



Please register PDFcamp on <http://www.verypdf.com/>, thank you.

摘选两大部分内容：

14.4物理污染防治技术（振动防治技术）

14.4物理污染防治技术（电磁辐射和放射性污染治理技术）

第一部分 振动防治技术

第十四章 振动防治技术

振动是一种很普遍的运动形式。当一个物体处在周期性往复运动的状态下时，就可以说物体在振动。任何一种机械，不论是进行圆周运动还是往复运动，都产生振动。某些振动对人的机体是有害的，有些甚至能破坏建筑物和设备。本章主要讨论机械振动的隔绝和阻尼，对振动引起结构的开裂、下沉、倒塌等破坏现象及其强度计算，请参阅有关著作。

第一节 振动公害的特征与评价

一、振动公害的特征

振动公害与噪声公害有着紧密的联系，当振动的频率在20—20000Hz的声频范围内时，振动源同时又是噪声源。另一方面，若声源的振动激发了某些固体物件的振动，这种振动会以弹性波的形式在固体中（如基础、地板、墙等）传播，并在传播过程中向外辐射噪声，这就是“固体声”，特别当引起物体共振时，会辐射很强的噪声。从这个意义上讲，防振技术是噪声防止技术的一种。

振动除了引起噪声方面的危害外，还能直接作用于人体、设备和建筑等，损伤人的机体，引起各种病症，损坏设备，使建筑物开裂、倒塌等。因此，振动又区别于噪声，有其相对的独立性。

振动对人体的危害受心理因素和生理因素影响很大，但一般来说，振动危害的大小主要取决于振动的频率、振幅或加速度。

人体各部分器官都有自己的固有频率，当振动频率接近某一器官的固有频率时，会引起共振，对该器官的影响最大。人的胸腔和腹腔系统对频率为4—8Hz的振动有明显的共振效应，因此，频率在4—8Hz的振动对人体的影响和危害最大。另外，频率20—30Hz的振动能引起“头—颈—肩”系统的共振，频率60—90Hz的振动能引起眼球共振，100—200Hz的振动能引起“下颚—头盖骨”的共振，都能造成人体的损伤。

振动振幅和加速度的危害程度

与频率有关：在高频振动时，振幅的影响是主要的；在低频振动时，则振动的加速度起主要作用。

振动对建筑物的危害如图14-1所示。一般来说，大振幅低频率的振动对建筑物危害较严重。

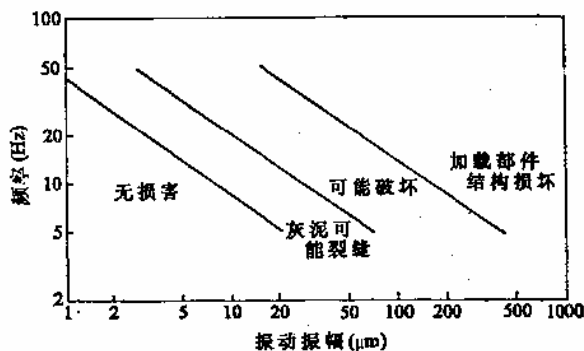


图14-1 振动对建筑物的危害

二、振动的评价

振动对人体的影响比较复杂,人的体位不同,接受振动的器官不同,振动的方向(垂直还是水平)、频率、振幅和加速度不同,人的感受也不同。因此,评价振动对人体的影响有很大困难。目前我国制订的振动的评价标准尚未颁布,这里仅介绍一些国外的情况,供读者参考。

振动的强弱常可根据振动的加速度来评价。人能感觉到的振动,它的加速度一般在 0.01m/s^2 到 10m/s^2 范围内。与在噪声控制中类似,反映振动加速度的参数可用分贝来表示它的相对大小,这个参数称为振动加速度级 La (Vibration acceleration level),可用下式表示:

$$La = 20 \lg \left(\frac{a}{a_0} \right) \quad (\text{dB}) \quad (14-1)$$

式中 a 为振动时的加速度的有效值(m/s^2),在正弦振动情况下:

$$a = a_m / \sqrt{2} \quad (14-2)$$

a_m 为振动加速度的振幅; a_0 为加速度基准值,通常取 $a_0 = 3 \times 10^{-4} \text{m/s}^2$,当频率为 100Hz 时,该基准值与声压的基准值 $P_0 = 2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$ 是一致的。

振动加速度级相同而频率不同时,人的主观感觉是不同的,经人体感觉修正后的加速度级叫振动级 VL (vibration level),它与 La 有下列关系:

$$VL = La + C_n \quad (14-3)$$

式中 C_n 为感觉修正值,由表14-1和14-2查到。

表14-1 垂直振动的修正值

频率 (Hz)	1	2	4	8	16	31.5	63	90
$C_n(\text{dB})$	-6	-3	0	0	-6	-12	-18	-21

表14-2 水平振动的修正值

频率 (Hz)	1	2	4	8	16	31.5	63	90
$C_n(\text{dB})$	3	3	-3	-9	-15	-21	-27	-30

振动级与感觉的关系如表14-3所示。

评价振动的强弱,也可根据振动对人体的影响,分成以下四个等级:

1. 振动的“感觉阈”:振动的“感觉阈”是指人体刚刚能感到振动时的强度。人体对刚超过感觉阈的振动是能忍受的。

2. 振动的“舒适感降低阈”:振动强度增大到一定程度,人就感到不舒适,使人产生讨厌的感觉,但没有产生生理影响,这就是“舒适感降低阈”。

3. 振动的“疲劳—工效降低阈”:振动强度继续增强,人不仅产生心理反应,而且出现

表14-3 振动级的大体状况

振动级 (dB)	振 动 状 况
100	墙壁开始裂缝
90	容器中的水溢出,花瓶等倒下
80	电灯摆动,门窗发出响声
70	门和窗振动
60	差不多所有的人都感到振动

生理反应,振动通过刺激神经系统,对其它器官产生影响,使注意力转移,工作效率降低等,这就是“疲劳—工效降低阈”。当振动停止后,这些生理现象随之消失。

4. 振动的“极限阈”:当振动强度超过一定限度时,就会对人体造成病理性损伤,产生永久性病变,即使振动停止也不能复原,这就是“极限阈”,也称为“暴露极限阈”。

国际标准化组织(ISO)推荐的全身振动评价标准如图14-2所示。图中曲线上的数字为人在一天内允许累计暴露时间。此标准适用于人体受垂直振动。如承受的是水平方向振动,则可将各曲线的纵坐标值除以 $\sqrt{2}$ 。

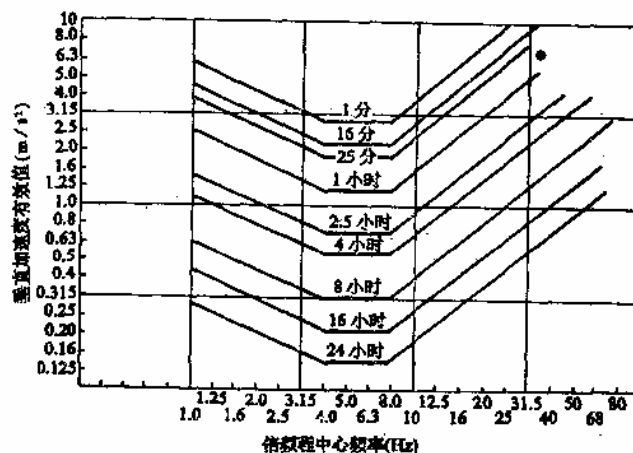


图14-2 “疲劳—工效降低阈”的ISO振动评价标准

Please register PDFcam on <http://www.verypdf.com/>, thank you.

评价振动对人体的影响,还与振动的方向有关。图14-3是ISO推荐的人体全身对规则振动的等感级曲线。从图上的两条曲线可知,频率8Hz以上的振动,垂直振动比水平振动高出10dB;人体对频率低的振动比对频率高的振动更敏感。

振动除了直接危害振源附近的人外,还可传播至远处,因此有些国家还制订了环境方面的振动允许标准,在此就不作介绍了。

三、振动的测量

常用的振动测量系统如图14-4所示。

振动测量仪除了振动接收器(又叫振动传感器、拾振器)及其附加的前置放大器外,振动测量系统的其它部分基本上与声学测量与分析系统相同。振动接收器作用是将机械振动转换为电信号。测量位移的仪器称为测振计,测量速度的称为速度计,测量加速度的称为加速度计。振动测量中最常用的是压电式加速度计。

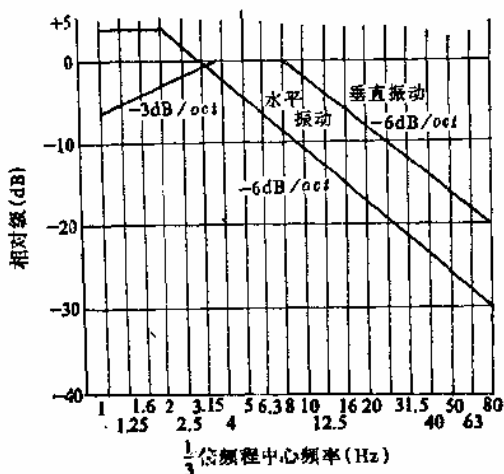


图14-3 垂直和水平振动等感度曲线

第二节 隔振技术

对机械振动的根本治理方法是改变机械的结构,降低甚至消除振动的发生,但在实践中往往很难做到这一点。因此,对于环境振动的控制来说,采用隔振和减振措施是消除振动危害的主要方法。

隔振就是将振动源与基础或其它物体的刚性连接改成弹性连接,隔绝或减弱振动能量的传递,从而达到防振的目的。隔振可以分为两大类:一类是对振动源采取隔振措施,防止它对周围设备和建筑物的影响。例如对空压机、电动机的基础进行隔振就属于这一类。这种隔振

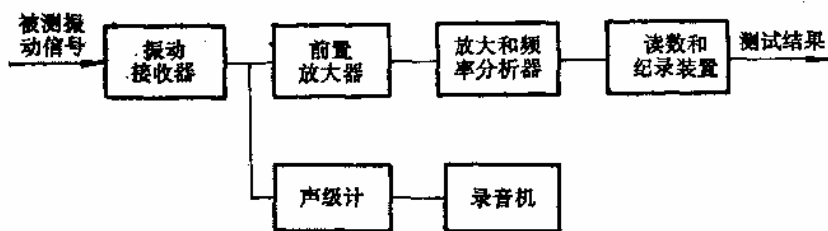


图14-4 振动测量系统

叫积极隔振或主动隔振,另一类是对怕振动干扰的精密仪器采取隔振措施,防止和减弱其它振动源通过基础向仪器设备传递振动,这种隔振叫消极隔振或被动隔振。尽管积极隔振和消极隔振在目标上有所不同,但依据的原理和采用的方法大体上是相同的。

隔振原理

振源在振动时,会产生一个激发力 $F = F_0 \sin \omega t$,当振动源与地基之间是刚性连接时,这个激发力会全部传给地基,由地基向四周传播;如果将振动源与地基的连接变成弹性连接,由于弹性装置的隔振作用,振源产生的激发力只有一小部分传给地基,因此减少了振动源对周围环境的影响。

衡量隔振效果好坏的物理量很多,工程上最常用的是传递系数 T (或称力的传递率)。传递系数是指通过隔振元件传递过去的力 F_1 与总激发力 F 的比值,即 $T = F_1 / F$ 。 T 越小,说明通过隔振器传过去的力越小,隔振效果就越好。因此,隔振理论的关键是计算传递系数 T 。

从物理学中可知,当一个振动系统的质量为 m ,弹簧的弹性系数为 k (如图14-5实线所示),则系统无阻尼自由振动的固有频率 f_0 为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (14-4)$$

式中: k ——弹簧单位伸长(或压缩)所需要的力。

式(14-4)也可写成:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (14-5)$$

式中: ω_0 ——振动系统的固有角频率, $\omega_0 = 2\pi f_0$ 。

在上述振动系统上加一个垂直激发力 $F = F_0 \sin \omega t$,则系统的运动方程为:

