

应力波作用下岩石声发射实验研究

万国香¹, 王其胜², 李夕兵³

(1. 嘉应学院 物理与光信息科技学院, 广东 梅州 514015;

2. 嘉应学院 土木工程系, 广东 梅州 514015; 3. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 在霍普金森(SHPB)冲击系统上进行了应力波作用下岩石声发射实验, 获得了该加载条件下岩石破裂的声发射规律。实验结果表明, 应力波下, 声发射峰值能量之前所出现的声发射信号相当匮乏; 而且其能量规律呈现出两种明显不同的特征: I型, 声发射峰值能量之后, 能量迅速衰减, 到了加载的末期, 能量出现了一定的回升, 产生了“拐点”; II型, 声发射峰值能量之后, 能量衰减相对 I型较慢, 且不出现“拐点”。研究结果表明, 声发射的能量特征与岩石破碎的程度密切相关; 冲击载荷作用下岩石的声发射不仅仅是裂纹信息的反映, 其中也包含了对应力波信号的反映。

关键词: 应力波; 声发射; 峰值能量; 破碎

中图分类号: TD31 **文献标识码:** A

Acoustic emission test of a rock under action of stress wave

WAN Guo-xiang¹, WANG Qi-sheng², LI Xi-bing³

(1. School of Physics and Optic Information Technology, Jiaying University, Meizhou 514015, China;

2. Department of Civil Engineering, Jiaying University, Meizhou 514015, China;

3. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Experiments were made on a SHPB system and the AE law of a rock under action of stress wave was obtained. The experimental results showed that the AE signals are few before the peak of the energy occurs; and the AE energy presents two different features: (1) the energy decays rapidly after the peak of the energy occurs, however, the energy rises at the end of the loading and the “inflection point” appears; (2) the energy decays slowly after the peak energy occurs and the “inflection point” does not appear. The study results indicated that the AE energy features closely relate to the rock fragmentation levels; the AE under action of stress wave not only reflects the information of cracks, but also that of stress wave signals.

Key words: stress wave; acoustic emission (AE); peak energy; fragmentation

当岩石、混凝土等脆性材料受外力或内力作用时, 在变形和破裂过程中伴随着声、电磁、光等物理现象, 其中以弹性波形式释放的应变能现象称为声发射。声发射作为一种无损检测技术是研究脆性材料失稳破坏演化过程的一个良好工具, 能够对岩石等脆性材料内部损伤的产生和扩展进行连续、实时监测, 并能够实现对其破坏位置的定位, 这是其他任何监测方法都不具有的优点, 因此, 被广泛应用于研究岩石、混凝土等材料的破坏研究。真正意义上的声发射研究以 1953 年德国物理学家 Kaiser 所作的工作为标志。这之后, 人们对不同载荷条件下岩石破裂过程中的声发射及其应用展开了大量的理论和实验研究工作, 取得了丰硕的成果^[1-9]。

大量的实验结果表明, 岩石破裂的声发射特征是与岩石性质、加载条件等密切相关的。Rudajev 等人^[10]通过对单轴压缩条件下岩石的声发射研究, 认为声发射时间系列参数包含了有关应力率和岩石破裂阶段的重要信息, 这些参数显示出了稳定的前兆特征。李庶林等^[11]对单轴压缩下岩石的声发射研究结果表明, 在弹性阶段的初期和后期, 随着应力水平的增加岩石声发射显著增加, 特别在弹塑性高应力阶段, 岩石声发射增长迅速; 岩样在试验接近峰值强度时单位时间内的应力增长速度减小, 声发射事件率出现明显下降, 即出现相对平静阶段; 声发射事件率在不同应力水平时变化很大, 峰值强度后的声发射现象仍然明显, 其声发射特征随岩样破坏形式的不同而不同。Tham 等人^[12]通过实验和数值模拟研究发现, 单轴拉伸下岩石声发射特征可分为三个阶段: ① 随机分布的声发射信号; ② 破裂带的出现; ③ 主破裂的发生, 并且花岗岩的微破

裂聚结现象比大理岩更加明显,非均质性的差异是导致拉应力下岩石声发射特征不同的主要原因。张流等^[13]的研究结果表明,低围压易于产生张性破裂,张性破裂会伴随较高的声发射率,主破裂后声发射很少;随着围压的提高,剪切破裂占主导地位,使得声发射率降低,但破裂后声发射率保持较高的水平。

