第四章　物理性污染防治工程基础

第一节　噪声污染防治技术基础

一、概述

（一）噪声和噪声污染

噪声是声波的一种，具有声波的一切特性，主要来源于物体（固体、液体、气体）的振动。从心理学出发，噪声定义为：凡是人们不需要的，使人烦躁的声音。从物理学观点来看，噪声是指声波的频率和强度变化毫无规律、杂乱无章的声音。从环境保护的角度，凡是干扰人们正常工作、学习和休息的声音统称为噪声。

噪声污染是指所产生的环境噪声超过国家规定的环境噪声排放标准，并干扰他人正常工作、学习、生活的现象。日常生活中的噪声强度虽然不会致人或其他动物于死地，却能危害人的健康。噪声可能由偶然的自然现象产生，但绝大多数情况下，噪声是由人类各种各样的活动所产生。世界各国都把噪声污染列为主要的环境污染公害之一。

1. 噪声的分类

作为感觉公害，噪声大致可分为四类：

（1）过响声，如喷气发动机发出的轰隆声；

（2）妨碍声，此种声音虽不太响，但它妨碍人的交谈、思考、学习和休息；

（3）不愉快声，如摩擦声、刹车声等；

（4）无影响声，日常生活中人们习以为常的声音。

按照声源不同，噪声可分为交通噪声、工业噪声、建筑施工噪声和社会生活噪声。根据噪声源的发生机理，噪声可分为机械噪声、空气动力性噪声和电磁噪声。通常声源不是单一的，即使是一种机械设备，也可能是由几种不同的噪声组成。

2. 噪声污染的特点

声学系统一般是由声源、传播途径和接受者三要素组成。通常把能够发声的物体称为声源，产生噪声的物体或机械设备称为噪声源。噪声源、噪声的传播途径、接受者是发生噪声污染的三个要素，只有这三个要素同时存在，才会构成噪声污染。

噪声污染具有以下特点：①噪声是人们不需要的声音总称，所以可以说任何声音都可能成为噪声；②噪声只会造成局部性污染，一般不会造成区域性和全球性污染；③噪声污染没有残余污染物，不会积累；④噪声一般不直接致命或致病，它的危害是慢性或间接的。

（二）噪声的危害

归纳起来，噪声的危害主要表现在：

1. 噪声会损伤听力

当人初进入噪声环境中，会感到烦恼、难受、耳鸣，甚至出现听觉器官的敏感性下降，听不清一般说话声，但这种情况持续时间并不长，几分钟就会恢复原状，这种现象称为听觉适应。如上述情况重复出现，且症状随接触次数增加及时间延长而加重，逐渐出现听觉疲劳，时间一久就引起听力损失，最后导致

耳聋。此外，高强噪声［超过 140 dB(A)］可能使得内耳鼓膜破裂，致使双耳完全失聪成为永久性耳聋，导致暴振性耳聋。

2. 噪声诱发各种疾病

噪声所引起的人体生理变化称为噪声的生理效应，噪声对人的危害除引起耳聋外，对大脑神经系统、心血管系统、消化系统等均有影响。一些试验表明，噪声会引起人体神经紧张反应，刺激肾上腺的分泌，因而引起心跳加快、心律不齐、血管痉挛、血压升高等症状。噪声还会使人的消化机能减退，胃功能紊乱，消化系统分泌异常，胃酸度降低，造成消化不良，食欲不振，从而易患胃溃疡和十二指肠溃疡等疾病。

3. 噪声干扰人的生活

噪声能干扰人的交谈、休息和睡眠，从而使人容易烦恼、激动、愤怒，甚至失去理智。一般来说，噪声越强，引起人们烦恼的可能性越大。人在睡眠时，受到连续噪声的影响，会使熟睡时间缩短，出现多梦；突然的噪声可以使人惊醒。若经常受到噪声的干扰，就会导致睡眠不足，出现头昏、头痛等现象。人们用语言交谈时，当噪声与谈话声的声级接近时，就会干扰交谈。噪声还能对人的语言思维活动产生影响。

4. 噪声影响安全生产和降低劳动生产率

噪声对工作的影响广泛而复杂，很难定量反映。噪声的刺激会使人心情烦躁、注意力分散、易疲劳、反应迟钝、注意力不集中，导致容易出差错、降低工作效率、甚至发生工作过失行为。另外，高强度噪声，还会掩蔽安全信号，例如报警信号和车辆行驶信号，易发生安全事故。

5. 噪声对其他生物、建筑物及机械设备的影响

噪声对其他生物、建筑物及机械设备都有不同程度的影响，国内外科技工作者也在从事这方面的研究。例如，强噪声会使鸟羽毛脱落，不产卵，甚至会使其体内出血和死亡；由于高噪声声波的振动，会使金属结构、建筑物等产生裂纹和断裂现象。

二、噪声污染防治的基本原理与原则

（一）噪声污染防治的基本原理

噪声源、噪声的传播途径、接受者是发生噪声污染的三个要素，因此，噪声污染必须从这三个方面综合考虑才能得到有效控制。首先要降低噪声源的噪声，其次从传播途径降低噪声，最后考虑接受者的个人防护。应根据实际情况采用单一途径或多途径控制。

1. 从声源降低噪声

从声源上降低噪声是噪声控制中最根本和最有效的手段。研究各种噪声源的发声机理、控制和降低噪声的发生是根本性措施。可采用以下措施：一是选用内阻尼大、内摩擦大的低噪声新材料；二是改进机器设备的结构，提高加工精度和装配精度；三是改善或者更换动力传递系统和采用高新技术，对工作机构从原理上进行革新；四是改进生产工艺和操作方法。

2. 从传播途径降低噪声

如果在噪声源上控制噪声受技术的制约，在一定程度上难以取得理想的效果，或者对现有设备无法采用控制措施，此时，最常用的方法是从传播途径上进行控制。如利用闹静分开的方法降低噪声；利用地形和声源的指向性降低噪声；利用绿化带降低噪声；采用声学控制手段降低噪声，这是噪声控制技术的重要内容，也是本章的重点，它主要包括吸声、隔声、减振和消声等，将在后面进行详细介绍。

3. 在接收点进行防护

控制噪声的最后一环是在接受点进行防护。在其他技术措施不能有效控制噪声时，或者只有少数人在吵闹环境下工作，个人防护是一种简单而又经济的措施。常用的防护用具有耳塞、耳罩、防声棉和防声头盔等。这些防护用具，主要是利用隔声原理，使强烈的噪声传不进耳内，从而达到保护人体不受噪声危害

的目的。

（二）噪声控制程序

噪声控制的基本程序为：①调查声源及其污染状况，进行噪声测量，取得有关噪声的物理量数据，并进行数据处理，分析噪声的频率特性和时域特性；②根据声源及噪声所影响的环境，选择噪声允许标准；③根据降噪量和噪声的频谱特性，设计控制方案，采取控制措施；④进行工程评价，包括声质量评价、经济性、适应性评价，论证控制方案能否达标；⑤控制措施实施后，再进行测量，综合分析评价是否达到控制目标。若未达标应重新设计，直至达到标准。常用的噪声控制措施简介见表 5－4－1。

表 5－4－1 噪声控制技术措施简介

技术措施	适用范围	常用材料、器件、技术措施
吸声处理	吸收室（罩）内的混响声	多孔吸声材料：玻璃棉、矿渣棉、泡沫塑料、木丝板、微孔砖、胶合板、硬质纤维板等； 吸声结构：穿孔胶合板、微穿孔板、帘幕、空间吸声体、共振吸声器
隔声处理	隔绝各种声源噪声	隔声墙：选择厚而重的材料为宜，同时在面向声源的一侧应饰以吸声材料； 隔声罩：多用钢板，钢板涂上阻尼材料； 隔声屏：多用复合结构，内层覆盖阻尼或吸声材料； 隔声间：砖墙、加气混凝土砌块
消声处理	降低风机等进、排气口的空气动力性噪声	阻性消声器：直管式、片式、折板式、蜂窝式、声流式、迷宫式、盘式和弯头式； 抗性消声器：扩张室式、共振式、干涉式； 宽频带消声器：阻抗复合消声器、微穿孔板消声器； 排气喷流消声器：小孔喷流、多孔扩散、节流降压
阻尼减振处理	减少板壳振动辐射噪声	阻尼层可单面或两面喷涂，也可将阻尼层黏合在两层金属板的中间
隔振处理	减弱设备传给基础的振动，阻止固体声传递，减少二次辐射	橡胶、软木、沥青毛毡、海绵乳胶、沥青矿棉毡、玻璃纤维毡、弹簧吊、螺旋性弹簧、复合减振器、剪形减振器、塔形减振器、减振衬垫
个人防护处理	减少噪声对听觉和人体的危害	耳塞、耳罩、防声头盔

三、吸声降噪技术

吸声降噪是控制室内噪声常用的技术措施，利用吸声材料和吸声结构来降低噪声的办法称为吸声降噪，通常简称为吸声。在降低噪声措施中，吸声是一种最基本的方法，因而在工程中被广泛应用。一般情况下，吸声控制能使室内噪声降低约 3～5 dB(A)，能使混响很严重的车间降噪 6～10 dB(A)。吸声技术除了用于室内，还可用于空调风道、机器隔声罩和阻性消声器中。

（一）吸声原理

在室内，当声波遇到墙面或其他物体表面时，会发生多次反射和叠加。特别是在无装饰的大厅或车间，由于声波的多次反射而形成混响声。若用可以吸收声能的材料或结构装饰在室内表面，便可吸收掉反射到上面的部分声能，使反射声减弱。一部分声能被反射，另一部分声能则被吸声材料吸收转化为热能而消耗掉，转化为热能的部分称为吸收能量。接收者这时听到的只是直达声和已经减弱的混响声，使总噪声

级降低，这便是吸声降噪的基本思路。

（二）吸声系数

试验证明，当声波辐射到某些材料表面时，材料能吸收消耗一定的声能，称这种材料为吸声材料。吸声材料或结构吸声能力的大小通常用吸声系数 α 表示。当声波入射到吸声材料或结构表面上时，声能部分被反射，部分被吸收，还有一部分透过它继续向前传播，故吸声系数定义为材料吸收的声能与入射到材料上的总声能之比，即：

$$\alpha = \frac{E_\alpha + E_t}{E_i} = \frac{E_i - E_r}{E_i} = 1 - r \tag{5-4-1}$$

式中：E_i——入射到材料或结构表面的总声能；

E_α——被材料或结构吸收的声能；

E_t——透过材料或结构的声能；

E_r——表示被材料或结构反射的声能；

r——反射系数。

从上式可以看出：当声波被完全反射时，$\alpha = 0$，说明材料不吸声；当声波被完全吸收时，$\alpha = 1$，表示声能全部被吸收，无声能反射。显然，α 值的变化一般在 0 ~ 1 之间，α 值愈大，说明材料的吸声性能愈好。

吸声系数的大小除与吸声材料本身的结构、性质、使用条件有关以外，对于同一种材料，还与声波入射的角度和频率有关。各种材料的吸声系数是频率的函数，因此，同一种吸声材料，对于不同频率的声波具有不同的吸声系数。工程中通常采用 125 Hz、250 Hz、500 Hz、1 000 Hz、2 000 Hz、4 000 Hz 6 个频率的吸声系数的算术平均值表示某一种材料的平均吸声系数，用$\bar{\alpha}$表示。通常，$\bar{\alpha}$在 0.2 以上的材料被称为吸声材料，$\bar{\alpha}$在 0.5 以上的材料就是理想的吸声材料。

1. 无规入射吸声系数与垂直入射吸声系数

声波入射角度对吸声系数有较大影响，工程设计中常用的吸声系数有无规入射吸声系数（混响室法吸声系数）和垂直入射吸声系数（驻波管法吸声系数）。若在专门的声学实验室——混响室中，使不同频率的声波以相等概率从各个角度入射到材料表面，接近于实际声场，这时所测得的吸声系数，称为混响室法吸声系数或无规入射吸声系数，通常记为 α_T。这种测试比较复杂，对仪器设备要求高，且数值往往偏差较大，但比较接近实际情况，在吸声减噪设计中被采用。若采用专门的声学仪器——驻波管，在声波垂直入射于吸声材料时测得的吸声系数，称为驻波管法吸声系数或垂直入射吸声系数，通常记为 α_0。驻波管法简便、精确，但与一般实际声场不符，多用于测试材料的声学性质和鉴定，在消声器设计中采用。

2. 吸声量

吸声系数反映房间壁面单位面积的吸声能力，材料实际吸收声能的多少，除了与材料的吸声系数有关外，还与材料表面积有关。故定义吸声系数与吸声面积的乘积为吸声量，吸声量亦称等效吸声面积，即：

$$A = \alpha S \tag{5-4-2}$$

式中：A——吸声量（等效吸声面积），m^2；

α——某频率声波的吸声系数；

S——吸声面积，m^2。

如果组成室内各壁面的材料不同，则壁面在某频率下的总吸声量 A 为：

$$A = \sum_{i=1}^{n} A_i = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i S_i \tag{5-4-3}$$

式中：A_i——第 i 种材料组成的壁面的吸声量，m^2；

S_i——第 i 种材料组成的壁面的面积，m^2；

α_i——第 i 种材料在某频率下的吸声系数。

（三）多孔吸声材料

常用的吸声材料都属于多孔吸声材料，按照其外观形状，可分为纤维型、泡沫型和颗粒型三类。纤维型材料由无数细小纤维状材料组成，如毛、化纤、玻璃棉等有机纤维、无机纤维等；泡沫型材料是由表面与内部皆有无数微孔的高分子材料制成，如泡沫塑料、泡沫玻璃等；颗粒型材料有多孔陶土、膨胀珍珠岩等，以及砌块、板材等的颗粒材料。多孔吸声材料微孔的孔径多在数微米到数十微米之间，孔的总体积占材料总体积的90%左右，如超细玻璃棉的孔隙率可大于99%。为了使用方便，一般经松散的各种多孔吸声材料加工为板、毡或砖等成型。

多孔吸声材料的构造特征是：其部分在空间组成骨架，使材料具有一定的形状，称为筋络，筋络间有许多贯通的微小间隙，具有一定的通气性能。当声波入射到多孔吸声材料的表面时，一部分声波被反射，一部分声波透入多孔材料衍射到内部的微孔内，激发孔内空气与筋络发生振动，由于空气分子之间的黏滞阻力、空气与筋络之间的摩擦阻力，使声能不断转化为热能而消耗；此外，空气与筋络之间的热交换也消耗部分声能，从而达到吸声的目的。

多孔材料的吸声特性主要受入射声波和材料的性质影响。其中声波性质除和入射角度有关外，主要和频率有关。一般多孔吸声材料对高频声吸收效果好，对低频声吸收效果差。这是因为低频声波激发微孔内空气与筋络的相对运动少，摩擦损失小，因而声能损失少；而高频声容易使振动加快，从而消耗声能较多。所以多孔吸收材料常用于高中频噪声的吸收。

多孔吸声材料的特性除与本身性质有关外，还与其使用条件有关，如厚度、密度、使用时的结构形式及温度、湿度等。

（四）吸声结构

多孔吸声材料对中、高频声吸收较好，而对低频声吸收较差，若采用共振吸声结构则可以改善低频吸收性能。共振吸声结构是根据共振原理制成的，常用的吸声结构有三种类型：薄板共振吸声结构、穿孔板共振吸声结构与微穿孔板吸声结构。

1. 薄板共振吸声结构

把薄的金属板、胶合板、硬质纤维板、或石膏板等材料的周边固定在框架（称龙骨）上，并将框架牢牢地固定在刚性板壁上，薄板与刚性壁面间留有一定厚度的空气层，这种由薄板与板后的封闭空气层构成的系统就叫做薄板共振吸声结构，如图5－4－1所示。

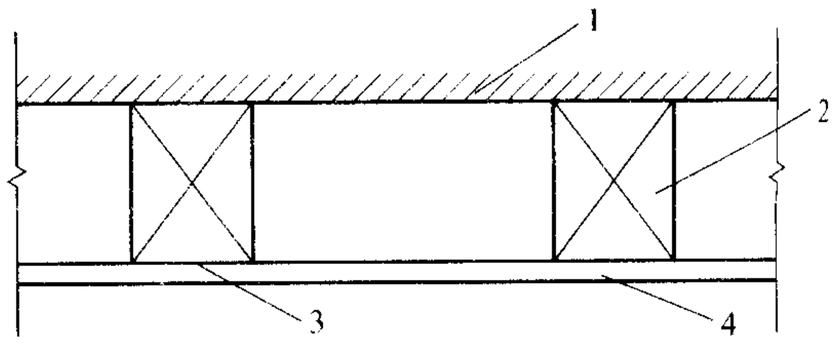


图5－4－1 薄板共振吸声结构示意图

1. 刚性壁面；2. 龙骨；3. 阻尼材料；4. 薄板

声波入射到薄板上引起板面振动，薄板振动要克服本身的阻尼和板与框架之间的摩擦力，使一部分声能转化为热能而耗损，尤其当边缘的阻尼较大时，声能消耗更大。当入射声波的频率与振动系统的固有频率相同时，便发生共振，此时板的弯曲变形最大，振动最剧烈，声能也就消耗最多。这就是薄板共振吸声的机理。

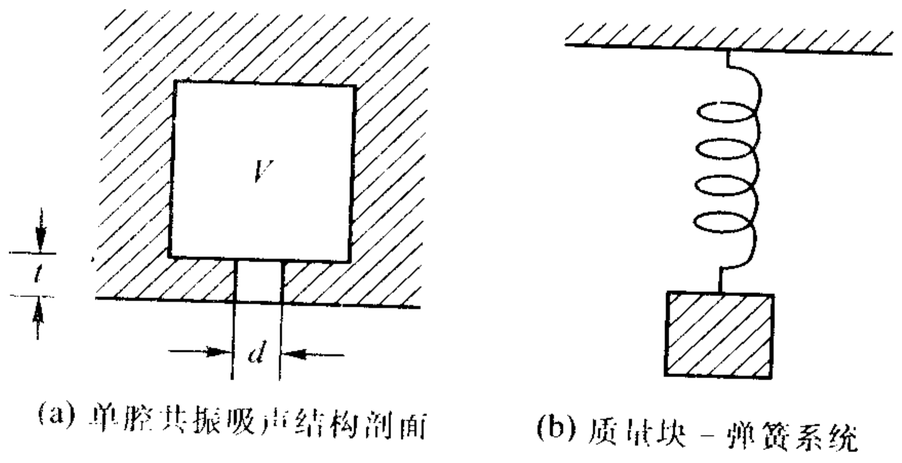
吸声性能的改善方法：在薄板结构边缘（板与龙骨的交接处）放置能增加结构阻尼的软材料，如泡沫塑料条、软橡皮、海绵条、毛毡等；也可在空腔中，沿着框架四周放置一些多孔吸声材料，如矿棉、玻璃棉等，这样可使吸声频带变宽，吸声系数增大，薄板共振结构的吸声性能得到明显改善；采用组合不同单元或不同腔深的薄板结构，或直接采用木丝板、草纸板等可吸收中、高频声的板材，可以拓宽吸声频带。

2. 穿孔板共振吸声结构

在薄板上穿以小孔，在板后与刚性壁面之间留一定深度的空腔所组成的吸声结构称为穿孔板共振吸声结构。按照薄板上穿孔数目的多少，将穿孔板共振吸声结构分为单孔共振吸声结构与多孔穿孔板共振吸声结构。制作这种吸声结构的材料，有比较薄的轻质合金板、胶合板、塑料板、石膏板等。

（1）单孔共振吸声结构：单孔共振吸声结构又称做“亥姆霍兹”共振吸声器或单腔共振吸声器。它

是一个封闭的空腔，在腔壁上开一个小孔与外部空气相通，如图 5－4－2 所示。



(a) 单腔共振吸声结构剖面　　(b) 质量块－弹簧系统

图 5－4－2　单腔共振吸声器结构示意图

单腔共振吸声器可以比拟成一个弹簧与质量块组成的简单振动系统。腔体中空气具有弹性，相当于弹簧，孔颈中空气柱具有一定质量，相当于质量块。声波入射到共振器时，激发颈中的空气柱做往复运动。空气柱与颈壁的摩擦阻尼，使部分声能转化为热能而耗损，从而达到吸声的目的。当声波频率与共振器的固有频率一致时，发生共振，这时颈中空气柱运动加剧，其振幅和振速达到最大值，因而阻尼最大，消耗声能也就最多，单腔共振吸声器吸声性能也最好。这就是单腔共振吸声器的吸声机理。

单腔共振吸声器的使用条件是空腔小孔的尺寸比空腔尺寸小得多，并且外来声波波长大于空腔尺寸。这种结构的特点是吸收低频噪声并且吸收频带较窄，因此多用在有明显音调的低噪声场合。若在颈口处放置一些多孔材料，或加贴一薄层尼龙布等透声物质，可以增加颈口部分摩擦阻尼，增宽吸声频带。

(2) 多孔穿孔板共振吸声结构：在薄板上按一定排列方式钻很多小孔或开狭缝，将穿孔板固定在框架上，框架安装在刚性板壁上，板后留有一定厚度的空气层，这种结构叫做多孔穿孔板共振吸声结构，通常简称为穿孔板共振吸声结构。它实际是由多个单孔共振器并联而成，如图 5－4－3 所示，故其吸声机理同单孔共振结构，但吸声状况大为改善，应用广泛。穿孔板的材料有木板、硬质纤维板、胶合板、金属板等。

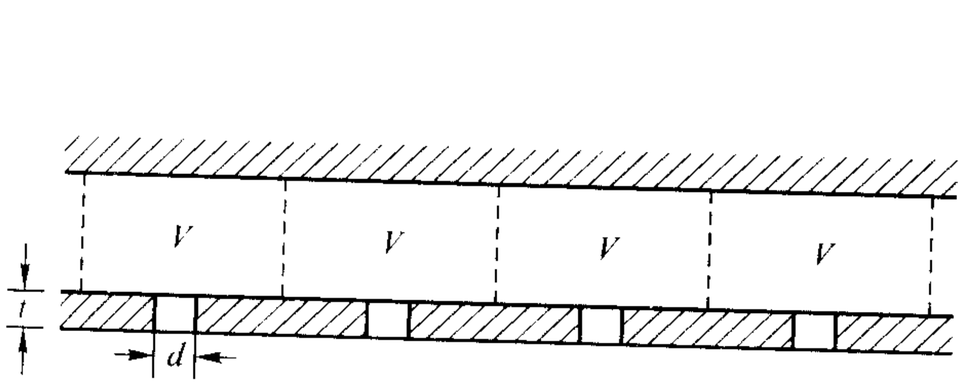


图 5－4－3　穿孔板共振吸声结构

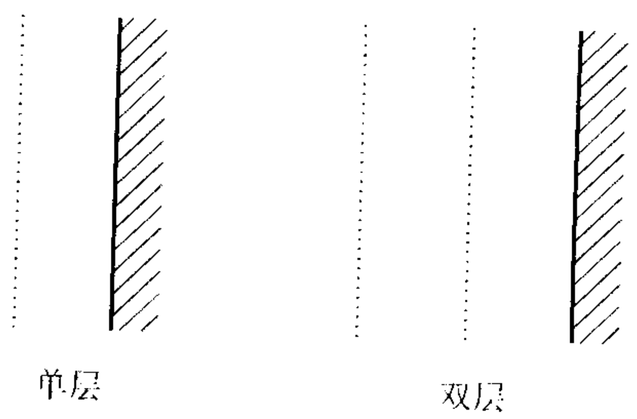


图 5－4－4　单、双层微穿孔板吸声结构示意图

(3) 微穿孔板吸声结构：微穿孔板吸声结构是我国著名声学专家马大猷教授于 20 世纪 60 年代研制成功的，它克服了穿孔板共振吸声结构吸声频带较窄的缺点。

在厚度小于 1 mm 的金属薄板上穿以孔径小于 1 mm、穿孔率为 1% ~4% 的小孔，安装方法同薄板共振吸声结构，后部留有一定厚度的空气层，起到共振薄板的作用。空气层内不填任何吸声材料。这样便构成了微穿孔板吸声结构，常用的是单层或双层微穿孔板，如图 5－4－4 所示。薄板常用铝板或钢板制作，因其板特别薄且孔特别小，为与一般穿孔板共振吸声结构相区别，故称做微穿孔板吸声结构。

由于孔很小，开孔率较低，对于频率较高的声波，微孔板相当于多孔吸声材料耗损声能，而对频率较低的声波，微孔板又相当于共振薄板耗损声能，因而是优良的宽频带吸声结构。微穿孔板吸声结构利用空腔深度来控制吸收峰值的共振频率，腔愈深，共振频率愈低。微穿孔板吸声结构板薄孔细，与普通穿孔板相比，声阻显著增加，声质量显著减小，因此明显地提高了吸声系数，增宽了吸声频带宽度。其吸声系数很高，有的可达 0.9 以上；吸声频带宽，可达 4 ~5 个倍频程以上。

减小微穿孔板的孔径，提高穿孔率，或是用双层或多层微孔板，可增大吸声系数，展宽吸声带宽；但孔径太小，易堵塞，故多选孔径为 0.5 ~1.0 mm，穿孔率多以 1% ~3% 为好。微孔板结构吸声峰值的共振频率与多孔板共振结构相似，主要由腔深决定，若以吸收低频声为主，空腔宜深；若以吸收中、高频声为主，空腔宜浅，腔深一般取 5 ~20 cm。

四、隔声降噪技术

当声波在传播途中遇到障碍物时，一部分被反射，一部分被障碍物吸收，其余透过屏障继续传播。在噪声传播途径中，利用构件将接受者与噪声源分开，阻挡、隔离噪声在媒质中直接传播，从而减轻噪声影响程度的技术称为隔声。隔声是噪声控制中最有效的措施之一。空气声和固体声的阻断是性质不同的两种方法，固体声的阻断主要采用隔振的方法，将在下一节叙述，本节只讨论空气声的阻断问题。采用适当的隔声措施如隔声墙、隔声屏障、隔声罩、隔声间，一般能降低噪声 15～20 dB(A)。

(一) 隔声原理

当噪声在空气中传播，入射到一匀质屏蔽物时，由于两分界面特性阻抗的不同，使部分声能被屏蔽物反射回去，一部分被屏蔽物吸收，只有一部分声能可以透过屏蔽物传到另一个空间去，参见图 5-4-5。显然，透射声能仅是入射声能的一部分，因此，设置适当的屏蔽物便可以使大部分声能反射回去，从而降低噪声的传播。具有隔声能力的屏蔽物称为隔声构件。