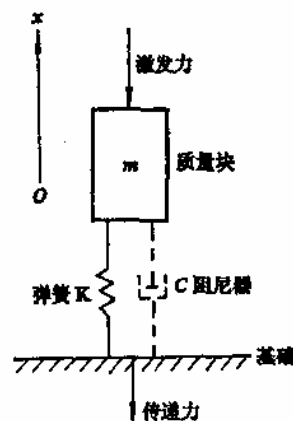


图14-5 积极隔振系统

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (14-6)$$

式中第一项为振动物质的惯性力，第二项为弹簧弹性力，右边是周期性的激发力。

解方程(14-6)，并根据 T 的定义得：

$$T = \frac{1}{\left| 1 - \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \right|} \quad (14-7)$$

式中： f ——激发力的频率，即 $f = \frac{\omega}{2\pi}$ 。

当系统中存在一个与振动速度成正比的阻尼时，运动方程为：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (14-8)$$

这时可解得：

$$T = \sqrt{\frac{1 + 4\beta^2 \left(\frac{f}{f_0} \right)^2}{\left(1 - \frac{f^2}{f_0^2} \right)^2 + 4\beta^2 \left(\frac{f}{f_0} \right)^2}} \quad (14-9)$$

式中： β ——阻尼比， $\beta = \frac{c}{c_0}$ (c 为系统的阻尼系数， c_0 为临界阻尼系数， $c_0 = 2\sqrt{km}$
 $= 4\pi m f_0$)；

$\frac{f}{f_0}$ ——频率比，用 η 表示。

如果采用分贝为单位，与传递系数 T 对应的传递损失 D 用下式计算：

$$D = 20 \lg \frac{1}{T} = 10 \lg \left[\frac{(1 - \eta^2)^2 + 4\beta^2 \eta^2}{1 + 4\beta^2 \eta^2} \right] \quad (\text{dB}) \quad (14-10)$$

式(14-9)可绘成图14-6，可以看出：①为了减小 T ，必须使 $\eta > \sqrt{2}$ ，这时 $T < 1$ ，系统具有隔振作用；当 $\eta < \sqrt{2}$ 时， T 反而变大； $\eta = 1$ 时变得极大，这对应于系统产生共振的情况，隔振系统不但不起隔振作用，反而起振动放大作用。②当 $\eta < \sqrt{2}$ 时， β 越大， T 值越小；而当 $\eta > \sqrt{2}$ 时， β 越小， T 值越小。因此在某些情况下，例如设备启动或停车时，使隔振装置具有一定的阻尼来限制激发力的放大作用是必要的。

一般隔振器的 $\beta = 2 - 20\%$ ，钢制弹簧的 $\beta < 1\%$ ，纤维衬垫的 $\beta = 2 - 5\%$ ，混合制成橡胶的 $\beta > 20\%$ 。

二、隔振设计

要使隔振装置有较好的隔振效果，应使 $\eta > \sqrt{2}$ 。常见的机械设备的振动基频频率 f 可由

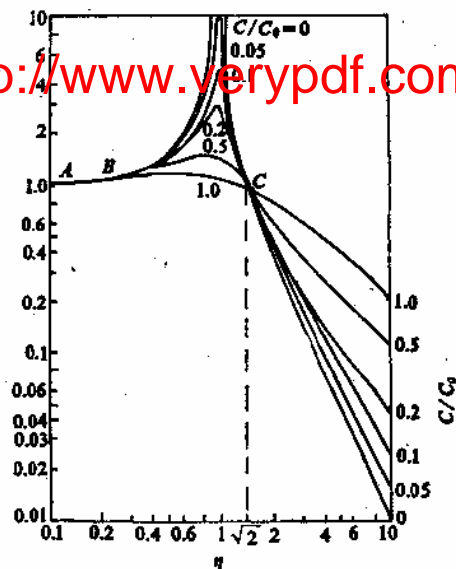


图14-6 T 与 η 的关系

表14-4查到。隔振系统的固有频率可由以下经验公式求得：

$$\text{金属弹簧 } f_0 = \frac{5}{\sqrt{x}} \quad (14-11)$$

$$\text{橡胶类弹性材料 } f_0 = \frac{5}{\sqrt{x}} \cdot \sqrt{\frac{E_d}{E_s}} \quad (14-12)$$

式中： x ——重力作用下弹性构件的静态压缩量(cm)；

E_d, E_s ——材料的动态与静态弹性模量。各种材料的 $\frac{E_d}{E_s}$ 值为：丁腈橡胶2.2—2.8；胶合玻璃纤维板1.2—2.9；矿渣棉1.5；软木1.8。

对于给定的激发力频率， f_0 越小，减振效果越好。由式 (14-11) 和 (14-12) 知，要使 f_0 小，必须有较大的 x ，加大设备基础的重量或选择柔软的弹性构件，都可以得到较大的 x 。因此在实际工程中，如果机器设备的质量足够大，弹性元件可直接装在机组底面下方。如果机器设备质量较小，宜将机组固定在厚重的底座上，而把弹性元件装置在底座和地面基础之间。

隔振装置的设计、计算有两类：一是根据 f 和 f_0 (或 x) 计算 T ；二是根据需要的 T 和已知的 f 求 f_0 和 x 。为方便起见，用图14-7所示的隔振设计图进行计算。

表14-4 常见机械设备的振动频率

设备种类	振动基频 (Hz)
风机类	(1)轴的转数(2)轴的转数×叶片数
电机类	(1)轴的转数(2)轴的转数×极数
齿轮	轴的转数×齿数
轴承	轴的转数× $\frac{1}{2}$ —珠子数
变压器	交流电频率×2
压缩机	轴的转数
内燃机	(1)轴的转数(2)轴的转数×缸数

例如，转速为每分钟1500转的电机安装在静态压缩量 x 为1cm 的隔振机座上，从图14-7的转速与 x 的交点可查出 $T \approx 0.04$ 。若要求 $T = 0.1$ ，则可由图上查得 $x = 0.25$ 。

在实用设计中，隔振系统固有频率最好低于5—7Hz。如果隔振的主要目的是降低机械振动所辐射的可听声，则固有频率可提高到10—14Hz。

三、常用隔振器

工程上常用的隔振材料有钢弹簧、橡胶、软木、毡类等，此外还有空气弹簧和液体弹簧。这里仅介绍应用最普遍的弹簧和橡胶隔振器。

1. 弹簧隔振器：弹簧隔振器有很多类

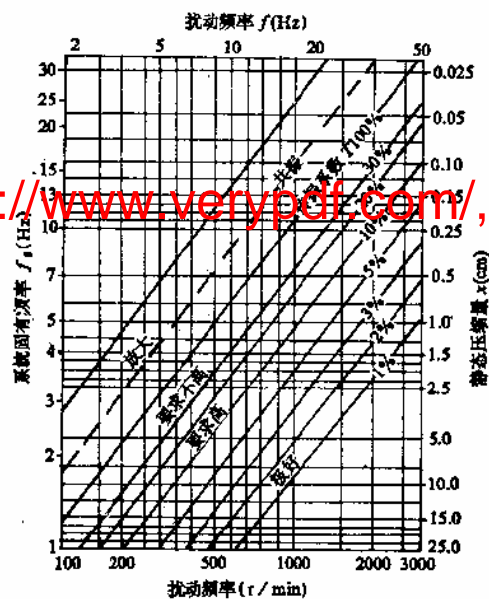


图14-7 隔振设计图

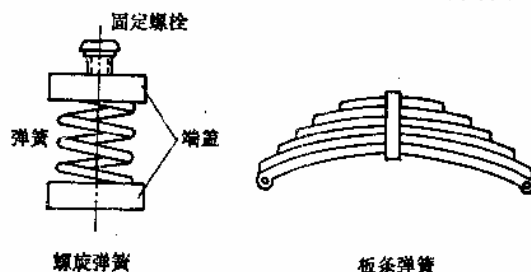


图14-8 钢弹簧隔振器

型，最常用的是螺旋形和板条形两种，如图14-8所示。

弹簧隔振器的优点是可以承受较大负载；耐高温，耐油污；有较大的静态压缩量；有很低的固有频率($<5\text{Hz}$)。缺点是本身阻尼太小($c/c_e = 0.005$)，易传递高频振动，易在150—350Hz范围内产生自身共振而传递中频振动，常需附加粘滞阻尼器，或在其上涂一层橡胶，增加阻尼，制成复合隔振器，以克服弹簧减振器的缺点。

当钢弹簧的静态压缩量较大时，易使弹簧失去稳定。为使隔振系统有足够的侧向稳定性，宜采用短而粗的弹簧，或者在侧向配备缓冲装置。

螺旋形钢弹簧的轴向弹性系数 K 可由下式计算：

$$K = \frac{Gd^4}{8nD^3} \tag{14-13}$$

式中： G ——切变弹性模量， $G = 8 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ ；
 d ——弹簧钢丝直径(m)；
 n ——弹簧有效圈数；
 D ——弹簧宽度，即螺旋的直径(m)。

钢弹簧的侧向弹性系数 K' 与轴向受压情况有关，进行隔振设计时，弹性的 K'/K (记作 α)应保持在0.5—2范围内， α 越小，表示弹簧的侧向稳定性越差。对于一定的 α ，弹簧的几何尺寸可按表14-5选取。

表14-5 弹簧几何尺寸比例

几何尺寸比例	α 值															
	0.5				1.0				1.5				2.0			
H'/D	2.50	1.90	1.55	1.35	1.45	1.25	1.10	1.00	1.00	0.90	0.78	0.70	0.65	0.60	0.50	0.45
H/D	2.50	2.28	2.17	2.16	1.45	1.50	1.54	1.60	1.00	1.08	1.06	1.12	0.65	0.72	0.70	0.72

摘自赵松龄，《噪声的降低与隔离》，同济大学出版社，下册p.223。

表中 H 为自然状态时长度， H' 为受压后处于平衡时的长度， x 为静态压缩量， $x = H - H'$ 。

安装弹簧隔振器时，应使各弹簧在同一平面上分布均匀对称，使受压均衡。当荷载不均匀对称时，重心一定要落在弹簧的几何中心，使机器的重心尽量降低，以保证整个系统的稳定性。

2. 橡胶隔振器：橡胶隔振器是选用一定硬度的橡胶材料制成合适的形状，粘结在金属附件上构成的。根据受力状况，可分为压缩型、剪切型和压缩剪切复合型，如图14-9所示。

橡胶隔振器的优点是：形状可自由选择；阻尼比 c/c_e 较大，不会产生共振激增现象；弹性系数可通过改变橡胶配方和结构进行控制。缺点是：不耐油污，不适于高温和低温下使用，易老化；对具有较低干扰频率和重量特别大的设备不适用。

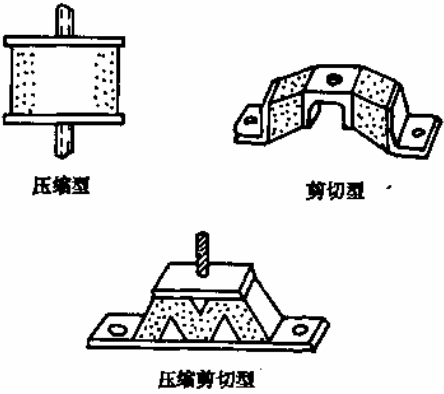


图14-9 橡胶隔振器

橡胶隔振器设计主要是确定材料的厚度和面积。材料的厚度用下式计算:

$$h = x \cdot E_d / \sigma \quad (14-14)$$

式中: h ——材料厚度(cm);

x ——橡胶的最大静态压缩量(cm);

E_d ——橡胶的动态弹性模量(kg/cm²);

σ ——橡胶的允许负载(kg/cm²)。

所需面积用下式计算:

$$S = P / \sigma \quad (14-15)$$

式中: S ——橡胶支承面积(cm²);

