复合材料学报 第23卷 第4期 8月 2006年
Acta Materiae Compositae Sinica Vol. 23 No. 4 August 2006

文章编号: 1000-3851(2006)04-0019-05

非平面界面的多层高分子复合材料吸声性能

杨 雪, 王源升*, 朱金华, 文庆珍, 余红伟
(海军工程大学 化学与材料系, 武汉 430033)

摘 要: 主要研究非平面界面的新型多层高分子复合材料在不同温度和压力下的吸声性能。制备了非平面界面的新型多层高分子复合材料和平面界面的传统多层高分子复合材料, 并在声管中测试其吸声系数。结果表明, 在所研究的频率范围内, 新型多层高分子复合材料吸声系数大于传统的多层高分子复合材料吸声系数; 这种新型多层高分子复合材料吸声系数峰值随温度的升高向低频方向移动, 而随压力变化不大。因此, 合理设计多层高分子复合材料的界面形状可以提高复合材料的吸声性能。

关键词: 吸声性能; 复合材料; 多层高分子; 界面
中图分类号: TB332; O427 **文献标识码**: A

Sound absorption properties of multilayered polymer composite materials with nonplanar interfaces

YANG Xue, WANG Yuansheng*, ZHU Jinhua, WEN Qingzhen, YU Hongwei

(Department of Chemistry and Materials, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: This paper mainly studies the sound absorption properties of a new type of multilayered polymer composite materials with nonplanar interfaces at different temperatures and pressures. The new type of multilayered composites with the nonplanar interfaces and a traditional multilayered composite with a planar interface were prepared and their sound absorption coefficients were measured in the sound tube. The results show that the sound absorption coefficients of the new type of absorbers are higher than those of the traditional absorber within the interested frequency range. The sound absorption coefficient peak values of the new type of absorbers shift to the low frequencies with temperatures increasing, but they are not sensitive to the pressures. It is suggested that appropriately designing the interface shape of multilayer polymer composite materials can enhance their sound absorption properties

Keywords: sound absorption properties; composite materials; multilayered polymers; interface

潜艇历来是最具有威慑作用的水下武器装备, 它在海战中发挥着巨大的作用。随着科学技术的发展, 探潜手段呈现多样化。而潜艇受本身条件的限制, 自卫能力有限, 因此潜艇的隐身性能显得尤为重要, 特别是潜艇的声隐身性能。在潜艇表面覆盖吸声层是潜艇声隐身的重要手段之一[1]。目前潜艇上所用的吸声层为孔腔式吸声结构, 这种孔腔式吸声结构低频段消声效果差, 而且随着压力增加吸声性能迅速下降。近几年, 本文作者开展了新型吸声材料的研究, 根据梯度降噪理论[2], 设计制备了梯度分层吸声材料。研究了多层梯度高分子复合材料的配方设计, 获得了具有优良吸声降噪效果的多层高分子复合材料[3]。本文中就此类具有不同界面形状的多层高分子复合材料的吸声性能随温度及压力变化进行了探讨, 这对于潜艇声隐身技术的发展和应用具有重要意义。

对于多层复合结构声学性能的研究较多。如Yuzo[4]等研究了由填料层和多孔泡沫材料组成的多层结构的吸声性能。结果表明, 多层结构在低频下出现较高的吸声峰。他们认为这是由于填料的振动效应和粘滞损耗效应共同作用的结果。Martin[5,6]等研究了对称多层结构的声学性能, 这种对

收稿日期: 2005-08-31; **收修改稿日期**: 2005-12-12
基金项目: 国防预研项目(4131005032)
通讯作者: 王源升, 教授, 高分子材料及其复合结构 E-mail: yuansheng@public.wh.hb.cn