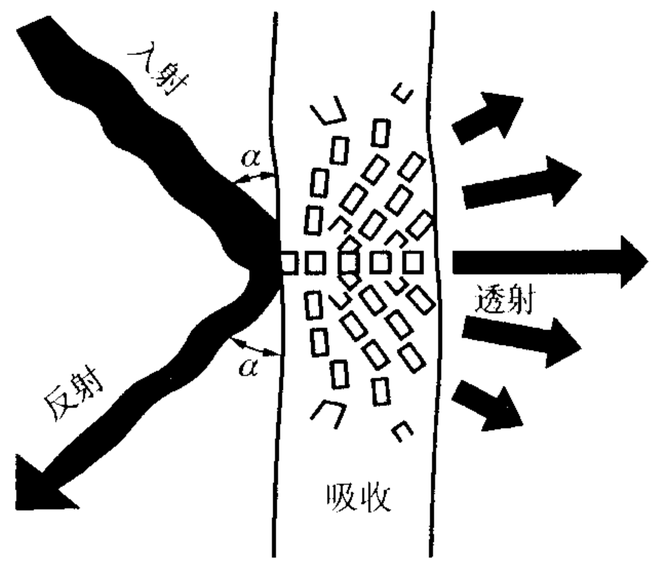


图 5-4-5 隔声基本原理示意图

(二) 透声系数与隔声量

1. 透声系数

常采用透声系数 τ 来表示隔声构件本身透声能力的大小，它等于透射声功率与入射声功率的比值，即：

$$\tau = \frac{W_t}{W} \tag{5-4-4}$$

式中：W_t——透过隔声构件的声功率，W；

W——入射到隔声构件上的声功率，W。

由 τ 的定义，又可写作 $\tau = \frac{I_t}{I} = \frac{p_t^2}{p^2}$，$\tau$ 又称做传声系数或透射系数。通常所指的 τ 是无规则入射时各入射角度透声系数的平均值。

2. 隔声量

一般隔声构件的 τ 值很小，远远小于 1，约在 10^{-5}～10^{-1}之间，为了计算方便，采用隔声量来表示构件本身的隔声能力。隔声量的定义为隔声构件一侧的入射声功率级与另一侧的透射声功率级之差。通过大量的实践对隔声量的定义进行修正，确定隔声量等于透射系数的倒数取以 10 为底的对数的 10 倍。即：

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau}$$

或：

$$R = 10 \lg \frac{I}{I_t} = 20 \lg \frac{p}{p_t} \tag{5-4-5}$$

隔声量又称为传声损失或透射损失，单位为 dB。τ 值愈小，R 值越大，表示隔声性能愈好；相反，则隔声效果越差。用隔声量来衡量构件的隔声性能比透声系数更为直观、明确，便于隔声构件的比较与选择。

实践和试验表明，隔声量的大小与隔声构件的结构、性质有关，也与入射声波的频率有关。同一隔墙对不同频率的声音，隔声性能可能有很大差异，故工程中常用 125～4 000 Hz 6 个倍频程或 100～3 150 Hz 的 16 个 1/3 倍频程的隔声量做算术平均，来表示某一构件的隔声性能，称为平均隔声量（$\overline{R}$）。

3. 插入损失

插入损失的定义为：离声源一定距离某处测得的隔声构件设置前的声功率级 L_{w1} 和设置后的声功率级 L_{w2} 之差值，记作 IL，即：

$$IL = L_{w1} - L_{w2} \tag{5-4-6}$$

插入损失通常在现场用来评价隔声罩、隔声屏等构件的隔声效果。

（三）单层均质墙的隔声性能

1. 单层匀质墙隔声的频率特性

在隔声技术中，通常将板状或墙状的隔声构件称为隔声墙。仅有一层墙板称做单层隔声墙，有两层或多层、层间有空气或其他材料，则称为双层或多层隔声墙。

实践证明，单层匀质墙的隔声量与入射声波的频率关系很大，其变化规律如图 5-4-6 中曲线所示。该曲线大致可分为 3 个区。

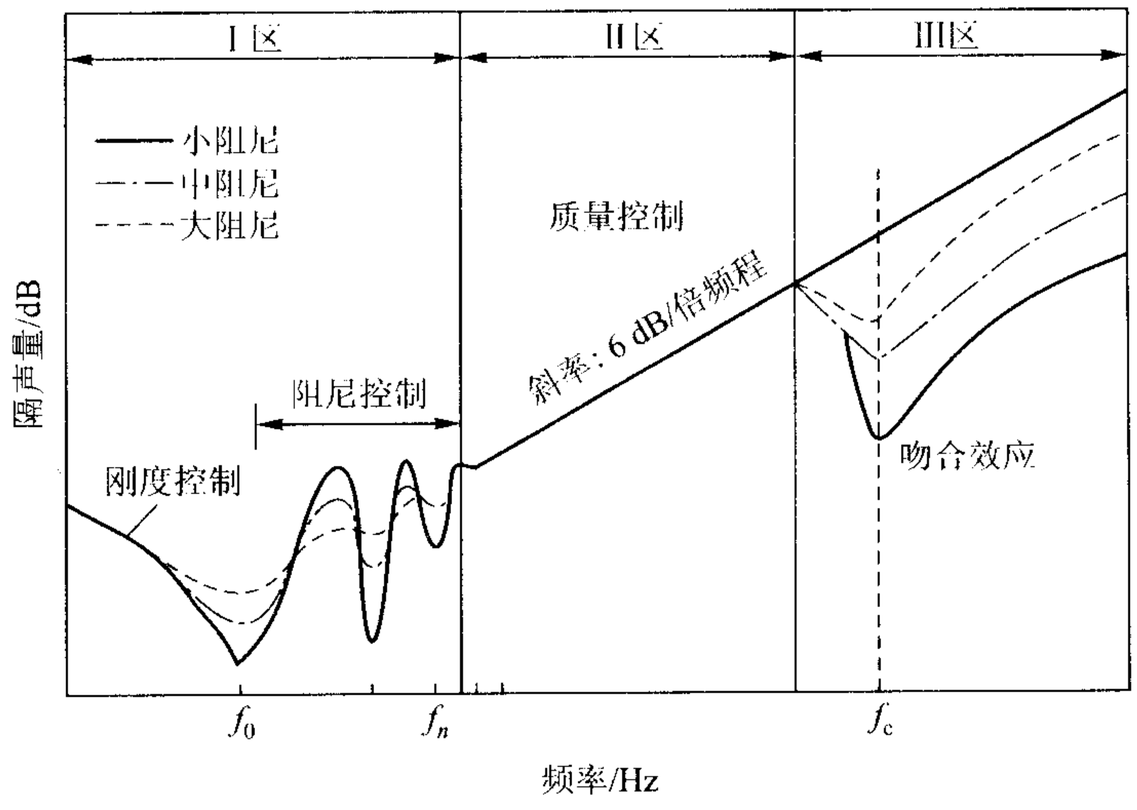


图 5-4-6　单层匀质墙的隔声频率特性曲线

第一个区称为刚度和阻尼控制区。该区域包含刚度控制区和阻尼控制区。刚度控制区的频率范围从零直到墙体的第一共振频率 f_0 为止。在这个区域中，墙板的隔声量与墙板刚度和声波频率的比值成正比。入射声波频率每增加一个倍频程，隔声量下降 6 dB(A)。

当入射声波的频率与墙板固有频率相同时，引起共振，进入板共振区，共振区的隔声量最小。但本区内随着声波频率的增加，共振现象愈来愈弱，直至消失，所以隔声量总体仍呈上升趋势。共振区有一系列共振频率，对隔声量影响最大的是基频和谐波频率。共振区的大小与墙板的面密度、形状、安装方式和阻尼有关。作为隔声构件，共振区越小越好。对一定的墙板，阻尼越大，对共振的抑制就越强，所以共振区又称做阻尼控制区。

对于一般砖、石等厚重的墙，共振频率很低，通常可不考虑；对于薄板，共振频率较高，阻尼控制区可分布在很宽的声频域，必须予以防止。一般采用增加墙板的阻尼来抑制共振现象。

第二个区是质量控制区。随着声波频率的提高，共振影响逐渐消失，这时在声波作用下，墙板的隔声量受墙板惯性质量影响。墙板的面密度愈大，即质量愈大，隔声量愈高，故称质量控制区。在该区域内，隔声量随入射声波频率的增加而以斜率为 6 dB(A)/倍频程直线上升。

第三个区是吻合效应区。声波频率继续提高，就进入吻合效应区。在该区域内，随着入射声波频率的继续升高，隔声量反而下降，曲线上出现一个深深的低谷，这是由于出现了吻合效应的缘故。越过低谷后，隔声量以每倍频程 10 dB(A) 趋势上升，然后逐渐接近质量控制的隔声量。增加板的厚度和阻尼，可使隔声量下降趋势得到减缓。

2. 吻合效应

吻合效应是指一定频率的声波以某一角度投射到墙板上，会激起构件的弯曲振动，若入射声波的波长在墙板上的投影正好与墙板的固有弯曲波波长相等时，墙板弯曲波振动的振幅便达到最大，因而向墙板的

另面辐射较强的声波，这时墙板的隔声量明显下降，这一现象称为“吻合效应”，相应的入射声波频率称为“吻合频率”。

由图 5-4-7 可知，发生吻合效应的条件是：

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sin\theta} \tag{5-4-7}$$

式中：λ_B——墙板弯曲波单位波长；

θ——入射角。

由于 $\sin\theta \leqslant 1$，所以只有在 $\lambda_B \geqslant \lambda$ 的情况下才能发生吻合效应。因一定构件的 λ_B 是一定的，因此，发生吻合效应的频率就不只是一个，而是符合 $f \geqslant \frac{c}{\lambda_B}$ 的多个频率。产生吻合效应的最低频率称为临界吻合频率 f_c，即 $\lambda_B = \lambda$ 时的频率。f_c 的计算公式为：

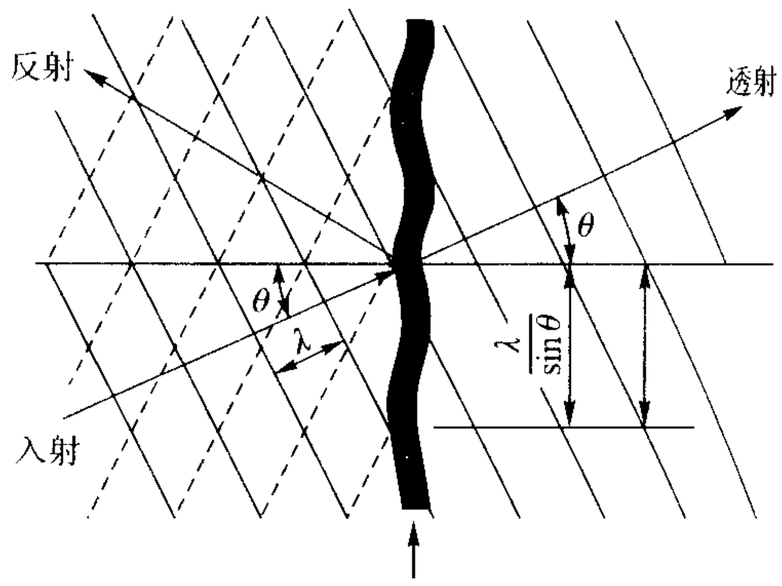


图 5-4-7 吻合的成立条件

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi}\sqrt{\frac{m}{B}} \text{ 或：} f_c = 0.551\frac{c^2}{\delta}\sqrt{\frac{\rho_m}{E}} \tag{5-4-8}$$

式中：m——墙板面密度，kg/m^2；

B——墙板的弯曲劲度，$N \cdot m$；

δ——墙板厚度，m；

ρ_m——墙板密度，kg/m^3；

E——墙板的弹性模量，N/m^2。

由上式可知，临界吻合频率受墙板厚度、密度、弹性等因素影响，墙板越厚，f_c 越低；轻而弹性模量大的隔板，f_c 常常降到听觉敏感的声频范围内，对隔声造成不利影响。

综上所述可知，单层匀质墙的隔声性能主要由墙板的面密度、刚度和内阻尼决定，在入射声波的不同频率范围，可能某一因素起主要作用，从而出现该区隔声性能上的某一特点。

3. 单层匀质墙的隔声量

单层匀质墙的隔声量公式建立条件为：①声波垂直入射到墙上；②墙把空间分成两个半无限大空间，而且墙的两侧均为通常状况下的空气；③墙为无限大，即不考虑边界的影响；④把墙看成一个质量系统，即不考虑墙的刚性、阻尼；⑤墙上各点以相同的速度振动，则从透声系数的定义及平面声波理论，可以导出单层墙在质量控制区的声波垂直入射时的隔声量 $R_\perp$ 为：

$$R_\perp = 10\lg\left[1 + \left(\frac{\pi f m}{\rho_0 c}\right)^2\right] \tag{5-4-9}$$

式中：m——墙板面密度，kg/m^2；

f——入射声波频率，Hz；

ρ_0——空气密度，kg/m^3，常温下取 $\rho_0 = 1.2\ kg/m^3$。

一般情况下，$\pi f m >> \rho_0 c$，因此：

$$R_\perp = 20\lg m + 20\lg f - 43 \tag{5-4-10}$$

式（5-4-10）常称为隔声质量定律。它定量描述了单层匀质墙的隔声量与其面密度及入射声波频率的关系。面密度越大，隔声量越好，m 或 f 增加一倍，隔声量都增加 6 dB(A)。但实际上，式（5-4-10）计算的结果与实测存在差异。如果主要只考虑墙板面密度与入射声波频率两个因素，可用下面的经验式估算隔声量：

$$R = 18\lg m + 12\lg f - 25 \tag{5-4-11}$$

由式（5-4-11）可知，实际上若频率不变，面密度每增加 1 倍，隔声量约增加 5.4 dB(A)；当面密度不变时，频率每增加 1 倍，隔声量增加约 3.6 dB(A)。

实际中，往往需要估算单层墙对各频率的平均隔声量。下面的经验公式表示在主要的入射声频率100～3 200 Hz范围内对隔声量求平均值，用平均隔声量$\overline{R}$表示：

$$R = 13.5 \lg m + 14 \quad (m \leqslant 200\ \mathrm{kg/m^2}) \tag{5-4-12a}$$

$$R = 16 \lg m + 8 \quad (m > 200\ \mathrm{kg/m^2}) \tag{5-4-12b}$$

（四）多层墙的隔声

1. 双层隔声墙

单纯依靠增加墙的厚度或面密度可以增加隔声量，但是这样是不经济的，隔声效果也不理想。因此，将墙一分为二，中间夹一定厚度的空气层，构成双层墙，这样墙在总质量没有变的情况下，隔声效果比单层实心结构好得多。双层墙提高隔声能力的主要原因是空气层的作用。其隔声机理是：当声波透过第一墙时，由于墙外及夹层中空气与墙板特性阻抗不同，造成声波的两次反射，形成衰减，并且由于空气层的弹性和附加吸收作用，使振动的能量衰减较大，然后再传给第二墙，又发生声波的两次反射，使透射声能再次减少，因而总的透射损失更大。

2. 双层墙的隔声特性曲线

图5－4－8为同质量单层墙组成的双层墙的隔声频率特性曲线，与单层墙大致相同。

双层墙相当于一个由双层墙与空气层组成的振动系统，由图中可以看出：当入射声波频率比双层墙共振频率低时，双层墙板将作整体振动，此时空气层不起作用，隔声能力与同样重量的单层墙没有区别；当入射声波达到共振频率f_0时，隔声量出现低谷；超过$\sqrt{2}f_0$以后，隔声曲线以每倍频程18 dB的斜率急剧上升，充分显示出双层墙结构的优越性；随着频率的升高，两墙板间会产生一系列驻波共振，使隔声特性曲线上升趋势转为平缓，斜率为12 dB倍频程；进入吻合效应区后，在临界吻合频率f_c处又出现一隔声量低谷，其f_c与吻合效应状况取决于两层墙的临界吻合频率。由图5－4－8可知，双层墙隔声性能较单层墙优越的区域主要在共振频率f_0以后，故在设计中尽量将f_0移往人们不敏感的频率区域。

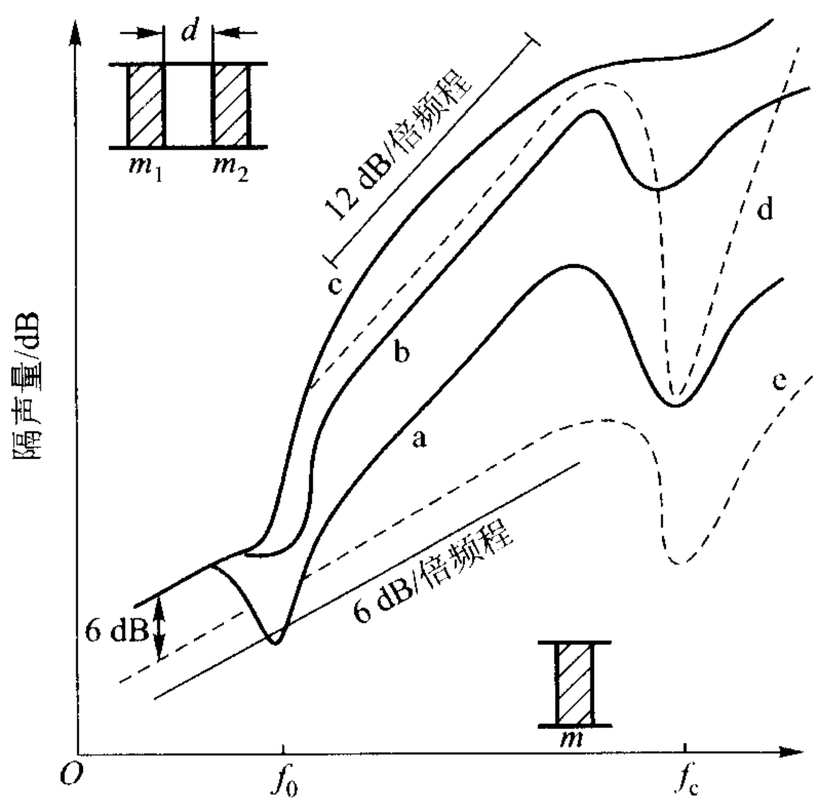


图5－4－8　双层墙隔声特性曲线

a. 无吸声材料；b. 有少量吸声材料；c. 满铺吸声材料；d. 双层墙隔声量；e. 单层墙隔声量

注：a、b、c均为双层墙。

3. 双层墙的共振频率及其隔声量的实际估算

双层墙的共振频率f_0指入射声波法向入射时的墙板共振频率，f_0的计算公式近似为：

$$f_0 \approx \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{\rho_0}{h}\left(\frac{1}{m_1}+\frac{1}{m_2}\right)} \tag{5-4-13}$$

式中：m_1、m_2——双层墙两场的面密度，$\mathrm{kg/m^2}$；

h——空气层的厚度，m。

由式（5－4－13）可知，空气层越薄，双层墙的共振频率f_0越高。

在工程应用中，常用以下经验公式来估算双层结构的隔声量：

$$R = 16 \lg(m_1 + m_2) + 16 \lg f - 30 + \Delta R \tag{5-4-14}$$

估算平均隔声量的经验公式为：

$$\overline{R} = 16 \lg(m_1 + m_2) + 8 + \Delta R \quad (m_1 + m_2 > 200\ \mathrm{kg/m^2}) \tag{5-4-15a}$$

$$\overline{R} = 13.5 \lg(m_1 + m_2) + 14 + \Delta R \quad (m_1 + m_2 \leqslant 200\ \mathrm{kg/m^2}) \tag{5-4-15b}$$

式中：ΔR——空气层附加隔声量，可从图5－4－9中查得。

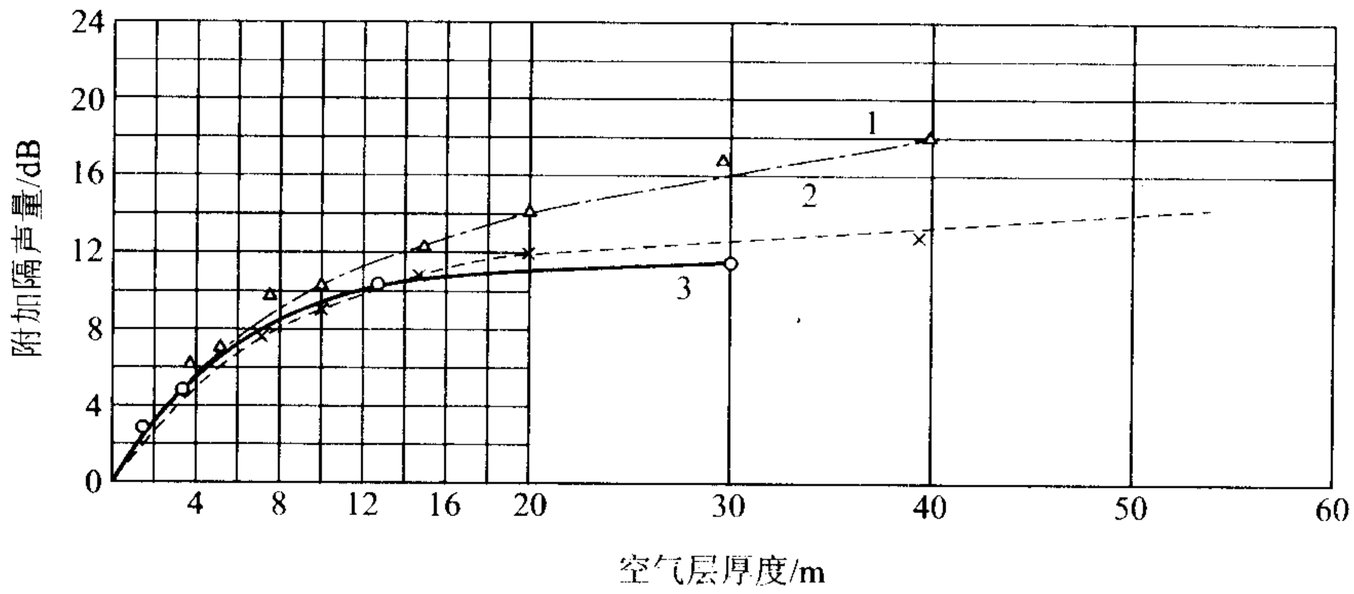


图 5－4－9 双层墙附加隔声量与空气层厚度的关系

1. 双层加气混凝土墙；2. 双层无纸石膏板墙；3. 双层纸面石膏板墙

（五）多层复合板隔声

在噪声控制工程中，常用轻质多层复合板，它是由几层面密度或性质不同的板材组成的复合隔声构件，通常是用金属或非金属的坚实薄板作为面层，内侧覆盖阻尼材料，或填入多孔吸声材料或空气层等组成。

多层复合板的隔声量较组成它的同等质量的单层板有明显改善。这主要是由于：①使用厚度或材质不同的多层板，可以错开共振与临界吻合频率，改善共振区与吻合区的隔声低谷现象；②分层材料的阻抗各不相同，使声波在分层界面上产生多次反射，阻抗相差愈大，反射声能愈多，透射声能的损耗就愈大；③夹层材料的阻尼和吸声作用，致使声能减弱，并减弱共振与吻合效应。试验表明，多层复合板具有质轻和隔声性能良好的优点，因而被广泛用于多种隔声结构中，如隔声门（窗）、隔声罩、隔声间的墙体等。

（六）隔声间

在某些高噪声环境下，建造一个具有良好的隔声性能的室内空间，对高精度的仪表、仪器和操作人员能有效地予以保护。当声源较多时，采取单一噪声控制措施不易奏效，采用多种措施成本高，介于这种情况，一般就把声源围蔽在局部空间内，以降低噪声对周围环境的污染。这些由不同隔声构件组成的具有良好隔声性能的房间叫做隔声间或隔声室，如图 5－4－10 所示。

隔声间的结构根据实际情况形状各异，有封闭式与半封闭式两种，一般多用封闭式。隔声间除需要有足够隔声量的墙体外，还需设置具有一定隔声性能的门、窗或观察孔等。

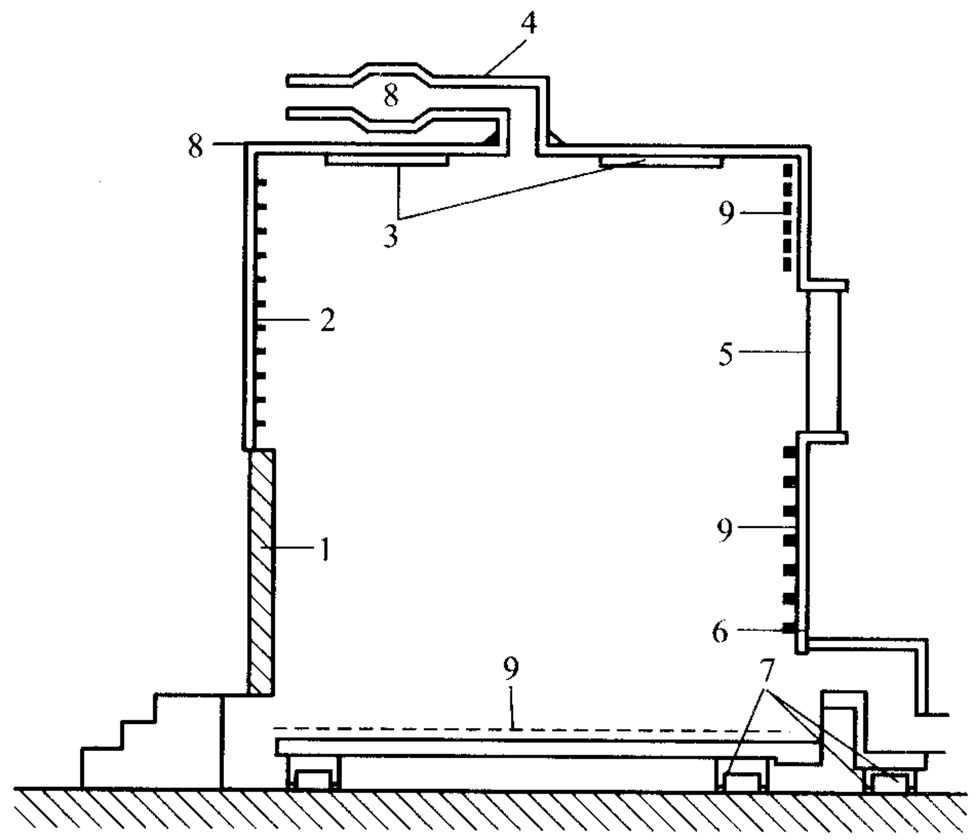


图 5－4－10 隔声间

1. 入口隔声门；2. 隔声墙；3. 照明器；4. 排气管道（内衬吸声材料）和风扇；5. 双层窗；6. 吸气管道（内衬吸声材料）；7. 隔振底座；8. 接头的缝隙处理；9. 内部吸声处理

1. 组合墙平均隔声量计算

具有门、窗等不同隔声构件的墙板通常称为组合墙。因为门窗的隔声量比墙体本身的隔声量低，所以组合墙的隔声量往往比单纯墙的低。组合墙的透声系数为各组成部件的透声系数的平均值，称为平均透声系数τ，由下式得出：

$$\bar{\tau}=\frac{\tau_1 S_1+\tau_2 S_2+\tau_3 S_3+\cdots+\tau_n S_n}{S_1+S_2+S_3+\cdots+S_n}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\tau_i S_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i} \tag{5-4-16}$$

