

# 新型压电导电材料阻尼特性研究

刘宇, 韩金花, 陈猛, 姜恒, 王育人, 徐文帅, 刘瑞霞

(中国科学院力学研究所微重力实验室, 北京 100190)

**摘要:** 采用共混法以环氧树脂为基体, PMN 为压电相, 分别添加不同质量分数的铜粉、铝粉、碳纳米管、石墨以及两相混合物作为导电相, 制备压电导电复合材料, 探究不同导电相对压电导电材料阻尼特性的影响。实验结果表明: 当 Al 含量为 20% 时, Al/PMN/Epoxy 复合材料损耗因子峰值达到 0.78, 明显优于添加其他相的压电导电阻尼材料。

**关键词:** 压电导电材料; 导电相; 阻尼特性

中图分类号: 0328

文献标识码: A

## Study on Damping Characteristics of Piezoelectric Conductive Materials

*Liu Yu, Han Jinhua, Chen Meng, Jiang Heng, Wang Yuren, Xu Wenshuai, Liu Ruixia*

(Key Laboratory of Microgravity, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** By using blending method, a new piezoelectric conductive damping materials with different conductive phases are prepared, taking epoxy as the matrix, PMN as the piezoelectric phase and studying the influence of the conductive phase on the damping characteristics of the piezoelectric conductive materials. The results show that Al/PMN/Epoxy composites is better than other piezoelectric conductive damping materials; when the content of Al is 20%, its peak value is 0.78, which shows an obvious advantages than others.

**Key words:** Piezoelectric conductive materials; conductive phase; damping characteristics

## 0 引言

由于电磁波在水中传播时能量衰减过快, 声波是目前在海洋中唯一能够远距离传播的能量形式, 也是完成水下通讯、定位、搜索等任务的唯一信息载体<sup>[1]</sup>。在海洋复杂声场环境下, 水下吸声材料是消除多余声波、控制声波传播的重要途径, 在声呐隐身、水声通讯等军民两用技术中有着重要应用<sup>[2-3]</sup>。水下吸声材料可以依据吸声机制的不同划分为传统水下吸声材料和新型水下吸声材料。传统水下吸声材料包括纯聚合物水下吸声材料、微粒填充型水下吸声材料、空腔谐振型水下吸声材料、阻抗渐变型水下吸声材料及多孔水下吸声材料等。吸声机制主要指声波在吸声材料内部传播时的能量损耗机制<sup>[4-5]</sup>。传统水下吸声材料的吸声机制主要以声波在材料(一般为聚合物基材料)内部引起的分子内摩擦及声波在不同介质界面上的耗能机制为基础, 存在阻尼机制较为单一, 综合性能较差等缺点, 限制了其应用范围。

压电导电阻尼材料是一种新型的智能阻尼材料，通常由高分子基体、压电相、导电相三相组成<sup>[6]</sup>，其综合多种阻尼耗能机制，阻尼机理复杂，可设计性强，为新型阻尼材料的研制提供了新的思路，吸引了国内外学者的广泛关注。但目前关于导电相对阻尼材料的影响还缺乏系统的研究，本文通过制备导电相分别为铜粉、铝粉、碳纳米管、石墨、两相混合以及三维泡沫铝材料的压电导电阻尼材料，探究导电添加相的种类和含量对复合材料阻尼特性的影响。

## 1 新型压电导电阻尼材料的制备

本文采用共混法，以环氧树脂为基体，选用具有烧结温度低、居里温度较低、压电耦合系数大等优点的压电陶瓷铌镁酸铅 PMN 作为压电相<sup>[7]</sup>，分别添加不同质量分数的铜粉、铝粉、碳纳米管、石墨以及两相混合物作为导电相（导电相配比见表 1、表 2），制备压电导电阻尼复合材料。

表 1 导电相种类及含量不同的压电阻尼材料样品成份表(质量配比)

Table 1 The contents of different kinds of piezoelectric conductive damping materials