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

称多层结构容易实现阻抗匹配，从而提高其吸声性能。Yu[7]等采用化学蒸气沉积和脉冲激光沉积法制备了不同层数的多层 $PbTiO_3$/ $SrTiO_3$ 复合结构，用 HP8510C 网络分析仪测试其多层结构的声反射。研究表明，随着层数的增加，反射系数的响应点基本不变。朱金华[8]等从理论上详细研究了分层高分子介质中的声吸收，并与实验结果进行了对比。采用所建立的理论模型计算的单层高分子材料吸声系数与实验结果比较吻合，而采用所建立的理论模型计算的多层高分子材料吸声系数与实验结果在个别频段上有一定的差距，这主要是因为在分层高分子材料中材料层之间的层界面实际上并非处于理想状态，层间的粘结情况、层间可能存在的间隙以及界面层的平整性等均可能影响到声波在界面层的反射与透射，从而影响到分层高分子材料的吸声性能。孙雁，张海燕[9,10]等对多层各向异性复合材料中波的传播性能进行了详细研究。他们所研究的这些多层复合材料均为传统的平面界面。对于界面不是平面的新型多层复合材料研究较少。如 Chen[11]等研究了由不同表面形状的多孔材料和穿孔板组成的复合结构吸声体的吸声性能。他们只研究了多孔材料表面形状变化对吸声性能的影响机理，而没有涉及内部界面形状变化对复合结构吸声性能的影响。Kang[12]研究了弹性泡沫尖劈材料的声穿透性能。表明泡沫尖劈的声透射损耗明显大于平面泡沫材料的声透射损耗，认为这是由于波型转换所致。对于这些吸声尖劈的研究也只涉及特定的尖劈表面形状参数变化对吸声性能的影响，这与本文中所要研究的内部界面形状变化的新型多层高分子复合材料吸声性能不同。目前对于这类新型多层高分子复合材料吸声性能的研究还未见报道。

本文作者主要研究非平面界面的新型多层高分子复合材料在不同温度和压力下的吸声性能。制备了三角形、半圆形和矩形等不同界面形状的新型多层高分子复合材料和平面界面的传统多层高分子复合材料，按 GB/ T3674 - 1995 标准，在中船总舰船总体性能实验检测中心驻波声管中测试其水声吸声性能。

1　实验部分

1.1　试样的制备

在装有电动搅拌器、干燥氮气导入管、$CaCl_2$ 干燥管的三颈瓶中，加入定量的甲苯二异氰酸酯(TDI，化学纯，上海试剂一厂)，在 65 ℃的油浴中充入干燥氮气搅拌约 10 min，使温度均匀，然后以每分钟 80 滴左右的速度滴加计量的预热至 65 ℃的聚醚二元醇(天津三石化)。聚醚滴加完以后，使温度保持在 80 ℃左右反应约 3 h，取样测定 NCO 端基含量，直至达到或接近理论值。将所合成的聚氨酯预聚物与填料按一定的质量比混合均匀后，在三辊机上碾磨，然后加入计量的固化剂。将所设计的第 1 层材料浇注到钢制的模具中，使之达到所设计的厚度。待该层材料接近表干时，在其上面浇注所设计的第 2 层材料。依次类推，以同样的方法浇注各层材料，使之达到所设计的总厚度。在 25 ℃下固化，24 h 后脱模，放置 2 周后测试其吸声性能。所研究的多层高分子复合材料试样剖面图如图 1 所示，图中 L = 20 mm，L' = 10 mm 为界面形状基线长度，h = 5 mm 为界面形状高度，h_1 = 5 mm 为钢板厚度，h_2 = 15 mm 为各层高分子材料平均厚度。新型多层高分子复合材料 FH-1、FH-2、FH-3 和传统多层高分子复合材料 FH-4 对应各层材料性能，各界面形状基线长度及界面形状高度相同，只是各界面形状不同；FH-3 和 FH-5 对应各层材料性能，界面形状及界面形状高度相同，只是界面形状基线长度不同；FH-6 上下两层界面形状分别与 FH-5 和 FH-3 相同。各层聚氨酯复合材料(从下到上依次为第 1 层、第 2 层和第 3 层)在 22 ℃时杨氏模量及损耗因子如表 1 所示。

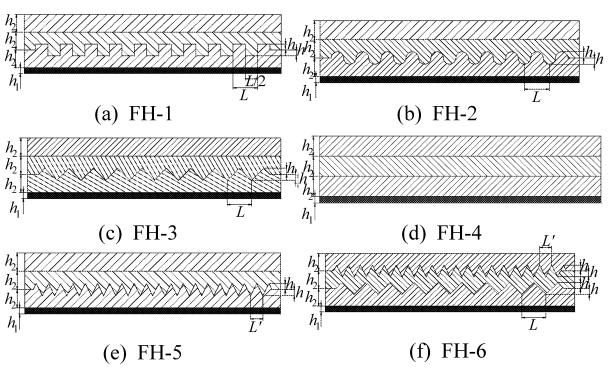

图 1　不同界面形状的多层高分子复合材料的剖面示意图

Fig. 1　The sectional drawing of multilayered polymer composite materials with different interface shapes