式中：τ_i——墙体第i种构件的透声系数；

S_i——墙体第i种构件的面积，m^2。

由上式可得组合墙的平均隔声量$\bar{R}$为：

$$\bar{R}=10\ \lg\frac{1}{\bar{\tau}} \tag{5-4-17}$$

【例5-4-1】某隔声间有一面25 m^2的墙与噪声源相隔，该墙透声系数为10^{-5}；在这墙上开一面积为3 m^2的门，其透声系数为10^{-3}；并开一面积为4 m^2的窗，其透声系数也为10^{-3}，求此组合墙的平均隔声量。

解：根据式（5-4-16）、式（5-4-17），得：

$$\bar{\tau}=\frac{\tau_1 S_1+\tau_2 S_2+\tau_3 S_3}{S_1+S_2+S_3}=\frac{10^{-5}\times(25-3-4)+10^{-3}\times 3+10^{-3}\times 4}{(25-3-4)+3+4}=2.9\times10^{-4}$$

$$\bar{R}=10\ \lg\left(\frac{1}{\bar{\tau}}\right)=10\ \lg\frac{1}{2.9\times10^{-4}}\text{dB(A)}=36\ \text{dB(A)}$$

由以上例题可知，开了门窗后，墙的隔声量显著下降。分析可知，单纯提高墙的隔声量对提高组合墙的隔声量作用不大，也不经济，故应综合考虑提高组合墙门窗的隔声量。一般采用的措施是：采用双层或多层结构来提高门窗的隔声量，或适当降低墙的隔声量，使其与门窗的隔声效果大致相同。一般使墙体的隔声量比门、窗高出10～15 dB(A)已足够，比较合理的设计是用“等透射量”的方法。设墙的透声系数与面积分别为τ_1、S_1，门（窗）的透声系数与面积分别为τ_2、S_2，按“等透射量”原则，$\tau_1 S_1=\tau_2 S_2$，可得：

$$R_1=R_2+10\ \lg\frac{S_1}{S_2} \tag{5-4-18}$$

式中：R_1、R_2——墙本身与门（窗）的隔声量，dB（A）。

为了计算方便，仅考虑组合墙由两种不同隔声性能的构件组成的情况，此时：

$$\bar{\tau}=\frac{S_1\tau_1+S_2\tau_2}{S_1+S_2}=\tau_1\left[\frac{1+\frac{S_2}{S_1}\frac{\tau_2}{\tau_1}}{1+\frac{S_2}{S_1}}\right] \tag{5-4-19}$$

对应的隔声量为：

$$\bar{R}=R_1-10\ \lg\left[\frac{1+\frac{S_2}{S_1}\cdot 10^{\frac{R_1-R_2}{10}}}{1+\frac{S_2}{S_1}}\right] \tag{5-4-20}$$

式（5-4-20）中第二项已绘成图5-4-11所示曲线，图中曲线表示隔声量之差。只要知道组合墙的两种部件的面积比与隔声量，就可以在图中查出这一附加隔声量损失，很快计算出组合墙的隔声量。

对于两种以上部件组成的组合墙，可以利用图5-4-11先求出其中两种部件组合的隔声量，再与第三个部件合并求取，其余类推，直至求出总的隔声量。

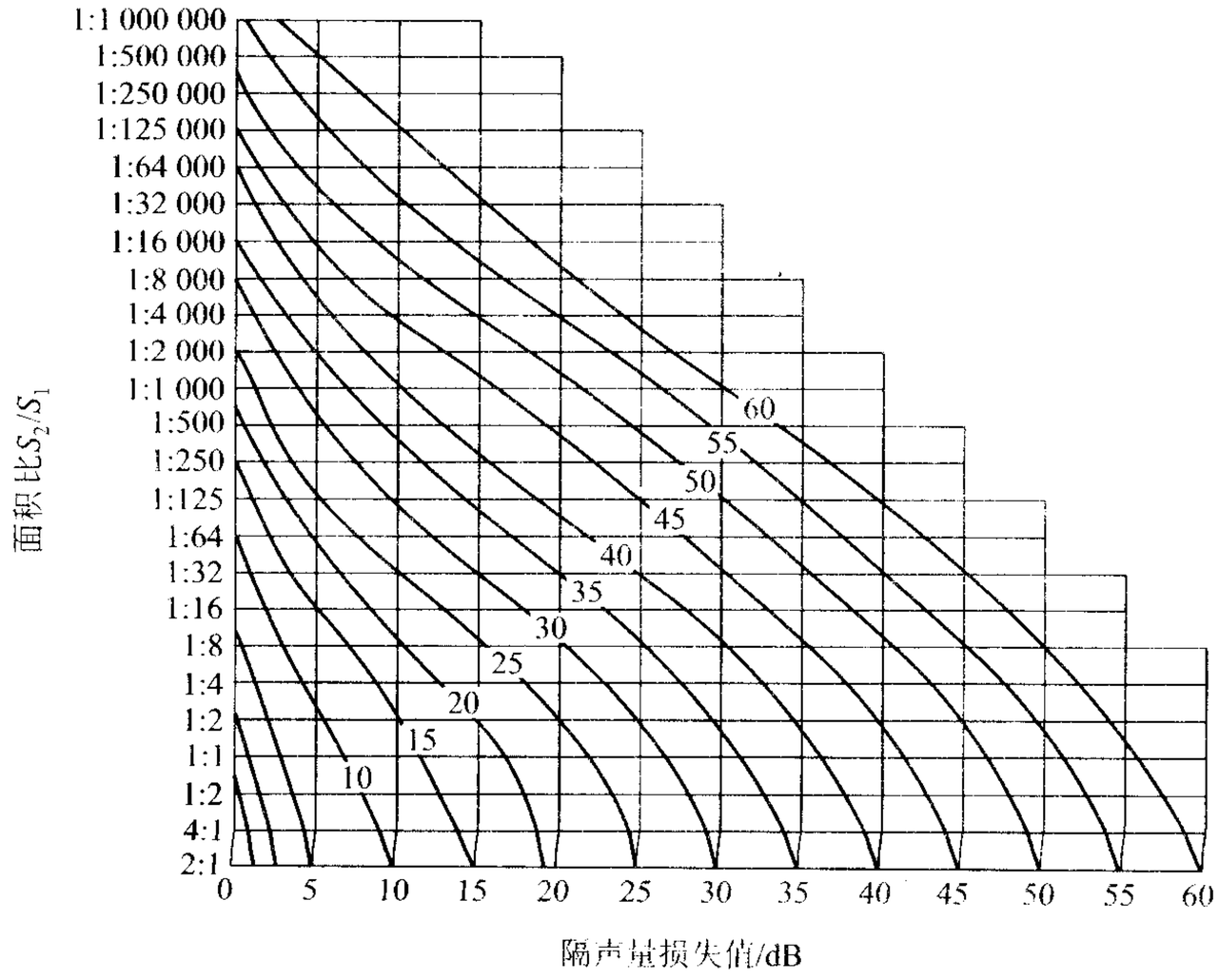


图 5-4-11 组合件隔声量计算图

2. 孔洞和缝隙对墙板隔声的影响

孔洞和缝隙对隔声墙板的影响很大，由于声波的衍射，一个小洞或一条狭缝都会大大降低组合墙的隔声量。门窗的缝隙、各种管道的孔洞、隔声罩的安装缝隙等都是透声较多之处，直接影响墙板等组合件的隔声量。

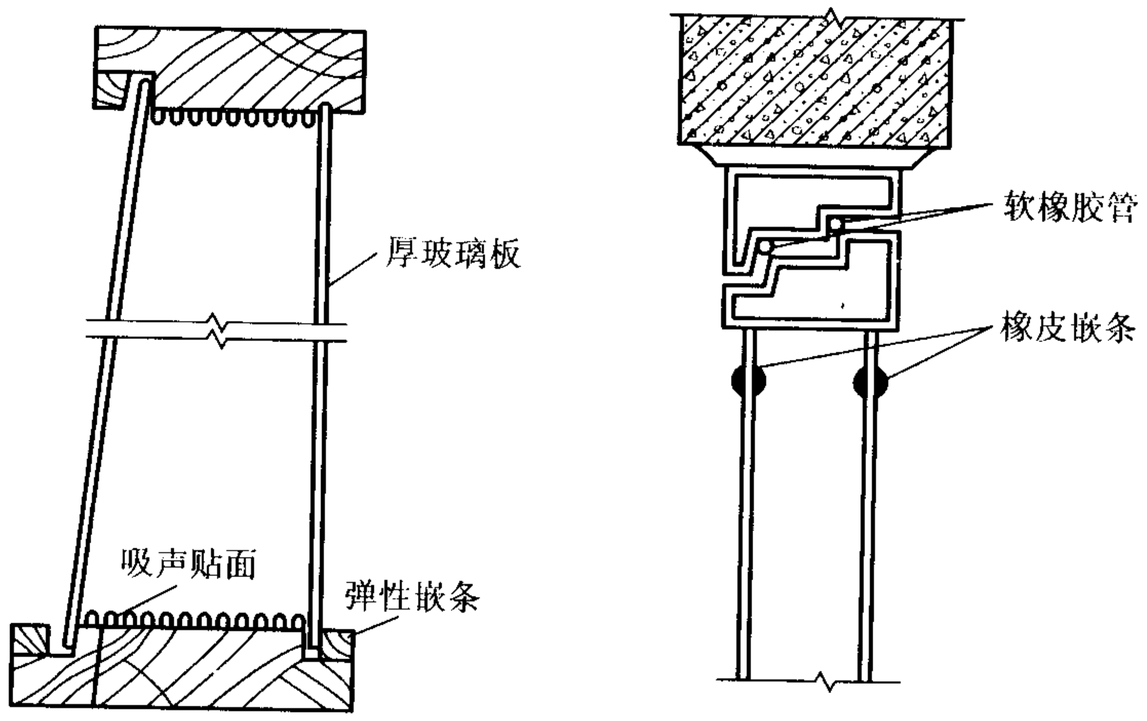
低频声波长较长，透过孔隙的声能要比高频声少些，所以孔洞对隔声的影响主要在高频段，随着孔洞的加大，高频隔声量继续下降，同时向中、低频方向扩展。孔隙对隔声的影响，还与隔声墙板的厚度有关，墙板越厚，孔隙对隔声性能的影响越小。为了不降低墙的隔声量，必须对墙上的孔洞和缝隙进行密封处理。

3. 门、窗的隔声和孔洞的处理

采用轻质双层或多层复合隔声板制成的门窗，称为隔声门、隔声窗。对于隔声门，首先要有足够的隔声量，其次要保证门的开启机构灵活方便，门扇与门框之间的密封要严实。通常隔声门做成双层轻便门，并在两层间加吸声处理，采用多层复合结构。门缝对门的隔声性能有很大影响，门缝密封方法及密封程度的好坏，与隔声门的使用是否方便及其实际隔声效果密切相关，所以隔声门的密封方法应根据隔声要求和门的使用条件确定。

隔声窗常采用双层或多层玻璃制作，其隔声量与玻璃的厚度、窗的结构、窗与窗框之间、窗框和墙壁之间的密封程度有关。因此，通常采用两层以上的玻璃，中间夹空气层的结构来提高隔声效果。同时应注意：①相邻两层玻璃不宜平行布置，朝声源一侧的玻璃有一定倾角，以便减弱共振效应；②需选用不同厚度的玻璃，以便错开吻合效应的频率，削弱吻合效应的影响；③密封要严，玻璃板要紧紧地嵌在弹性垫衬中，以防止阻尼板面的振动，层间四周边框宜做吸声处理，如图 5-4-12 所示。

为了防止孔洞和缝隙透声，常采用以下措施对孔洞加以处理：①对于经常开启的门窗与边框的交接处，在保证开启方便的前提下应尽量加以密封，密封材料可选用柔软而富有弹性的材料，如细软橡皮、海绵乳胶、泡沫塑料、毛毡等，但不能用实心硬橡皮条。使用中应注意，如果橡胶类密封材料老化，应及时更换。②在隔声要求很高的场合下，可以采用双层或多层门、窗，并对门窗缝隙加以密封。③在土建工程中注意砖墙灰缝的饱满，混凝土墙的砂浆捣实。④隔声间的通风换气口应有消声装置。⑤隔声间的各种管线通过墙体结构需打孔时，应在孔洞周围用柔软材料包扎封紧。



(a) 双层木窗　　(b) 双层钢窗

图 5－4－12　两种双层窗的结构形式

五、消声器

消声器是一种降低空气动力学噪声的主要技术措施，主要安装在空气动力学设备的气流进出口或通道上，阻止或减弱噪声的传播。环境噪声和工业噪声有相当部分是气流产生的，而消声器能有效减少这些噪声，因此，消声器在噪声防治中得到广泛应用。

（一）消声器的种类

消声器的种类和结构型式很多，按其消声机理和结构的不同大致可分为 4 类：阻性消声器、抗性消声器、宽频带型消声器和排气喷流消声器。它们有不同的消声频谱特性，可根据设备的空气动力性及噪声频谱选用适当的消声器。

1. 阻性消声器

阻性消声器是一种吸收型消声器，吸声材料固定在气流通过的通道内，利用声波在多孔吸声材料中传播时，因摩擦阻力和黏滞阻力将声能转化为热能，达到消声的目的。它的特点是对中、高频的噪声有良好的消声性能，对低频消声性能较差，主要用于控制风机的进、排气噪声和燃气机进气噪声等。

2. 抗性消声器

抗性消声器不直接吸收声能，其中扩张室消声器的消声原理是借助管道截面的突然扩张或收缩；而共振腔消声器则是借助共振腔，利用声阻抗失配，使沿管道传播的噪声在突变处发生反射、干涉等现象从而实现消声。它主要适用于消除低、中频的窄带噪声，应用于空压机的进气噪声、内燃机的排气噪声等脉动性气流噪声的消除。

3. 宽频带型消声器

宽频带型消声器主要包括阻抗复合式消声器和微穿孔板消声器两种，具有较好的宽频带消声特性，主要用于超净化空调系统及高温、潮湿、油雾、粉尘和其他要求特别清洁的场合。

4. 排气喷流消声器

排气喷流消声器利用扩散降速、变频或改变喷注气流参数等达到消声的目的，具有宽频带的消声特性，主要用于消除高压气体排放的噪声，如锅炉排气、高炉放风等。

在实际应用中，往往利用两种或两种以上的原理制成复合型消声器。另外还有一些特殊形式的消声器，例如，喷雾消声器、引射掺冷消声器、电子消声器等。

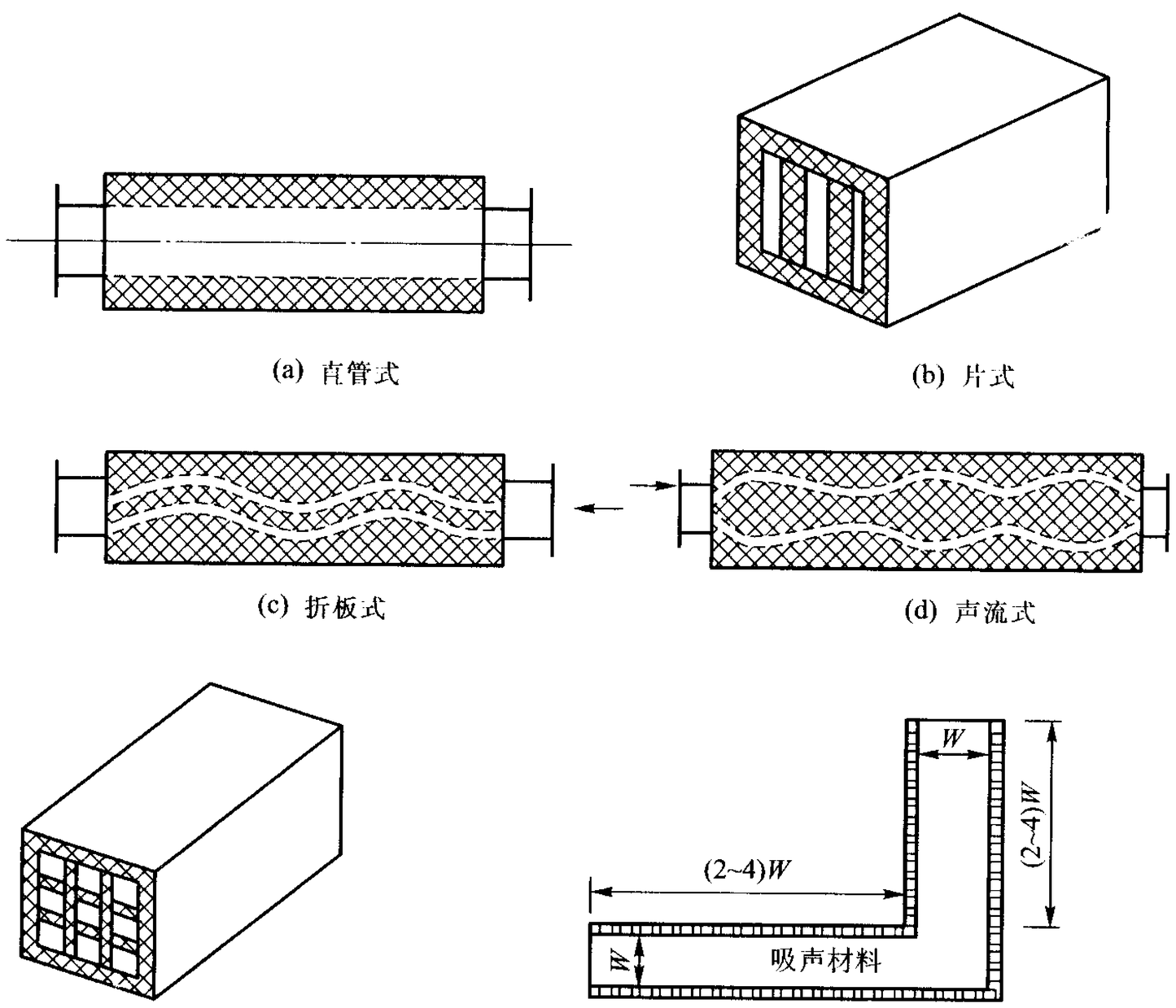
（二）阻性消声器

阻性消声器是一种利用吸声材料消声的吸收型消声器，吸声材料固定在气流通过的通道内，利用声波

在多孔吸声材料中传播时，因摩擦阻力和黏滞阻力将声能转化为热能，达到消声的目的。它的作用类似于电路中的电阻，故称阻性消声器。

1. 阻性消声器的种类

阻性消声器按气流通道几何形状一般分为直管式、片式、折板式、蜂窝式、声流式和弯头式等，如图5-4-13所示。



(a) 直管式　(b) 片式　(c) 折板式　(d) 声流式　(e) 蜂窝式　(f) 弯头式

图5-4-13 阻性消声器的种类

(1) 单通道直管式消声器：单通道直管式消声器是阻性消声器中最简单的一种，结构形式如图5-4-13(a)所示，在管壁上衬贴吸声材料而成。它的特点是结构简单、气流直通、阻力损失小、适用于流量小的管道消声。从结构上可以看出，阻性直管消声器的消声衰减量与消声器材料的声学性能、气流通道的周长、断面面积以及管道长度有关，因受气流速度、压力等因素影响，难以建立起准确的计算公式。常用的计算消声量的公式是A. N. 别洛夫公式，即：

$$L_A = \varphi(\alpha_0)\frac{P}{S}l \tag{5-4-21}$$

式中：L_A——消声量，dB；

P——消声器通道断面的有效周长，m；

S——消声器通道的有效截面积，m^2；

l——消声器有效长度，m；

α_0——垂直入射吸声系数；

$\varphi(\alpha_0)$——消声系数，与材料的垂直入射吸声系数α_0有关，可由表5-4-2查得。

表 5-4-2　$\varphi(\alpha_0)$ 与 α_0 的关系

α_0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60～1.0
$\varphi(\alpha_0)$	0.05	0.11	0.17	0.24	0.31	0.39	0.47	0.55	0.64	0.75	0.86	1～1.5

可以看出，式（5-4-21）没有考虑气流条件，计算结果与实测可能有较大差别。在低、中频时，计算值与实测值基本相等，但在高频时，计算值往往要高于实测值。材料的吸声性能越好，管道越长，消声量就越大。因此，设计时尽可能选用吸声性能好的多孔材料，并详细计算通道的几何尺寸，对于相同截面积的通道，P/S 值以矩形最大，圆形最小。

（2）片式消声器：片式消声器如图 5-4-13(b) 所示。对于流量较大、需要的通风面积大的情况，常在管道纵向插入几片吸声片，将其分隔成多个通道以增加周长和减小截面积。通常取吸声片厚度为 50～100 mm，片间距离（通道宽度）取 100～250 mm。当片式消声器每个通道的构造尺寸相同时，只要计算单个通道的消声量，即为该消声器的消声量。所以，片式消声器的消声量计算公式与单通道直管式消声器计算公式相似。

（3）折板式消声器：如图 5-4-13(c) 所示，它是片式消声器的变形，为了增加高频的消声效果而将直通道改为曲折通道。在给定直线长度情形下，该种消声器可以增加声波在管道内的传播路程，使材料能更多地接触声波，特别是高频声波，能增加传播途径中的反射次数，从而提高高频消声量。为了减小阻力损失，折角不要过大，一般小于 20°。

（4）声流式消声器：如图 5-4-13(d) 所示，声流式消声器是由片式消声器和折板式消声器发展而来的。声流式消声器将折板式的折角变为平滑，当声波通过时，增加反射次数，并对某些频率的声波产生吻合振动，从而改善吸声性能，而且还使气流较为通畅地通过，达到高消声、低阻损的要求。

（5）蜂窝式消声器：这种消声器是由若干个小型直管消声器并联而成，形似蜂窝，故得其名，如图 5-4-13(e) 所示。因小型管道的周长 P 与截面积 S 之比值要比直管式和片式大，所以消声量较高，且由于小管的尺寸很小，使上限失效频率大大提高，而改善了高频消声特性。因为每个小型直管消声器都是相互并联的，所以只需计算一个小型直管消声器的消声量，就可以表示整个消声器的消声量。

（6）消声弯头：在弯管壁面衬贴吸声材料，就成为一个有明显消声效果的消声弯头，如图 5-4-13(f) 所示。消声弯头能改变管道内气流的方向。弯头上衬贴吸声材料的长度，一般相当于管道截面尺寸的 2～4 倍，没有吸声材料的弯头消声效果很差。在高频范围内，衬贴有足够长吸声材料弯头的消声量比没有吸声材料弯头的消声量高 10 倍。其形式有圆管弯头、矩形管弯头、圆弧形弯头和直角形弯头等。弯头的插入损失大致与弯折角度成正比，如 30°弯头的插入损失仅为 90°弯头的 $\frac{1}{3}$。对于无规则入射，180°弯头的减噪量约为 90°弯头的 1.5 倍。

2. 结构因素对阻性消声器性能的影响

实验证明，消声器实际消声量的大小与噪声频率有关，噪声的频率越高，传播的方向性越强。对于一定截面积的气流通道，当入射声波的频率高至一定限度时，由于方向性很强而形成“光束状”传播，很少接触贴附的吸声材料，消声量明显下降，这一现象称之为高频失效。产生高频失效所对应的频率称为上限失效频率 $f_上$。以直管式消声器为例，可用如下经验公式计算：

$$f_上 \approx 1.85\ c/D \tag{5-4-22}$$

式中：c——声速，m/s；

D——消声器通道的当量直径，m，对矩形管道取边长平均值，圆形管道取直径，其他可取面积的开方值。

当频率高于失效频率时，每增高一个倍频程其消声量约下降 $\frac{1}{3}$，可估算为：

$$\Delta L' = \frac{3-n}{3}\Delta L \tag{5-4-23}$$

式中：$\Delta L'$——高于失效频率的某倍频程的消声量，dB；

ΔL——失效频率处的消声量，dB；

n——高于失效频率的倍频程数。

由于高频失效，所以在设计消声器时，对于小风量的细管道，可以选用直管式；但对于较大风量的粗管道就必须采用多通道形式。通常在消声器通道中加装消声片，或把消声器设计成片式、折板式、蜂窝式或弯头式等，以提高消声器在中、高频范围内的消声效果。在高频失效频率附近采取上述办法可显著地提高高频消声效果，但对低频来说效果并不明显。同时由于通道过多或出现弯曲，会显著增加阻力损失，使消声器的空气动力性能变坏。因此，这类消声器形式的采用应根据现场实际情况来决定。

3. 气流对阻性消声器性能的影响

气流对消声器的消声性能影响表现在两个方面：一是气流存在会影响声波的传播和衰减规律；二是气流速度过大时，会在消声器内产生一种附加噪声，即所谓气流再生噪声。这两方面的影响是同时产生的，但本质却不同。前一种情况影响很小，通常主要考虑第二种情况。

当通过消声器的气流速度过大时，气流与其内壁面摩擦剧烈发出声音，即产生了气流再生噪声，降低了消声器的消声效果。分析其产生机理，原因有两个：一是气流经过消声器时因局部阻力和摩擦阻力形成湍流产生的噪声，气流再生噪声主要就指这一部分；二是高速气流激发消声器构件振动而辐射的噪声。根据试验结果可得出管道中气流再生噪声倍频程的声功率统计公式：

$$L_w = 72 + 60 \lg v - 20 \lg f \tag{5-4-24}$$

式中：L_w——倍频程的气流再生噪声，dB；

f——倍频程的中心频率，Hz；

v——气流速度，m/s。

气流再生噪声的大小主要取决于气流的速度和消声器的结构。控制气流噪声的主要措施：一是按声源特性和消声器的消声量确定合适的气流速度；二是选择合适的消声器结构，改善气流状态，减少湍流发生。

（三）抗性消声器

抗性消声器主要是利用声抗的大小来消声，而不使用吸声材料，仅依靠管道截面的突变或旁接共振腔等在声传播过程中引起阻抗的改变而产生声波的反射、干涉现象，从而降低由消声器向外辐射的声能，达到消声的目的。常见的抗性消声器有扩张室消声器和共振腔消声器两大类。抗性消声器的选择性较强，适用于窄带噪声和低、中频噪声的控制。

1. 扩张室消声器

扩张室消声器是抗性消声器最常用的结构形式。它是由连接管和扩张室组成的，其最基本的形式是单节扩张室消声器，如图 5-4-14 所示。声波在管道中传播时，管道的突变急剧改变了声波的传播，即增加了声阻抗，消耗了声能，从而降低了噪声强度，达到了消声的目的。