P ——设备重量(kg);

橡胶隔振器国内有系列产品,可根据需要选用。

表14-6 几种橡胶的有关参数

材 料 名 称	许可应力 σ (kg/cm ²)	动态弹性模量 E_d (kg/cm ²)	E_d / σ
软橡胶	1—2	50	25—50
较硬的橡胶	3—4	200—250	50—83
有槽绝或圆孔橡胶	2—2.5	40—50	18—25
海绵状橡胶	0.3	30	100

例14-1 有一台自重为600kg的机器,转速为2000r/min。安装在1×2×0.1m³的钢筋混凝土底板上。试设计橡胶隔振器,要求振动级降低20dB。

解:

要求振动级降低20dB,可算出 $T = 10\%$ 。从图14-7横坐标2000r/min引垂直线与所需 T 的斜线相交,从交点可查得所需静态压缩量 $x = 0.25$ cm,系统的固有频率可控制在10Hz附近。

选用带圆孔的丁腈橡胶板作隔振器,按照式14-12推算所需压缩量,取 $E_d/E_s = 2.25$ 。

$$x = (5^2 / f_0^2) \cdot \frac{E_d}{E_s} = (25 / 10^2) \times 2.25 = 0.56 \text{ (cm)}$$

查表14-6,取 $E_d/\sigma = 20$,按公式14-14计算橡胶板的总厚度:

$$h = x \cdot E_d / \sigma = 0.56 \times 20 = 11.2 \text{ (cm)}$$

根据负载及许可应力,按式14-15计算所需面积。总负载应为机器自重加上混凝土底板重量。混凝土底板重 W 为:

$$W = 2000 \times (1 \times 2 \times 0.1) = 400 \text{ (kg)}$$

所以,所需橡胶垫层的面积为:

$$S = \frac{P}{\sigma} = \frac{600 + 400}{2} = 500 \text{ (cm}^2\text{)}$$

根据安装构造要求,宜分成六个垫块,每个垫块的面积为:

$$S_1 = S / 6 = 500 / 6 \approx 84 \text{ (cm}^2\text{)}$$

根据上述计算,橡胶隔振垫层的大致尺寸可取厚11cm、面积9×9cm²或选取厚11cm、直径为10cm的圆柱体。

固定地脚螺栓与机器时,最好在机壳底部和螺帽下垫以橡皮垫,并在螺栓上套橡皮管。橡胶减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。

除了上面介绍的两种隔振器外,还有软木、毡类隔振材料,在此不再一一介绍。值得一提的是近年来出现的一种高效能隔振器——空气弹簧,见图14-10。它是在一个高强度空腔内用空气压缩机打进一定压力的空气,使其具有一定的弹性。空气弹簧一般设有自动调节系统,可根据荷载的重量,自动调节腔内压力,使机器保持稳定的下沉量。这种装置隔振效率高,固有频率低,而且具有粘性阻尼,常用于火车、汽车和一些消极隔振的场合。

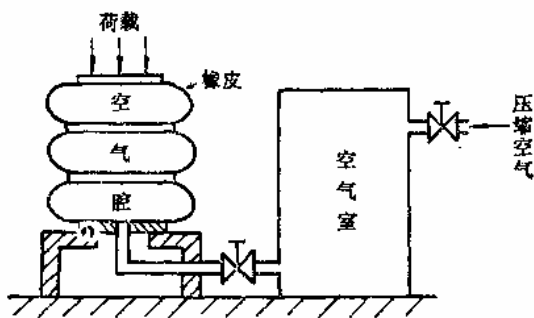


图14-10 空气弹簧示意图

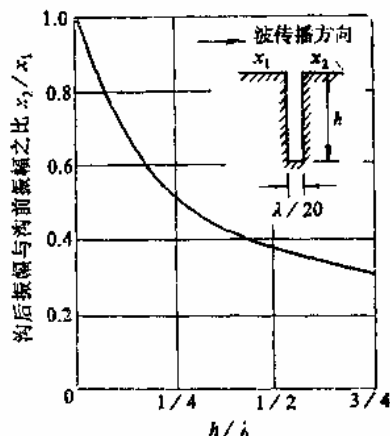


图14-11 防振沟的隔振效果

3. 防振沟:在振动波传播的路径上挖沟,可以阻止振动的传播,这就叫做防振沟。防振沟对于在地表面传播的振动的隔绝是很有效的。

防振沟的隔振效果主要决定于沟深,沟宽的影响不大。设计时可依据图14-11来粗略地估算沟的深度。

例14-2 欲使频率为10Hz的振动的振幅减为原来的一半,防振沟应多深?

解:

不同振动频率的地表波波长可由表14-7查得,当频率为10Hz时, $\lambda = 14\text{m}$ 。由图14-10

表14-7 不同频率地表波的波速与波长

振动频率 Hz	地表面波速 m/s	波长 λ cm	振动频率 Hz	地表面波速 m/s	波长 λ cm
10	140	1400	300	126	42.1
200	137	68.6	350	117	33.5
250	128	51.2			

查得当 $x_2/x_1 = 1/2$ 时, $h/\lambda = \frac{1}{4}$, 所以防振沟的深度为:

$$h = \frac{1}{4}\lambda = \frac{1}{4} \times 14 = 3.5(\text{m})$$

第三节 阻尼减振技术

许多设备是由金属薄板制成的,例如,车、船、飞机的主体,机器的护壁,空气动力机

械的管道壁等。当这些机械运转或行驶时,金属板便会发生弯曲振动,发出强烈的噪声。另外,用于控制噪声的隔声罩(见第十三章),由于设计不当,也会受激振动,不但不起隔声作用,反而会使噪声更强。对于这一类振动,常在金属板等薄壁结构上涂敷一层内摩擦损耗大的阻尼材料,能有效地减少振动,这就是阻尼减振技术。

一、阻尼减振的简单原理

阻尼材料减振主要是通过减弱金属板中传播的弯曲波来实现的:当薄板发生弯曲振动时,振动的能量迅速传给紧密涂在薄板上的阻尼材料,引起薄板与阻尼层之间和阻尼层内部的摩擦错动,使相当部分的薄板振动能被消耗,成为热能散发掉,减弱了薄板的弯曲振动。同时,阻尼材料还能缩短薄板被激振后的振动时间,从而也就降低了金属板辐射噪声的能量。

二、阻尼材料与阻尼层

常用的阻尼材料有沥青、软橡胶和各种高分子涂料。阻尼层的特性一般都采用材料的损耗因子 η 来衡量, η 值越大,材料的阻尼性能越好。大部分金属的 η 的数量级为 10^{-5} — 10^{-4} ,木材为 10^{-3} — 10^{-2} ,软橡皮 10^{-2} — 10^{-1} 。材料的损耗因子通常都是由实验室测定。

阻尼材料可由市场购置,也可以根据配方自己配制。国内一些单位研制的阻尼材料,损耗因子可达 3×10^{-2} — 5×10^{-2} ,可在不同的条件下使用。表14-7—14-10列出了几种国产阻尼浆的配方。

表14-7 沥青阻尼浆配方

材料成分	重量百分比	材料成分	重量百分比	材料成分	重量百分比
沥青	67	熟桐油	4	石棉绒	14
煤焦油	23.5	蓖麻油	1.5	汽油	14

表14-8 防振隔热阻尼浆

材料名称	重量百分比	材料名称	重量百分比
30%氯丁橡胶液	60	1—5mm膨胀蛭石	8
420环氧树脂	2	石棉粉	6
胡麻油醇酸树脂	4	2%苯酸钴液	0.6
膨胀珍珠岩	8	15%苯酸铝液	0.8
0.3—1mm细膨胀蛭石	10	苯酸锰液	0.6

表14-9 软木防热隔振阻尼浆

材料名称	重量百分比	材料名称	重量百分比
厚白漆	20	粒度4mm软木粉	13
光油	13	松香油	4
生石膏	23	水	27

阻尼层与金属板面的结合,一般有两种形式:一种是自由阻尼层,一种是约束阻尼层。

自由阻尼层是将阻尼材料涂在板的一面或两面,当板弯曲振动时,板和阻尼层都能进行压缩和伸长变形。

约束阻尼层是把阻尼浆涂在两层金属板中间,在板弯曲振动时,阻尼层一面受到拉伸,

表14-10 746阻尼浆

材 料 名 称	重量百分比	材 料 名 称	重量百分比
15%氯丁橡胶溶液	42	工业磷酸三苯酯	2.5
40%酚醛树脂溶液	15	工业二硫化钼	15
4*或3*膨胀蛭石	15	碳酸钙	8
石棉绒	2.5	溶剂 (乙酸丁酯70%) 120#汽油30%)	适量

摘自王文奇、江珍泉《噪声控制技术》，化学工业出版社。

另一面受到压缩，受上下两板面的约束不能伸缩变形，而主要受较大剪切变形。因此，约束阻尼层能耗散更多的振动能，金属板又提高了阻尼材料的弹性模量，故比自由阻尼层有更好的减振效果。约束阻尼层施工较复杂，造价较高，常用在要求较高的地方。

自由阻尼层厚度一般取板厚的2—3倍，厚度太小起不到阻尼作用，厚度再增加，阻尼效果增加不显著。约束阻尼层厚度影响因素较多，没有一般规律。

对阻尼层除了要求有较高的损耗因子外，还要求对金属有较好的粘结性，保证在金属板振动时不致碎裂和脱落。

第四节 质量平衡和动力吸振器

消除机械设备振动危害最行之有效的办法是改变机械的结构，从振动源本身消除或减小振动，这在某些场合是最有效的减振措施。质量平衡和动力吸振是两种最常用的办法。

一、质量平衡

旋转机械设备常因旋转体重心偏心而产生不平衡力，从而引起振动。这对于某些高速旋转的大型机械，往往会产生强烈振动，造成严重的环境问题。控制这种振动最有效的办法是避免偏心，可用质量平衡的方法。

(一)静态不平衡的校正

静态不平衡是指一个平面内的不平衡，如图14-12所示。如果圆盘的重心和转动轴有一距离 r ，则圆盘转动时会产生一离心力 F ：

$$F = mr\omega^2 \quad (14-16)$$

式中： m ——圆盘质量；

ω ——转动角速度。

消除这种振动，可在不平衡质量的反方向，即在圆盘较轻的一边附加一个质量 M ，使下式成立即可：

$$Mr' = mr \quad (14-17)$$

式中： r' ——附加质量 M 与转动轴间的距离。

(二)动态不平衡的校正

在转动体很长时，也会产生不平衡。这时不仅有重心的偏心，还有不平衡力偶影响转

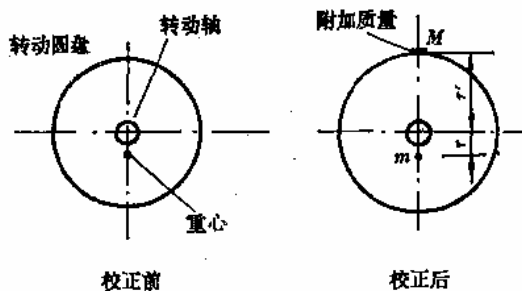


图14-12 静态不平衡及其校正

动,引起振动,这叫动态不平衡。动态不平衡实际上是两个或两个以上平面内的不平衡。如图14-13所示。不平衡发生在两个平面内,因此,校正时应在两个平面内进行平衡。

动态不平衡校正,要用专用的动平衡机,按照规定的程序操作,才能找到不平衡,然后

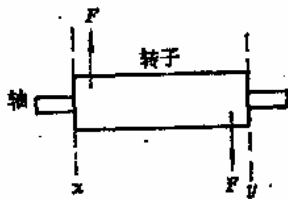


图14-13 动态不平衡示例

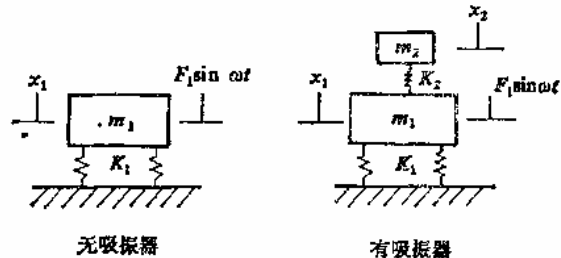


图14-14 动力吸振器原理

可进行校正。

二、动力吸振器

当机械设备受某一固定干扰频率激发而振动时,可以在机械设备上附加一个振动系统,使干扰频率激发的振动降低,这叫动力吸振器。

设质量为 m_1 的设备产生的振动力为 $F_1 \sin \omega t$,该设备安装在弹性系数为 K_1 的装置上。为消除振动,该设备上安装一附加振动系统,该系统由质量 m_2 和弹性系数为 K_2 的弹性元件组成,如图14-14所示。