1.2　吸声系数的测试

按 GB/ T3674 - 1995 标准，在中船总舰船总体性能实验检测中心驻波声管中测试。声管内径 208 mm，外径 308 mm，管长 6000 mm。在常温(22 ℃)

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 1　各层聚氨酯材料性能

Table 1　The material properties of each layer polyurethane

Frequency/ Hz	First layer polyurethane		Second layer polyurethane		Third layer polyurethane	
	Loss factor	Young's modulus/ MPa	Loss factor	Young's modulus/ MPa	Loss factor	Young's modulus/ MPa
1600	0.3628	94.61198	0.2971	56.07109	0.3401	36.61266
2000	0.3659	100.43620	0.2982	59.10526	0.3466	38.42000
2400	0.3681	105.63419	0.2988	61.77236	0.3520	40.04012
2800	0.3697	110.17770	0.2992	64.06313	0.3565	41.45095
3200	0.3709	114.34350	0.2994	66.14061	0.3604	42.74586
3600	0.3718	118.06193	0.2997	67.98022	0.3638	43.90939
4000	0.3726	121.59792	0.2999	69.71539	0.3669	45.02353

常压下测试各试样的吸声系数, 试样背衬为空气; 常压下, 分别在 5、22 及 35 ℃条件下测试 FH-2 和 FH-6 的吸声系数, 试样背衬为空气; 常温下, 分别在 0～3 MPa 条件下测试 FH-2 和 FH-6 的吸声系数, 试样背衬为尼龙。

2　结果与讨论

2.1　新型多层高分子复合材料吸声性能

图 2 为多层高分子复合材料吸声性能。从图 2 可以看出, 非平面界面的新型多层高分子复合材料吸声系数大于平面界面形状的传统多层高分子复合材料吸声系数。总的来说在所研究的频率范围内特别是在低频下 FH-2 的吸声性能优于其它界面形状复合材料的吸声性能。对于矩形界面的新型多层高分子复合材料 FH-1, 可能是由于不同材料间的接触面增加, 使界面间的摩擦力增加, 从而导致其吸声系数大于界面为平面的传统多层高分子复合材料 FH-4 的吸声系数。对于半圆形界面和三角形界面的新型多层高分子复合材料 FH-2、FH-3, 除了材料间接触面增加之外, 主要是由于平面波入射到此界面上时发生波型转换, 一部分纵波转变为切变波, 引起较大的剪切变形, 使入射波能量被大量地消耗掉。对于 FH-2, 可能是由于平面波入射到此界面上时发生多种角度的波形转换, 多种成分的波形转换和高分子材料粘弹损耗的协同作用使其吸声性能优于其它复合材料的吸声性能。

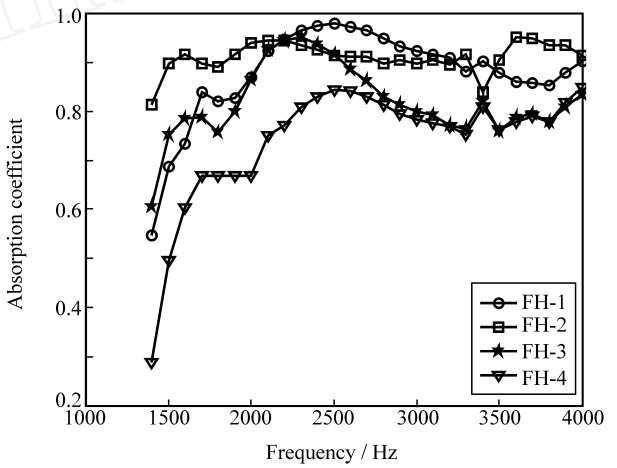

图 2　不同界面形状的多层高分子复合材料吸声系数

Fig. 2　The sound absorption of the multilayered polymer composite materials with different interface shapes

2.2　界面形状基线长度的影响

图 3 为界面形状基线长度 L = 20 mm 和 L' = 10 mm 的多层高分子复合材料 FH-3 和 FH-5 吸声系数对比曲线图。从图 3 可以发现: (1) 低频下