综观以上这些研究,基本上是基于材料受静应力时产生的声发射,虽然也有一些研究者考虑了不同围压下材料的声发射^[14-20],但都没有进行应力波作用下(动载)岩石的声发射研究,这严重制约了声发射技术的发展和应用。本文在 SHPB 冲击系统上进行了岩石破裂的声发射实验,对声发射能量等规律进行了系统深入的分析。

1 静载下岩石声发射

静载岩样为花岗岩,试样的设计尺寸为:直径 50 mm,长径比 2:1。每个试样端面和圆周都进行仔细研磨,两端不平行度小于 0.02 mm,圆周与端面的不垂直度小于 0.02 mm(图 1b)。对直径差异进行严格控制,同组试样的直径偏差在 0.01 mm 以内。常规静态强度为 107 MPa(图 1a)。

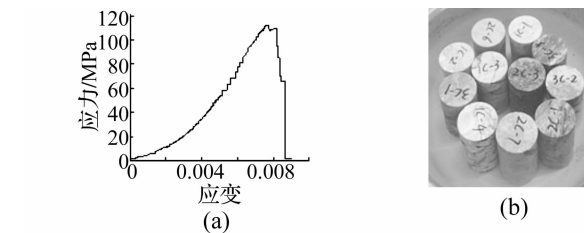


图 1 静载下岩石应力应变关系及试样

Fig. 1 Stress-strain curve and samples under static load

静载作用下,岩石破裂的声发射能量与时间以及应力与时间的关系如图 2 所示,从图 2 可以看出,随着加载时间的增加,声发射能量逐渐增大,到达 120 s 左右时,增大的速率加快,从 160 s 至 170 s 之间,能量迅速增大到最大值,几乎产生了一个阶跃,说明此时岩石

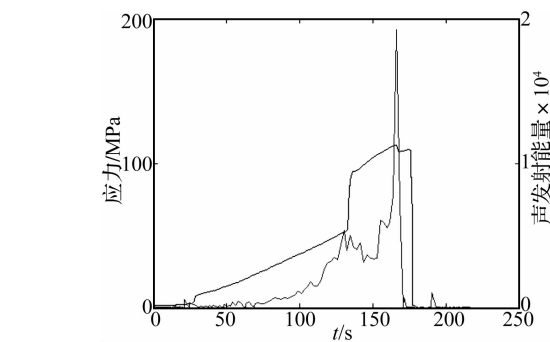


图 2 静载下花岗岩声发射能量随时间的变化

Fig. 2 AE energy variation with time of granite under static load

内部产生了很大的裂纹,开始发生破坏。将图中声发射能量与应力的过程进行对比,也可以发现,在加载初期,有少量小能量的声发射事件出现,这是岩石内部初始裂纹闭合产生的;在 90 s 至 120 s 时,随着应力继续增大,声发射能量却比较平稳,增大量较小,这对应着岩石应力应变的弹性段,此时岩石内部没有出现大的裂纹;随着加载的继续进行,岩石过了弹性段,进入损伤阶段,此时声发射能量增加迅速,在应力最高点附近,声发射能量达到峰值,岩石发生破坏。

声发射计数与时间的关系如图 3 所示,在加载的初期,声发射计数最大达到 2 000,这对应着岩石初始裂纹的闭合段;随着加载的进行,声发射计数逐步增大,其峰值并不对应着能量的峰值

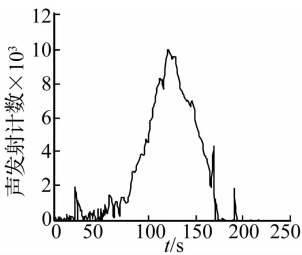


图 3 静载下花岗岩声发射计数的变化
Fig. 3 AE variation of granite under static load

处(对比图 2 和图 3),这与其他研究者的结果是一致的:大能量的事件往往对应着少的计数(事件数),而多计数往往对应着相对能量较小的事件。

2 应力波作用下岩石声发射实验

2.1 声发射装置和实验步骤

图 4 为冲击载荷的声发射试验系统,它由 SHPB 冲击系统和声发射采集系统共同组成。施加冲击载荷后,应变仪和声发射采集系统自动触发并采集信号、存盘。在实验中,岩石完成一次冲击所需的时间大致为 100 μs - 200 μs,我们所选择的声发射仪采样频率为 40 MHz,能够满足采集精度。