整个系统的运动方程为:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + K_1 x_1 - K_2 (x_2 - x_1) &= F_1 \sin \omega t \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + K_2 (x_2 - x_1) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14-18)$$

上述方程的通解为:

$$\begin{cases} x_1 = A \sin \omega t \\ x_2 = B \sin \omega t \end{cases} \quad (14-19)$$

把式(14-19)代入式(14-18),整理得

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{K_2}{K_1} - m_1 \frac{\omega^2}{K_1}\right) A - \frac{K_2}{K_1} B &= \frac{F_1}{K_1} \\ A &= \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_a}\right)^2\right] \cdot B \end{aligned}$$

式中: ω_a ——吸振器的固有角频率, $\omega_a = \sqrt{\frac{K_2}{m_2}}$ 。

当 $1 - \left(\frac{\omega}{\omega_a}\right)^2 = 0$ 时, 也即 $f_a = f$ 时, 设备的振幅 A 为零, 即机器根本不振动, 动力吸振器就是利用这一特性来消除振动的。

当然实际情况是复杂的,干扰频率往往有一定变化范围,上面理论分析的系统实际上都包括一些阻尼,要求得理论解是困难的,因此,动力吸振器的设计要以实验进行调整。

例14-3 设机械的质量为100kg,转速为每分钟600转,在某一干扰频率下发生振动,若用动力吸振器消振,要求吸振器的质量为机械质量的1/10,试问弹性系数应多大?

解:

当吸振器的固有频率与机械的干扰频率相等时,机械的振动最小。因此

$$\frac{K_2}{m_2} = \frac{K_1}{m_1}$$

$$K_2 = m_2 (2\pi f_0)^2$$

$$= \frac{100}{10} [2\pi (600/60)]^2 = 3.95 \times 10^4 \text{ (N/m)}$$

习 题

14-1 在座位上,用安全带把胸部与座位系在一起能够承受的最大加速度列于下表中,它们的加速度级分别是多少?

14-2 钢制弹簧的 $\beta = 0.5\%$,静态压缩量 $x = 1\text{cm}$,此弹簧对频率为10Hz的振动的传递系数 T 是多少?传递损失 D 是多少分贝?

14-3 某隔振设计中采用钢弹簧,要求隔振系统固有频率 f_0 为5Hz,弹簧的压缩率 $x/H' = 0.2$,钢弹簧的 $\alpha = 1$,试确定弹簧的自然长度 H 和宽度 D 。

运动方向	最大加速度 (g)	时间限制 (s)
向 后	45	0.1
向 前	35	0.1
向 上	18	0.04
向 下	10	0.1

(答: $H = 8\text{cm}$, $D = 4\text{cm}$)

14-4 一台泵安装在一块平台上,为了隔振,平台下面安装了四个弹簧,测得每个弹簧静态压缩量 $x = 2.24\text{cm}$,系统的干扰频率 $f = 15\text{Hz}$,泵和平台共重2942N。求(1)系统的固有频率 f_0 ; (2)隔振系数 T ; (3)弹簧的弹性系数; (4)阻尼比 β (由图14-6查)。

(答: $f_0 = 3.34\text{Hz}$, $T = 5\%$, $K = 328.35\text{N/m}$, $\beta = 0.1$)

14-5 一台电机转速为每分钟1000转,带动一台泵,它们共同安装在一个基础上,电机下装两个弹簧,每个弹簧负载1961.3N,泵下也有两个弹簧,每个弹簧负载882.6N,要求 $T = 15\%$,求弹簧的弹性系数。(不考虑阻尼)

(答: $K_1 = 2884.3\text{N/cm}$, $K_2 = 1298\text{N/cm}$)

14-6 转速为每分钟1500转的电动机安装在 $1 \times 1 \times 0.1\text{m}^3$ 的钢筋混凝土底板上,电动机自重为300kg,每 m^3 钢筋混凝土重2000kg。试设计橡胶隔振器,使振动级降低14dB。

第二部分 电磁辐射和放射性污染治理技术

第十五章 电磁辐射和放射性污染治理技术

第一节 电磁辐射的危害与测量

电气与电子设备仪器已遍及生产、科学研究与医疗卫生等各个领域,并已进入人们日常生活之中。随着电子工业的发展与电子仪器设备的广泛应用而造成的电磁辐射对环境的污染与危害,已愈来愈为人们所认识。减少电磁污染,保障居民与操作人员的身心健康,已经是环境科学工作中的一个重要部分。

一、电磁辐射的作用机理及其对人体的危害

电气与电子设备的运行过程产生电波,电波的实质就是电磁辐射。从频率的概念而言,主要是指射频电磁场频段。当射频电磁场达到足够的强度时,就会对生物体产生作用,机体可吸收一定的辐射能量,发生生物学效应,主要表现为热效应。通常可将处于电磁场中的生物机体看作介质电容器。介质中含有极性与非极性分子,极性分子在射频电磁场作用下,将发生重新排列,这种作用称为偶极子的取向作用。非极性分子在电磁场中可被极化,同样可以产生偶极子取向作用。由于射频电磁场的方向变化极快,致使偶极子取向作用迅速变化。在这一过程中,偶极子与周围的分子发生剧烈碰撞而产生大量热能,这就是处于射频电磁场中生物机体产生热效应的基本过程。此外,机体中的电解质因受场力作用发生位移,在高频条件下,在平衡位置上振动发热。机体内的体液多为导体,在不同程度上具有闭合回路的性质,在电磁场作用下,局部发生感应涡流致热。这种能量转化率与场强成正比。当射频电磁场辐射强度在一定范围内,可对人体有良好作用;而超过一定范围时,则可破坏人体热平衡,有害健康。

电磁辐射对人体危害程度随波长而异,波长愈短对人体作用愈强,微波作用最为突出。射频电磁场的生物学活性与频率的关系为:微波>超短波>短波>中波>长波。不同频段的电磁辐射在大强度与长时间作用下,对人体产生下述病理危害:

处于中、短波频段电磁场(高频电磁场)的操作人员或居民,经受一定强度与时间的暴露,将产生身体不适感,严重者可引起神经衰弱症候群与反映在心血管系统的植物神经失调。但是这种作用是可逆的,脱离作用区,经过一定时间的恢复,症候可以消失,不形成永久性损伤。

处于超短波与微波电磁场中的作业人员与居民,其受伤害程度要比中、短波严重。尤其是微波的危害更甚。其频率在 3×10^8 赫兹以上。在其作用下,人体除将部分能量反射外,部分被吸收。辐射能使机体内分子与电解质偶极子产生强烈射频振荡。媒质间的摩擦作用转化为热能,从而引起机体升温。微波的功率、频率、波形、环境温度与湿度,以及被辐射的部位等因素,对伤害的程度与深度都有一定的影响。这种危害的主要病理表现为:引起严重神经衰弱症状,最突出的是造成植物神经机能紊乱。在高强度与长时间作用下,对视觉器官造成严重损伤,同时对生育机能也有显著不良影响。

微波对生物危害的一个显著特点是具有积累性,在一次伤害未得到恢复前再次受辐射,伤害将积累,多次积累,则伤害不易恢复。

二、电磁污染的种类与传播途径

(一) 射频污染的种类

射频电磁场包括两类：天然源与人为源。天然源是由自然现象所引起，由于大气中发生电离作用，导致电荷的蓄积，从而引起放电现象。这种放电的频带较宽，可从几千周到几百兆周，乃至更高的频率。人为源按频率的不同可分为工频场源与射频场源。工频场源以大功频输电线路产生的电磁污染为主，也包括若干放电型污染源。射频场源主要由无线电或射频设备工作过程产生的电磁感应与电磁辐射所引起。表15-1与15-2分别给出天然与人为电磁污染源。由于电子工业的迅速发展与电气、电子设备广泛应用，人为电磁辐射污染已成为环境污染的主要来源。

(二) 电磁污染的传播途径

电磁污染大体可由下述三种途径传播：

表15-1 天然电磁污染源

分 类	来 源
大气与空间污染源	自然界的火花放电、雷电、台风、高寒地区飘雪、火山喷发……
太 阳 电 磁 场 源	太阳的黑点活动与黑体放射……
宇 宙 电 磁 场 源	银河系恒星的爆发、宇宙间电子移动……

表15-2 人为电磁污染源

分 类		设 备 名 称	污 染 来 源 与 部 件
放电所致污染源	电晕放电	电力线(送配电线)	由于高电压、大电流而引起静电感应、电磁感应、大地漏泄电流所造成。
	辉光放电	放电管	白光灯、高压水银灯及其它放电管
	弧光放电	开关、电气铁道、放电管	点火系统、发电机、整流装置……
	火花放电	电气设备、发动机、冷藏车、汽车……	整流器、发电机、放电管、点火系统……
工频辐射场源		大功率输电线、电气设备、电气铁道	污染来自高电压、大电流的电力线场电气设备
射频辐射场源		无线电发射机、雷达……	广播、电视与通信设备的振荡与发射系统
		高频加热设备、热合机、微波干燥机……	工业用射频利用设备的工作电路与振荡系统……
		理疗机、治疗机	医学用射频利用设备的工作电路与振荡系统……
建筑物反射		高层楼群以及大的金属构件	墙壁、钢筋、吊车……

1. 空间辐射：电子设备与电气装置工作过程，本身相当于一个多向发射天线，不断地向空间辐射电磁能。这种辐射传播又分为两种方式：一种是以场源为核心，在半径为一个波长范围内，电磁能向周围传播，是以电磁感应方式为主，将能量施加于附近的仪器以及人体。一般情况，在射频设备某些强辐射部位，由于感应作用，可使日光灯自动发光与金属板间碰撞产生火花等现象，这就说明近场感应已十分危险；另一种是在半径为一个波长范围之

外,电磁能进行传播,以空间放射方式将能量施加于敏感元件。在远区场中,输电线路、控制线等具有天线效应,接收空间电磁辐射能进行再传播而构成危害。

2. 导线传播:当射频设备与其它设备共用同一电源,或两者间有电气联接关系,电磁能(信号)即可通过导线进行传播。此外,信号输出、输入电路、控制电路等,也能在强磁场中拾取信号进行传播。

3. 复合传播污染:属于同时存在空间传播与导线传播所造成的电磁辐射污染,称为复合传播的污染。

三、电磁污染的测量

(一)电磁污染测量的特点

电磁场有远区场与近区场之分。远区场是以场源为中心,半径在一个波长之外的区域;近区场则是指一个波长范围内的区域。由于两种区场电磁辐射能传播特征与规律不同,因而其测量特点也不同。

1. 远区场电磁污染测量特点:远区场电磁传播方式以辐射为主,也称为辐射场。由于已脱离了场源,电磁辐射强度的衰减比近区场缓慢,其电场强度 E 与磁场强度 H 有一固定的数学关系:

$$E = 120\pi H = 377H \quad (15-1)$$

因此,只要测量出该区场中电场或磁场任一强度,即可推算出另一场强。由于磁场易于测量,故常测定磁场强度后再推算电场强度。在实践中常以电场强度表示电磁污染程度。

2. 近区场电磁污染测量特点:近区场主要为感应场。电场强度与磁场强度无固定关系,因此需要由偶极子天线与环形天线分别测量电场与磁场强度。由于近区场强大,要求场强仪有较大的测量范围。近区场电磁场强随空间位置的不同而迅速变化,为使在仪器接收天线范围内场强保持为常数,仪器的天线尺寸应尽可能小,以便使测定结果能代表天线所在区域的场强值。