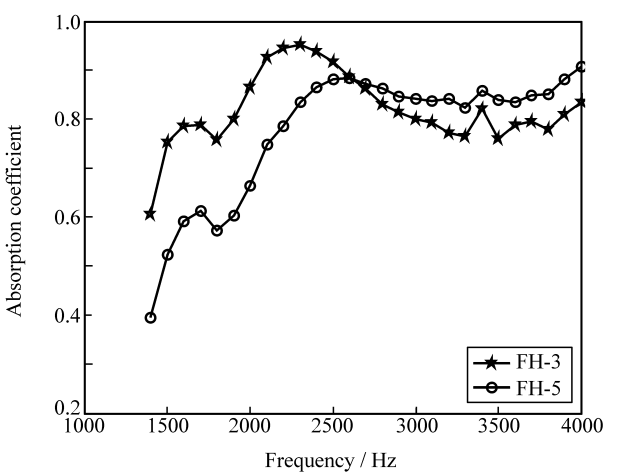

图 3　FH-3 和 FH-5 的吸声系数对比

Fig. 3　The comparison in absorption coefficients between FH-3 and FH-5

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

FH-3 吸声系数大于 FH-5 吸声系数；(2) 吸声峰值频率与吸声频宽基本不变。

2.3　温度变化对新型多层高分子复合材料吸声系数的影响

图 4(a) 和图 4(b) 分别为新型多层高分子复合材料 FH-2 和 FH-6 吸声系数随温度的变化曲线。从图 4 可以发现，新型多层高分子复合材料吸声系数与温度关系密切。随着温度升高吸声系数峰值明显向低频方向移动，且吸声峰值与宽度基本不变。这可能是因新型多层高分子复合材料的吸声系数不仅与材料中的波型转换有关，而且与高分子材料动态力学性能随温度的变化有关。当温度升高，高分子材料大分子各级纵波阻尼损耗峰和切变阻尼损耗峰均向高频移动，使其低频下大分子链段间的作用力增加，在声波传播过程中大分子链段运动时的内摩擦就会增大，从而提高了高分子材料将声能转换为热能的能力，故衰减声波的能力随温度的升高而向低频移动，因此在所研究的频率范围内新型多层高分子复合材料的吸声系数随温度的升高而向低频移动。

2.4　压力变化对新型多层高分子复合材料吸声系数的影响

图 5(a) 和图 5(b) 分别为新型多层高分子复合材料 FH-2 和 FH-6 吸声系数随压力的变化曲线。从图 5 可见，在所研究的频率范围内，新型多层高分子复合材料吸声系数大多在 0.6 以上(个别点除外)，其吸声系数随压力的变化不大。对比传统孔腔式吸声结构体在加压下低频吸声性能明显降低的情况(如图 6 所示[13])，这是新型多层高分子复合材料研究的一项重大发现。这可能是因所制备的新型多层高分子复合材料在 0～3 MPa 内自由体积随压力变化不大，使其大分子链段间作用力基本不变。