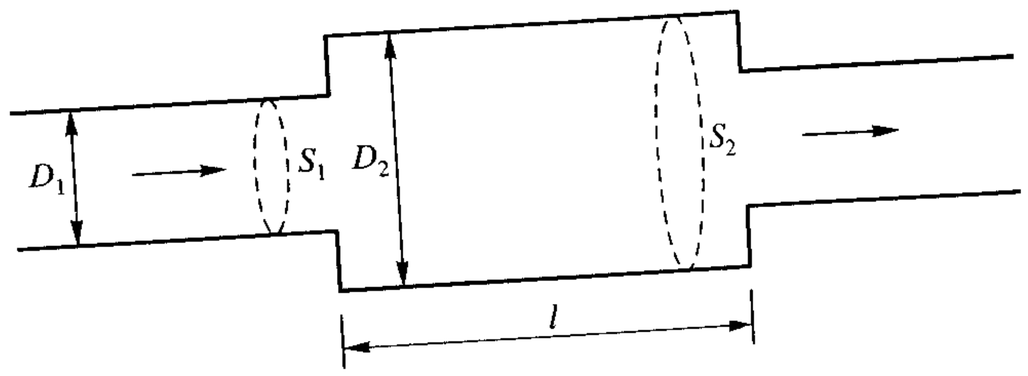


图 5-4-14 单节扩张室消声器

对于图 5-4-14 所示单节扩张室消声器，根据管道传播理论，声波通过扩张室时，其声强透射系数为：

$$\tau_l = \frac{1}{\cos^2 kl + \frac{1}{4}\left(\frac{S_1}{S_2} + \frac{S_2}{S_1}\right)^2 \sin^2 kl} \tag{5-4-25}$$

式中：k——波数，$k = \frac{2\pi}{\lambda}$；

λ——声波波长。

单节扩张室消声器的主要缺点是存在许多通过频率，在通过频率处的消声量为零，即声波会无衰减地通过消声器而达不到消声的目的。解决的方法通常有两种：一是在扩张室内插入内接管，二是将多节扩张室串联。在实践中，通常将上述两种方法结合使用，即将多节不同的扩张室用不同长度的内插管串联起来，这样可以在较宽的频率范围内获得较高的消声量，得到较好的消声效果。考虑到消声器的空气动力性，串联的腔室一般以 2 ~ 4 腔为宜。

2. 共振腔消声器

在一段气流通道的管壁上开一些小孔，使其与管外闭合的空腔相通，就构成了共振腔消声器，如图 5 - 4 - 15所示。共振腔消声器也是一种抗性消声器，它是利用共振吸声原理进行消声的，其最简单的结构形式是单腔共振消声器，如图 5 - 4 - 16 所示。

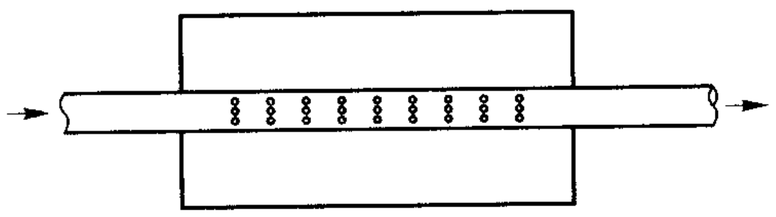


图 5 - 4 - 15　共振腔消声器

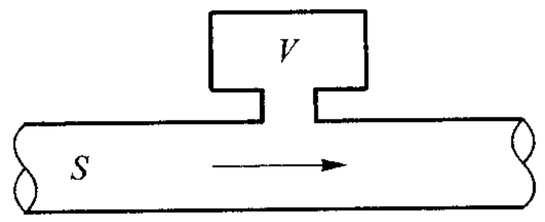


图 5 - 4 - 16　单腔共振消声器

（1）消声原理与消声量的计算：共振腔消声器实质上是共振吸声结构的一种应用，其基本原理基于亥姆霍兹共振器。管壁小孔中的空气柱类似活塞，具有一定的声质量，密闭空腔类似于空气弹簧，具有一定的声顺，二者组成一个共振系统。当声波传至颈口时，在声压作用下空气柱便产生振动，振动时的摩擦阻尼使一部分声能转换为热能耗散掉。同时，由于声阻抗的突然变化，一部分声能将反射回声源。当声波频率与共振腔固有频率相同时，便产生共振，空气柱振动速度达到最大值，此时消耗的声能最多，消声量也就最大。

当声波波长大于共振腔消声器最大尺寸的 3 倍时，其共振吸收频率为：

$$f_r = \frac{c}{2\pi}\sqrt{\frac{G}{V}} \tag{5-4-26}$$

式中：c——声速，m/s；

V——空腔体积，m^3；

G——传导率，有长度的量纲，其值为：

$$G = \frac{S_0}{l + 0.8\ d} = \frac{\pi d^2}{4(l + 0.8\ d)}。$$

式中：S_0——孔颈截面积，m^2；

d——小孔直径，m；

l——小孔颈长，m。

工程上应用的共振消声器很少是开一个孔的，而是由多个孔组成。此时要注意各孔间要有足够的距离，当孔心距为小孔孔径的 5 倍以上时，各孔间的声辐射互不干涉，此时总的传导率等于各个孔的传导率之和，即 $G_{总} = nG$（n 为孔数）。

忽略共振腔声阻的影响，单腔共振消声器对频率为 f 的声波的消声量为：

$$L_R = 10\ \lg\left(1 + \frac{K^2}{\frac{f}{f_r} - \frac{f_r}{f}}\right) \tag{5-4-27}$$

其中：

$$K = \frac{\sqrt{GV}}{2S}$$

式中：S——气流通道的截面积，m^2；

V——空腔体积，m^3；

G——传导率。

图 5－4－17 给出的是不同情况下共振腔消声器的消声特性曲线。可以看出，共振腔消声器的选择性很强。当 $f=f_r$ 时，系统发生共振，L_R 将变得很大，在偏离 f_r 时，L_R 迅速下降。K 值越小，曲线越尖锐，因此 K 值是共振消声器设计中的重要参量。

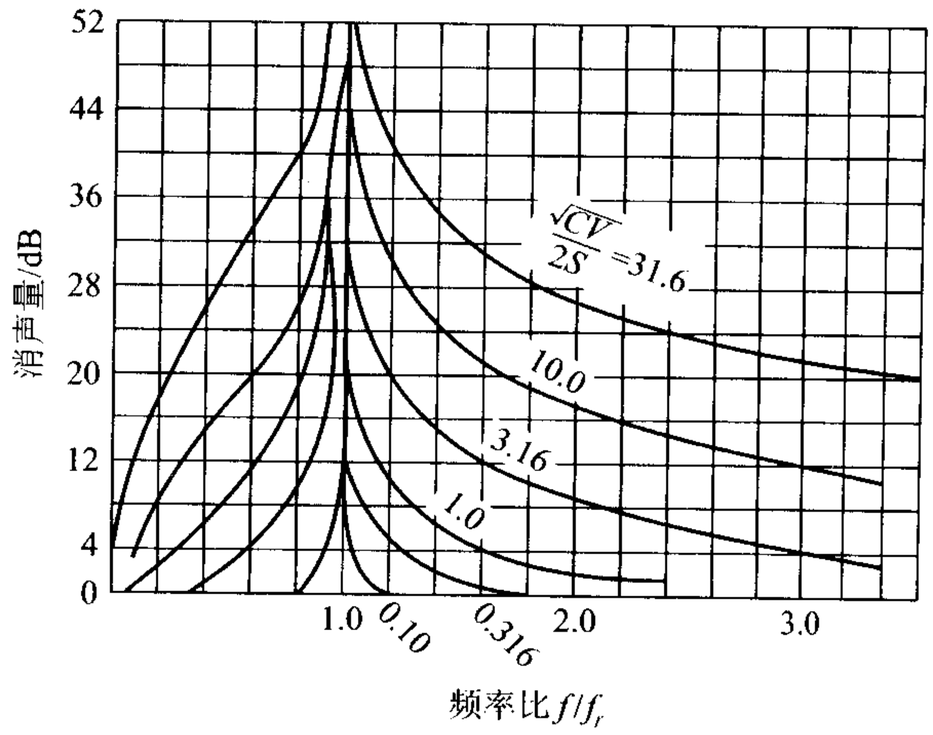


图 5－4－17 共振腔消声器的消声特性

（2）改善消声性能的方法：共振腔消声器特别适合于低、中频成分突出的噪声，且消声量比较大。但是其消声频带范围窄，可采用以下方法弥补此缺陷。

① 选定较大的 K 值：由图 5－4－17 可以看出，在偏离共振频率时，消声量的大小与 K 值有关，K 值越大，消声量也越大。增大 K 值，还能改善共振吸声的频带宽度；但同时消声器的体积也增大，因此，在设计时，应考虑全面，适当地选取 K 值。

② 增加声阻：在共振腔中填充一些吸声材料，或在孔颈处衬贴薄而透声的材料，都可以增加声阻使有效消声的频率范围展宽。这样处理尽管会使共振频率处的消声量有所下降，但由于偏离共振频率后的消声量下降缓慢，从整体看还是有利的。

③ 采取多节共振腔串联：把具有不同共振频率的几节共振腔消声器串联，并使其共振频率互相错开，可以有效地展宽消声频率范围。

（四）频带型消声器

1. 阻抗复合式消声器

阻性消声器在中、高频范围内有较好的消声效果，抗性消声器则适于消除低、中频噪声。为使消声器在宽频带范围内有良好的消声效果，可将二者复合起来使用，取两者结构的优点，这就构成了阻抗复合式消声器。常用的形式有：阻性－扩张室复合式；阻性－共振腔复合式；阻性－扩张室－共振腔复合式等。图 5－4－18 给出了几个阻抗复合式消声器的示意图。

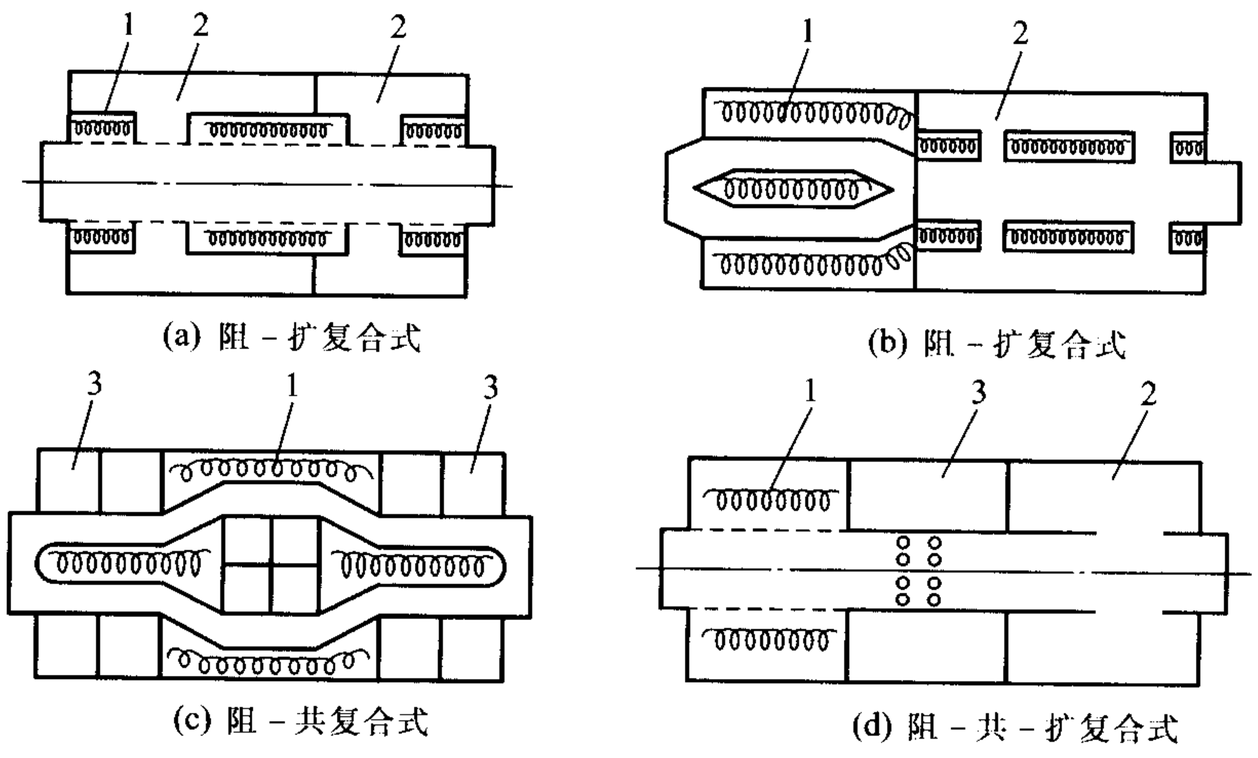


图 5－4－18 几个阻抗复合式消声器示意图

1. 阻性；2. 扩张室；3. 共振腔

阻抗复合式消声器由吸声材料和共振、扩张室等声学元件组成，消声原理大致是阻性和抗性原理的结合。但当声波波长较长时，阻抗复合后因耦合作用而相互干涉，使声波在传播过程中的衰减机理变得极为复杂，难以确定简单的定量关系。因此，在实际应用中，阻抗复合式消声器的消声量通常由试验或实际测量确定。

2. 阻性扩张室复合消声器

图 5 -4 -18(a) 是由阻性和抗性两部分消声结构组成的复合消声器。为了不增加消声器的长度，又不影响扩张室插入管的作用，将吸声材料附在扩张室的插入管上，主要用于消除风机等设备的高频噪声，消声效果约为 20 dB(A)。抗性消声部分由两节和多节不同长度的扩张室串联组成，主要用于消除低中频噪声，一般有 10 ~20 dB(A) 的消声效果。阻性和扩张室复合在一起，可在低中高频范围内获得良好的消声效果，一般用在风机进出口上。

3. 阻性共振腔复合消声器

消声器的阻性部分是将吸声材料粘贴在消声器通道的内壁上，用以消除压缩机噪声等的中、高频成分。抗性部分设置在通道中间，由具有不同消声频率的三对共振腔串联组成，其消声值在 20 ~30 dB(A)，在低、中、高频的宽广范围上都有较好的消声性能。

(五) 微穿孔板消声器

微穿孔板消声器是利用微穿孔板吸声结构制成的一种新型消声器。在厚度小于 1 mm 的金属板上钻许多孔径为 0.5 ~1 mm、穿孔率一般为 1% ~3% 的微孔，并在穿孔板后面留有一定的空腔，就构成了微穿孔板吸声结构。微穿孔板消声器是一种高声阻、低声质量的吸声元件，它是阻抗复合式消声器的一种特殊形式。由理论分析可知，声阻与穿孔板上的孔径成反比。与一般穿孔板相比，微穿孔板吸声结构由于孔很小，所以声阻就大得多，从而提高了结构的吸声系数。低的穿孔率降低了其声质量，使吸声频带宽度得到展宽，同时微穿孔板后面的空腔能够有效地控制共振吸收峰的位置。

微穿孔板消声器有以下优点：①其空气动力性能好，适用于要求阻损小的设备；②气流再生噪声低，允许有较高的气流速度；③适用于要求洁净的场所；④在特殊条件下，它能耐高温和气流冲击，不怕油雾和水蒸气。

(六) 排气喷流型消声器

小喷口高压排气或放空所产生的空气动力性噪声在工业生产中普遍存在，这类噪声声级高、频带宽、传播远、危害大。对这类噪声的控制，主要从声源上降低噪声，主要利用扩散降速、变频或改变喷注气流参数等达到消声效果。按其消声原理可分为小孔喷注、多孔扩散、节流降压、喷雾和引射掺冷等类型消声器。

1. 小孔喷注消声器

小孔喷注消声器特点是体积小、质量轻、消声量大，主要用于消除小口径高速喷流噪声，喷注噪声的峰值频率与喷口直径成反比。如果喷口直径变小，喷口辐射的噪声能量将从低频移向高频，结果低频噪声被降低，高频噪声反而增加。如果孔径小到一定值，喷注噪声将移到人耳不敏感的频率范围上去，根据这一原理，将一个大的喷口改成许多小喷口来代替，从发生机理上使它的干扰噪声减少。小孔喷注消声器的小喷口一般选择直径 1 ~3 mm，并且必须有足够的孔心距。

2. 多孔扩散消声器

多孔扩散消声器是根据气流通过多孔装置扩散后，速度及驻点压力都会降低的原理设计制作的一种消声器。它利用粉末冶金，烧结塑料、多层金属网、多孔陶瓷等材料代替小孔喷注，这些材料本身有大量的细小孔隙，当气流通过这些材料制成的消声器时，排放气流被滤成无数个小的气流，气体压力降低，流速因扩散减小，辐射噪声的强度也相应减弱。同时这类材料还有阻性材料的吸声作用，自身也可吸收一部分声能。

3. 节流降压消声器

节流降压消声器是利用节流降压原理制成的。当高压气流通过一定流通面积的节流孔板时，压力得到降低。通过多级节流孔板串联，就可以把原来高压气体直接排空的一次大的突变压力降分散为多次渐变压力降。排气噪声功率与压力降的高次方成正比，所以把压力突变排空改为压力渐变排空，便可取得较好的消声效果。这种消声器通常有 15 ~30 dB(A) 的消声量。

第二节　振动防治技术基础

一、振动与振动污染特征

任何可以用时间的周期函数描述的物理量，都称之为振动。振动是自然界最普遍的现象之一。通常所说的振动主要指机械振动，是指力学系统在观察时间内，它的位移、速度或加速度往复经过极大值和极小值变化的现象。每经过相同的时间间隔，上述物理量能够重复出现的振动称为周期振动。完成一次振动所需要的时间称为周期，每秒完成的振动次数称为频率。不是周期性出现的振动称为非周期振动。最简单的周期振动是按正弦规律变化的简谐振动。由频率不同的简谐振动合成的振动称为复合振动。任何复杂的振动都可以由许多不同频率和振幅的简谐振动合成。

环境中存在着各种各样的振动现象。环境科学所指的振动污染是指对人体及生物带来有害影响的振动。振动会引起人体内部器官的振动或共振，从而导致疾病的发生，对人体造成危害，严重时会影响人们的生命安全，振动污染还表现在对居民心理上、感觉上的影响。此外，振动会对其设备、机器本身造成损害，还会产生噪声以及共振，造成严重的环境污染，因此振动污染是一种不可忽略的公害。

振动污染源主要包括：工厂振源，如为居民生活设施配套的机械设备和混合在居民区中的中小型工厂内的工业设备；交通振源，如公路交通、穿越城区的铁路和地铁以及城市上空的飞机等；工程振源，如在城区建筑工地建筑施工的打桩、压路等机械设备；以及大地脉动及地震等。在所涉及的范围内，振动污染和噪声污染一样带有局部性。

（一）振动污染的评价

振动的评价标准可以用不同的物理量表示，在环境振动测量中用的比较多的是振动加速度级和振动速度级。评价振动对人体的影响比评价噪声复杂。振动强弱对人体的影响大体上有以下四种情况：

振动的“感觉阈”，人体刚能感觉到振动，对人体无影响；

振动的“不舒服阈”，这时振动会使人感到不舒服；

振动的“疲劳阈”，它会使人感到疲劳，从而使工作效率降低，实际生活中以该阈为标准，超过标准者被认为有振动污染；

振动的“危险阈”，此时振动会使人产生病变。

在生理学中，振动强度习惯以 g（$g=9.806\ 65\ m/s^2$）为单位表示加速度。人体对振动的感觉是：刚刚感到振动是 $0.003\ g$，不愉快的感觉是 $0.05\ g$，不可容忍感是 $0.5\ g$。振动还有垂直与水平之分，人体对垂直振动比水平振动更敏感。我国的国家标准中规定的城市区域环境振动标准如表 5－4－3 所示。

表 5－4－3　城市各类区域铅垂方向振级标准值

适用地带范围	昼间/dB(A)	夜间/dB(A)
特殊住宅区	65	65
居民文教区	70	67
混合区、商业中心区	75	72
工业集中区	75	72
交通干线道路两侧	75	72
铁路干线两侧	80	80

（二）振动污染控制的一般过程

振动控制过程与噪声控制类似，但比较复杂。其任务就是通过一定的手段使受控对象的振动水平满足人们的预定要求。为达到振动控制的目的所采取的手段，通常需经历如下5个环节：

（1）确定振源特性与振动特征：即确定振源的位置，激励的特性（简谐性、周期性、窄带随机性或宽带随机性），振动特征（受迫型、自激型或参激型）等。因为不同性质的振源引起的振动，其解决的方法也不同。

（2）确定振动控制水平：即确定衡量振动水平的量及其指标，这些量可以是位移、速度或加速度、应力等，也可以是其最大值或均方根值。

（3）确定振动控制方法：不同的振动控制方法其适用性不同，这些方法包括隔振、吸振、阻振、消振及结构修改等。

（4）进行分析与设计：包括建立受控对象与控制装置（如吸振器、隔振器、阻尼器等）的力学模型，进行振动分析，以及对控制装置参数与结构的设计。

（5）实现将控制装置的结构与参数从设计转化为实物：可实现性是振动控制研究中必须注意的重要问题。

二、振动控制的常用方法

振动控制方法有许多，从不同角度出发，已形成不同的控制分类方法，通常采用的控制方法主要包括：

（1）修改结构：通过修改受控对象（受控对象是各类产品、结构或系统的统称）的动力学特征参数使振动满足预定的要求，而不需要附加任何子系统的振动控制方法。所谓动力学参数是指影响受控对象质量、劲度与阻尼特性的参数，如惯性元件的质量、转动惯量及其分布等。这是一个高技术手段，目前非常引人注目。

（2）控制振动源振动：即消振。控制振动最彻底和最有效的办法就是控制振动源振动，消除或减弱振源，如改善机器平衡性能、改变扰动力的作用方向、增加机组的质量、在机器上装设动力吸振器等。

（3）隔振：通常在振源与受控对象之间串加一个子系统来实现隔振，用以减小受控对象对振源激励的响应，如采用防振沟、安装隔振元件等。

（4）在受控对象上附加吸振元件，利用吸振器产生的吸振力以减小手动对象对振源激励的响应。

（5）阻振：又称阻尼减振。在受控对象上附加阻尼器或阻尼元件，通过消耗能量使响应最小，也常用外加阻尼材料的方法来增大阻尼。阻尼可使沿结构传递的振动能量衰减，还可减弱共振频率附近的振动。

（6）防护措施：为了保护在强烈振动环境里工作的人免受伤害，除了控制振动外，还可采取防护措施。全身振动的防护可用防振鞋，局部防振常用防振手套等。

三、隔振技术

隔振技术，就是通过在振动源与地基、地基与需要防振的机械设备之间，安装具有一定弹性的装置，使得振源与地基之间或地基与设备之间的近刚性连接转变为弹性连接，以隔离或减弱振动能量的传递，达到减振降噪的目的。

（一）隔振的分类

根据隔振目的不同，隔振分为积极隔振（主动隔振）和消极隔振（被动隔振）两类。

积极隔振是在机器与基础之间安装弹性支承即隔振器，减少机器振动扰力向基础的传递量，迫使机器的振动得以有效的隔离，如图5-4-19所示。其隔振的目的就是为了降低设备的扰动对周围环境的影响，同时使设备自身的振动较小。一般情况下，风机、水泵、压缩机及冲床的隔振都是积极隔振。

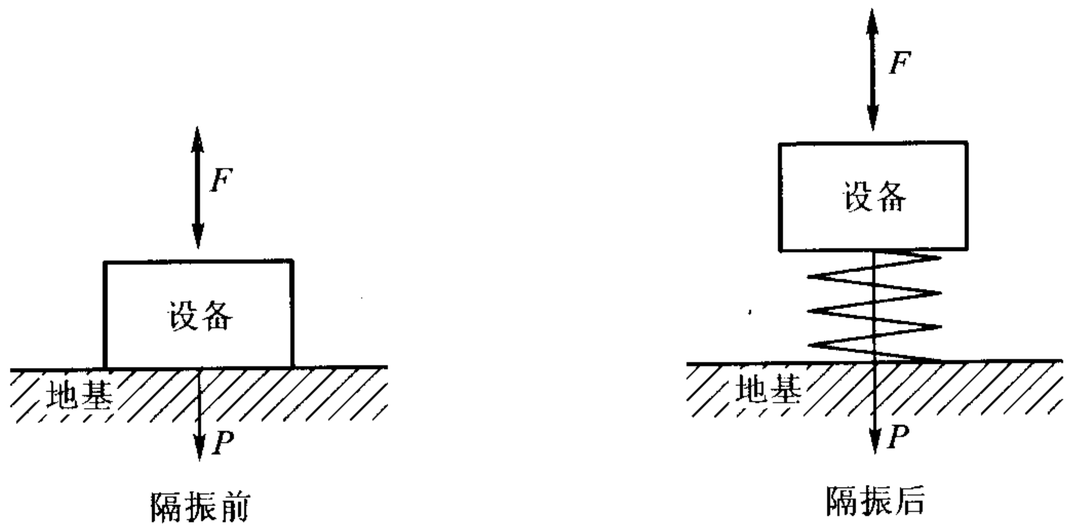


图 5－4－19 主动隔振示意图

消极隔振是在仪器的设备与基础之间安装弹性支承即隔离器，以减少基础的振动对仪器设备的影响程度，使仪器设备能正常工作或不受损害，如图 5－4－20 所示。其目的是为了减小地基的振动对设备的影响，使设备的振动小于地基的振动，达到保护设备的目的。一般情况下，仪器与精密设备的隔振都是消极隔振，在房屋下安装隔振器防止地震破坏也属于此类。

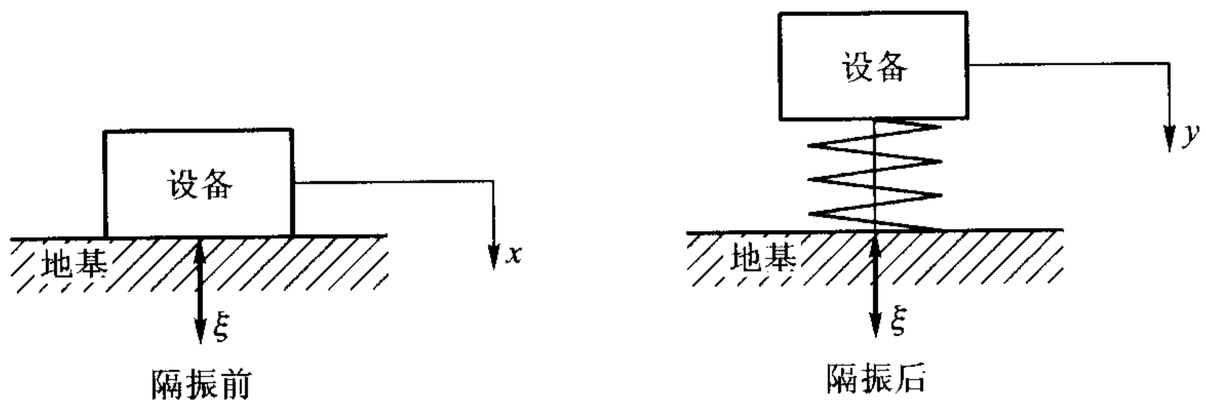


图 5－4－20 被动隔振示意图

积极隔振与消极隔振原理是相同的，所以积极隔振的原理、方法和结论对消极隔振同样适用。

（二）隔振的评价

描述和评价隔振效果的物理量很多，最常用的振动传递系数 T。传递系数的定义是指通过隔振元件传递的力与扰动力的比值，或传递的位移与扰动之间的幅值。T 越小，说明通过隔振元件传递的振动越小，隔振的效果越好。如果 $T=1$，说明了干扰完全被传递，没有隔振效果，在地基和设备中间不采取隔振措施就是这种情形；如果 $T<1$，则说明了扰动只被部分传递，起到了一定的隔振效果；如果隔振系统设计失败，也可能出现 $T>1$ 的情况，这时振动被放大了。