3. 电磁污染的量度单位:由于射频电磁场的频段不同,其测量采用的单位也有所不同。高频(100千周—30兆周)与甚高频(30—300兆周)的电场强度用V/m、mV/m、 μ V/m或分贝表示。磁场强度用A/m、mA/m或 μ A/m表示。微波(特高频, >300兆周)是以能量通量密度量度,其单位为W/cm²、mW/cm²或 μ W/cm²。

4. 测量方法与仪器:对于主要辐射场源污染的测量是以设备为0点,作东、西、南、北、东南、西南、东北、西北每一方位为45°角(8个方位)的测量,每一方向上的测点选在10、20、30、40m……。测量前根据污染源的工作频率 f 求出大致波长 λ ,

$$\lambda = \frac{C}{f} = \frac{3 \times 10^8}{f} \quad (C \text{ 为光速}) \text{ 即为近区场之作用半径。接近区场与远区场范围分}$$

别测量场强,将测量之数据(包括峰值与平均值)记录于设定的表格中,可以做出辐射特性曲线与辐射图。

电磁场强测量仪器:高频、甚高频与微波的辐射性质不同,且近、远区场测量要求也有差别,因此,测量仪器也各不相同,需根据测量的频段与范围分别选用各自的场强测量仪。我国生产的这类仪器已成系列,可以根据测量对象与需要选用。

第二节 防治电磁辐射的基本方法

电磁辐射是不可见的物理性污染,防治这种污染的技术称为“抑制”技术。常用的抑制技术包括下述几个方面。

一、电磁屏蔽技术

(一)电磁屏蔽的原理与方式

电磁屏蔽是采用某种能抑制电磁辐射能扩散的材料,将电磁场源与外界隔离开来,使辐射能限制在某一范围内,达到防止电磁污染的目的。屏蔽材料选用良导体。当场源作用于屏蔽体时,因电磁感应,屏蔽体产生与场源电流方向相反的感应电流而生成反向磁力线,这种磁力线与场源磁力线相抵消,达到屏蔽效应。屏蔽体采取接地处理,使屏蔽体对外界一侧电位为零,这样电场也起到屏蔽作用。电磁屏蔽的实质是利用屏蔽材料的吸收与反射效应。由于反射作用,使射入屏蔽体内部的电磁能显著减少;而射入屏蔽体内的部分电磁能又被吸收,从而使穿透屏蔽体的能量显著降低。

屏蔽方式根据场源与屏蔽体相对位置可分为主动场屏蔽与被动场屏蔽两类。主动场屏蔽是将场源作用限制在某一范围之内,使之对限定范围之外的任何生物机体或仪器不产生影响。主动场屏蔽的特点是场源与屏蔽体之间距离小,结构严密,可以屏蔽电磁场强大的场源,要有符合技术要求的接地处理。被动场屏蔽是将场源设置于屏蔽体之外,使之对限定范围内的生物机体或仪器不产生影响。其特点是屏蔽体与场源间距离大,屏蔽体可不接地。

(二)屏蔽材料与结构

实验证明,铜、铝与铁对各种频段的电磁辐射源都有较好的屏蔽效果。在屏蔽设计中可以根据技术与经济评价选材。一般情况,电场屏蔽宜选用铜材,磁场屏蔽则宜选用铁材。

屏蔽体结构一般选用板结构或网结构两种。板结构的设计厚度根据下式确定:

$$R_a = 1.314d\sqrt{fG\mu} \quad (15-2)$$

式中: R_a ——金属板内对电磁能吸收衰减量(dB);

d ——金属板厚度(cm);

G ——金属相对导电系数;

μ ——金属磁导率;

f ——场源频率。

由式(15-2)可见,电磁能的吸收衰减随屏蔽层厚度增大而增大。但由于射频电流的集肤效应,过厚的屏蔽也是不必要的。实验表明,当厚度超过1毫米时,屏蔽效果不再有显著改善。

对于网状结构,设计应考虑网孔目数与层数。网孔目数愈大,金属丝直径愈粗,愈有利于屏蔽。对中、短波场源屏蔽要求不严格,可以根据取材的方便确定。对于微波场源则要高目数网材,但网孔的直径要防止与波长构成比例关系。网层数的选择根据屏蔽要求而定,一般双层效果远高于单层。

屏蔽体要求有较好的整体性,交接处需用严格的焊接结构。缝隙与门窗要严密,但防止产生绝缘部位。

(三)接地处理

接地处理是将屏蔽体用导线与大地连接,为屏蔽体与大地间提供一个等电势分布。设计

接地系统必须遵守下述各项要求:

1. 由于射频电流的集肤效应,接地系统要有足够的表面积,以宽为10厘米的铜带为佳。
2. 为保证接地系统有较低的阻抗,接地线应尽量短。
3. 为保证接地系统的良好作用,接线长度应避免 $1/4$ 波长的奇数倍。
4. 接地方式有埋接地棒、铜板或网格等,无论哪种方式,都应有足够厚度,以保证一定的机械强度与耐腐蚀性。

二、吸收法控制微波污染

对于微波辐射污染控制可以采用对这种辐射能产生强烈吸收作用的材料敷设于场源外围,以防止大范围的污染。目前电磁辐射吸收材料可分为两类,一类为谐振型吸收材料,是利用某些材料的谐振特性制成的吸收材料。这种吸收材料厚度小,对频率范围较窄的微波辐射有较好的吸收效率。另一类为匹配型吸收材料,是利用某些材料和自由空间的阻抗匹配,达到吸收微波辐射能的目的。

应用吸收材料防护,一般多用在微波设备调试过程,要求在场源附近能将辐射能大幅度衰减。实际应用的吸收材料种类繁多,如各种塑料、橡胶、胶木、陶瓷等加入铁粉、石墨、木材和水等物质制备而成。此外,应用等效天线吸收辐射能,也有良好效果。

三、远距离控制和自动作业

根据射频电磁场,特别是中、短波,其场强随距场源距离的增大而迅速衰减的原理,若采取对射频设备远距离控制或自动化作业,对操作人员将会显著减少辐射能的损害。

四、线路滤波

为了减少或消除电源线可能传播的射频信号和电磁辐射能,可在电源线与设备交接处加装电源(低通)滤波器,以保证低频信号畅通,而将高频信号滤除,起到对高频传导隔离去除作用。

五、合理设计工作参数,保证射频设备在匹配状态下操作

射频设备工作参数的合理,元件、线路正确的布局,使设备在匹配条件下工作时,可以避免设备因参数不能处于最佳状态或负载过轻而形成高频功率以驻波形式通过馈线辐射造成污染。

六、个人防护

对于临时无屏蔽条件的操作人员直接暴露于微波辐射近区场时,必须采取个人防护措施,包括穿防护服,戴防护头盔和防护眼镜。

第三节 放射性废物处理与处置技术

随着原子能工业的日益发展与核能、核素在各国和许多领域中的应用,放射性废物的排放量不断增加,已严重威胁着人类与自然环境。放射性废物处理与处置问题早已引起了环境科学界的关注,并进行了大量研究工作。放射性废物处理与处置技术得到很大的发展,已形成一整套特殊的环境工程技术体系,并在不断地完善。

一、放射性废物的来源与分类

(一)放射性废物的来源

放射性废物来源于下述四个方面:

1. 核燃料的生产过程产生的放射性废物：包括铀矿开采、铀水法冶金工厂、核燃料精制与加工过程。

2. 核反应堆运行过程产生的放射性废物：包括生产性反应堆、核电站与其他核动力装置的运行过程。

3. 核燃料后处理过程产生的放射废物：包括废燃料元件的切割、脱壳、酸溶与燃料的分离与净化过程。

4. 放射性同位素应用过程产生的放射性废物。由于放射性废物来源的不同，其性质也各有差异。

(二)放射性废物的分类

在核工业的各个环节中产生的放射性固体、液体与气体废物，各自的放射性水平有显著的差异，为使能经济有效地分别处理各类放射废物，各国按放射性废物的放射性水平制订了分类标准。根据国际原子能机构的建议，放射性废液与废气按单位体积具有的放射性强度—— Bq/m^3 或 Bq/L 作为统一的分类标准，固体废物则按单位时间固体表面积辐射的剂量—— $\text{C}/\text{kg}\cdot\text{h}$ 进行分类。分类表如表15-3。

表15-3 国际原子能机构建议的放射性废物分类表

形态	类别	放射性强度 A ($3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}/\text{m}^3$)	废物表面辐射剂量 D ($2.58 \times 10^{-4} \text{ C}/\text{kg}\cdot\text{h}$)	备 注
液 体	1	$A \leq 10^{-9}$	—	一般可不处理；
	2	$10^{-9} < A \leq 10^{-8}$		处理时不用屏蔽；
	3	$10^{-8} < A \leq 10^{-7}$		处理时可能用屏蔽；
	4	$10^{-7} < A \leq 10^{-6}$		处理时必须屏蔽；
	5	$10^{-6} < A$		必须先冷却
气 体	1	$A \leq 10^{-10}$	—	一般不处理；
	2	$10^{-10} < A \leq 10^{-9}$		一般用过滤法处理；
	3	$10^{-9} < A$		用其他严格方法处理；
固 体	1		$D \leq 0.2$	β, γ 辐射体占优势；
	2		$0.2 < D \leq 2.0$	含 α 辐射体微量；
	3		$2.0 < D$	
	4		α 放射性用 Bq/m^2 表示	从危害观点确定 α 辐射占优势， β, γ 辐射微量

由分类表可见，放射性废液的5类中第1类允许不加处理可以直接排放于环境中。第2类需采用一般的物理、化学法处理后，使达到第1类水平，排放或回用，操作者可直接操作。第3类也需采用常规物理、化学法处理达到第1类水平后，排放或复用，但需在屏蔽条件或远距离操作。上述3类废液归类为低水平放射性废液。第4类属于中水平放射性废液，仍可采用常规物理、化学方法与蒸发浓缩处理，但必须在较严密的屏蔽下操作。第5类属于高水平放射性废液，必须采取特殊安全措施进行最终安全处置。

放射性废气中第1类为低水平放射性废气，一般直接通过高烟囱排放；第2类属于中水平放射性废气，在通过高烟囱排放前必须经过过滤器净化；第3类废气必须采用特殊的处理技术，去除其中的裂变产物与高放射性气溶胶。

四类放射性固体废物中,前三类均含有高穿透性 β 、 γ 射线为主的辐射固体废物,主要需防止这几类废物对人体的外照射伤害。第4类则主要是含高辐射能量、短射程的 α 辐射体为主的废物,对这种废物主要应防止侵入人体造成内照射的危害。

二、放射性废液的成分与性质

(一)核燃料生产系统产生的放射性废液的成分与性质

由采矿、矿石粉碎、溶矿、铀提取、精制与加工过程组成的核燃料生产系统中,放射性废液主要产生于溶矿、铀提炼与精制过程。目前由溶矿到铀提炼的工艺有酸溶—溶剂萃取、酸溶—离子交换与碱溶—沉淀等不同工艺,因而产生的废水性质不同。表15-4列出不同工艺产出的废水成分与性质。这类废水的主要特征是含有高浓度溶解固体与悬浮固体,并含超铀元素,其中危害最大的是镭-226、钍-232和铀本身。铀精制过程每加工1吨铀约产生3.8m³废水,其中含有一定量钍-234和镭-234。

表15-4 不同工艺产品的废水成分与性质

工 艺	pH	U ₃ O ₈ (g/L)	放射性强度(3.7×10^3 Bq/mL)		
			Ra ²²⁶	Th ²³²	Th ²³⁴ + Pa ²³⁴
酸溶—溶剂萃取	1.5	0.10	4.0×10^{-8}	3.9×10^{-8}	1.2×10^{-4}
酸溶—矿浆离子交换	3.3	0.0034	5.4×10^{-8}	1.2×10^{-8}	4.8×10^{-4}
碱溶—沉淀综合工艺	6.9	0.02	8.1×10^{-8}	9.4×10^{-8}	5.1×10^{-4}
酸溶—逆流 倾析—溶剂萃取	2.0	0.002	2.7×10^{-8}	1.1×10^{-8}	—

Please register PDFcamp on <http://www.verypdf.com/>, thank you.