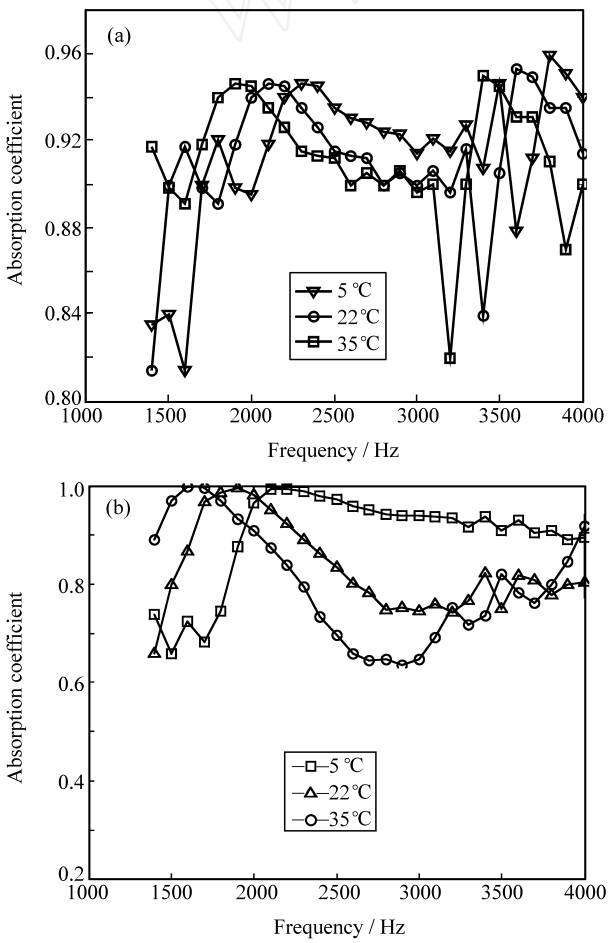

图 4　新型多层高分子复合材料吸声系数随温度的变化曲线

Fig. 4　The influence of temperatures on the sound absorption coefficients of the new type of multilayered polymer composite materials

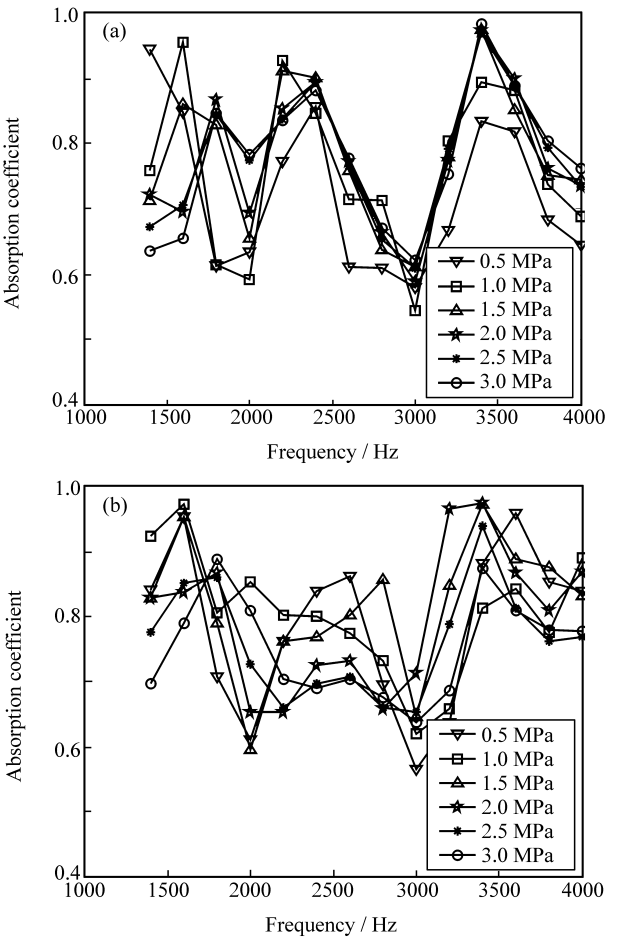

图 5　压力变化对新型多层高分子复合材料吸声系数的影响

Fig. 5　The influence of pressures on the sound absorption coefficients of the new type of multilayered polymer composite materials

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

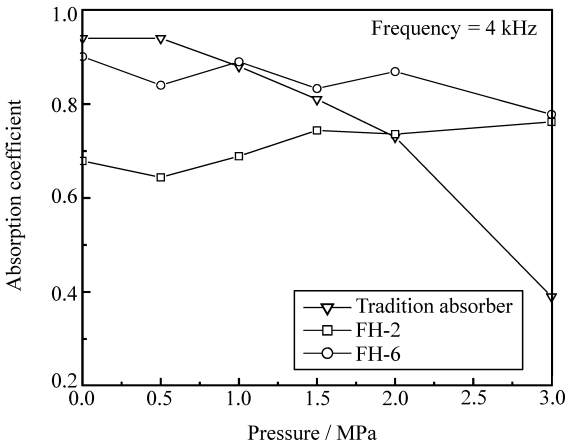

图 6　不同压力下传统吸声结构和新型多层高分子复合材料的吸声系数对比

Fig. 6　The comparison in absorption coefficients between the tradition absorber and the new type of multilayered polymer composite materials at different pressures

在声波传播过程中, 大分子链段运动时的内摩擦基本不变, 从而高分子复合材料衰减声波的能力不变。故新型多层高分子复合材料吸声系数随压力的变化不敏感。

4　结　论

制备了三角形、半园形、矩形和平面形等不同界面形状的多层高分子复合材料, 按 GB/ T3674 - 1995 标准, 在声管中测试其水声吸声性能, 并对测试结果进行了分析, 得出如下结论:

(1) 界面形状变化有利于提高多层复合材料的吸声性能。在所研究的整个频率范围内半圆形界面形状的多层高分子复合材料具有较好的吸声性能。

(2) 在所研究的频率范围内, 随着温度升高, 新型多层高分子复合材料吸声峰值向低频移动, 吸声峰值和宽度基本不变; 随着压力的升高, 新型多层高分子复合材料吸声性能变化不大。

(3) 温度和压力变化对复合结构吸声性能的影响主要与高分子材料本身各种模式的粘弹损耗随温度和压力的变化有关。有关这方面的定性和定量关系需进一步深入研究。

对于本课题还需进一步研究的内容是: 建立合适的有限元模型模拟多层高分子复合材料的吸声性能, 从理论上研究各种界面形状的多层高分子复合材料的吸声性能, 揭示其吸声机理, 优化其吸声性能。

参考文献:

[1] 张宏军, 邱伯华, 石　磊, 等. 消声瓦技术的现状与发展趋势 [J]. 舰船科学技术, 2001, 180(4): 6 - 10.
Zhang Hongjun, Qiu Bohua, Shi Lei, et al. The status quo and development trend of anechoic tile technology [J]. Ship Science and Technology, 2001, 180(4): 6 - 10.

[2] 王源升. 水溶性高分子涂层降噪机理的研究 [D]. 四川: 四川大学, 1995.

[3] 朱金华. 梯度分层吸声材料的研究与设计 [D]. 四川: 四川大学, 2001.

[4] Yuzo O, Hideyuki A, Munetake S, et al. Sound absorption by multi- layered constructions composed of powder layers and porous sheets [J]. Electrical Engineering in Japan, 1998, 122 (2): 1 - 11.

[5] Martin B G. Acoustical properties of symmetric multilayers [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1992, 91 (3): 1469 - 1473.

[6] Cheng Z Y, Martin B G. Symmetric multilayer structures and their use in the design and fabrication of Chebyshev acoustic antireflection coatings [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1991, 90(1): 385 - 390.

[7] Yu Tao, Chen Yanfeng, Zhu Yongyuan, et al. Acoustic property of $PbTiO_3$/ $SrTiO_3$ multilayer structures prepared by MOCVD and PLD methods [J]. Applied Surface Science, 1999, 138/ 139: 609 - 612.

[8] 朱金华, 刘巨斌, 姚树人, 等. 分层高分子介质中的声吸收 [J]. 高分子材料科学与工程, 2001, 17(2): 34 - 38.
Zhu Jinhua, Liu Jubin, Yao Shuren, et al. The acoustic absorption in layered polymer materials [J]. Polymer Materials Science and Engineering, 2001, 17(2): 34 - 38.

[9] 孙　雁, 李红云, 谢　军. 基于 Hamilton 体系多层各向异性材料表面波传播的数值解法 [J]. 复合材料学报, 2004, 21 (5): 159 - 165.
Sun Yan, Li Hongyun, Xie Jun. New numerical method for surface wave propagation in multilayer anisotropy materials [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(5): 159 - 165.

[10] 张海燕, 刘镇清, 吕东辉. 全局矩阵法及其在层状各向异性复合板中 Lamb 波传播特性研究中的应用 [J]. 复合材料学报, 2004, 21(2): 111 - 116.
Zhang Haiyan, Liu Zhenqing, Lü Donghui. Global matrix and its application to study on Lamb wave propagation in layered anisotropic composite plates [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2004, 21(2) :111 - 116.

[11] Chen Wen- Hwa, Lee Fan- Ching, Chiang Dan- Ming. On the acoustical absorption of porous materials with different surface shapes and perforated plates [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 237(2): 337 - 355.

[12] Kang Yeon- June, Bolton J S. Sound transmission through elastic porous wedges and foam layers having spatially graded properties [J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 102(6): 3319 - 3332.

[13] 李延林. 潜艇隐身和材料 [J]. 橡塑资源利用, 2005(1): 22 - 30.
Li Yanlin. Stealth and materials of submarines [J]. Rubber & Plastics Resources Utilization, 2005(1): 22 - 30.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net