在工程设计和分析时，通常采用理论计算振动传递系数的方法来分析系统的隔振效果，有时也采用隔振效率来描述隔振系统的性能，隔振效率定义为 $\varepsilon=(1-T)\times 100\%$。

（三）隔振原理

单自由度振动系统是最简单的振动系统，也是多自由度振动系统振动隔离的基础，它包含了隔振设计的基本原理和本质。以下就以单自由度隔振系统为例，简单说明隔振原理。

如图 5－4－21 所示为无阻尼单自由度隔振系统，假设设备的质量为 m，隔振系统的劲度为 k，系统受到的干扰为 $F=F_0e^{j\omega t}$，传递力为 $P(t)$，则此隔振系统的固有频率为 $\omega_0=\sqrt{\dfrac{k}{m}}$ 或 $f_0=\dfrac{1}{2\pi}\sqrt{\dfrac{k}{m}}$。不计系统的阻尼时，系统的运动方程式为：

$$m\ddot{x}+kx=F_0e^{j\omega t} \tag{5-4-28}$$

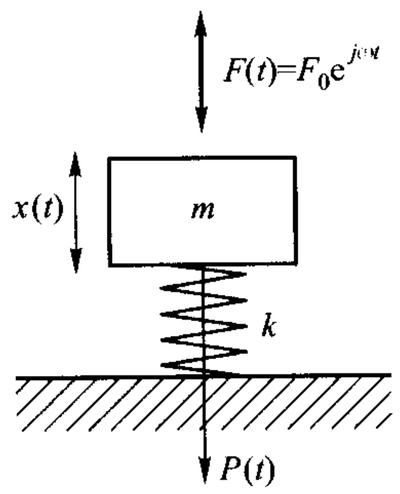


图 5－4－21 无阻尼单自由度隔振系统示意图

其稳态解的数学表达式为：

$$x=\frac{F_0}{k}\frac{1}{1-\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}\right)^2}e^{j\omega t} \tag{5-4-29}$$

式中：$\frac{F_0}{k}$——$\omega=0$ 时，在隔振系统上施加干扰力 F_0 时系统的变形量，也叫静位移。为简便计，通常定义参数 $z=\frac{\omega}{\omega_0}$，$z$ 成为归一化的频率。通过隔振系统传递给地基的干扰力为：

$$P=kx=F_0\frac{1}{1-z^2}e^{j\omega t} \tag{5-4-30}$$

振动传递系数为：

$$T=\left|\frac{P_0}{F_0}\right|=\left|\frac{1}{1-z^2}\right| \tag{5-4-31}$$

由式（5-4-31）可以得出：当 $z=1$ 即 $\omega=\omega_0$ 时隔振系统的振动传递系数将为无穷大，这显然不行，当隔振系统存在阻尼时，就不会出现这种情形。

如图 5-4-22 所示，在考虑系统阻尼时，隔振系统的运动方程为：

$$m\ddot{x}+c\dot{x}+kx=F_0e^{j\omega t}$$

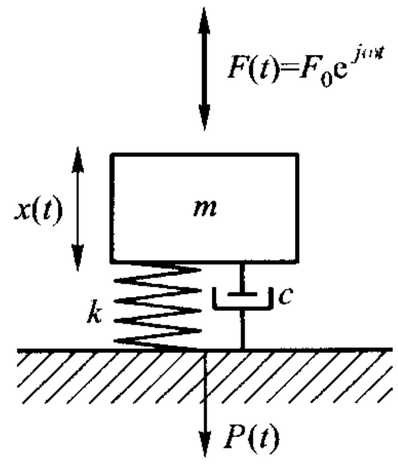


图 5-4-22　有阻尼单自由度隔振系统示意图

式中：c——阻尼系数，引入临界阻尼系数 $c_0=2\sqrt{mk}=2m\omega_0$ 和阻尼比 $\xi=c/c_0$，则上式的解可以表示为：

$$x=\frac{F_0}{k}\cdot\frac{1}{\sqrt{(1-z^2)^2+(2\xi\zeta)}}\cdot e^{j(\omega t-\phi)} \tag{5-4-32}$$

式中：$\phi=\arctan\frac{2\zeta z}{1-z^2}$，是传递的干扰相对外力的相位差。有阻尼时，阻尼元件也传递振动，传递力为 $c\dot{x}$，通过振动传递的干扰力为 $P=c\dot{x}+kx$，在稳定情况下：

$$P=c\dot{x}+kx=\frac{\frac{F_0}{k}}{\sqrt{(1-z^2)^2+(2\zeta z)^2}}(ke^{j(\omega t-\phi)}+j\omega ce^{j(\omega t-\phi)}) \tag{5-4-33}$$

传递干扰力的幅度为：

$$P_0=\frac{\frac{F_0}{k}}{\sqrt{(1-z^2)^2+(2\zeta z)^2}}\cdot\sqrt{(k+\omega^2c^2)} \tag{5-4-34}$$

振动传递系数为：

$$T=\frac{\sqrt{1+(2\zeta z)^2}}{\sqrt{(1-z^2)^2+(2\zeta z)^2}} \tag{5-4-35}$$

对比式（5-4-35）和式（5-4-31）可以发现：有阻尼时，隔振系统的传递系数的表达式要复杂得多。当系统出现 $\omega=\omega_0$ 时，隔振系统的振动传递系数将不再无穷大，此时的振动传递系数由系统的阻尼决定。

实际振动系统通常有多个自由度，刚性机械系统最多可以有 6 个自由度，它们分别对应 x 轴、y 轴、z 轴直线方向运动，以及机械系统绕 x 轴、y 轴、z 轴的转动。对于具体研究对象，我们不一定关心全部 6 个自由度的振动，可能在其中几个自由度上的激扰为零，或者其中某几个自由度不是主要研究对象，可以不予考虑，对具有多个自由度的振动系统在隔振设计时，可以在避免各自由度相互耦合的前提下，分别考虑各自由度振动的隔离。

（四）隔振设计

在隔振设计中，通常把 100 Hz 以上的振动称为高频振动，6～100 Hz 的振动定义为中频振动，6 Hz 以下的振动为低频振动。常用的绝大多数工业机械设备的基频振动都属于中频振动，部分机械设备所产生

的基频振动的谐频和个别的机械设备所产生的振动属于高频振动，而地壳的振动和地震所产生的振动都属于低频振动。

在工业振动控制中，最多的就是 6 ~ 100 Hz 左右的中频振动。下面对中频振动的隔振设计进行介绍。

从隔振原理和隔振性能分析，隔振设计步骤可分为以下几步进行：

（1）测试分析，确定被隔振设备的原始数据，包括设备及安装台座的尺寸、质量、重心和中心主惯性轴的位置，机器质量和转动惯量，以及激励振动源的大小、方向、频率、位置等。以上数据通过调查统计或查阅相关机器设备制造安装图纸加以确定。

（2）由以上数据，按频率比的要求计算隔振系统的固有频率，也可以根据隔振设计的具体要求，例如设备所允许的振幅来计算隔振系统的固有频率。在计算频率比时，如果有几个频率不同的振动源都需要隔离，则应该取激励频率中最小的那个为设计计算值。

（3）根据隔振系统所需要的固有频率，计算隔振器应该具有的劲度。

（4）计算设备工作时的振幅，核算是否满足隔振设计的要求，必要时通过降低隔振系统的劲度或增加基座的质量来达到要求的隔振指标。

（5）根据计算结果和工作环境要求，选择隔振器的类型以及安装方式，计算隔振器的尺寸进行结构设计。最后必须考虑隔振系统隔振效率和设备启停过程中通过共振区时的振幅，由此决定隔振系统的阻尼。

（五）常用的隔振装置及其应用

工程上常用的隔振材料或隔振装置主要有钢弹簧、橡胶、软木、玻璃纤维板、毛毡类等。此外，空气弹簧和液体弹簧也开始使用。目前，使用最广泛的是金属弹簧和剪切橡胶。但以空气弹簧的隔振效果为最好，发展前景乐观。在工程实际中，也常常混合使用一些隔振装置，如应用最多的有钢弹簧 - 橡胶复合式隔振器、软木 - 弹簧隔振装置等，这些隔振装置综合了不同材料的优点。现将常用的一些隔振装置简要介绍如下。

1. 隔振器

（1）钢弹簧隔振器：钢弹簧是在隔振装置中最常用的一种隔振器，有螺旋弹簧式隔振器和板条式钢板隔振器等，如图 5 - 4 - 23 所示。各类风机、空压机、球磨机、破碎机等大中小型机械设备均使用螺旋弹簧减振器。板弹簧是由几块钢板叠合制成的，利用钢板的摩擦可获得适宜的阻尼比，这种减振器只在一个方向上有隔振作用，一般用于火车、汽车的车体减振和在只有单方向冲击载荷的场合减振。

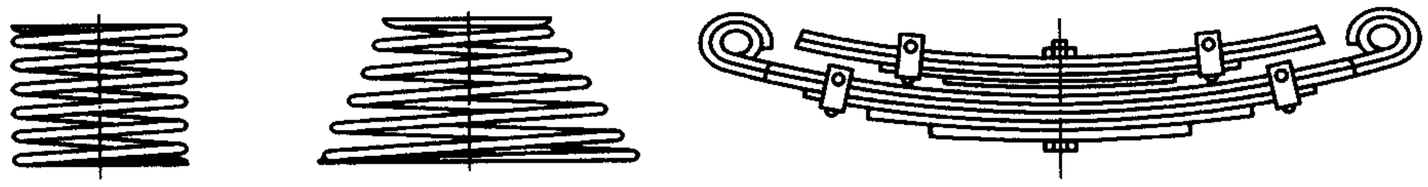


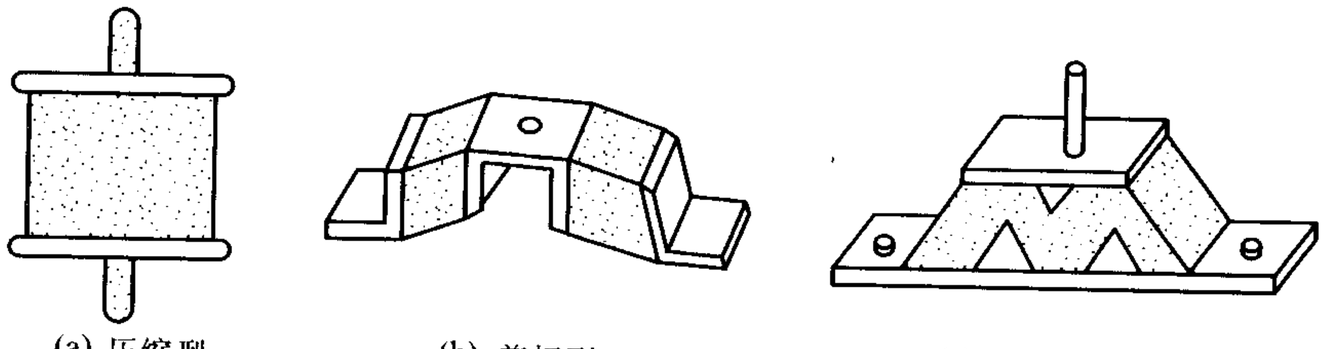
图 5 - 4 - 23 弹簧形式

钢弹簧有较大的静态压缩量，因此，能使隔振系统获得很低的固有频率，适宜低频隔振；有较大的承载能力，且性能稳定；此外，钢弹簧还具有结实耐用、尺寸小、耐高温、耐腐蚀等优点。它的缺点是本身阻尼较低，对于共振频率附近的振动隔离能力较差，易于传递中频振动。为了弥补钢弹簧的这一缺点，通常采用附加黏滞阻尼器的方法，火灾弹簧钢丝外敷设一层橡胶，以增加钢弹簧隔振器的阻尼。

安装钢弹簧隔振器，应注意以下两点：第一，应使各弹簧的自由高度尽量一致，基础底面要平整，使各弹簧在平面上均匀对称，受压均衡；第二，机组的重心一定要落在各弹簧几何中心上，整个振动系统的重心要尽量低，以保证机组运行的稳定性。

（2）橡胶隔振器：橡胶隔振器也是工程上常用的一种隔振装置，它最大的优点是本身具有良好的阻尼特性，在共振区时不致造成过大的振动，甚至接近共振点还能完全适用。橡胶隔振器主要是由硬度合适的橡胶材料制成的，其形状、面积和高度均根据受力情况进行设计。橡胶隔振器适宜压缩、剪切和切压状

态，不宜用于拉伸的状况，受剪切的隔振效果一般比受压缩的隔振效果好。据承力条件的不同，可分为压缩型、剪切型、压缩剪切复合型。如图 5－4－24 为几种橡胶隔振器的结构图。



(a) 压缩型　(b) 剪切型　(c) 压缩－剪切型

图 5－4－24　橡胶隔振器型式

橡胶隔振器的缺点是其性能易受温度影响。在高温下使用性能不好，低温下使用弹性系数也会改变，易老化。天然橡胶制成的隔振器使用温度为 30～60 ℃。橡胶一般是怕油污的，如果必须在油中使用时则应改用丁腈橡胶。此外，橡胶隔振器使用一段时间后，应检查它是否老化而弹性变坏，如果已损坏应及时更换。

（3）空气弹簧：空气弹簧也称“气垫”。这类隔振器的隔振效率高，固有频率低（在 1 Hz 以下），而且具有黏性阻尼，所以具有良好的隔振性能。空气弹簧的组成原理如图 5－4－25 所示。这种隔振器在橡胶空腔内充入一定压力的气体，使其具有一定的弹性，从而达到隔振的目的。空气弹簧一般敷设有自动调节机构，当负荷振动时，空气在空气室与贮气室间流动，可通过阀门调节压力，使之保持恒定的静态压缩量。空气弹簧多用于火车、汽车和一些消极隔振的场合。如工业用消声室，在几百吨混凝土结构下垫上空气弹簧，向内充气压力达 10^6 Pa，固有频率接近 1 Hz。

空气弹簧的缺点是需要有压缩气源及一套复杂的辅助系统，造价昂贵，并且荷重只限于一个方向，故一般工程上很少采用。

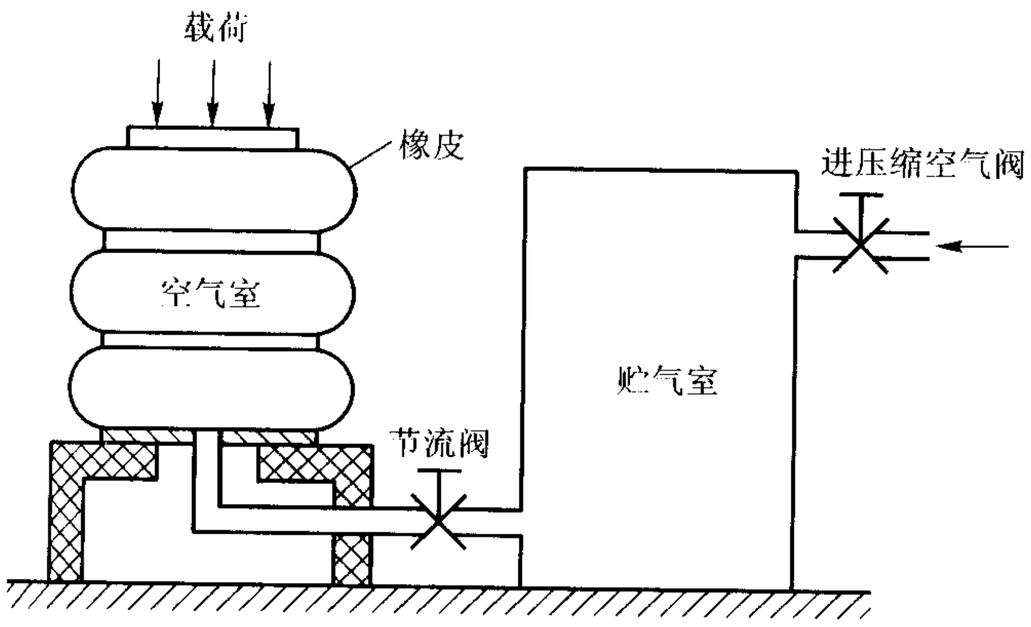


图 5－4－25　空气弹簧的构造原理

2. 隔振垫

隔振垫是较常用的隔振材料，常用的其他隔振垫有橡胶、软木、毛毡、玻璃纤维等。这类隔振垫的优点是价格低廉、安装方便，可根据需要切成任何形状和大小，并可重叠放置，可获得良好的隔振效果。

在隔振垫中，橡胶隔振垫近几年发展得比较快。常见的有肋状垫、开孔的镂孔垫、凸台橡胶垫（钉子垫）及 WJ 型橡胶垫等，如图 5－4－26 所示。

WJ 型橡胶垫是一种新型橡胶垫，它在橡胶垫的两面有四种不同高度和直径的圆台，分别交叉配置。

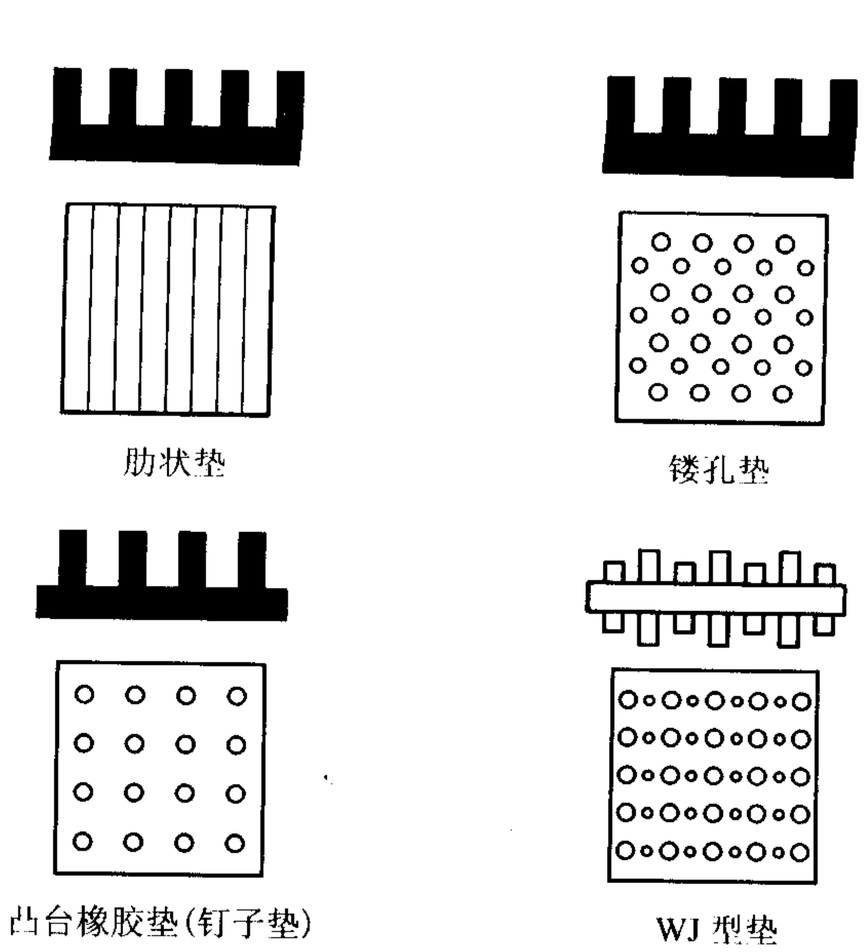


图 5－4－26　橡胶垫常见型式

当 WJ 型垫在载荷作用下，较高的凸圆台受压变形，较低的圆台尚未受压时，其中间部分受载而弯成波浪形，振动能量通过交叉圆台和中间弯曲波来传递，它能较好地分散并吸收任意方向的振动。由于原凸面斜向地被压缩，这便起到制动作用，在使用中无需紧固措施，即可防止机器滑动，承载越大，越不易滑移。

橡胶隔振垫的刚度是由橡胶的弹性模量和几何形状决定。由于表面是凸台及肋状等形式，故能增加隔振垫的压缩量，使固有频率降低。突台的疏密直接影响隔振垫的技术性能。

3. 软木

隔振用的软木与天然软木不同，它是用天然软木经高温、高压、蒸汽烘干和压缩制成的板状和块状物。软木具有一定的弹性，但动态弹性模量与静态弹性模量不同，一般软木静态弹性模量约为 1.3×10^6 Pa，动态弹性模量约为静态弹性模量的 2～3 倍。软木的静态压缩量中有一部分是永久变形。计算固有频率时应扣除这一部分不可恢复的压缩量。软木隔振系统的固有频率一般可控制在 20～30 Hz 范围内。软木的优点是质轻、耐腐蚀、保温性能好、加工方便等。软木不宜于低频隔振，并且它的隔振效果会随着晶粒粗细、软木层厚度、载荷大小，以及结构形式不同而发生变化。

4. 毛毡

玻璃纤维、矿渣棉和各类毛毡均是良好的隔振材料。

玻璃纤维和矿渣棉等材料耐腐蚀，防火，弹性好，其性能不随温度而变化。它们主要用于机器设备的隔振以及特殊建筑物基础的隔振。这类材料容重在 82～122 kg/m^3，纤维直径约为 8～10 μm 的，易作隔振垫层；而容重小，纤维直径小的易作吸声材料。如用酚醛树脂等黏合剂，把玻璃纤维或矿渣棉胶合成板状，会大大提高承载能力。常用的玻璃纤维板承载力为 $(1\sim2)\times10^4$ Pa，阻尼比为 0.04～0.07，自由状态的最佳厚度易取 5～15 cm 范围，隔振系统的固有频率为 5～10 Hz。

其他种类毛毡应防腐，防虫，易用油纸或塑料薄膜予以包裹，缝隙易用沥青涂抹密封。

四、动力吸振技术

动力吸振是振动控制中常用的方法之一，通过动力吸振器吸收主振动系统的振动能量，可以达到降低主振动系统振动的目的。其种类主要有无阻尼动力吸振器、阻尼动力吸振器、复式动力吸振器和非线性动力吸振器等。

（一）无阻尼动力吸振器

1. 动力吸振原理

如图 5－4－27 所示的单自由度系统，质量为 M，劲度为 K，在一个频率为 ω、幅值为 F_A 的简谐外力激励下，系统将做强迫振动。对于无阻尼系统，可以得到质量块 M 的强迫振动振幅为：

$$A_0=\frac{X_{st}}{1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \tag{5-4-36}$$

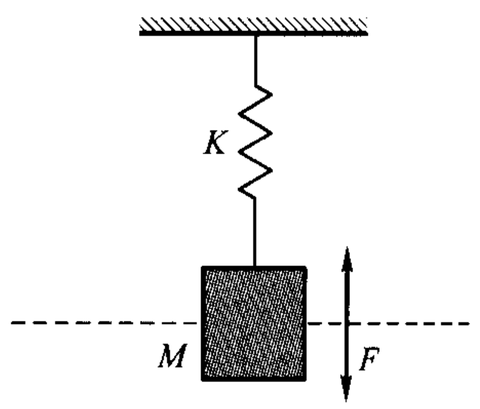


图 5－4－27 单自由度强迫振动系统

式中：ω_0——$\omega_0=\left(\frac{K}{M}\right)^{0.5}$，为振动系统的固有频率；

X_{st}——$X_{st}=\frac{F_A}{K}$，表示质量块在非简谐外力 F_A 作用下发生了静位移。

由上式可见：当激励频率接近或等于系统固有频率 ω_0 时，其振幅就变得很大。实际振动系统总是具有一定的阻尼，因此振幅不可能无穷大。在考虑系统的黏性阻尼 c 之后，其强迫振动的振幅则为：

$$A=\frac{X_{st}}{\sqrt{\left[1-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2+\left[2\times\left(\frac{c}{c_0}\right)\times\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)\right]^2}} \tag{5-4-37}$$

式中：$c_0 = 2\ (MK)^{0.5}$，为临界阻尼系数。

对于自由衰减振动系统，只有当系统阻尼小于临界阻尼时，才能够得到衰减振动解；而当系统阻尼大于临界阻尼时，就得到非振动状态的解。

图 5－4－28 给出了式（5－4－36）和式（5－4－37）代表的一组曲线。由图可见：由于阻尼的存在，使得强迫振动的振幅减小，阻尼比 c/c_0越大，振幅的降低越明显，特别是在$\frac{\omega}{\omega_0} = 1$ 的附近，阻尼的减振作用尤其明显。因此，当系统存在相当数量的黏性阻尼时，一般可以不考虑附加措施减振或吸振。