反应堆运行系统废水成分与性质
反应堆的种类甚多,按用途可分为生产堆、动力堆与实验堆;按冷却剂的性质可分为石墨堆、轻水堆、重水堆与熔盐堆;若按反应堆结构,又有压水堆、沸水堆、气冷堆、快中子增殖堆之分。由于反应堆类型不同,运行过程产生的放射性废水的成分与性质也有差异。这类废水中的放射性化学成分主要来源于冷却剂自身含有的杂质与腐蚀产物受中子活化的结

表15-5 轻水反应堆冷却剂成分与放射性性质

核 素	半衰期	γ 射线能量(MeV)	可能的形成方式
Mg ²⁷	9.5min	0.84, 1.015	Mg-26(n, γ)Mg-27 Al-27(n, γ)Mg-27
Mn ⁵⁶	2.6h	0.85, 1.8, 2.1	Mn-55(n, γ)Mn-56 Fe-56(n,p)Mn-56
Na ²⁴	15h	1.37, 2.76	Na-23(n, γ)Na-24 Al-27(n, α)Na-24 Mg-24(n,p)Na-24
As ⁷⁶	26.5h	0.56, 1.21, 1.41 1.78, 2.06	As-75(n, γ)As-76 Se-76(n,p)As-76
P ³²	14.2d	无 γ 射线	S-32(n,p)P-32 P-31(n, γ)P-32
S ³⁵	87.2d	无 γ 射线	S-34(n, γ)S-35

果。有时当燃料元件表面破损,致使裂变物质泄漏,可能造成严重污染,产生水平较高的废水。表15-5、15-6分别列出轻水反应堆冷却剂及沉淀物中检出成分与放化性质。表15-7列出典型沸水反应堆第一回路冷却剂中放化性质。

表15-6 冷却剂沉淀物成分与放化性质

核素	半衰期	γ 射线能量(MeV)	可能的形成方式
Fe ⁵⁹	45d	0.19, 1.10, 1.29	Fe-58(n, γ)Fe-59
Sc ⁴⁵	84d	0.89, 1.12	Sc-45(n, γ)Sc-46
Zn ⁶⁵	245d	0.51, 1.14	Zn-64(n, γ)Zn-65
Mn ⁵⁴	300d	0.835	Fe-54(n, p)Mn-54
La ¹⁴⁰	40.2h	0.33, 0.49, 0.82, 1.60	裂变

表15-7 沸水堆第一回路冷却剂中放化性质

同位素	半衰期	浓度(计数/min·mL)	占总 γ 放射性百分率(%)
Na ²⁴	15h	3×10^5	76
Mn ⁵⁶	2.6h	8×10^4	20
Co ⁵⁸	71d	8×10^3	2.0

表15-8 元件贮存池放射性废水成分与性质

放射性核素	浓度(3.7×10^3 Bq/mL)	%	% (H ³ 除外)
H ³	2×10^{-5}	35.1	
P ³²	1.5×10^{-5}	0.26	0.41
S ³⁵	4×10^{-4}	7.02	10.12
Ca ⁴⁵	1×10^{-5}	0.17	0.27
Cr ⁵¹	2×10^{-4}	3.51	5.41
Zn ⁶⁵	2×10^{-5}	0.07	0.10
Co ⁶⁰ + Fe ⁶⁰	1×10^{-5}	0.17	0.27
Sr ⁹⁰	5×10^{-6}	0.08	0.13
Sr ⁹⁰	3×10^{-5}	0.52	0.81
Sb ¹²⁴	2×10^{-5}	0.35	0.54
Cs ¹³⁷	2×10^{-5}	35.12	54.14
Cs ¹³⁴	1×10^{-5}	17.56	27.07
其它	很小, 忽略不计	很小, 忽略不计	很小, 忽略不计

元件贮存池是辐照后燃料元件临时冷却存放的场所, 废元件出堆后 需在此池内贮存 100 天左右。池中注有冷却、防护用水, 经元件贮存后, 此水成为放射性废水, 其成分与放化性质列于表15-8中。

(三)核燃料后处理厂放射性废水成分与性质

核燃料后处理是对辐照后燃料元件实施化学处理, 回收其中剩余与新生燃料的工艺过程, 包括元件切割、脱壳、燃料芯酸溶、燃料的萃取分离与加工等工序。后处理过程是产生放射性废水量大、强度高的核工艺系统, 其中脱壳、酸溶与燃料萃取分离、净化工序中分别

产生不同性质的放射性废水。

1. 燃料元件脱壳废水的性质：核燃料元件有几种不同的金属包壳，如铝、不锈钢与锆合金等。在后处理过程首先脱除金属包壳。脱壳有两种方法：一种是用可溶解这种金属壳的溶液浸溶脱壳，另一种是用机械脱壳。前者产生大量放射性废液，后者产生放射性固体废物。

浸溶脱壳的浸溶液因包壳金属种类而异。铝壳采用氢氧化钠-硝酸钠复合液浸溶，其废液成分与性质列于表15-9。锆合金包壳采用氟化铵-硝酸铵复合液浸溶，废液成分与性质列于表15-10。不锈钢包壳一般采用硫酸浸溶，废液成分与性质列于表15-11中。三种废液均属中水平放射性废液。

表15-9 铝包壳脱壳废液成分与性质
脱壳剂：18.8MNaOH-3.6MNaNO₃混合液

化 学 成 分		放 化 成 分	
NaAlO ₂	1.2mol/L	总β	9.1 3.7×10 ⁸ Bq/mL
NaOH	1.0mol/L	总γ	27.0 3.7×10 ⁸ Bq/mL
NaNO ₂	0.6mol/L	Csβ	1.2 3.7×10 ⁸ Bq/mL
NaNO ₃	0.9mol/L	Srβ	0.5 3.7×10 ⁸ Bq/mL
		稀土+钪β	0.2 3.7×10 ⁸ Bq/mL
Na ₂ SiO ₃	0.02mol/L	Zrγ	8.0 3.7×10 ⁸ Bq/mL
比重	1.19	Nbγ	6.2 3.7×10 ⁸ Bq/mL
U和Pu，或U和Th	占它们在燃料中总量的0.04%	Ruβ	5.0 3.7×10 ⁸ Bq/mL
		Pu	1,500衰变/min·mL

废液体积：1.3m³/tU

Please register PDFcamp on <http://www.verypdf.com/>, thank you.

表15-10 锆合金包壳脱壳废液成分与性质
脱壳剂：6MNH₄F—1.0mol/LNH₄NO₃
燃料：加压水冷反应堆使用的2号锆合金(Zircaloy-2)包壳燃料

成 分	原 始 废 液	中 和 废 液
Zr ⁴⁺	0.2mol/L	0.18mol/L
Na ⁺	—	1.6mol/L
F ⁻	1.5mol/L	1.4mol/L
OH ⁻	—	0.05mol/L
NO ₃ ⁻	0.02mol/L	0.05mol/L
NH ₄ ⁺	0.75mol/L	—
Sn ⁴⁺	0.003mol/L	0.003mol/L
Al ³⁺	0.0075mol/L	0.006mol/L
U, Pu, 裂变产物	约占其总量的0.02%	约0.02%
体积, m ³ /tU	15.9	17.5

2. 核燃料芯酸溶与燃料萃取分离工艺废液的性质：核燃料芯一般采用硝酸溶解，再采用溶剂萃取工艺由溶液中提取铀、钍与钷，将大量裂变产物残留在萃余液中，这一工艺过程称为共去污循环。残液中含有99.9%以上裂变产物，作为高水平放射性废液排出，这是核工业中唯一最高水平的放射性废液。表15-12选列了几种典型共去污循环工艺的废液成分与产量。

表15-11 不锈钢包壳脱壳废液成分与性质

脱壳剂: $6\text{MH}_2\text{SO}_4$

燃料: 爱迪生加固燃料组件, 外壳含有9.9kg304型不锈钢

成 分	原 始 废 液	中 和 废 液
H^+	4.4mol/L	—
OH^-	—	0.5mol/L
$\text{Fe}^{3+}, \text{Cr}^{3+}, \text{Ni}^{2+}$	1mol/L	0.72mol/L
SO_4^{2-}	3.3mol/L	2.4mol/L
Na^+	—	5.3mol/L
U^{6+}	占其总量的0.04%	占总量的0.04%
Th^{4+}	占其总量的0.01%	占总量约0.01%
体积: $\text{m}^3/\text{tU} \rightarrow \text{Th}$	8.1	11.3

表15-12 几种典型共去污循环废液成分

成分(%, mol/L)	铝壳铀燃料 Purex流程	铀-钍合金 TBP-25流程	铝壳钍燃料 Therex流程
裂变产物(%)	>99.9	约99.9	约99.9
钍、钷(%)	<0.1	约0.1	约0.1
Al^{3+} (mol/L)	0.004	1.20	0.05
Fe^{3+}	0.01		0.01
Cr^{3+}	0.004		
Ni^{2+}	0.0032		
H^+	2.36	0.40	3.00
Na^+	0.02		0.02
NO_3^-	2.40	4.00	3.02
SO_4^{2-}	0.025		
F^-			0.02
产率(L/tU)	4000	166000	5450

表15-13列出了核燃料后处理工艺废液中主要裂变产物的性质。由于废液中含有大量裂变产物,在衰变过程将产生大量热能,导致废液升温,乃至沸腾。因此,在对这类废液采取特殊的安全处置之前,需要进行一定时间的冷却贮存过程,以便使大量短半衰期的放射性物质衰变完毕。

3. 核燃料净化循环工艺废液性质:由共去污循环提取的核燃料尚需进一步净化,去除夹带的少量裂变产物与杂质,这一过程称为净化循环,是采用再酸解-溶剂萃取工艺。过程中产生的放射性废液除含量与放射性强度低于共去污循环的废液外,所含成分与性质大体接近,这种废液属于中水平放射性废液。

4. 其他放射性废水的性质:放射性同位素的生产及其在不同领域的应用,核工业工厂或实验室附设的洗衣房等,均产生不同性质的放射性废水。表15-14列出两种实验室与洗衣房废水性质,以资参考。这些废水均属低水平放射性废水。