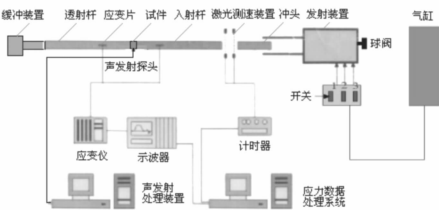


图 4 冲击载荷下声发射试验系统
Fig. 4 Schematic diagram of AE test device of rock under dynamic load

为了与静载试验具有对比性,采用和静载试验质地一样的花岗岩,按照 SHPB 冲击系统的要求,试样的设计尺寸为:直径 50 mm,长径比 0.5。在 SHPB 冲击系统上(冲击载荷 2 MPa),进行了岩石破坏的动态加载实验,获得了岩石常规动载应力应变关系,岩石试样和动态应力应变关系如图 5 所示。

在上述试验装置上,进行冲击载荷下声发射试验。试验步骤如下:

- (1) 确定一冲击动载水平,采用半正弦波作为加载波形;
- (2) 参照试样动态实验强度值,选定冲击气压和冲头冲击速度;
- (3) 将声发射探头安装在试件上,做好探头与试件间的润滑;
- (4) 放置试样于应力传递装置的两个弹性杆之间,做好试样与弹性杆间的润滑,放好应力传递装置框架端部的挡片;
- (5) 检查实验系统两弹性杆与试样的平行度与接触情况,若平行度不够或接触条件不好,则回到第(4)步,启动声发射采集系统;
- (6) 启动冲头发射机构,冲击气压达到预定值;
- (7) 发射冲头,声发射和应变仪数据采集系统采集信号、存盘;
- (8) 完成一次实验,根据需要进入下一轮,重复(1)~(8)。

2.2 动载下岩石声发射

2.2.1 声发射能量随时间的变化

图6为花岗岩在动载(SHPB冲击)下声发射能量和应力随时间的变化曲线。从该图可以看出在加载应力的最高点有一个很大声发射能量出现,在这个最大值(峰值)之前大的声发射信号几乎没有,这是由于冲

击载荷速度很快,在应力达到最大值时,小裂纹来不及发展,当冲击载荷达到一定值,使得岩石此时产生大的裂纹,声发射探头捕捉到这个信号,就出现了图中的峰值能量。在峰值之后,岩石达到了最大强度值,但并没有完全破坏,还具有一定的承载能力,应力波继续在岩石内部传播,裂纹继续扩展,所以能量峰值后仍不断有声发射信号出现,但声发射能量在减小,逐渐减小到几乎接近零,然后突然出现了一个较大的声发射值,表明此时出现了一个较大的裂纹,这之后岩石完全破裂,不再具有承载力。在静载实验时,随着加载的进行,声发射由较小值慢慢增大,特别到损伤段,声发射急剧增大,在应力达到最大值时,声发射能量也基本达到最大值,之后很少出现声发射信号(图2)。而在SHPB冲击载荷时,正如前面所述,随着载荷快速增大,小裂纹来不及发展,冲击载荷达到一定值岩石就产生了很大的裂纹,这个很大的破裂信号被声发射仪记录下来。

需要说明的是,尽管SHPB力学系统与声发射采集系统两者采样点所对应的时间并不一一对应,但是从信号产生到结束,两者所对应的总时间长是相等的,这样经过计算得到,在应力峰值的附近,声发射能量达到峰值,如图6。其次,在图6中,声发射能量并不是绝对能量,而是声发射系统自身处理以后的相对能量,为无量纲量。在相对能量为零处,其绝对能量并不为零,只是所对应的能量值相对较小。

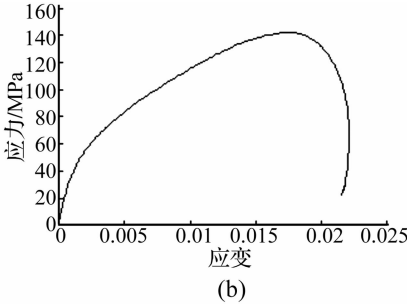
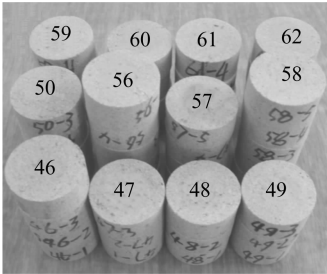