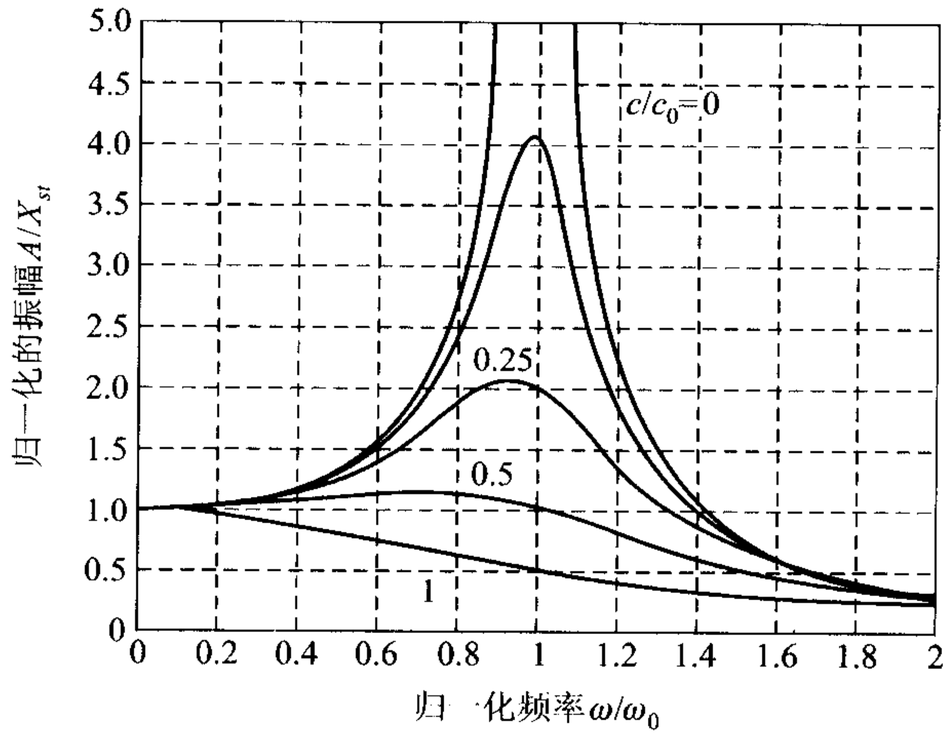


图 5－4－28　单自由度系统的强迫振动振幅

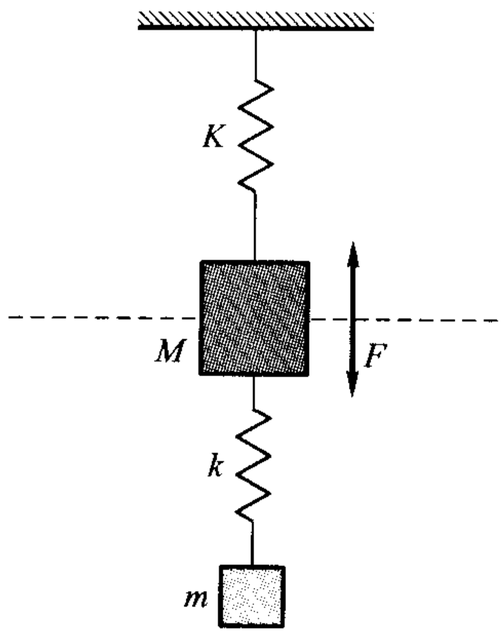


图 5－4－29　附加动力吸振器的强迫振动系统

当系统阻尼很小时，动力减振将是一个有效的办法。如图 5－4－29 所示，在主系统附加一个动力吸振器，动力吸振器的质量为 m，劲度为 k。由主系统和动力吸振器构成的无阻尼二自由度系统强迫振动方程的解为：

$$\begin{cases} A = \dfrac{X_{st}\left[1-\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]}{\left[1-\left(\dfrac{\omega}{\omega_b}\right)^2\right]\left[1+\dfrac{k}{K}-\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]-\dfrac{k}{K}} \\ B = \dfrac{X_{st}}{\left[1-\left(\dfrac{\omega}{\omega_b}\right)^2\right]\left[1+\dfrac{k}{K}-\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]-\dfrac{k}{K}} \end{cases} \tag{5-4-38}$$

式中：A——主振动系统强迫振动振幅；

B——动力吸振器附加质量块的强迫振动振幅；

ω_b——$\omega_b = \sqrt{\dfrac{k}{m}}$，为动力吸振器的固有频率。

这个二自由度系统的固有频率可以通过令上式的分母为零得到：

$$\omega_{1,2} = \frac{1}{2}\left[\left(\frac{K+k}{M}+\frac{k}{m}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{K}{M}-\frac{k}{m}\right)^2+2\frac{k}{M}\left(\frac{k}{m}+\frac{K}{M}\right)+\left(\frac{k}{M}\right)^2}\right] \tag{5-4-39}$$

$$= \frac{\omega_0^2}{2}\left[1+\lambda^2+\mu\lambda^2 \pm \sqrt{(1-\lambda^2)^2+\mu^2\lambda^4+2\mu\lambda^2(1+\lambda^2)}\right]$$

式中：ω_0——$\omega_0 = \sqrt{\dfrac{K}{M}}$，为主振动系统的固有频率；

μ——$\mu = \dfrac{m}{M}$，为吸振器与主振动系统的质量比；

λ——$\lambda = \dfrac{\omega_b}{\omega_0}$，为吸振器与主振动系统的固有频率之比。

如果激振力的频率恰好等于吸振器的固有频率，则主振动系统质量块的振幅将变为零，而吸振器质量块的振幅为：

$$B = -\frac{K}{k}X_{st} = -\frac{F_A}{k} \tag{5-4-40}$$

此时，激振力及其动力吸振器共振，而主振动系统保持不动，这就是动力吸振器名称的由来。动力吸振器的使用是有条件的，主要适用于激振频率等于系统固有频率，且激振频率基本恒定；主振动系统阻尼较小；主振动系统有减小振动要求的场合。

2. 无阻尼动力吸振器设计步骤

（1）通过计算或测试，确定激振频率，并估算激振力幅值大小；

（2）确定吸振器弹簧劲度，使得吸振器振幅为空间许可的合理值，并且弹簧能够经受这一振幅下的疲劳应力；

（3）选择吸振器质量，满足且选择一定质量比，这是为了使主振动系统能够安全工作，在两个新的固有频率间应有一定的间隔频带；

（4）检验：将设计生产好的吸振器安装到主振动系统上，让主振器工作，检查吸振效果，如有问题再修改设计。

（二）阻尼动力吸振器

1. 阻尼动力吸振器的原理

如果在动力吸振器中设计一定的阻尼，可以有效拓宽吸振频带，如图 5－4－30 所示，在主振系统上附加一阻尼动力吸振器，吸振器的阻尼系数为 c，则主振动系统的质量块和吸振器的质量块分别对应的振幅为：

$$\begin{cases} A = X_{st} \cdot \sqrt{\dfrac{(2\beta f)^2 + (f-\lambda)^2}{(2\beta f)^2[(1+\mu)f^2-1]^2 + [\mu\lambda^2 f^2 - (f^2-1)(f^2-\lambda^2)]^2}} \\ B = X_{st} \cdot \sqrt{\dfrac{(2\beta f)^2 + \lambda^2}{(2\beta f)^2[(1+\mu)f^2-1]^2 + [\mu\lambda^2 f^2 - (f^2-1)(f^2-\lambda^2)]^2}} \end{cases} \tag{5-4-41}$$

式中：A——主振动系统强迫振动振幅；

B——动力吸振器附加质量块的强迫振动振幅。

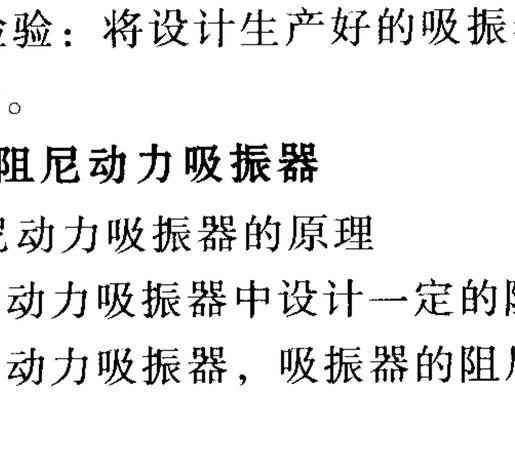


图 5－4－30 阻尼动力吸振器的强迫振动系统

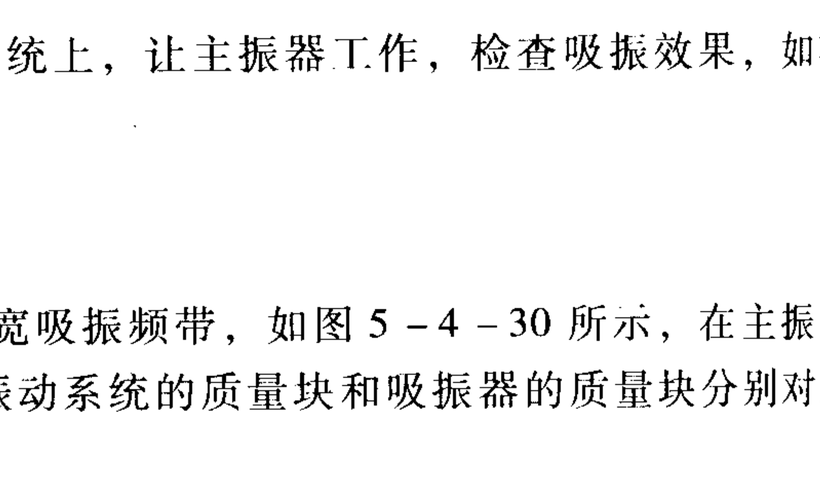


图 5－4－31 吸振器阻尼与主振动系统振幅的关系曲线

式中各主要参数为归一化频率 $f = \dfrac{\omega}{\omega_0}$；固有频率比 $\lambda = \dfrac{\omega_b}{\omega_0}$；临界阻尼比 $\beta = \dfrac{c}{2\sqrt{mk}}$；质量比 $\mu = \dfrac{m}{M}$。

吸振阻尼对主振动系统振幅具有影响，这种影响可以从图 5－4－31 中看出。图中给出的调谐系统主

要参数为 $\mu=0.1$，$\lambda=1$，阻尼比 β 变化范围从 0 到 ∞。由图可见，当吸振器无阻尼时，主振系统的共振峰为无穷大；当吸振器阻尼无穷大时，主振动系统的共振峰同样也为无穷大；只有当吸振器具有一定阻尼时，共振峰才不至于为无穷大。因此，必然存在一个合适阻尼值，使得主振动系统的共振峰最小，这个合适的阻尼值就是动力吸振设计的一个重要任务。

由图 5-4-31 还可发现：无论阻尼取何值，曲线都通过 P、Q 两点。这一特点为阻尼动力吸振器的设计优化给出了限制，如果将主振动系统的两个共振峰设计到 P、Q 两点附近，则主振系的振幅将大大降低。

与无阻尼动力吸振器不同的是，阻尼动力吸振器受频带的影响较小，因此称为宽带吸振器。

2. 阻尼动力吸振器设计步骤

（1）根据主振动系统的质量 M 和固有频率，选择吸振器的质量 m，并计算质量比；

（2）根据 $\lambda=\dfrac{\omega_b}{\omega_0}=\dfrac{1}{1+\mu}$，确定吸振器弹簧劲度 $k=m\omega_b^2$；

（3）根据 $\left(\dfrac{c}{c_0}\right)^2=\dfrac{3}{8(1+\mu)^3}$，计算黏性阻尼系数；

（4）根据下式计算主振系的最大振幅：

$$\frac{A_{\max}}{X_{st}}=\sqrt{1+\frac{\mu}{2}} \tag{5-4-42}$$

（5）检验：将设计生产的吸振器安装到主振动系统上，让主振器工作，检查吸振效果，必要时应修改设计。

（三）防振沟

在振动传播途径上挖沟以隔绝振动的传播，这种以防振为目的而设计的沟叫做“防振沟”。如果振动主要是传播地面的表面波的话，这种措施是很有效的，一般来说，防振沟越深隔振效果越好，而沟的宽度对隔振效果影响不大。防振沟中间以不填充材料为好，若为了防止其他物体落入沟内，可适当填些松散的锯末、膨胀珍珠岩等材料。

防振沟可用在积极防振上，即在振动的机械设备周围挖掘防振沟，防止振动向振源四周扩散；也可用在消极防振上，即在怕受振动的精密仪器附近，在垂直干扰振动的传来的方向上挖掘防振沟。

（四）阻尼减振技术

阻尼是指系统损耗能量的能力，从减振的角度看，就是将机械振动能量转变为热能或其他可以消耗的能量，从而达到减振的目的。阻尼的作用主要有 5 个方面：阻尼有助于降低机械结构的共振振幅，从而避免结构因动应力达到极限所造成的破坏；阻尼有助于机械系统受到瞬间冲击后，很快恢复到稳定状态；阻尼有助于减少因机械振动所产生的声辐射，降低机械噪声；阻尼可以提高各类机床、仪器等的加工精度、测量精度和工作精度；阻尼有助于降低结构传递振动的能力。

阻尼减振技术就是充分运用阻尼耗能的一般规律，适当增加系统中阻尼，从材料、工艺、设计等各项技术问题上发挥阻尼在减振方面的潜力。

1. 阻尼减振降噪的原理

阻尼的大小采用损耗因数 η 来表示，定义为薄板振动时每周期时间内损耗的能量 D 与系统最大弹性势能 E_P 之比除以 2，即：

$$\eta=\frac{1}{2\pi}\frac{D}{E_P} \tag{5-4-43}$$

薄板受迫振动的位移和振速分别为：

$$y=y_0\cos(\omega t+\varphi) \tag{5-4-44}$$

$$u=\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t}=-\omega y_0\sin(\omega t+\varphi) \tag{5-4-45}$$

阻尼在位移 $\mathrm{d}y$ 上所消耗的能量为：

$$\delta u \frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} = \delta u^2 \mathrm{d}t$$

因此，阻尼在一个周期内耗损的能量为：

$$D = \delta\omega y_0^2 \int \sin(\omega t + \varphi)\mathrm{d}(\omega t) = \pi\delta\omega y_0^2 \tag{5-4-46}$$

系统最大势能为：

$$E_P = \frac{1}{2} k y_0^2 \tag{5-4-47}$$

故损耗因数为：

$$\eta = \frac{\omega\delta}{k} = \frac{2\delta}{\delta_0} \times \frac{\omega}{\omega} = 2\xi \frac{f}{f_0} \tag{5-4-48}$$

从以上分析可以看出，损耗因数η除与材料的临界阻尼系数R_c有关外，还与系统的固有频率f_0及激振力频率f有关。对同一系统，激振力频率越高，则η越大，即阻尼效果越好。材料的损耗因数η是通过实际测定求得，常用的测量方法有频率响应法和混响法。

2. 阻尼材料

（1）阻尼材料的分类：现有的阻尼材料可以分为5类：①弹性阻尼材料，如橡胶类、沥青类和塑料类；②复合材料，包括层压材料以及混合材料；③阻尼合金，基体包括铁基、铝基等；④库仑摩擦阻尼材料，如不锈钢丝网、钢丝绳和玻璃纤维；⑤其他类，如阻尼陶瓷、玻璃等。

目前在工程上应用较多的是弹性阻尼材料。这类阻尼材料具有很大的阻尼损耗因数和良好的减振性能，但适应温度的变化范围窄，只要温度稍有变化，其阻尼特性就会有较大的变化，性能不够稳定，不能作为机器本身的结构件，同时对于一些高温场合也不能应用。因此，人们研制了大阻尼合金，它具有比一般金属材料大得多的阻尼值，并耐高温，可以直接用这种材料作机器的零件，具有良好的导热性，只是价格贵。复合阻尼材料是一种由多种材料组成的阻尼板材，通常做成自黏性的，可由铝质约束层、阻尼层和防黏纸组成。这种材料施工工艺简单，有较好的控制结构振动和降低噪声的效果。

（2）阻尼材料的影响因素：影响因素主要分为以下几点：

① 温度的影响：温度是影响阻尼材料特性的重要因素。图5-4-32表示了在某一频率下阻尼材料的弹性模量E'和阻尼损耗因数η随温度T^w变化的曲线，可以看到3个明显的区域。Ⅰ区称为玻璃态区，这时材料的E'值有最大值，且随T^w的变化其值变化缓慢，而η值最小，但上升速率较大；Ⅱ区称为玻璃态转变区，其特点是随温度的增加，E'值很快下降，当$T^w = T_r^w$时，η有最大值；Ⅲ区称为高强态区或类橡胶态区，E'与η都很小，且随温度的变化亦小。

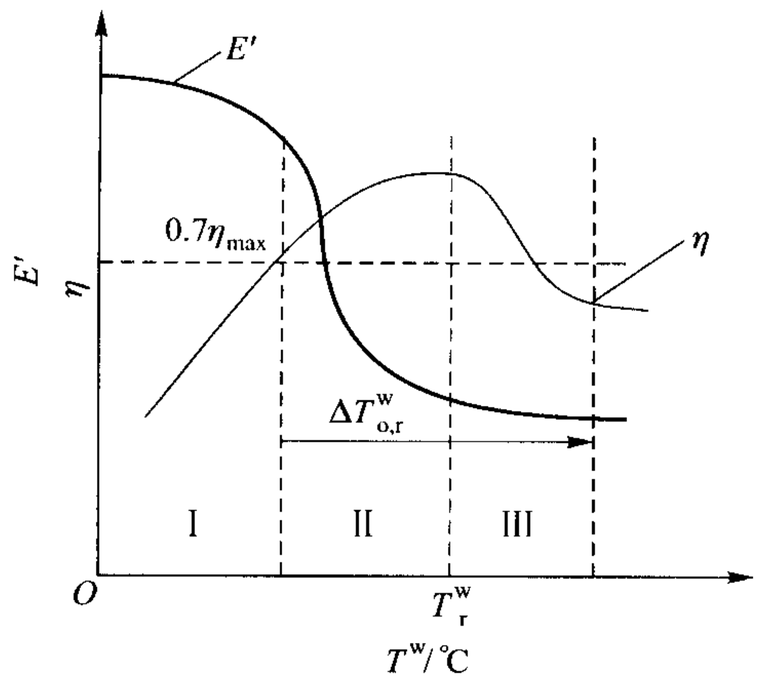


图5-4-32 某一频率下，E'、η随温度变化曲线

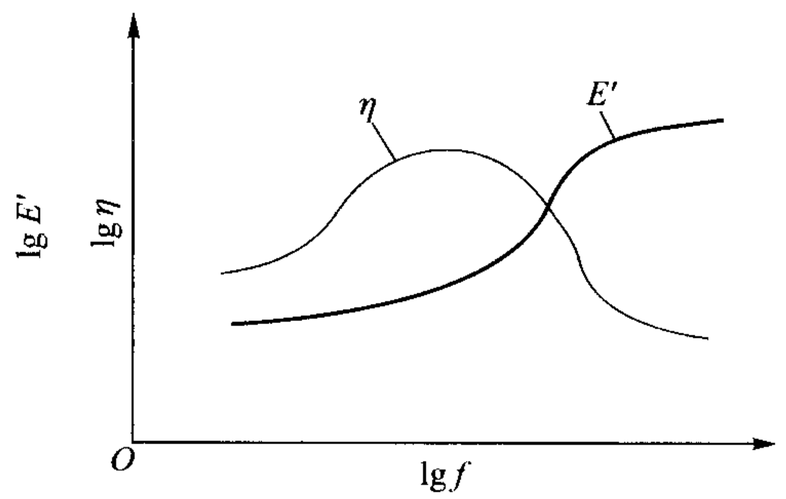


图5-4-33 某一温度下，E'、η随频率f变化的曲线

② 频率f的影响：图5-4-33表示了频率变化对阻尼材料特性的影响。由图可以看出，在某温度下，弹性模量E'随频率f的增加始终呈增加趋势，而损耗因数η在一定的频率下有最大值。定性地从E'曲线的

形状来看，它与阻尼材料的温度特性相反。也就是说阻尼材料的低温特性对应高频特性，而高温特性对应于低频特性。

③ 其他环境因素的影响：动态应变和静态预载对阻尼材料高弹区的动态特性亦具有重要影响。动态应变增加，弹性模量 E' 减少而阻尼损耗因数 η 增加；而当静态预载增加时，弹性模量 E' 增加，阻尼损耗因数下降。

3. 附加阻尼结构

阻尼减振技术是通过阻尼结构得以实施的，而阻尼结构又是由各种阻尼基本结构与实际工程结构相结合而组成的。阻尼基本结构大致分为离散型的阻尼器件和附加型的阻尼结构。

离散型阻尼器件可分为两类。一类是应用振动隔离的阻尼器件，如金属弹簧减振器、黏弹性材料减振器、空气弹簧减振器等；另一类是应用与吸收振动的阻尼器件，如阻尼吸振器、冲击阻尼吸振器等。

附加型阻尼结构大致分为三类：一类是直接黏附阻尼结构，如自由层阻尼结构、约束层阻尼结构、插条式阻尼结构等；第二类是直接附加固定的阻尼结构，如封砂阻尼结构、空气积压薄膜阻尼结构；第三类是直接固定接合的阻尼结构，如接合面阻尼结构等。附加型阻尼结构是提高机械结构阻尼的主要结构形式之一。

附加型阻尼结构就是通过在各种结构上直接黏附阻尼材料结构层，可增加结构件的阻尼性能，提高其抗振性和稳定性。直接黏附的阻尼结构主要有自由阻尼结构和约束阻尼结构。

（1）自由阻尼结构：自由阻尼结构是将一层大阻尼材料直接黏附或涂抹在需要做减振处理的机器零件或结构件上，机械结构振动时，阻尼层随结构件变形，产生交变的应力和应变，起到减振和阻尼的作用。如图 5－4－34 所示，当基层板做弯曲振动时，板和阻尼层自由压缩和拉伸，阻尼层将损耗较大的振动能量，从而使振动减弱。为了进一步增加阻尼层的拉伸与压缩，可在基层板与阻尼层之间再增加一层能承受剪切力的间隔层。当基本弹性层产生弯曲振动时，间隔层有类似于杠杆的放大作用，可增加阻尼层的拉压变形，从而增加阻尼材料耗能作用。

（2）约束阻尼结构：若将阻尼层牢固地粘贴在基本弹性层后，再在阻尼层上部牢固粘贴刚度较大的约束层，这种结构叫做约束阻尼结构。约束阻尼结构是由基本弹性层、阻尼层和弹性材料层（也称约束层）构成，如图 5－4－35 所示。当基本弹性层发生弯曲振动时，阻尼层上下表面各自产生压缩和拉伸变形，使阻尼层受剪切应力和应变，从而耗散结构振动的能量。约束阻尼结构比自由阻尼结构可耗损更多的能量，因此具有更好的减振效果。

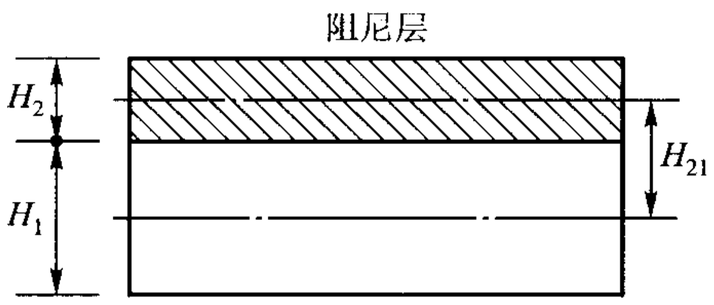


图 5－4－34　自由阻尼结构示意图

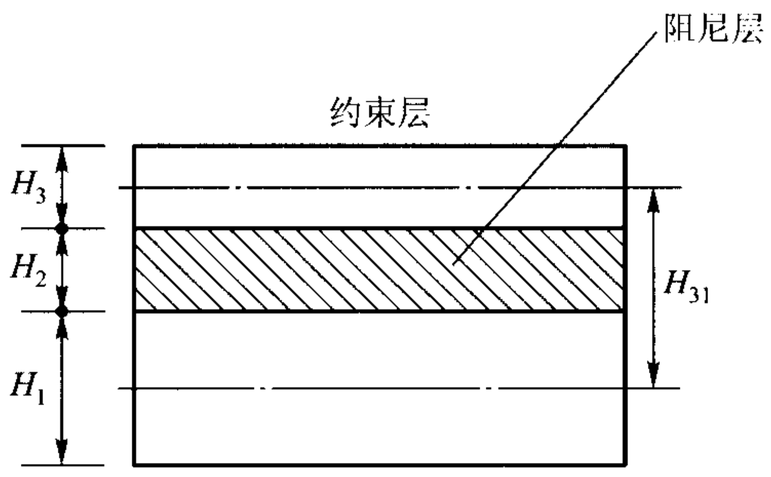


图 5－4－35　约束阻尼结构示意图

4. 阻尼基本结构的应用

附加阻尼结构特别适用于梁、板、壳件的减振，在汽车外壳、飞机舱壁等薄壳结构的抗振保护和控制中较为广泛采用。在阻尼结构的形式上，应根据工作条件等要求合理选取，综合考虑。通常自由阻尼结构适合于拉压变形，而约束阻尼结构适用于剪切变形。用两种不同质地的阻尼材料支撑多层结构，可提高阻尼性能，由于多层结构使用不同的玻璃态转变温度和模量的阻尼材料，可加宽温度带宽

和频率带宽。

阻尼处理位置对于减振性能影响显著，有时在结构的全面积上进行阻尼处理可能造成浪费，而实际工程结构也只能进行局部阻尼处理。如何使局部阻尼处理达到最佳的阻尼效果是阻尼处理位置的优化问题，可以根据不同阻尼结构的阻尼机理，相应进行优化处理以达到最佳的性价比。

第三节 电磁辐射和放射性污染治理技术基础

一、概述

（一）电磁辐射污染

电磁辐射是以电磁波的形式在空间环境中传播的，不能静止地存在于空间某处。尽管电磁波看不见摸不着，但它确实存在于我们周围，且可监测到。人类工作和生活的环境充满了电磁辐射。电磁辐射污染是指人类使用产生电磁辐射的器具而泄漏的电磁能量流传播到室内外空气中，其量超出环境本底值，且其性质、频率、强度和持续时间等综合影响，引起周围受辐射影响人群的不适感，并使健康和福利受到损害。这里所谓对健康的影响，是指从对人体生理影响到急性病、慢性病以及更为严重乃至死亡的广泛范围的影响；所谓对福利的影响，则包括与人类共存的动植物、自然环境、各种器物等的影响以及经过人工改造的自然因素的总体。

电磁辐射污染源可以分为天然电磁辐射和人为电磁辐射。天然电磁辐射是由自然界的某些自然现象引起的，比如自然界的雷电、火花放电、火山喷发、太阳黑子活动和宇宙间恒星爆发等。一般情况下，天然辐射的强度对人类的健康影响不大，而通信和一些仪器设备的电磁干扰很强烈。人为电磁辐射主要来源于人们在生产和生活中使用的各种电子设备，通过其电源线、天线、控制线、信号线以及设备内部的元器件，以不同途径向外界空间辐射和泄漏电磁能量，对环境造成电磁辐射污染。环境中的电磁污染主要来源于此。

根据频率不同，人为电磁场源分为工频场源和射频场源。工频场源主要是由大功率输电线路所产生的电磁污染，也有一些是放电型污染源；射频场源则主要由于无线电设备或射频设备工作时产生的电磁感应及电磁辐射。

电磁辐射污染有三种危害，即干扰危害、对人体健康的危害和引爆引燃的危害。例如，电磁辐射对人体健康的损害就包括对人体的直接致病性损害，导致胎儿先天性异常的间接损害，导致遗传物质发生突变的潜在性损害等。因此，电磁辐射也是造成公害的主要污染物之一。

（二）放射性污染

在一些元素中，它们的原子核是不稳定的，能够自发地改变核结构而转变成另一种核，这种现象称为核衰变。在发生核衰变的同时，总是伴随不稳定的核放出带电的或不带电的粒子，这种核衰变称为放射性衰变，这种由原子核放射出来的各种粒子称为核辐射。具有这种性质的物质叫做放射性物质，铀、钍和镭是最常见的放射性物质。放射性物质衰变时可从原子核中释放出 α 射线、β 射线、γ 射线和 X 射线等。