样品名称	Cu	Al	CNT	石墨	PMN	Epoxy
Epoxy	-	-	-	-	-	100
PMN/Epoxy	-	-	-	-	60	100
	8	-	-	-	60	100
Cu/PMN/Epoxy	12	-	-	-	60	100
	20	-	-	-	60	100
	-	8	-	-	60	100
Al/PMN/Epoxy	-	12	-	-	60	100
	-	20	-	-	60	100
	-	-	0.5	-	60	100
CNT/PMN/Epoxy	-	-	1	-	60	100
	-	-	2	-	60	100
	-	-	-	5	60	100
石墨/PMN/Epoxy	-	-	-	10	60	100
	-	-	-	15	60	100

表 2 导电相由两相组成的压电导电阻尼材料成份表（质量配比）

Table 2 The contents of piezoelectric conductive damping materials including two kinds of conductive materials

样品名称	Cu	Al	CNT	石墨	PMN	Epoxy
Al/CNT/PMN/Epoxy	-	14	2	-	60	100
Cu/CNT/PMN/Epoxy	-	2	14	-	60	100
Al/Cu/PMN/Epoxy	6	10	-	-	60	100
Al/CB/PMN/Epoxy	-	14	-	2	60	100

## 2 阻尼特性分析

采用美国 TA 公司的 DMAQ800 动态热机械分析仪, 对压电电阻尼材料阻尼性能进行测试, 采用单悬臂模式, 试样的尺寸为 40mm×10mm×5mm, 测试条件为, 升温速率: 5°C/min; 频率: 1.00HZ; 温度范围: 20-120°C; 应变率: 0.1%。通过测试得到复合材料的储能模量、损耗模量以及损耗因子, 对阻尼性能进行分析。

### 2.1 Cu 含量对 Cu/PMN/Epoxy 复合材料的阻尼性能的影响

制备了以 Cu 为导电相的 Cu/PMN/Epoxy 三相压电电阻尼复合材料, 并对其阻尼特性进行了研究(测试结果见图 1 图 2)。从实验结果中可以看出随着 Cu 含量的增加, Cu/PMN/Epoxy 的储能模量、损耗模量及损耗因子均呈现先大幅增大而后减小的趋势。当 Cu 含量为 12%时, Cu/PMN/Epoxy 的损耗因子峰值达到 0.65, 有效阻尼温域范围为 60°C-80°C。

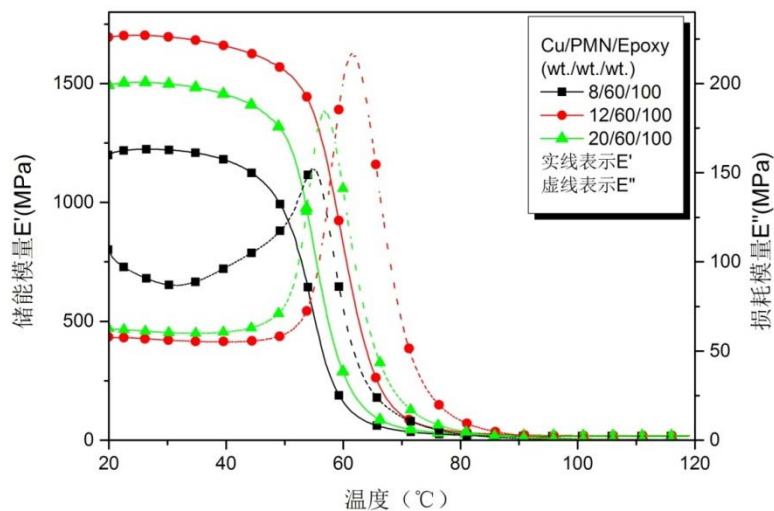


图 1 Cu/PMN/Epoxy 复合材料的储能模量、损耗模量随温度变化的情况

Fig1. The changes of Cu/PMN/Epoxy's storage modulus and loss modulus with the temperature