表15-13 共去污循环工艺废液中含有的主要裂变产物与性质

核素	半衰期	β 能量(MeV)	γ 能量(MeV)
Kr ⁸⁵	10.27a	0.695(99+%)	无
Sr ⁸⁹	54d	1.463(100%)	无
Sr ⁹⁰	28a	0.61(100%)	无
Y ⁹⁰	64.5h	2.18(100%)	1.4(0.4%)
Y ⁹¹	58d	1.537(—100%)	1.22(0.3%)
Zr ⁹³	63d	0.364(57%), 0.396(42%) 0.883(1%)	0.717(98%)
Nb ⁹³	35d	0.160(100%)	0.745(100%)
Mo ⁹⁹	67h	0.45(13%), 1.23(87%)	0.780, 0.740, 0.180, 0.140
Ru ¹⁰³	41d	0.217(95%), 0.698(5%)	0.498(95%)
Ru ¹⁰⁶	1.0a	0.0392(100%)	无
Rh ¹⁰¹	30s	2.44(12%), 3.1(11%)	2.41(0.25%), 1.55(0.5%) 1.045(2%)
Te ^{127m}	90d	无	0.0885(100%)
Te ¹²⁷	9.3h	0.7(100%)	无
Te ^{129m}	33d	无	0.106(100%)
Te ¹²⁹	72d	1.8(100%)	0.8(100%), 0.3(100%)
I ¹³¹	8.05d	0.250(2.8%), 0.335(9.3%) 0.608(87.2%), 0.815(0.7%)	0.722(3%), 0.637(9%) 0.364(80%), 0.284(5.3%)
Xe ¹³³	5.27d	0.345(100%)	0.081(100%)
I ¹³⁵	6.68h	0.5(35%), 1.0(40%), 1.4(25%)	1.8(50%), 1.27(50%)
Cs ¹³⁴	2.06a	0.638(1%), 0.1(0.95%)	0.24(1%), 0.5(6%), 0.17(1%)
Cs ¹³⁷	30a	0.523(92%), 1.17(8%)	无
Ba ¹⁴⁰	12.8d	0.480(40%), 1.022(60%)	0.54(30%), 0.30(10%) 0.16(10%), 0.03(100%)
La ¹⁴⁰	40.2h	1.32(70%), 1.67(20%)	3.0(1%), 2.5(5.4%) 1.598(94%), 0.8151(29%)
Ce ¹⁴¹	32d	0.422(67%), 0.585(33%)	0.145(67%)
Pr ¹⁴³	13.7d	0.932(100%)	无
Nd ¹⁴³	稳定的	无	无
Ce ¹⁴⁴	290d	0.170(30%), 0.300(70%)	0.134(10%), 0.100(10%) 0.0087(10%), 0.054(10%) 0.0337(10%)
Pr ¹⁴⁴	17.5min	0.8(3%), 2.3(2%)	2.185(1%), 1.480(2%) 0.695(4%)
Nd ¹⁴⁷	11.3d	0.38(25%), 0.60(15%) 0.83(10%)	0.532(25%), 0.318(15%) 0.092(60%)
Pm ¹⁴⁷	2.6a	0.223(100%)	无
Sm ¹⁴⁸	稳定的	无	无
Sm ¹⁵¹	93a	0.076(100%)	0.019(100%)
Eu ¹⁵³	1.7a	0.152(84%), 0.252(16%)	0.1368(—), 0.1309(—), 0.1045(—), 0.0858(—),

表15-14 放射性化学与生物实验室与洗衣房的废水成分与性质

成 分	化学实验室废水	生物物理实验室废水	洗衣房废水
pH	7.8	8	5.5
钠(mg/L)	92	62	359
钙(mg/L)	40	80	2
镁(mg/L)	18	18	1.2
氯化铁(mg/L)	2.8	—	—
氮(mg/L)	0.18	1.1	0.2
钾(mg/L)	—	33	11.2
锰(mg/L)	—	—	8.2
重碳酸根(mg/L)	85	67	79.2
硝酸根(mg/L)	99	31	—
氯根(mg/L)	46	96	241.5
铬酸根(mg/L)	0.6	—	—
硫酸根(mg/L)	14	48	91.2
二氧化硅(mg/L)	106.5	106.5	106.5
磺基环烷酸(mg/L)	38.2	13.9	174
油及其它有机物(mg/L)	40	41.4	160
总盐量(mg/L)	622	1040	1756
α 辐射体浓度(3.7×10^{10} Bq/L)	1×10^{-7}	1×10^{-8}	1×10^{-7}
β 辐射体浓度(3.7×10^{10} Bq/L)	1×10^{-7}	1×10^{-7}	1×10^{-7}
生化需氧量(mgO_2/L)	5—10	300—350	250—300

三、放射性废气与固体废物的性质

(一)放射性废气的产生与性质

放射性废气来源于核工业的两方面，第一是核动力反应堆运行过程，核燃料辐照过程产生惰性气体同位素氙-133、氪-85与挥发性的碘-131与碘-129，溢出冷却剂之外形成放射性废气。这类废气夹带有少量水雾与气溶胶。以一典型压水堆为例，其废气间歇地以较小流量释放，平均每年排放的这类废气中，总放射性达到38,000居里；第二是后处理工厂产生高放射性废气。这些废气主要来源于核燃料元件的切割、脱壳与溶芯过程。积累于燃料孔隙中的氪-85与碘同位素在切割过程，不同程度的释放出来，同时有少量的氙释放。在浸溶过程，剩余在燃料中的氪、碘同位素随浸溶而释放，氙则与溶液中之氢交换。在上述过程同时还产生含高放射性的酸性雾沫气体溶胶。

其它方面的放射性废气一般都属于中、低水平放射性废气，多数都可以直接通过高烟囱排放。

(二)放射性固体废物的产生与性质

在核工业各环节与放射性同位素应用中，都可能产生放射性固体废物。其中核工厂中各类受放射性沾污而报废的设备、机械、管道、零件等，均属于中、低水平放射性固体废物；核燃料后处理中机械脱壳产生放射性水平较高的放射性固体废物；放射性废水处理过程中、高水平放射性泥渣，以及受污染废弃的离子交换树脂、滤料等；放射性废气处理系统中的报废过滤器，被放射性沾污的玻璃器皿、脱脂棉、吸水纸、破布、工作服、隔离服，以及受污染的地面、墙壁砖石与混凝土等，都作为放射性固体废物处理。上述固体废物可分为可燃性与不可燃性两类，其处理方法各不相同。

四、放射性废物的危害性

放射性废物的危害在于其对人类机体与生态环境的严重破坏性。放射性核素通过外照射与内照射两种途径危害人类与生态机体。外照射是由废物中含有的 γ 辐射体与部分 β 辐射体直接对人体照射产生的生物效果，在大剂量的辐照下，人体内造血器官、神经系统、消化系统均会遭受损伤而致病。内照射则是废物中含有的 α 辐射体为主的核素，通过各种渠道进入人体，按不同性质分别集聚于不同的器官，产生破坏作用。这种照射作用因具有积累性，比外照射的危害更加严重。各类放射性核素内照射的危害程度有如下特点：

1. 能广泛分布于人体各器官的放射性核素(如 H^3 、 Na^{24} 等)比易于集聚于单一器官的核素危害性小。
2. 半衰期愈长的放射性核素危害性愈大。
3. 滞留于人体内时间(生物半衰期)愈长的放射性核素危害性愈大。
4. 能浓集放射性核素且对辐照敏感的器官，易于遭受破坏。
5. 易浓集放射性核素且在人体内起重要作用的器官，易于受辐照损伤。
6. 比电离能愈大的辐射核素，内照射的危害性愈大。

五、放射性废物处理与处置技术特点

由于放射性废物的特殊性与危害性，因此对这类废物处理与处置也有显著的特点。特别是在运输、包装、操作、设备以及处理与处置的标准、水平方面，都有特殊的要求。放射性废水采用常规物理、化学处理，但大都要达到深度处理，尽量复用，减少排放，并使放射性物质最大限度的浓集于最小的体积内，以便进一步处理或处置。放射性废气从表面观察是“清洁”的无色气体。放射性是以气态或少量气溶胶混于空气中，因此非一般工业废气的处理技术能够解决。即使直接排放的放射性废气，也需要比一般废气更高的烟肉与更大的稀释倍数。放射性固体废物的包装、运输、处理与处置均需在特别严格与防护条件下进行，需要采取特殊的安全处置或永久性贮存。总之，放射性废物的处理与处置技术体现下列特点：

1. 控制标准以放射性单位表示的去污率(因素)衡量。
2. 处理与处置所需设备材质都是耐腐蚀、耐辐照的合金材质。
3. 绝大部分操作是在较严密的防护与屏蔽条件下进行，屏蔽体可用铸铁板、钢筋混凝土，特别高水平的操作需要重混凝土屏蔽。
4. 操作中、高水平放射性废物时，设备或厂房应为密封与负压条件。
5. 废物处理过程产生的二次废物均需纳入后续的处理系统进一步处理。

放射性三废的处理与处置之间有密切相关性，可用图15-1描述其间的关联关系。

六、放射性废液处理技术

(一)低放射性废水的处理

图15-2描述了低放射性废水处理工艺模式。低放射性废水分为表面清洁与混浊的两类。前者可以直接采用离子交换法、蒸发法或膜分离法处理，处理后的清水可以再回用，浓缩液(二次废物)以中等水平放射性废液进行再处理。混浊性废水则需除浊与除放射性的组合处理工艺，一般采用混凝沉淀—过滤—离子交换工艺。沉渣归于固体废物系统。废过滤料与废离子交换树脂也作为放射性固体废物处置。

处理放射性废水的蒸发器，可以采用内循环、外循环列管蒸发器或薄膜蒸发器，底部常需屏蔽措施。二次蒸汽可以采用泡罩塔或填料塔进行净化。对低放射性废水的浓缩倍数视原水

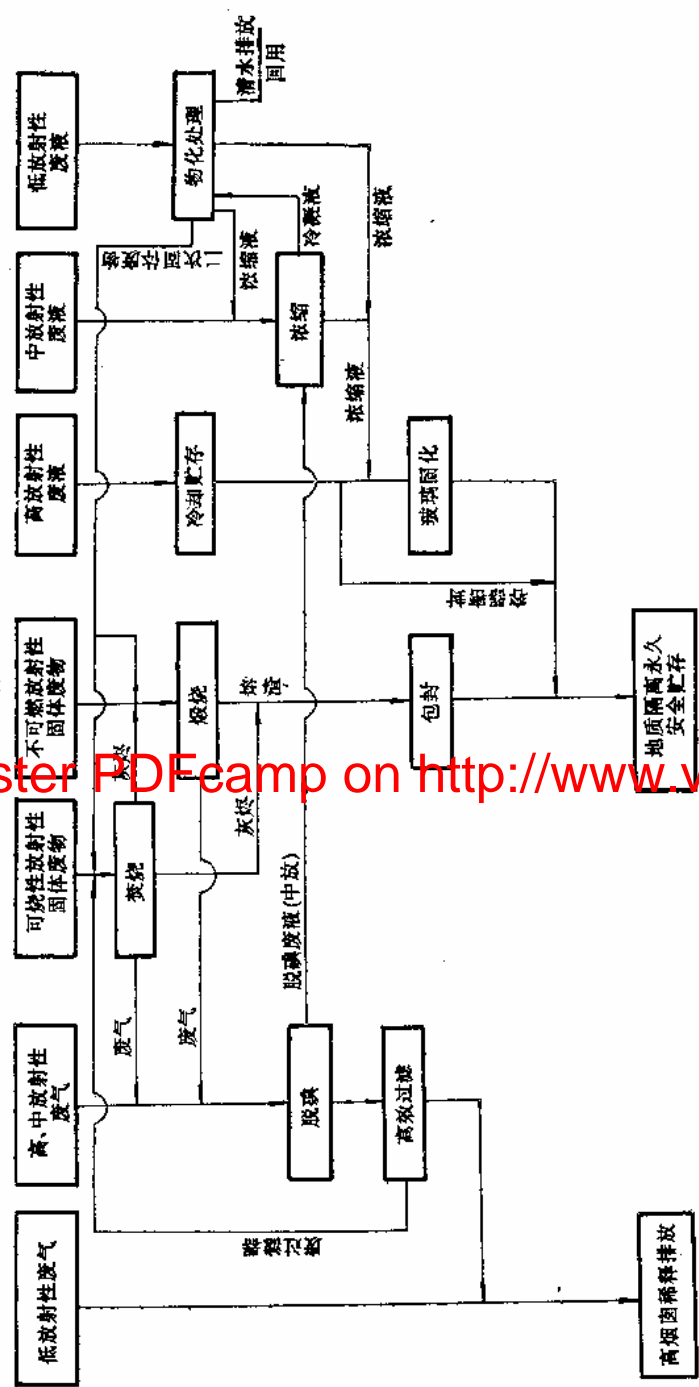


图15-1 放射性废物处理、处置流程图

Please register PDFcamp on <http://www.verypdf.com/>, thank you.