环境中放射性的来源分天然辐射源和人工辐射源。天然辐射主要来自宇宙辐射，以及地球和人体内的放射性物质。而对于公众造成的自然条件下原本不存在的辐射，这类辐射源称为人工辐射源，人工辐射源的主要来源是核能生产、核武器制造及核试验、核事故、放射性同位素的生产和应用、放射性废物治理和核设施退役等。放射性污染，就是指由于人类活动造成物料、人体、场所、环境介质表面或者内部出现超过国家标准的放射性物质或者射线。放射性污染又称辐射污染，主要来自于核试验造成的全球性放射性污染，核能生产、放射性同位素的生产和应用导致放射性物质以气载或液态的形式释放而直接进入环境，核材料贮存、运输或放射性废物处理与处置可能造成的放射性物质间接地进入环境。

放射性废物是指含有放射性核素或被放射性核素所污染，其浓度或比活度大于审管部门确定的清洁解控水平，预期不会再被利用的废物。放射性废物主要产生于核燃料的生产过程、核反应堆运行过程、核燃料后处理过程以及放射性同位素应用过程中。放射性废物是对人体产生辐射危害的重要辐射源和对环境造成污染的环境污染源，放射性废物的处理是辐射防护与环境保护的重要组成部分。

二、电磁辐射污染防治技术

（一）电磁辐射污染防治的原理与基本原则

通过大量的实地调查，发现造成电磁辐射场强过高的原因是多方面的，其中主要的原因是电磁辐射体本身电磁能泄漏和辐射体布局不合理造成的。因此，电磁辐射防护与治理的原理是，首先要抑制电磁辐射源，包括所有电子设备以及电子系统，人们称其为主动防护与治理。具体做法是：设备的合理设计；加强电磁兼容性设计的审查与管理；做好模拟预测和危害分析工作等。其次是被动防护与治理，即从被辐射方着手进行防护，具体做法有：采用调频、编码等方法防治干扰；对特定区域和特定人群进行屏蔽保护。

电磁辐射防治措施的基本原则是：

（1）屏蔽辐射源或辐射单元；

（2）屏蔽工作地点；

（3）采用吸收材料，减少辐射源的直接辐射；

（4）清除工作现场二次辐射源，避免或减少二次辐射；

（5）屏蔽设施必须有很好的接地；

（6）加强个人防护，如穿具有屏蔽功能的工作服、戴具有屏蔽功能的工作帽和眼镜等。

（二）高频电磁辐射防治的基本方法

1. 屏蔽技术

（1）屏蔽的分类：电磁干扰过程必须具备三要素：电磁干扰源、电磁敏感设备、传播途径。屏蔽措施主要是从电磁干扰源及传播途径两方面来防治电磁辐射：一方面抑制屏蔽室内电磁波外泄即抑制电磁干扰源；另一方面阻断电磁波的传播途径以防止外部电磁波进入室内。根据不同的分类方法，将屏蔽进行分类。

① 按照屏蔽的方法分为主动场屏蔽与被动场屏蔽：两者的区别在于场源与屏蔽体的位置不同。场源位于屏蔽体之内，用来限制场源对外部空间影响的称为主动场屏蔽；场源位于屏蔽体之外，主要用于防治外界电磁场对屏蔽室内影响的为被动场屏蔽。

② 按照屏蔽的内容分为电磁屏蔽、静电屏蔽和磁屏蔽三种：电磁屏蔽是指人们采取一定的措施以消除电磁感应的影响；静电屏蔽则是利用静电场的特性将电力线终止于屏蔽体的表面上从而抑制电场的干扰；磁屏蔽则是用高磁导率材料制成的磁屏蔽体将磁场封闭在内，以防止电磁辐射的危害。实际防治工作中采用最多的是电磁屏蔽。

（2）电磁屏蔽基本原理：电磁屏蔽作用的机理是利用电磁感应现象：外界交变电磁场的电磁感应作用，使屏蔽壳体内产生感应电流，感应电流在屏蔽空间能产生与外界电磁场方向相反的电磁场，通过内外电磁场的相互作用从而达到屏蔽效果。电磁屏蔽就是利用某种材料制成的封闭物体所具有的两重作用，封闭体一方面可以减轻甚至消除外部电磁场对其内部的影响，同时封闭体的外部区域也不受其内部电磁场的影响。

对于电磁场，电场分量 E 和磁场分量 H 是同时存在的。只是当频率 f 越低、高磁场场源越近（即近场强区）时，随场源特性不同，电场分量 E 和磁场分量 H 有很大的差别：高电压、低电流场源，近场以电场为主；低电压、高电流场源，近场以磁场为主。随着频率与场源距离的增大，平面波电磁场起主要作用。

电磁场屏蔽能起作用主要是依靠屏蔽体的吸收、反射作用。

① 吸收：电损耗、磁损耗及介质损耗等共同组成了屏蔽体的吸收作用。通过这些损耗转化为热消耗在屏蔽体内，从而达到阻止电磁辐射和防止电磁干扰的目的。

② 反射：主要利用介质（空气）与金属的波阻抗不一致而产生反射作用。二者阻抗相差越大，反射作用越明显。

③ 电磁波在屏蔽体表面及屏蔽体内的吸收与反射：入射电磁波遇到屏蔽体后，由于两者波阻抗不一致而使一部分电磁波被反射回空气介质中，但仍有一部分能穿透屏蔽体。穿透的电磁波由于屏蔽体在电磁场中产生的电损耗、磁损耗及介电损耗等而消耗部分能量，即部分电磁波被吸收，吸收后剩余的电磁波在到达屏蔽体另一表面时同样由于阻抗不匹配又会有部分电磁波反射回屏蔽体内，形成在屏蔽体内的多次反射，而剩余部分则穿透屏蔽体进入空气介质。

（3）电磁屏蔽效果：电磁屏蔽效果的好坏可用电磁屏蔽效能 S_E 来评价。为了定量衡量这种效能，把区域屏蔽后测量点的功率密度与屏蔽前同一测量点的功率密度相比较，这个降低的值用分贝数（dB）来表示：

对于电场：

$$S_E = 20 \lg_{10} \frac{E_b}{E_a} \tag{5-4-49}$$

对于磁场：

$$S_H = 20 \lg_{10} \frac{H_b}{H_a} \tag{5-4-50}$$

式中：E_b、E_a——装屏蔽体前、后的电场强度，V/m；

H_b、H_a——装屏蔽体前、后的磁场强度，A/m。

由于各种材料吸收和反射的效果不同，材料的选择成为屏蔽效果好坏的关键。材料内部电场强度 E 与磁场强度 H 在传播过程中均按指数规律迅速衰减，用电磁波的衰减系数 α 来衡量电磁波在导体材料中衰减的快慢，α 值越大，衰减得越快，屏蔽效果越好。也可以用屏蔽效率来表现屏蔽作用的大小，所谓屏蔽体的屏蔽效率（%），取决于电场和磁场在屏蔽前后的强度比值，即：

$$\alpha_E = \frac{E_1 - E_2}{E_1} \times 100\% \tag{5-4-51a}$$

或：

$$\alpha_H = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \times 100\% \tag{5-4-51b}$$

式中：α_E——电场屏蔽效率，%；

α_H——磁场屏蔽效率，%；

E_1、E_2——屏蔽前后电场强度，V/m；

H_1、H_2——屏蔽前后磁场强度，A/m。

（4）电磁屏蔽室的设计制作：影响电磁屏蔽壳体屏蔽效果的因素归纳起来有如下几个方面：

洞孔：屏蔽壳体上出现的各种不连续洞孔的大小及其分布密度。

缝隙：屏蔽体上的焊接缝隙，可拆卸板或镶板缝隙及门缝等。

屏蔽材料：所选屏蔽材料的种类或材质、电气性能如电导率和磁导率等。

屏蔽空间的尺寸所形成的空腔振谐：当封闭的屏蔽壳体受到大功率高频设备泄漏的相关频率电磁能量的激励时，将产生谐振；甚至壳体中的一些大功率脉冲（当脉冲的前后沿非常陡峭时）也能导致这种谐振的出现，从而降低了屏蔽效能。

混合屏蔽：不同种屏蔽材料在屏蔽壳体中混合使用，会影响屏蔽的效果。

天线效应：各种金属导线引入屏蔽体空间内，会影响屏蔽效果。

屏蔽效果的好坏也与到辐射源的距离、辐射的频率等有关。根据上述影响电磁屏蔽体屏蔽效果因素的分析，屏蔽结构设计一般要求如下：

① 屏蔽材料的选择：屏蔽材料应选择导电性能好和磁导率高的材料，例如铜、铝等。高频段一般选用铜、铝为屏蔽材料。对于中短、波频段，可用金属导体将辐射源屏蔽，并加以良好的接地。对于超短波

和微波频段，一般采用屏蔽材料与吸收材料制成复合材料，然后再做成屏蔽体。

② 屏蔽结构设计合理：在设计屏蔽结构时，要求尽量减少不必要的开孔、缝隙以及尖端突出物。要求屏蔽体与被屏蔽设备之间必须保持一定距离，保持屏蔽结构的电气接触性能良好，并妥善进行屏蔽接地。电磁屏蔽室内通常有各种仪器设备，工作人员还要进进出出，这就要求屏蔽室有门、通风孔、照明孔等工作配套设施，这就会使得屏蔽室出现不连续部位。孔洞上接金属套管可以减小孔洞的影响，套管与孔洞周围要有可靠的电气连接；孔洞的尺寸要小于干扰电波的波长。另外，屏蔽室的每一条焊缝都应做到电磁屏蔽。连续焊接接缝的射频特性最好。

③ 屏蔽厚度的选用：一般认为，接地良好时，屏蔽效率随屏蔽厚度的增加而增高。但鉴于射频（特别是高频波段）的特性，所以厚度无需无限制地增加。由试验可知，当屏蔽厚度到达 1 mm 以上时，其屏蔽效能的差别不显著。

④ 屏蔽网孔大小（目数）及间距的问题：如选用屏蔽金属网，对于中、短波，一般目数小些就可以保证屏蔽效果；而对于超短波、微波来说，屏网目数一定要大。由实验得知：屏蔽网的网孔越密，网丝的直径越粗，其屏蔽效能越高；对于同一种直径的网材，相同规格铜网的屏蔽效能要大于相同规格铁网的屏蔽效能；一般随频率增高，屏蔽材料的屏蔽效能也相应增大，当频率达到 3×10^8 Hz 左右时出现最大屏蔽效能，而后就随频率增高呈急剧下降趋势；一般双层金属网屏蔽效能大于单层网，当金属网间距在 5 ~ 10 cm以上时，双层网的衰减量相当于单层网的 2 倍。

一般情况下，屏蔽间距越大，电磁场强度的衰减就越快。为了提高屏蔽效果，可适当增大屏蔽体与场源的间距：间距太小，很可能达不到要求的屏蔽效果；间距过大，一方面会使屏蔽失去意义，另一方面会增加不必要的空间体积，给工作带来不便。一些常用设备主要部件的屏蔽间距为：高频输出变压器的水平屏蔽间距为 20 ~ 30 cm，垂直间距为 50 ~ 60 cm；在能保证屏蔽体有良好的高频电气接触性能与射频接地的条件下，振荡回路的屏蔽间距可缩小到 10 ~ 20 cm；为了保证馈线输出匹配良好，一般将屏蔽馈线所用的屏蔽馈筒到传输线之间的距离选择为 1/4 工作波长的奇数倍。

2. 接地技术

（1）机理：这里所谓接地是指屏蔽接地，接地可分为射频接地和高频接地两类。射频接地是将场源屏蔽体或屏蔽体部件内感应电流加以迅速的引流以形成等电势分布，避免屏蔽体产生二次辐射所采取的措施，是实践中常用的一种方法。高频接地就是将屏蔽内由于感应生成的高频电流迅速引入大地，使屏蔽体本身不致再成为高频的二次辐射，以保证高效的屏蔽效果。下文所介绍的接地，就是指高频接地。

（2）要求：高频接地是将设备屏蔽体和大地之间，或者与大地上可以看作公共点的某些构件之间，采用低电阻导体连接起来，形成电气通路，使屏蔽系统与大地之间形成一个等电势分布。考虑接地系统设计时一定要达到以下要求：①由于射频电流存在趋肤效应，故屏蔽体的接地系统表面积要足够大，以宽为 10 cm 的铜带为好；②为了保证接地系统的阻抗足够低，接地线要尽可能短；③要保证接地系统有良好的作用，要求接地应当避开 1/4 波长的奇数倍；④无论采取何种接地方式，都要求有足够的厚度，以维持一定的机械强度和耐腐蚀性。

（3）效果：在中、短波段，接地正确与否对电场屏蔽效果的影响很大，接地状态下的屏蔽效能相比，二者有显著的差异，相差可高达 30 dB，对磁场屏蔽效能则无明显影响。在短波段，特别是 20 ~ 30 MHz 频段以上，接地作用不太明显；对于微波段，屏蔽接地作用则更小。

3. 滤波

（1）滤波与滤波器：在许多射频设备生产过程中，通过线路所造成的线路干扰与线路辐射有日益严重的趋势。为了防治由于射频电源线路所造成的干扰，就要采取线路抑制措施，滤波是抑制电磁干扰最有效的手段之一。滤波即在电磁波的所有频谱中分离出一定频率范围内的有用波段。线路滤波的作用是保证有用信号通过的同时阻截无用信号通过。

滤波器是一种具有分离频带作用的无源选择性网络。所谓选择性就是它具有能够从输入端（或输出

端）电流的所有频谱中分离出一定频率范围内有用电流的能力。即在一个给定的通频带范围内，滤波器具有非常小的衰减，能让电能（电流）很容易通过；而在此频带之外滤波器具有极大的衰减，能抑制电能（电流）的通过。在防治电磁干扰信号的传导和某些辐射干扰方面，电源电磁干扰滤波器是相当有效的器件。

（2）滤波器的设计要点：滤波器是由电阻、电容和电感组成的一种网络器件。滤波器在电路中的位置设置根据干扰侵入途径来确定。在设计时尤其要注意截止频率、对象阻抗、衰减区域宽度和线圈 Q 值等几个因素。

4. 其他措施

电磁辐射防治还可采用其他方法：

采用电磁辐射阻波抑制器，通过反作用场的作用，在一定程度上抑制无用的电磁辐射；

新产品和新设备的设计制造时，尽可能使用低辐射产品；

从规划着手，对各种电磁辐射设备进行合理安排和布局，并采用机械化或自动化作业，减少作业人员直接进入强电磁辐射区的次数或工作时间。

另外，加强个体防护和安排适当的饮食，也可以抵抗电磁辐射的伤害。

（三）微波辐射的防治

为了防止和避免微波辐射污染环境而造成公害，影响人体健康，可采取相应的防护措施。微波辐射的安全防护原则为：减少辐射源的直接辐射，降低或杜绝微波泄漏，屏蔽辐射源及其附近的工作地点，加大工作点与辐射源的距离，采用个人防护用品及其他有效安全措施等。

1. 减少或杜绝辐射源的直接辐射或泄漏

根据微波传输原理，合理设计微波设备结构并采用适当的措施，减少直接辐射，并将设备的泄漏水平控制在安全标准以下。在微波设备制成之后，应对泄漏进行必要的测定，达到安全标准的产品才能投放市场。通过严格维修制度和操作规程，合理使用微波设备以减少不必要的伤害。例如，雷达等大功率发射设备操纵和调试时，要注意使用不同类型的吸收器、微波抑制器等。可利用等效天线或大功率吸收负载的方法将电磁能转化为热能散掉，从而减少微波天线的直接辐射。

2. 屏蔽辐射源

要把有害的微波辐射限制在一个有限空间，可采用反射屏蔽和吸收屏蔽两种方法。

反射微波辐射的屏蔽：使用板状、片状和网状金属组成的屏蔽壁来反射散射微波，可较大幅度地衰减微波辐射。板、片状的屏蔽壁比网状的屏蔽壁效果好，也有人用涂银尼龙布来屏蔽，效果也不错。

吸收微波辐射的屏蔽：微波辐射也常利用吸收材料进行微波吸收加以屏蔽。微波吸收材料是一种既可有效吸收微波频段电磁波又对微波频段电磁波的反射、透射和散射都极小的电子材料。目前电磁辐射吸收材料可分为谐振型和匹配型两类：谐振型吸收材料是利用某些材料的谐振特性制成的，其特点是材料厚度小，对较窄频率范围内的微波辐射有较好的吸收效果；匹配型吸收材料则是通过某些材料和自由空间的阻抗匹配以吸收微波辐射能。

微波吸收的常见方式有两种：一是仅在罩体或障板其中之一上贴附吸收材料，将辐射电磁波吸收；二是在屏蔽材料罩体和障板上都贴附吸收材料，以进一步削弱射频电磁波的透射。

3. 屏蔽辐射源附近的工作地点或加大工作点与场源的距离

微波辐射能量随距离加大而衰减，且波束方向狭窄，传播集中，遇到对场源无法进行屏蔽的情况时，就要采取对工作点进行屏蔽的措施。也可通过加大微波场源与工作人员或生活区的距离，来达到保护人民群众身体健康的目的。

4. 微波作业人员的个体防护

对于必须进入微波辐射强度超过照射卫生标准的微波环境操作的人员，可采取下列防护措施：

（1）穿戴微波防护服和防护头盔：根据屏蔽和吸收原理设计而成的三层金属膜布防护服，其内层是牢固棉布层，可防止微波从衣缝中泄漏照射人体；中间为涂有金属的反射层，可反射从空间射来的微波能

量；外层用介电绝缘材料制成，用以介电绝缘和防蚀，并采用电密性拉锁，袖口，领口、裤角口处使用松紧扣结构。也有用直径很细的钢丝、铝丝、柞蚕丝、棉线等混织金属丝布制作的防护服。现在出现了使用经化学处理的银粒，渗入化纤布或棉布的渗金属布防护服，使用方便，防护效果较好，其缺点在于银来源少且价格昂贵。

（2）戴防护面具：面部的防护可采用戴防护面具的方法。面具可做成封闭型（罩上整个头部），或半边型（只罩头部的后面和面部）。

（3）戴防护眼镜：眼镜可用金属网或薄膜做成风镜式，较受欢迎的是金属膜防护镜。

（四）静电防治

频率$f=0$的电磁场就是静电场。静电场虽然没有辐射的影响，但是高压静电放电同样对人体健康、机械设备及电子仪器等造成重大的危害，而且当静电积累到一定程度并引起放电且能量超过物质的引燃点时会引发静电火灾。

防止和消除静电危害主要从三个方面入手：第一是尽量减少静电的产生；第二是在静电产生不可避免的情况下，采取加速泄放静电的措施，以减少静电的积累；第三是当静电的产生、积累都无法避免时，要积极采取防止放电着火的措施。

1. 防止或减少静电的产生

选材时尽量考虑采用物性类同或导电性能相近的材料，尽量采用导体材料，不用或少用高绝缘材料。

改善装卸和运输方式，尽量减少摩擦和碰撞。

防止和减少不同物质的混合和杂质的混入。

控制速度（传动速度、流动速度、气体输送速度、排放速度等）。

增大接触面的平滑度，减小摩擦力。

2. 各种油料的防静电措施

液体易燃物质在流量大、流速高的情况下，可使油面静电电位很快上升，达到引燃点而引起着火，因此，要控制输送流量、速度。

采用合适的进油方式，尽量避免上部喷注，宜采用底部进油。

防止混入其他油料、水以及杂质，确保油料清洁。

油料搅拌时要均匀。

改善过滤条件，过滤器材料的选用、孔径安装部位都要符合规定，控制流过过滤器的速度和压力。

放料时避免泄喷，在需要放出油料时，开口部要大些，喷出压力应在 1 000 kPa 以下。

严格执行清洗规程。

3. 加速静电逸散，防止静电积累

加速静电荷的泄放。可采用良好的接地措施，改善材料的导电性等方法，如使用防静电添加剂，涂刷或者镀上防静电层，增加环境的相对湿度等。

中和消除静电。静电荷积累到一定程度后，消除静电可采用中和的办法。中和是指用极性相反的电荷去抵消积累的电荷，如采用不同极性的缓冲器。消除静电是指用人为的方法再产生相反极性的电荷来消除原来积累的电荷，可采用自感应式静电消除器、外加电源式静电消除器以及同位素静电消除器等。

4. 防止放电着火

安装放电器。在设备的合适位置上预先设置放电器，以便于释放积累的静电，如飞机的机翼后沿设有多组的放电器，以避免过载放电着火。

屏蔽带电体。采用隔离的办法来限制带电体对周围物体产生电气作用及放电现象。

加强静电的测量和报警。安装静电的测量和报警系统，及早发现危险，及时采取有效措施，防止静电着火发生。

防止或减少可燃性混合物的形成。控制可燃物的浓度，从而降低着火的概率。

三、放射性污染防治技术

辐射防护，也称为放射性防护。人们在对辐射产生健康危害的机理进行大量的理论和试验研究基础上，建立了有效的辐射防护体系，并不断加以发展和完善。目前，国际上普遍采用的辐射防护的三个原则是：实践的正当性，防护水平的最优化和个人剂量限值。实践的正当性要求任何伴有辐射的实践所带来的利益应当大于其可能产生的危害；防护水平的最优化是指在综合考虑社会和经济等因素之后，将辐射危害保持在合理可行、尽量低的水平上；而规定个人剂量限值的目的则是为了保证社会的每个成员都不会受到不合理的辐射照射。表 5－4－4 列出了常见的辐射剂量值。

表 5－4－4 来自天然和人工辐射源辐射的集体剂量

来 源	集体剂量/(人·Sv·a^{-1})
所有的天然辐射源	10 000 000
宇宙射线：飞机旅行	2 000
燃煤电站	约 2 000
燃煤的家庭烹调及取暖	100 000
地热能源	6 人·Sv/(GW·a)
磷盐工业	6 000
磷石膏	1977 年为 300 000
工业化国家的 X 射线检查	每百万人为 1 000，即 1 600 000
核武器试验	在最高年份为 400 000（1962—1963） 所有时间共计 30 000 000
核电（不包括废物处置）	1980 年为 500，在 2000 年为 1 000
核电（职业照射）	2 000
夜光钟表	2 000

国内外大量实践表明，只要所受照射剂量低于国标规定剂量当量限值以下，就不会影响健康。所以，必须严格执行国家标准和安全操作规程，加强放射性监测和辐射防护。辐射防护一般采用下列措施。

（一）外照射的防护

距离防护。在其他条件不变时操作人员所受剂量的大小与人到放射源距离的平方成反比，也就是说，人在离放射源 2 m 处所受到剂量是人离放射源 1 m 所受剂量的$\frac{1}{4}$，3 m 所受剂量是 1 m 处所受剂量的$\frac{1}{9}$，其他距离可依此类推。由此可见，凡实际操作允许情况下，应尽量远离放射源。

时间防护。人所受剂量的大小与人在操作放射源的时间成正比，如果其他条件都相同，则人在放射源周围时间越长，所受剂量也就越大。因此，工作人员必须经过培训，做到熟悉操作减少操作时间，从而减少所受到的剂量。

屏蔽防护。这是射线防护的主要方法。对单一 α 射线的防护，戴上手套，穿好鞋袜，不让放射性物质直接接触到皮肤就可以了；对于 β 射线，用一定厚度（一般几毫米）的铝板，有机玻璃等轻质材料就可以完全屏蔽。γ 射线的穿透力最强，是屏蔽防护的主要对象。

（二）内照射的防护

防止由呼吸道吸收。放射性气溶胶气体放射性核素如氡（Rn），氚（^{3}H）等，可由呼吸道进入人体而被吸收，吸收率的大小与放射性核素的溶解度成正比。

防止由胃肠道吸收。被放射性核素污染的食物、水等，经口、由胃肠道进入人体，吸收率的大小取决

于放射性核素的化学特性。碱金属（如^{24}Na、^{137}Cs）、卤素（如^{18}F、^{36}Cl、^{131}I）的吸收率高达100%，稀土金属和重金属元素的吸收率最低，在0.01%～0.001%之间。

防止由伤口吸收。某些放射性核素如Rn、^{3}H、^{131}I、^{90}Sr（液体）可透过完整皮肤进入人体，吸收率随时间增长缓慢，当皮肤上有伤口时，吸收率就增加几十倍以上，并使伤口污染而难以愈合。

（三）放射性废物的治理技术

随着核工业发展和核技术应用，放射性废物的产生是一种必然现象。目前放射性废物治理主要依据废物的形态，即废水、废气、固体废物，分别进行处理和处置。放射性废物处理主要包括废物的分类收集和贮存，废气、废液的净化和固化，固体废物的减容、包装及运输等；放射性废物的处置主要包括废物的整备、埋藏和监护等，放射性废物的处置是废物治理的最后工序，所有的处理过程均应为废物的处置创造条件。

因此，放射性废物与一般工业或生活废物的处理处置在技术上有一定的共性，由于其危害性，在处理处置方面，也显著地体现了其特殊性。放射性废物处理的根本任务在于为废物中核素的衰变提供合适的时间和空间条件，将其对公众可能造成的辐射危害始终控制在许可水平之内。基本途径是将气载和液体放射性废物做必要的浓缩及固化处理后，在与环境隔绝的条件下长期安全地存放。净化后的废物可有控制地排放，使之在环境中进一步弥散和稀释，固体废物则经去污、整备后处置，污染物料有时可经去污后再循环利用。

1. 放射性废物的处理原则

国际原子能机构（IAEA）提出了放射性废物管理的9条基本原则。主要是：

保护人类健康：放射性废物管理必须确保对人类健康的影响达到可接受水平。

保护环境：放射性废物管理必须确保对环境的影响达到可接受的水平。

超越国界的保护：放射性废物管理应考虑超越国界的人员健康和环境的可能影响。

保护后代：放射性废物管理必须保证对后代预期的健康影响不大于当今可接受的水平。

给后代的负担：放射性废物管理必须保证不给后代造成不适当的负担。

国家法律框架：放射性废物管理必须在适当的国家法律框架内进行，明确划分责任和规定独立的审管职能。

控制放射性废物产生：放射性废物的产生必须尽可能最少化。

放射性废物产生和管理间的相依性：必须适当考虑放射性废物产生和管理的各阶段间的相互依赖关系。

设施安全：必须保证放射性废物管理设施使用寿期内的安全。

根据上述原则，我国制定了放射性废物管理的40字方针："减少产生、分类收集、净化浓缩、减容固化、严格包装、安全运输、就地暂存、集中处置、控制排放、加强监测"。

2. 放射性废液处理技术

各类放射性废液的比活度、含盐量差别很大，处理方法也不一样。应用放射性同位素产生的放射性废水一般比活度低，核素的半衰期也比较短，经过衰变贮存，检测放射性物质浓度合格后可作为工业废水处理。核工业放射性工艺废液一般需要多级净化处理，低、中放废液常用的处理方法有絮凝沉淀、蒸发、离子交换（或吸附）和膜技术（如电渗析、反渗透、超滤膜）。高放废液比活度高，一般只经过蒸发浓缩后贮存在双壁不锈钢贮槽中。