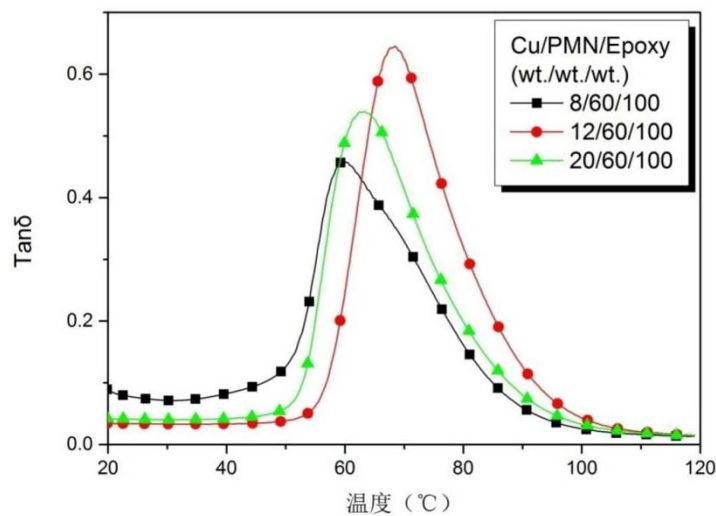


图 2 Cu/PMN/Epoxy 复合材料的损耗因子随温度变化的情况

Fig2. The changes of Cu/PMN/Epoxy's loss factor with the temperature

## 2.2 Al 含量对 Al/PMN/Epoxy 复合材料的阻尼性能的影响

制备了以 Al 为导电相的 Al/PMN/Epoxy 三相压电电阻尼复合材料,并对其阻尼特性进行了研究(测试结果见图 3 图 4)。当 Al 含量增大到 12%时,储能模量与损耗能量变化较小,主要表现为曲线向高温方向移动;随着 Al 含量继续增加到 20%,储能模量与损耗模量仍然表现为向高温方向移动,但损耗模量增加幅度较大,Al/PMN/Epoxy 复合材料的阻尼性能呈现出逐渐上升的趋势;当 Al 粉含量为 20%时,复合材料的损耗因子峰值达到 0.78,有效阻尼温域范围( $\tan \delta > 0.3$ )为 64°C -86°C。

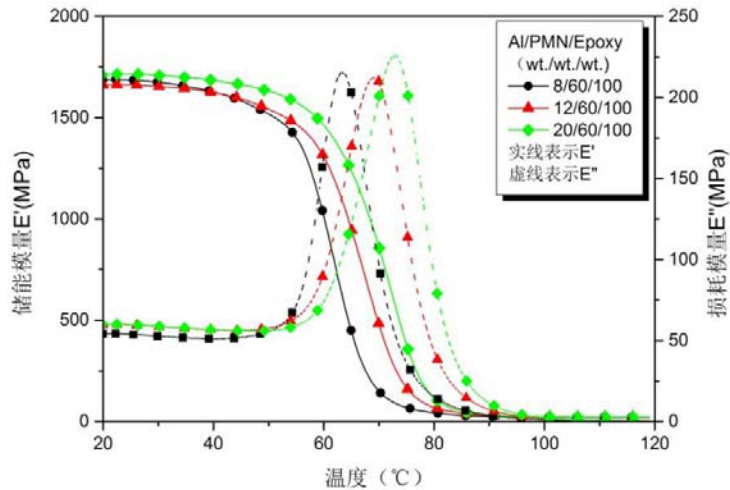


图 3 Al/PMN/Epoxy 复合材料的储能模量、损耗模量随温度变化的情况

Fig3. The changes of Al/PMN/Epoxy's storage modulus and loss modulus with the temperature