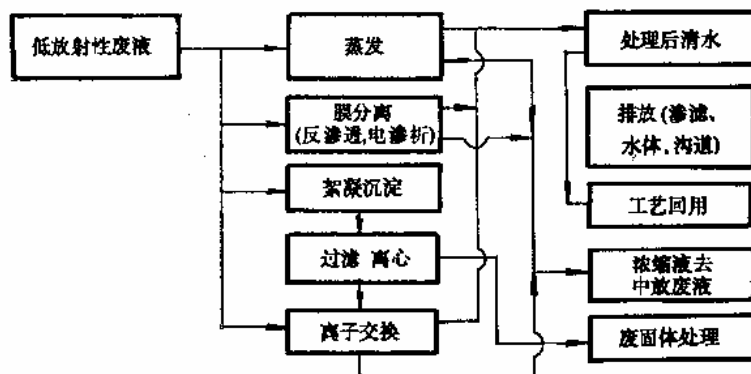


图15-2 低放射性废液处理工艺模式

放射性水平而异，以浓缩液达到中等放射性水平为准。

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。

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，其它与常规无异。混凝剂主要采用铝盐、铁盐、磷酸盐、锰盐等，高分子混凝剂，如聚合铝与铁盐、有机高分子负离子型混凝剂等，均能有效的去除放射性。混凝过程去除放射性的机制是吸附共沉淀。混凝剂在溶液中形成带负电荷的絮体，作为载体强烈吸附放射性金属离子，形成共沉淀体系。对于不同的放射性离子，用不同的混凝剂产生的去除效果不同，一般应根据水质选择适宜的混凝剂。过滤处理可以采用砂滤，也可以采用微滤技术。

(二)中水平放射性废液的处理

中水平放射性废液产生途径较多，成分比较复杂。由核燃料后处理净化循环产生的中水平放射性残液中，含有微量钚，并夹带少量有机溶剂，为保持后续处理的正常操作，必须首先实施钚的回收与有机溶剂的去除。中水平放射性废液的主要处理手段是蒸发浓缩，使废液体积进一步减小，达到形成高放射性废液的水平。浓缩倍数视原废液放射性强度而定。图15-3给出中水平放射性废液处理示意流程。这种废液的蒸发过程主要问题是二次蒸汽放射性

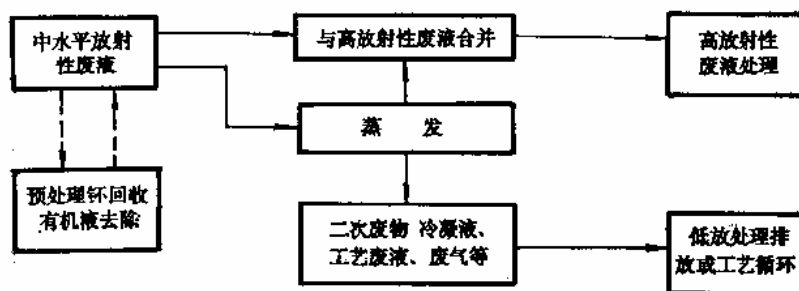


图15-3 中水平放射性废液处理流程

雾沫夹带。由于废液中含有易于发泡的有机质，在蒸发过程产生大量泡沫，随二次蒸汽夹带排出。由于泡沫中含有高浓度放射性物质，为二次蒸汽后续处理造成困难。为降低蒸发过程的泡沫与减少二次蒸汽的夹带雾沫，可采用多种措施，其中向蒸发液中投加消泡剂是重要的措施之一。一般常采用的消泡剂有醇类的衍生物、脂肪酸类、酰胺类、磷酸蓖麻油与硅油等有机液体，投加量应通过实验确定。蒸发操作中，控制蒸发废液pH值偏酸性条件，也可以减少泡沫的

发生。保持蒸发器内较低的操作液位,可以减少二次蒸汽雾沫夹带量。然而无论采用何类措施,二次蒸汽的雾沫夹带不可能完全消除,必须在冷凝前采用适当的二次蒸汽的除沫净化处理。

有的放射性操作部门产生中水平放射性废液量甚少,不足以建立处理设施,也可以与高放射性废液合并一起处理。

蒸发过程产生的二次废物均以低放射性废物进行再处理,有一些二次废液需要返回蒸发器再处理。

(三)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。前已述及,这类废液中因含有大量裂变产物,衰变过程产热而升温,处理前需要有一定时间的冷却贮存过程。贮存池一般设于离开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物中,以便实施最终安全处置。这种废液的固化体应具备下述特性:①高度化学稳定性;②水浸出惰性;③抗放射辐照性;④抗老化性;⑤热稳定性。国内外研究了多种实用的固化技术,如玻璃固化、沥青固化、人工合成树脂固化与水泥固化都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。

经固化处理后的放射性固化体在最终送入国家统一管理的安全贮存(处置)库之前,需有临时贮存措施,包括容器与贮存地点。这种措施必须方便操作与运输;有较严密的防护措施;防止受到偶然侵蚀、破坏或其它不利影响;设置冷却措施。表15-15列出几种可选择的贮存方式与措施,最实际有效的贮存方式是使废物从产生到最终贮存(处置)之间的包装、处理与运输等步骤减到最少。

表15-15 放射性固化体临时贮存方式与措施

贮存方式	冷却措施	腐蚀控制	维修要求
水池	池水强制循环	在惰气体或非腐蚀性介质中包封	高
空气冷却地下室	空气自然循环	同上	低
混凝土衬里密室	空气自然循环或通向大气	同上	低
靠近地面散热室	热量导向地面	同上	低

七、放射性固体废物的处理与处置技术

(一)可燃性放射性固体废物处理方法

可燃性放射性固体废物往往与大多数不可燃固体废物混杂在一起,必须先进行分选。不同性质的可燃性固体废物可以选用不同的处理方法。一般情况,采用焚烧法最为理想,使之生成水蒸汽、二氧化碳与灰分,以二次废物分别进一步处理。灰分中如含有钚,必须通过回收系统加以回收。固化与贮存是固体废物最终处置途径。图15-4表明可燃放射性固体废物可选用的处理与处置途径。

(二)不可燃放射性固体废物的处理与处置

这类废物以受污染的金属设备、部件为主,并杂以其它无机废物,因此首先进行拆卸与破碎处理,减少其有效体积是十分必要的。最终以煅烧熔融处理,使最终体积减到最小,最

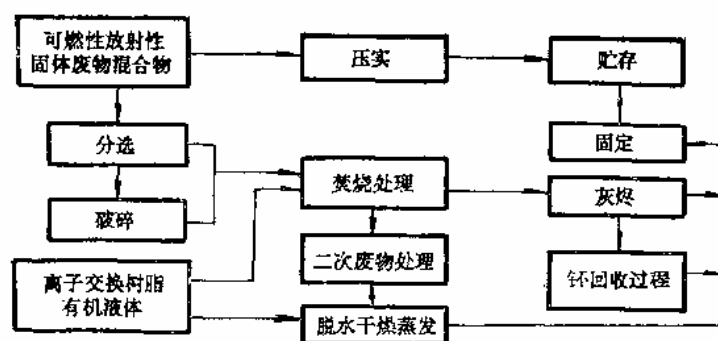


图16-4 可燃性放射性固体废物处理方法选择

有利于最终贮存。煅烧可使固体废物体积减小到原有的1/10左右。对于高放射性固体废物处理的操作,必须在严密的屏蔽条件下进行。图15-5示出此类废物的处理流程。

(三)放射性固体废物最终处置

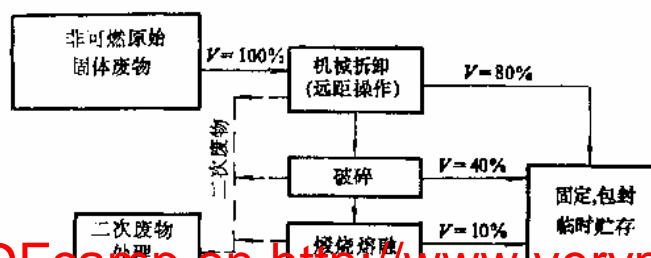


图15-5 不可燃放射性固体废物处理流程

核工业中，大多数放射性废物最后形成稳定的固态物作为终态进行最终处置。对于含长寿命核素的核废物的最终处置需要十分谨慎，在核工业环境工程领域，将这种最终安全处置称作“地质隔离”。地质隔离的选址与地质条件大体与其它有毒有害固体废物相似而更加严格。选择沙漠或山区谷地为宜。建造的放射性固体废物安全贮存库系统及其对人类影响关系示于图15-6中。

The diagram illustrates the safety system for radioactive waste storage. It features three concentric circles representing barriers: the innermost circle is labeled '放射性废物' (Radioactive Waste), the middle circle is '工程屏障' (Engineering Barrier), and the outermost circle is '天然屏障' (Natural Barrier). An arrow labeled '放射' (Radiation) points from the waste towards the right. To the right of the barriers, there are labels for '水' (Water), '植物—食物' (Plants—Food), and '人类' (Humans), indicating the potential exposure pathways. The entire system is situated within a landscape that includes '沙漠' (Desert) and '山区谷地' (Mountain Valley).

最终贮存的废物应封装于不锈钢容器内。贮存库提供三道屏障。内贮存库结构一般采用不锈钢覆面的钢筋混凝土贮存室；工程屏障一般包括一整套地下水抽提系统，维持库外区域较低的地下水位。有时为加固深层地质而设置混凝土墙或金属板结构；外层有多种多样，如美国与原联邦德国研究的大点，而沙漠土壤显示了对碱土金属与铜系元素的贮存库浸泡于流动水中，放射性核素的迁移较远的距离，能保证有可靠的安全性。

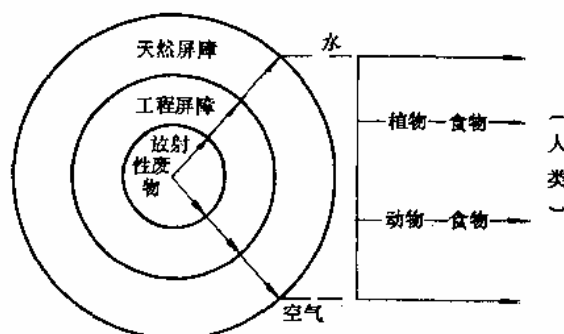


图15-6 核废物最终贮存管理

八、放射性废气的处理

对于低放射性废气,特别是不含长寿命的超铀元素的低放射性废气,一般可以直接稀释排放。排风机与排放烟囱是根据排气量、放射性水平、大气的放射性控制标准以及当地的气象特征进行设计。对于含有长寿命超铀元素的废气与含高放射性的气溶胶,则需要通过一定的处理措施。如含有碘-131、碘-129挥发性气体的废气,可以通过吸收处理,使碘元素转入液体,吸收液可以采用硝酸或硝酸汞-硝酸混合液,对碘都有较好的效果;也可以采用分子筛吸附法脱碘。对废气中的氡最有效的捕集方法是采用以氧化铜为催化剂的分子筛催化吸附床吸附处理。对气溶胶与惰性气体的处理常采用气体高效过滤器,过滤材质一般为纸质或人造纤维波纹板的多层叠加体。通过上述各种处理后的废气,仍需要通过高烟囱稀释排放。

总之,放射性废物与一般工业或生活废物的处理与处置在技术上有一定的共性,但由于其危害性,在处理与处置方面,也显著地体现了其特殊性。

习 题

- 15-1 试论述电磁辐射对人类与环境的危害性。
- 15-2 电磁污染的测量体现哪些特点?不同射频污染测量方法有何不同?
- 15-3 防治电磁辐射有多少种方法?各方法各有何特点?
- 15-4 试评述放射性废物的分类与性质。
- 15-5 试评述放射性废水处理方法与特点。
- 15-6 试比较放射性固体废物与一般固体废物处理与处置方法。

Please register PDFcamp on <http://www.verypdf.com/>, thank you.