图5 动载实验的试样及常规动态应力应变关系

Fig. 5 Dynamic test samples and conventional dynamic stress-strain curve

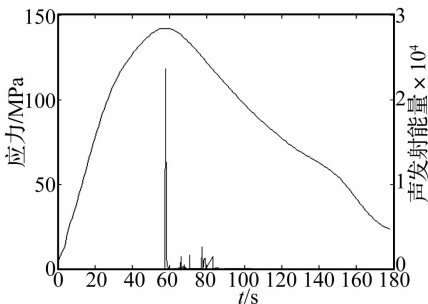


图6 动载下岩石声发射能量与应力随时间的变化

Fig. 6 AE energy and stress variation with time of rock under dynamic load

2.2.2 动载应变率对声发射峰值能量的影响

动载应变率对声发射能量峰值的影响,如图7所示,声发射峰值能量随动载应变率增大而减小。入射应力波速度越大,应力波幅值越大,岩石受载后破碎程度就越大。这说明声发射能量与岩石破碎的程度密切相关,岩石越破碎,其能量越小。关于这一点,在后面有更详细的补充论述。

2.2.3 动载下花岗岩声发射计数变化

冲击载荷下岩石破裂声发射计数随时间的变化如

图8所示。比较图6和图8,可以发现,声发射计数的变化与声发射能量的变化非常类似:峰值能量基本对应着峰值计数,在其他时间点,高的能量值也基本对应着高的计数值,这一点和静载下声发射计数规律是完全不同的。在静载时,高能量的声发射往往对应着低的计数(图3)。这是由于静载下声发射信号完全是对裂纹信息的反映,而动载下声发射在除了反映裂纹发展情况,在一定程度上来讲甚至更多地反映了应力波信号,是两者叠加的结果。

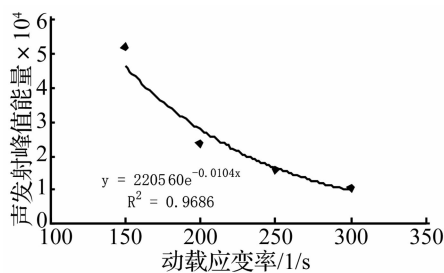


图 7 动载下岩石声发射峰值能量随动载应变率的变化
Fig. 7 AE peak energy variation with dynamic strain rate

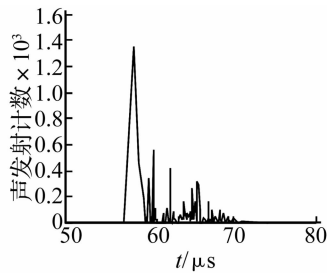


图 8 动载下花岗岩声发射计数随时间的变化
Fig. 8 AE acouts variation with time of granite under dynamic load

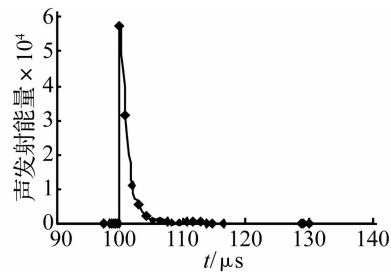


图 9 动载下花岗岩 Hit 信号特征 (试样编号 13-2, 未破坏)
Fig. 9 Hit signals trait of granite under dynamic laod (sample ID 13-2, undestroyed)

3 能量规律与岩石破碎程度的关系

3.1 声发射峰值能量特征

值得说明的是,在实验过程中,有些岩样冲击后仍然保持完好,并没有发生破裂,这种情况也探测到了丰富的声发射信号,而且声发射峰值能量甚至比破裂岩石所记录到的值更大。如采用冲击载荷 2 MPa,编号为 10-2 的混合花岗岩仍然完整,其声发射峰值能量为 48 245;采用冲击载荷 2 MPa,编号为 13-2 的混合花岗岩完整,其声发射峰值能量为 56 942(如图 9)。而采用冲击载荷 2 MPa,破裂岩石的声发射峰值能量基本在 4 000 以下。这些结果表明,在岩石未破裂时,记录的声发射值为应力波在岩石中传播的振动信号,由于岩石一直很完整,应力波在没有损伤的岩石中传播下去,幅值没有发生衰减,被声发射探头记录下来。Goldsmith 等人对大理岩、玄武岩等火成岩及一些沉积岩、变质岩和混凝土杆,用圆球冲击的研究结果表明:当冲击速度大于某一值时应力波即产生衰减,衰减到一定幅值后,衰减随传播距离而显著减小。Hakailehto^[21]在他早期的博士论文中给出了应力波在岩石衰减的模型。他认为:当加载应力大于岩石初始破裂应力(即 $\sigma - \varepsilon$ 关系中的 σ_c)时,岩石内部裂纹的扩展,将导致应力波沿岩杆传播时幅值的衰减,所以导致记录到的声发射值比未破裂岩石的值更小。