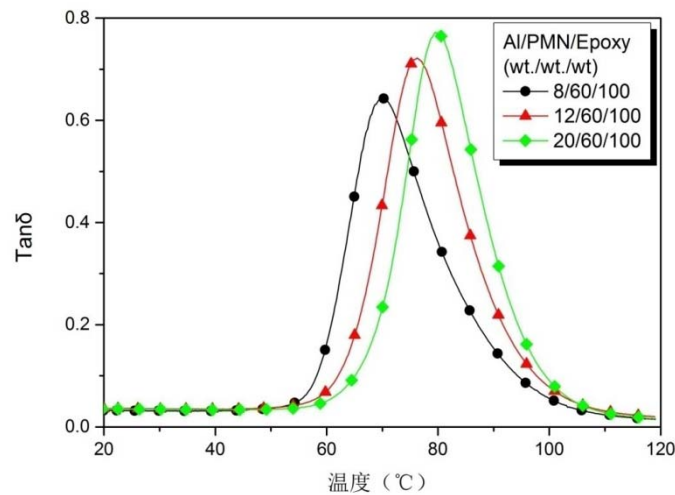


图 4 Al/PMN/Epoxy 复合材料的损耗因子随温度变化的情况

Fig4. The changes of Al/PMN/Epoxy's loss factor with the temperature

## 2.3 CNT 含量对 CNT/PMN/Epoxy 复合材料的阻尼性能的影响

制备了以 CNT 为导电相的 CNT/PMN/Epoxy 三相压电电阻尼复合材料,并对其阻尼特性进行了研究(测试结果见图 5 图 6)。与 Cu/PMN/Epoxy 及 Al/PMN/Epoxy 复合材料相比,CNT/PMN/Epoxy 的损耗模量随温度变化的曲线较为特殊,在低温区域的损耗模量相对高,损耗模量随温度变化的趋势与储能模量随温度变化的趋势一致;当 CNT 含量为 1%时,损耗因子出现极大值为 0.45,有效阻

尼温域范围为 54-71℃。而当 CNT 含量超过 1%后, 损耗因子随温度变化的曲线表现出两个峰, 两个峰之间出现小的凹陷, 随着 CNT 含量的增加, 这两个峰之间的凹陷增加; 说明此时 CNT 与基体的相容性较差, 导致相分离现象严重, 这主要由于 CNT 为管状中空结构, 随着 CNT 含量的增加, 团聚现象严重导致的。

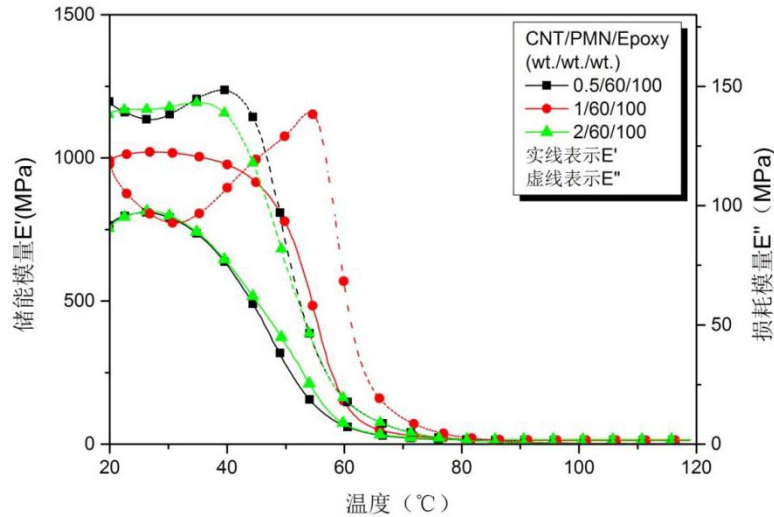


图 5 CNT/ PMN/Epoxy 材料的储能模量、损耗模量随温度变化的情况

Fig5. The changes of CNT/ PMN/Epoxy's storage modulus and loss modulus with the temperature