常用放射性废液处理技术的去污系数列于表5-4-5，典型放射性废水处理工艺流程见图5-4-36所示。

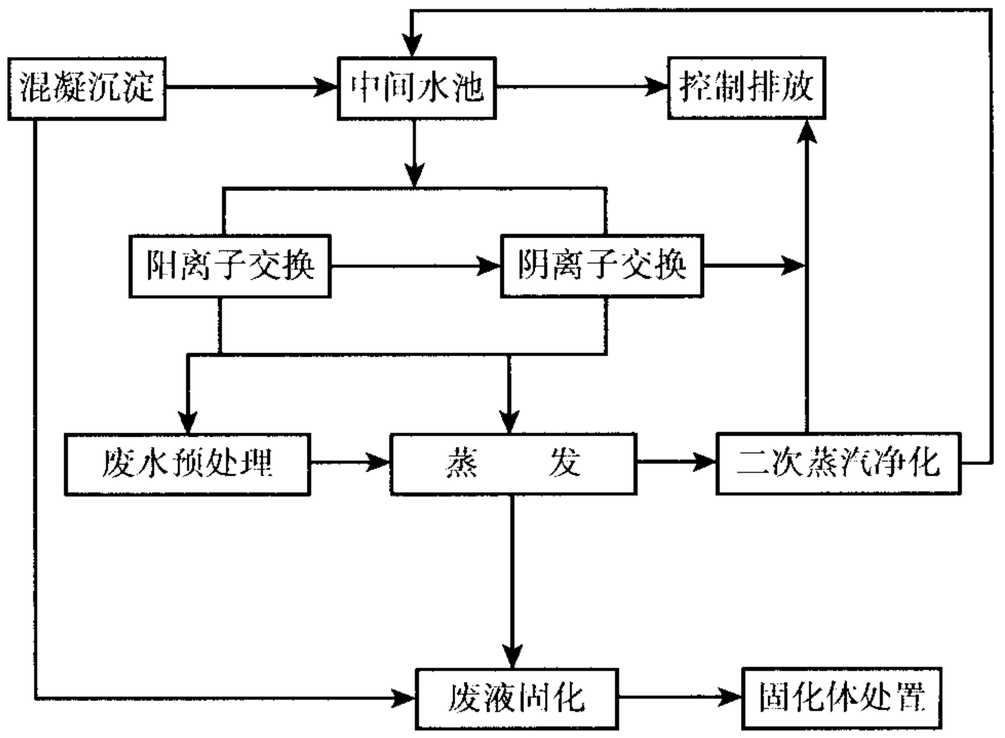


图5-4-36　典型放射性废水处理工艺流程

表 5-4-5 常用放射性废液处理技术的去污系数

处理技术	去污系数	使用对象
絮凝沉淀、吸附	1~10	低、中放废液，洗衣、淋浴水
蒸发	10^3~10^6	低、中放废液，高放废液
离子交换	10~100	低、中放废液（低含盐量）
反渗透	10~40	低、中放废液，洗衣、淋浴水

（1）中低水平放射性废液的处理：混凝沉淀与过滤技术在放射性废水处理的应用中，除设备与材质要求较高外，其他与常规无异。混凝沉淀过程去除放射性的机制是吸附共沉淀，多用于处理组分复杂的低、中水平放射性废水，一般与其他方法联用时作为预处理方法。絮凝剂主要采用铝盐、铁盐、锰盐等，高分子絮凝剂，如聚铝与铁盐，有机高分子负离子型混凝剂等，均能有效去除放射性，缺点是放射性去除效率较低，一般为50%~70%，最多也只有10左右的去污系数，且此法产生的污泥量较多，其中含有大量放射性物质需进一步处理。过滤处理可以采用砂滤，也可以采用微滤技术。

蒸发浓缩工艺较多用于高、中水平放射性废液的处理，其主要目的是将放射性物质浓缩、减少废液的体积，以便降低贮存或做进一步处理（如固化）的费用；其次，在某些情况下通过蒸发操作还可以回收处理过程中有用的化学物质如硝酸等。而二次蒸汽的冷凝水如果放射性相当低就可以直接排放，或经其他方法处理后排放。蒸发法的突出优点是净化效率较高，一般可以达到10^5的去污系数。蒸发不适合处理含有易起泡物质（如某些有机物）和易挥发核素（如Ru、I）的废水；另外，蒸发耗能大，处理费用较高，限制了它的应用。

离子交换与膜分离技术在放射性废水处理的应用中，以前者更加成熟与可靠，应用更加广泛。两者的浓缩液一般都不能达到预期的浓缩倍数，往往需要进一步蒸发浓缩。离子交换树脂具有自浓度极低的溶液中有选择地去除离子的能力，在处理中、低放射性废水时，离子交换树脂对去除含盐类杂质较少的废水中放射性离子具有特殊的作用，因而常用作基本的处理方法。离子交换法处理废水常用的动态操作系统是以树脂作为滤层的滤柱式操作，其形式有阳、阴交换柱串联或混合交换柱等。离子交换树脂吸着饱和后，用适当的酸、碱溶液或盐溶液淋洗、再生后复用，再生废液经蒸发浓缩、固化后贮存或处置。

（2）高放射性废液的处理与贮存：高放射性废液是核工业中最高水平的放射性废液，产量较少，是实施最终安全贮存（处置）前的终态液体。这类废液中含有大量裂变产物，衰变过程产生而升温，处理前需要一定时间的冷却贮存过程。贮存池一般设于操作间与居住区的深埋地下贮存池。池结构为不锈钢覆面的钢筋混凝土贮存室，室内设带有冷却系统的不锈钢贮存槽。

经冷却后的高放射性废液大多数国家都采用固化技术进一步处理，使之固定到高度稳定性的惰性固体中，以便实施最终安全处置。国内外研究了多种实用的固化技术，如玻璃固化、沥青固化和水泥固化等可以应用于此类废液的处理，而尤以硅酸盐玻璃固化技术，更受到各国的重视。

3. 放射性废气处理技术

放射性废气主要产自放射性操作工艺过程的排气和设备泄漏，此外，还产自放射性实验室和厂房的排风。放射性废气中通常含有放射性粉尘、气溶胶、惰性气体和挥发性核素等。

（1）放射性粉尘和气溶胶的处理：一般的工业除尘设备可用于处理含有放射性粉尘的气体，干式除尘器如降尘室和旋风分离器常用于去除粒径大于60 μm的粉尘颗粒；湿式除尘装置常用于去除粒径为10~60 μm的粉尘颗粒，如泡沫除尘器和喷射式洗涤器等，净化后空气粉尘浓度一般不大于100 mg/m^3。去除粒径小于10 μm的粉尘颗粒，常用的装置为布袋式过滤除尘器、填料及油过滤器，净化后空气粉尘浓度为1~2 mg/m^3；新型的静电除尘器对微米级粒径颗粒物的去污效率可达99%以上。捕集颗粒的平均几何直径为0.02~0.7 μm，而且浓度很低的放射性气溶胶粒子最有效的过滤装置是高效微粒空气过滤器（HEPA），这种过滤器具有很高的除微粒效率，对于粒径<0.3 μm的颗粒，去除效率>99.97%，广泛用

于几乎所有的核设施内。

（2）放射性气体的处理：由于放射性气体的来源和性质不同，处理方法也不相同。常用的方法是吸附，即选用对某种有吸附能力的材料做成吸附塔。经过吸附处理的气体再排入烟囱。吸附材料吸附饱和后需再生后才可继续用于放射性气体的处理。其他方法还有液体洗涤吸收、低温分馏装置及贮存衰变等。

放射性废气经过净化处理，监测符合允许水平后即可排放。为了达到最好的稀释扩散，一般要通过高烟囱（60～150 m）排放。烟囱的高度对废气的扩散有很大影响，必须根据排放方式、排放量、地形及气象条件等实际情况设计，并选择有利的气象条件排放。排放口要设置连续监测器，还有颗粒和碘取样器监测它们的排放量，并且可以取样进行核素分析。

4. 放射性固体废物处理技术

放射性固体废物种类繁多，可分为湿固体（蒸发残渣、沉淀泥浆、废树脂等）和干固体（污染劳保用品、工具、设备、废过滤器芯、活性炭等）两大类。为了减容和适于运输、贮存和最终处置，要对固体废物进行焚烧、压缩、固化或固定等处理。

（1）减容技术：固体废物减容的目的是减少体积，降低废物包装、贮存、运输和处置的费用。处理方法主要有两种：压缩或焚烧。

松散的固体废物可采用压缩减容，废弃设备则经切割、破碎后再行压缩减容，并用标准容器加以包装。压缩是依靠机械力作用，使废物密实化，减少废物体积。虽然压缩处理可获得的减容倍数比较低（2～10），但和焚烧处理相比，压缩处理操作简单，设备投资和运行成本低，所以压缩处理在核电厂应用相当普遍。现在各国采用的压缩机种类很多，有的在桶内压缩，有的压扁后装桶。压力有几十吨的常规压缩，也有几千吨压力的高压压缩（超级压缩）。

可燃性废物常用焚烧法减容，多达90%的可压缩废物也是可燃的；焚烧灰渣必须固化处理后装入密封容器进行最终处置。自20世纪50年代以来，一直采用焚烧的方法来处理可燃性放射性废物，适于焚烧处理的放射性废物有反应堆运行、放射性同位素应用以及核燃料的生产、研究产生的低放废物；低放废有机溶剂和轻度污染的钚废物。对放射性废物焚烧，要求采用专门设计的焚烧炉，配置完善的排气净化系统，保证排入大气的放射性及其他有毒物质量低于规定的限值。经过焚烧，70%以上放射性物质进入炉灰渣中。焚烧炉应有足够的防护措施，炉内维持一定负压。对焚烧灰渣应进行固化处理或直接装入高度整体性容器中进行处置。

（2）固化技术：放射性废液处理产生的泥浆、蒸发残渣和废树脂等湿固体和焚烧炉灰等干固体，都是弥散性物质，需要固化处理。固化是在放射性废物中添加固化剂，使其转变为不易向环境扩散的固体的过程。通常，固化的途径是将放射性核素通过化学转变，引入到某种稳定固体物质的晶格中去；或者通过物理过程把放射性核素直接掺入到惰性基材中。对固化工艺的一般要求是，高放废物的固化应能进行远距离控制和维修；低、中放废物的固化，操作过程应简单，处理费用应低廉。

理想的废物固化体要具有阻止所含放射性核素释放的特性，其主要特性如下：①低浸出率；②高热导率；③高耐辐射性；④高化学稳定性和耐腐蚀性；⑤高机械强度；⑥高减容比。

拟固化或固定的废物包括中、高放射性浓缩废液，中、低放射性泥浆，废树脂，水过滤器芯子，焚烧炉灰渣等。中、低放射性废物常采用水泥、沥青及塑料固化工艺进行固化，高放射性废物常采用玻璃或陶瓷固化工艺进行固化。表5－4－6列出几种主要固化方法的优缺点和适应性。

表5－4－6　几种主要固化方法的比较

项　　目	水泥固化	沥青固化	塑料固化	玻璃固化	陶瓷固化
干废物包容量（质量分数）/%	5～40	30～60	30～60	10～30	15～30
密度/(g·cm^{-3})	1.5～2.5	1.1～1.9	1.1～1.5	2.5～3.0	2.5～3.0
浸出率/[g·(cm^2·d)$^{-1}$]	10^{-1}～10^{-4}	10^{-3}～10^{-5}	10^{-3}～10^{-6}	10^{-4}～10^{-7}	10^{-5}～10^{-8}

续表

项　　目	水泥固化	沥青固化	塑料固化	玻璃固化	陶瓷固化
抗压强度/MPa	10～30	塑性	20～100（或塑性）	脆性	高
耐辐照/Gy	约 10^8	约 10^7	约 10^7	约 10^9	约 10^9
投资	低	中	中	高	高
操作和维修	简单	中等	中等	复杂	复杂
适用性	低、中放废物	低、中放废物	低、中放废物	高放、α废物	高放、α废物
应用状况	工业规模	工业规模	工业应用	工业应用	研究开发

习　　题

5-4-1　噪声的三要素是指什么？（　　）

A　波长、频率和声速　　B　声压、声强和声功率

C　噪声源、传播途径和接受者　　D　周期、频率和波长

5-4-2　以下关于噪声污染特点的论述中，哪些是不正确的？（　　）

A　噪声是人们不需要的声音总称，所以任何声音都可能成为噪声

B　噪声只会造成局部性污染，一般不会造成区域性和全球性污染

C　噪声污染没有残余污染物，不会积累

D　噪声不会直接致命或致病，它的危害是慢性的或间接的

5-4-3　在以下几种噪声控制措施中，主要用于空气动力性噪声控制的措施是哪种？（　　）

A　隔声　　B　消声　　C　隔振　　D　吸声

5-4-4　已知 50 m^2 的材料 A，在某频率下的吸声系数是 0.2，25 m^2 的材料 B 在该频率下的吸声系数是 0.3，则该频率下的吸声量是多少？（　　）

A　材料 A 吸声量 > 材料 B 吸声量　　B　材料 A 吸声量 = 材料 B 吸声量

C　材料 A 吸声量 < 材料 B 吸声量　　D　无法判断

5-4-5　已知在入射声波频率为 500 Hz 时，几种常用建筑材料的吸声系数分别为：混凝土的吸声系数为 0.01、玻璃窗（关闭时）为 0.18、木板为 0.15、硬质纤维板为 0.14，则这四种建筑材料中，对 400 Hz声波的吸声性能最好的是哪种材料？（　　）

A　混凝土　　B　玻璃窗（关闭时）C　木板　　D　硬质纤维板

5-4-6　有一隔声墙，对某一频率的入射声波的透射系数为 0.01，则其隔声量是多少？（　　）

A　0.1　　B　10　　C　20　　D　5

5-4-7　某隔声间有一面 20 m^2 的墙与噪声源相隔，该墙透声系数 τ 为 10^{-5}；在这墙上开一个面积为 2 m^2 的门，其 τ 为 10^{-3}；并开一个面积为 3 m^2 的窗，其 τ 为 10^{-3}；则此组合墙的平均隔声量是多少？（　　）

A　36　　B　24　　C　20　　D　30

5-4-8　以下关于消声器消声原理论述哪个是不正确的？（　　）

A　阻性消声器是一种利用吸声材料消声的吸收型消声器

B　抗性消声器主要是依靠管道截面的突变或旁接共振腔等在声传播过程中引起阻抗的改变而产生声波的反射、干涉现象，从而达到消声的目的

C　多孔扩散消声器是根据气流通过多孔装置扩散后，速度及驻点压力都会升高的原理设计制作的一种消声器

D　阻性消声器是利用声波在多孔吸声材料中传播时，因摩擦阻力和黏滞阻力将声能转化为热能，达到消声的目的

5－4－9　为了消除脉动性气流噪声的影响，通常选用的消声器类型是哪种？（　　）

A　阻性消声器　　B　抗性消声器

C　阻抗复合式消声器　　D　排气喷流消声器

5－4－10　在以下论述中，哪个不正确？（　　）

A　多孔材料的吸声特性主要取决于入射声波和所用材料的性质

B　微穿孔板吸声结构的吸声原理是共振原理

C　组合墙的隔声量往往比单纯墙的要低

D　阻性消声器对中、低频有良好的消声性能

5－4－11　在振动评价中，通常采用（　　）为标准，超过者被认为是有振动污染。

A　感觉阈　　B　不舒服阈　　C　疲劳阈　　D　危险阈

5－4－12　在振动各种控制手段中，最有效的办法是什么？（　　）

A　消振　　B　隔振　　C　吸振　　D　阻振

5－4－13　在常用的隔振器中，隔振效果最好、具有广阔发展前景的是什么？（　　）

A　螺旋钢弹簧隔振器　　B　板弹簧隔振器

C　空气弹簧　　D　橡胶隔振器

5－4－14　在只有单方向冲击载荷的场合，通常选用的隔振器类型是哪种？（　　）

A　螺旋钢弹簧隔振器　　B　板弹簧隔振器

C　空气弹簧　　D　钢弹簧橡胶复合式隔振器

5－4－15　下面论述中，哪个不是确定使用动力吸振器所要求的条件？（　　）

A　激振频率接近或等于系统固有频率，且激振频率基本恒定

B　主振动系统阻尼较小

C　主振动系统有减小振动的要求

D　弹簧劲度能够经受振动系统的疲劳应力

5－4－16　以下有关防振沟的论述中，哪个不正确？（　　）

A　防振沟主要适用于控制以在地面传播的表面波为主的振动

B　防振沟越深，隔振效果越好

C　防振沟越宽，隔振效果越好

D　防振沟一般中间不填充材料

5－4－17　阻尼对于机械结构有着许多影响，下面（　　）不属于阻尼的积极作用特点。

A　阻尼有助于提高机械结构的共振振幅

B　阻尼有助于机械系统受到瞬间冲击后，很快恢复到稳定状态

C　阻尼有助于降低机械噪声

D　阻尼有助于降低结构传递振动的能力

5－4－18　下列阻尼结构中，哪种不属于直接黏附阻尼结构？（　　）

A　自由层阻尼结构　　B　约束层阻尼结构

C　接合面阻尼结构　　D　插条式阻尼结构

5－4－19　下面论述中，哪个是正确的？（　　）

A　隔振系统的固有频率越高，越有利于隔振

B　阻尼有助于提高机械结构的共振振幅

C　防振沟越宽，隔振效果越好

D　橡胶隔振器最大优点是本身具有一定的阻尼，在共振点附近有良好的隔振效果

5-4-20 下面论述中，哪个不正确？（ ）

A 隔振可以分为主动隔振和被动隔振

B 动力吸振器适用于主振动系统阻尼较低的系统减振

C 通过修改结构减振是目前非常引人注目的高技术手段

D 阻尼对于减振具有积极作用，因此，为获得更高的减振性能，应在结构的全面积上进行阻尼处理

5-4-21 电磁辐射对人体危害随波长而异，对人体危害最大的是哪种？（ ）

A 长波 B 中波 C 微波 D 超短波

5-4-22 以下防治电磁辐射污染的措施中，哪种不属于被动防护？（ ）

A 采用调频方法防治电磁干扰

B 设备的合理设计，减少辐射泄漏

C 加大工作点与辐射场源的距离

D 对特定人群进行屏蔽保护

5-4-23 电磁场屏蔽的基本原理是什么？（ ）

A 吸收作用和反射作用 B 吸收作用

C 共振原理 D 反射作用

5-4-24 以下论述中，哪个不正确？（ ）

A 电磁屏蔽可以分为主动场屏蔽和被动场屏蔽

B 滤波器主要用于抑制通过线路所造成的线路干扰与线路辐射

C 为了保证接地系统有较低的阻抗，接地线应尽量长

D 在短波段，接地作用不太明显；对于微波段，屏蔽接地作用则更小

5-4-25 以下论述中，哪个是正确的？（ ）

A 电磁屏蔽材料的厚度越大，屏蔽效果越好

B 一般来说，金属屏蔽材料中钢的屏蔽性能比铜好

C 一般来讲，频率越高，屏蔽材料的屏蔽效能也增加

D 屏蔽体与场源距离越大，屏蔽效果越好

5-4-26 辐射防治的三个基本原则是什么？（ ）

A 科学性、可靠性、经济性

B 实践的正当性、防护水平的最优化和个人剂量限值

C 防护的安全性、技术的可靠性和个人剂量限值

D 技术的可行性、经济的合理性、防护的可靠性

5-4-27 对于中水平放射性废液处理，主要采用的方法是什么？（ ）

A 膜分离技术 B 蒸发浓缩 C 离子交换技术 D 混凝沉淀

5-4-28 下列除尘器中，去除放射性粉尘效果最好的技术是哪种？（ ）

A 布袋除尘器 B 高效微粒空气过滤器

C 喷射式洗涤器 D 静电除尘器

5-4-29 对放射性废物进行最终处置，通常采用固化的方法，其中最有前途的固化方法是哪种？（ ）

A 水泥固化 B 沥青固化 C 陶瓷固化 D 玻璃固化

5-4-30 以下论述中，哪个正确？（ ）

A 对于放射性废气通常采用吸收的方法

B 表观清洁的低放射性废水可以直接采用离子交换法、膜分离法等处理，处理后的清水不能回用

C 对于外辐射照射的防护可以采用距离防护、时间防护和屏蔽防护的方法

D 放射性固体废物的最终处置途径是固化和贮存

第五篇习题参考答案

5-1-1	C	5-1-2	A	5-1-3	D	5-1-4	B	5-1-5	D	5-1-6	A
5-1-7	D	5-1-8	C	5-1-9	D	5-1-10	A	5-1-11	B	5-1-12	A
5-1-13	C	5-1-14	B	5-1-15	C	5-1-16	D	5-1-17	B	5-1-18	B
5-1-19	D	5-1-20	B	5-1-21	C	5-1-22	B	5-1-23	B	5-1-24	A
5-1-25	C	5-1-26	D	5-1-27	D	5-1-28	A	5-1-29	B	5-1-30	D
5-1-31	C	5-1-32	B	5-1-33	A	5-1-34	C	5-1-35	A	5-1-36	C
5-1-37	C	5-1-38	D	5-1-39	B	5-1-40	A	5-1-41	D	5-1-42	B
5-1-43	B	5-1-44	D	5-1-45	C	5-1-46	A	5-1-47	B	5-1-48	C
5-1-49	B	5-1-50	D	5-1-51	C	5-1-52	D	5-1-53	A	5-1-54	C
5-1-55	A	5-1-56	D	5-1-57	C	5-1-58	C	5-1-59	A	5-1-60	D
5-1-61	C	5-1-62	B	5-1-63	D	5-1-64	D	5-1-65	C	5-1-66	D
5-1-67	B	5-1-68	A	5-1-69	C	5-1-70	D	5-1-71	C	5-1-72	C
5-1-73	B	5-1-74	A	5-1-75	D	5-1-76	A	5-1-77	C	5-1-78	B
5-1-79	C	5-1-80	D	5-1-81	D	5-1-82	B	5-1-83	B	5-1-84	C
5-1-85	D	5-1-86	B	5-1-87	C	5-1-88	B	5-1-89	D	5-1-90	D
5-1-91	A	5-1-92	D	5-1-93	A	5-1-94	A	5-1-95	A	5-1-96	C

5-2-1	A	5-2-2	D	5-2-3	C	5-2-4	A	5-2-5	C	5-2-6	B
5-2-7	B	5-2-8	B	5-2-9	A	5-2-10	D	5-2-11	C	5-2-12	B
5-2-13	B	5-2-14	A	5-2-15	B	5-2-16	D	5-2-17	A	5-2-18	C
5-2-19	D	5-2-20	B	5-2-21	C	5-2-22	C	5-2-23	A	5-2-24	C
5-2-25	D	5-2-26	C	5-2-27	D	5-2-28	A	5-2-29	C	5-2-30	A
5-2-31	D	5-2-32	C	5-2-33	A	5-2-34	C	5-2-35	C	5-2-36	D
5-2-37	C	5-2-38	A	5-2-39	A	5-2-40	D	5-2-41	C	5-2-42	D
5-2-43	B	5-2-44	D	5-2-45	B	5-2-46	A	5-2-47	B	5-2-48	D
5-2-49	A	5-2-50	D	5-2-51	C	5-2-52	C	5-2-53	D	5-2-54	B
5-2-55	B	5-2-56	A	5-2-57	B	5-2-58	C	5-2-59	D	5-2-60	C

5-3-1	C	5-3-2	A	5-3-3	C	5-3-4	B	5-3-5	B	5-3-6	C
5-3-7	D	5-3-8	A	5-3-9	D	5-3-10	C	5-3-11	D	5-3-12	B
5-3-13	A	5-3-14	B	5-3-15	C	5-3-16	B	5-3-17	B	5-3-18	C
5-3-19	D	5-3-20	A	5-3-21	A	5-3-22	B	5-3-23	C	5-3-24	C
5-3-25	D	5-3-26	A	5-3-27	B	5-3-28	D	5-3-29	C	5-3-30	B
5-3-31	C	5-3-32	B	5-3-33	A	5-3-34	A	5-3-35	C	5-3-36	B
5-3-37	A	5-3-38	C	5-3-39	B	5-3-40	A	5-3-41	A	5-3-42	B
5-3-43	D	5-3-44	C	5-3-45	B	5-3-46	A	5-3-47	B	5-3-48	D
5-3-49	C	5-3-50	D	5-3-51	B	5-3-52	D	5-3-53	A	5-3-54	A
5-3-55	A										

5-4-1	C	5-4-2	D	5-4-3	B	5-4-4	A	5-4-5	B	5-4-6	B
5-4-7	A	5-4-8	A	5-4-9	B	5-4-10	D	5-4-11	C	5-4-12	A
5-4-13	C	5-4-14	B	5-4-15	D	5-4-16	C	5-4-17	A	5-4-18	C
5-4-19	D	5-4-20	D	5-4-21	C	5-4-22	A	5-4-23	A	5-4-24	C
5-4-25	C	5-4-26	B	5-4-27	B	5-4-28	B	5-4-29	C	5-4-30	C

主要参考文献

[1] 宁平. 固体废物处理与处置. 北京：高等教育出版社，2007.

[2] 聂永丰. 三废处理工程技术手册：固体废物卷. 北京：化学工业出版社，2003.

[3] 娄性义. 固体废物处理与处置. 北京：冶金工业出版社，1996.

[4] 柴晓利，刘建勇，党小庆. 注册环保工程师执业资格考试（复习教程）. 北京：化学工业出版社，2006.

[5] 彭长琪. 固体废物处理工程. 武汉：武汉理工大学出版社，2004.

[6] 毕振明，高忠爱，等. 固体废物的处理与处置. 修订版. 北京：高等教育出版社，1993.

[7] 汪宝华.《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》实施手册. 北京：中国环境科学出版社，2005.

[8] 杨玉楠，熊运实，杨军，等. 固体废物的处理处置工程与管理. 北京：科学出版社，2004.

[9] 蒋展鹏. 环境工程学. 北京：高等教育出版社，1992.

[10] 高艳玲，张继有. 物理性污染控制. 北京：中国建筑工业出版社，2005.

[11] 陈亢利，钱先友，许浩瀚. 物理性污染与防治. 北京：化学工业出版社，2006.

[12] 盛美萍，王敏庆，孙进才. 噪声与振动控制技术基础. 北京：科学出版社，2001.

[13] 赵良省. 噪声与振动控制技术. 北京：化学工业出版社，2004.

[14] 刘文魁，庞东. 电磁辐射的污染及防护与治理. 北京：科学出版社，2003.