3.2 声发射能量随时间变化规律

在本实验中,花岗岩声发射能量呈现出两种不同的特征。Ⅰ型特征:在声发射峰值能量后,能量迅速衰减,到了加载的后期,能量有小幅回升,出现了“拐点”(图 10);Ⅱ型特征:声发射能量达到峰值后,并未立刻衰减到一个很小的值,衰减后的第一个值和峰值属同一量级(10^4),而且之后没有出现所谓“拐点”(图 11)。一开始,我们认为这可能是岩石的离散性导致的结果,然而通过对破坏后岩石碎块的块度进行分析后发现,岩石受载后完全破碎,其声发射能量呈现Ⅰ型特征;岩石受载后没有完全破碎,只是出现小裂纹,其声发射能

量呈现Ⅱ型特征。这说明岩石在动载作用下声发射能量规律也与岩石破碎程度关系密切。

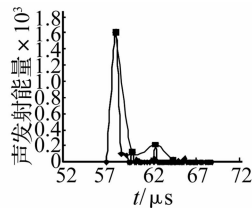


图 10 破碎岩石的声发射能量随时间的变化
Fig. 10 AE energy variation with time of broken rock

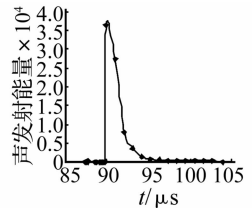


图 11 未破碎岩石的声发射能量随时间的变化
Fig. 11 AE energy variation with time of un broken rock

4 结 论

在 SHPB 冲击系统上进行了动载下岩石的声发射实验,得到了对应的声发射能量特征。结果表明:

- (1) 声发射峰值能量前出现的声发射信号较少,这是由于冲击速度太快,小裂纹还来不及发展;
- (2) 应力波下岩石的声发射能量规律与岩石破碎的程度密切相关,表现在两个方面:其一未破碎岩石声发射峰值能量比破碎岩石更高;其次破碎岩石和未破碎岩石声发射能量随时间的变化分别呈现两种特征;
- (3) 应力波作用下岩石的声发射不仅是裂纹信息的反映,其中也包含了应力波信号。另外,声发射计数与能量有着类似的特征。

参 考 文 献

[1] Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. Int J Rock Mech Min Sci &Geomech Abst, 1993,30(7):883-899.
[2] Rudajev V, Vilhelm J, Kozak J, et al. Statistical precursors of instability of loaded rock samples based on acoustic emission. Int J Rock Mech Min Sci &Geomech Abst, 1996, 33(7):743-748.
[3] Seto M, Nag D K, Vutukuri V S. In-situ rock stress measurement from rock cores using the acoustic emission method and deformation rate analysis[J]. Geotechnical and Geological Engineering,1999(17): 241-266.

[4] Backers T, Stanchits S, Dresen G. Tensile fracture propagation and acoustic emission activity in sandstone: The effect of loading rate[J]. *Int J Rock Mech &Min Sci*, 2005, 42:1094 – 1101.

[5] 李夕兵,刘志祥. 岩体声发射混沌与智能辨识研究[J]. *岩石力学与工程学报*,2005,24(8):1296 – 1300.

[6] 杨 健,王连俊. 岩爆机理声发射试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*,2005,24(20):3796 – 3802.

[7] 蒋海昆,张 流,周永胜. 地壳不同深度温压条件下花岗岩变形破坏及声发射时序特征[J]. *地震学报*,2000,22(4):395 – 403.

[8] 吴 刚,赵震洋. 不同应力状态下岩石类材料破坏的声发射特性[J]. *岩土工程学报*,1998,20(2):82 – 85.

[9] 郝晋升,刘晓红,李纪汉. 华北地区五种岩石在高压下的破坏特征[J]. *地震学报*,1986,8(4):404 – 411.

[10] Rudajev V, Vilhelm J, Lokajicek T. Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure [J]. *Int J Rock Mech &Min Sci*, 2000, 37:699 – 704

[11] 李庶林,尹贤刚,王泳嘉. 单轴受压岩石破坏全过程声发射特征研究[J]. *岩石力学与工程学报*,2004,23(15):2499 – 2503.