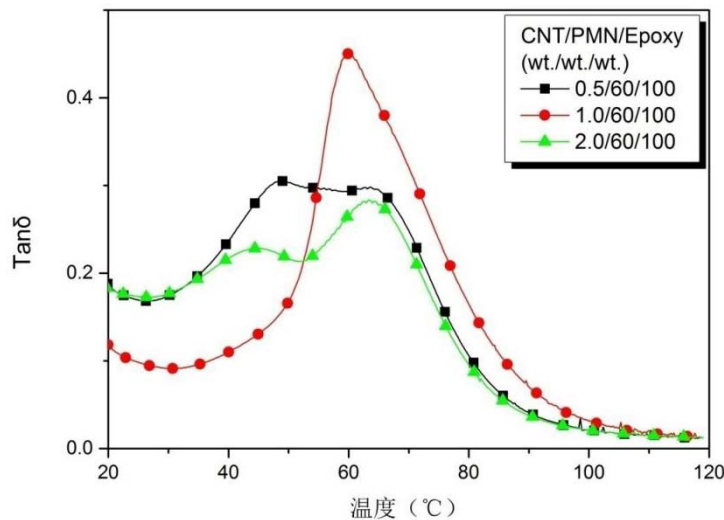


图 6 CNT/ PMN/Epoxy 复合材料的损耗因子随温度变化的情况

Fig6. The changes of CNT/ PMN/Epoxy's loss factors with the temperature

#### 2.4 石墨含量对石墨/PMN/Epoxy 复合材料的阻尼性能的影响

制备了以石墨为导电相的石墨/PMN/Epoxy 三相压电电阻尼复合材料, 并对其阻尼特性进行了研究(测试结果见图 7 图 8)。当导电相石墨的含量由 5%增加到 10%时, 复合材料的储能模量和损耗模量均表现为增加, 这是因为陶瓷和石墨粉体本身具有很高的模量。随着石墨含量的增加, 石墨/PMN/Epoxy 复合材料的阻尼性能呈现出先上升后下降的趋势; 当石墨含量为 10%时, 复合材料的损耗因子峰值达到 0.68, 有效阻尼温域范围 ( $\tan\delta > 0.3$ ) 为 67℃-88℃。

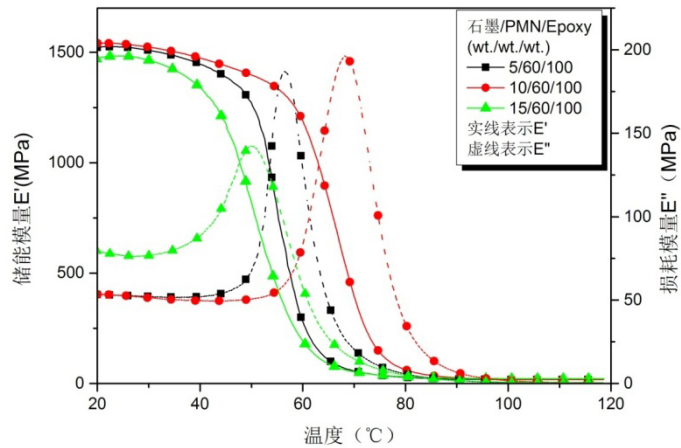


图 7 石墨/ PMN/Epoxy 复合材料的储能模量、损耗模量随温度变化的情况

Fig.7. The changes of 石墨/ PMN/Epoxy's storage modulus and loss modulus with the temperature

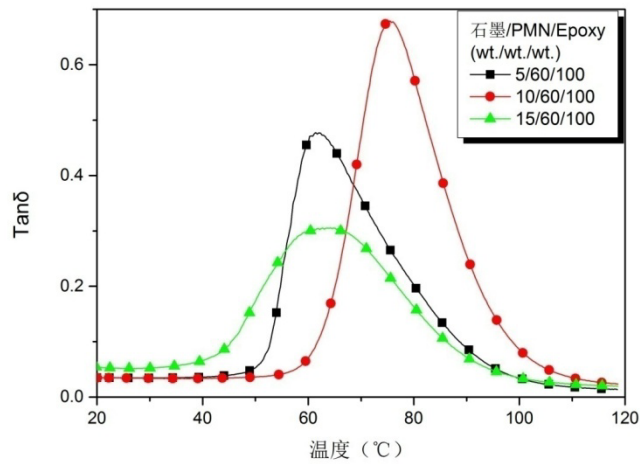


图 8 石墨/ PMN/Epoxy 复合材料的损耗因子随温度变化的情况

Fig.7. The changes of 石墨/ PMN/Epoxy's loss factors with the temperature

### 2.5 导电相为两相的压电阻尼复合材料的阻尼性能

制备了 Al/CNT/PMN/Epoxy、Cu/CNT/PMN/Epoxy、Al/Cu/CNT/PMN/Epoxy、Al/石墨/CNT/PMN/Epoxy 四种压电电阻尼复合材料，并对其阻尼性能进行了探究（测试结果见图 9 图 10）。相较其他三种材料，Al/CNT/PMN/Epoxy 复合材料的损耗模量与储能模量较高。Al/CNT/PMN/Epoxy 压电复合材料的损耗因子峰值可达 0.69，有效阻尼温域值为 61°C-80°C，阻尼性能相对较好。

表 3 几种压电阻尼材料的阻尼参数

Table3 Damping parameters of several piezoelectric damping materials

样品	损耗因子峰值	陶瓷化转变温度 (°C)	有效阻尼温域 (tanδ>0.3)
Al/CNT/PMN/Epoxy	0.69	67	61°C-80°C
Cu/CNT/PMN/Epoxy	0.4	58	52°C-69°C
Al/Cu/PMN/Epoxy	0.50	64	0°C
Al/石墨/PMN/Epoxy	0.50	61	56°C-73°C