[12] Tham L G, Liu H, Tang C A, et al. On tension failure of 2-D rock specimens and associated acoustic emission[J]. *Rock Mech Rock Engng*, 2005,38(1):1 – 19

[13] 张 流,许昭永,陆阳泉. 地震前兆场物理机制实验研究的新进展. *地震*,1995,增刊: 40 – 54.

[14] 潘长良,祝方才,曹 平,等. 单轴压力下岩爆倾向岩石的声发射特征[J]. *中南工业大学学报*,2001,32(4):336 – 338.

[15] 余怀忠,尹祥础,夏蒙梵,等. 地震临界点理论的实验研究[J]. *地震学报*,2004,26(增刊):122 – 130.

[16] 纪洪广,蔡美峰. 混凝土材料声发射与应力 – 应变参量耦合关系及应用[J]. *岩石力学与工程学报*,2003,22(2):227 – 231.

[17] 马胜利,蒋海昆,扈小燕,等. 基于声发射实验结果讨论大地震前地震活动平静现象的机制. *2004,26(3):426 – 435.*

[18] Prikryl R, Lokajicek T, Li C, et al. Acoustic emission characteristics and failure of uniaxially stressed granitic rocks: the effect of rock fabric[J]. *Rock Mech Rock Engng*, (2003) 36(4):255 – 270.

[19] Rudajev V, Vilhelm J, Lokajicek T. Laboratory studies of acoustic emission prior to uniaxial compressive rock failure [J]. *International journal of rock mechanics and mining sciences*, 2000, 37:699 – 704.

[20] Chang S. H. , Lee C. I. . Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under Triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004, 41:1069 – 1086.

[21] Hakailehto K O. The behavior of rock under impulse loads-A study using the hopkinson split bar method [J]. *Acta polytechnica scandinanica*, 1969,81:1 – 61.

(上接第 94 页)

4 结 论

本文采用成对比较法对 24 个 FCV 噪声样本进行偏好型的主观评价分析,并结合声音样本的客观参量分析,引入神经网络建立了 FCV 声品质评价模型。目前所有的噪声品质的评价方法都是线性的,BP 神经网络具有非线性的输入、输出关系,具有自适应、自学习的能力,对于人类的非线性主观评价过程,能够很好的逼近。因此利用神经网络可以将燃料电池轿车声品质评价中客观评价参量与主观评价结果之间的复杂关系很好的表现出来,并能建立高精度的预测模型。

最后通过分析神经网络输入与输出之间的权重算法,计算出了 FCV 声品质客观评价参量对主观评价结果的贡献度,并确定了 FCV 声品质的主要影响参量为:响度、粗糙度和 A 声级。文中所提出的基于神经网络的预测和贡献分析方法不仅仅适合于燃料电池轿车声品质评价的应用,对于其它领域的声品质评价及预测等都有着借鉴意义。在声学工作者的不断努力下,神经网络将会在声学界数据处理的领域中得到更充分的应用。神经网络自身还有很多有待改进的地方。如对

样本的取样要求有一定的广度和均匀性;易出现过度拟合;训练时间过长等。研究者们正努力解决这些问题。

参 考 文 献

[1] Blauert J. Aesthetic and Cognitive Aspects of Noise Engineering [C]. *Proc. InterNoise ' 86*, Cambridge M A, 1986, 1: 3 – 14.

[2] Matthias S, Michael W. Development of vehicle sound quality2targets and methods [C] // *SAE International*, 971 – 976.

[3] Heinrichs B M. Sound quality evaluation of interior vehicle noise using an efficient psychoacoustic method[C] // *Proc of Euronoise 98*, 1998.

[4] 吴 宪,徐庆华,陈昌明. 燃料电池轿车底盘总布置智能化装配设计的实现[J]. *制造业自动化*, 2004 (4) : 65 – 68.

[5] Brandl F K, Biermayer W. A new tool for the onboard objective assessment of vehicle interior noise quality[C] // *SAE International*, 1999 – 01 – 1695.

[6] Noumura K, Yoshida J. Perception Modeling and Quantification of Sound Quality in Cabin. *SAE paper*, 2003 – 01 – 1514.

[7] 张宝杰,乔英杰,赵志伟. *环境物理性污染控制* [M]. 北京:化学工业出版社, 2003.