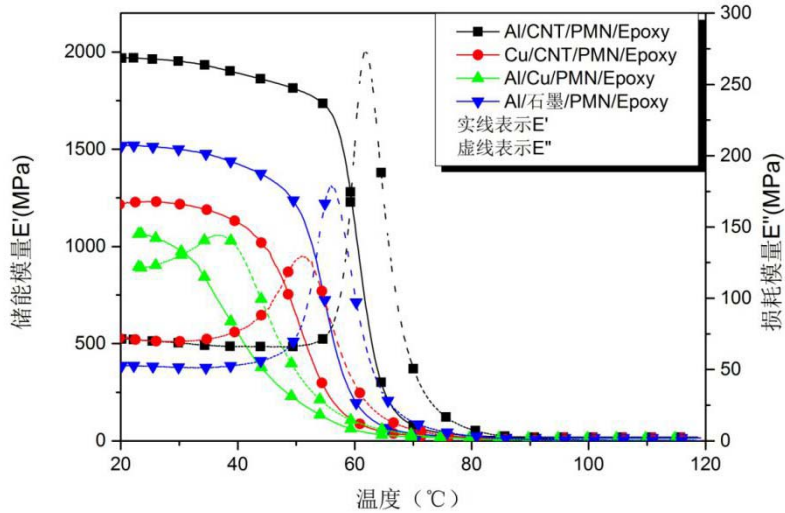


图 9 几种压电阻尼材料的储能模量、损耗模量随温度的变化情况

Fig9. The changes of piezoelectric conductive damping materials' storage modulus and loss modulus including two kinds of conductive materials with the temperature

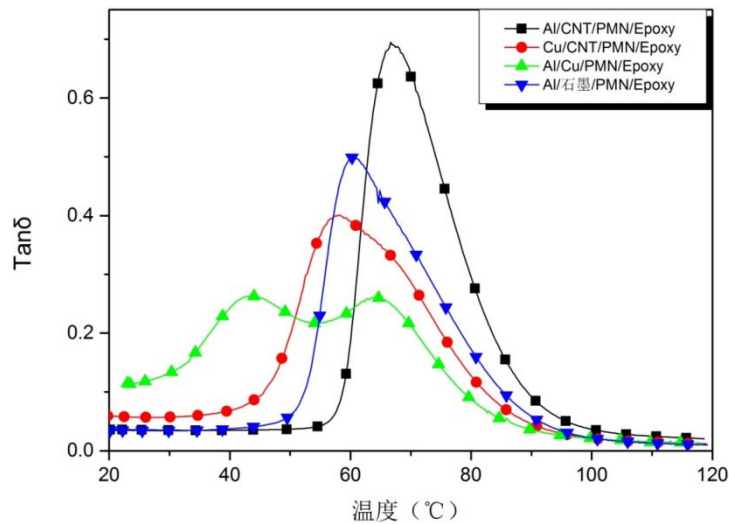


图 10 几种压电阻尼材料的损耗因子随温度的变化情况

Fig10. The changes of piezoelectric conductive damping materials' loss factors including two kinds of conductive materials with the temperature

### 3 结 论

通过将以上实验结果进行对比发现, 当 Al 作为导电相且 Al 粉含量为 20% 时, 复合材料的损耗因子峰值达到 0.78, 有效阻尼温域范围 ( $\tan\delta > 0.3$ ) 为 64°C-86°C, 表现出的阻尼性能最好, 这是由于 Al 在材料中分散性较好, 分散较为均匀, 有助于在材料内部形成良好的导电通路。导电相为两相的压电阻尼材料的阻尼性能并不优于导电相为一相的压电阻尼材料, 这是由于导电相的混合添加会对各自导电通路的形成造成干扰, 进而影响材料的阻尼性能。

## 参 考 文 献

- [1] 顾金海, 叶学千. 水声学基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- [2] Odell D, Hertel K, Nelson C. New acoustic systems for AUV tracking, communications, and noise measurements at NSWCCD-ARD[C], Idaho Oceans Conference Record (IEEE), 2002, 1:266-271.
- [3] Heinemann M, Larraza A, Smith K B. Experimental studies of applications of time-reversal acoustics to noncoherent underwater communications[J]. The Journal of the Acoustical Society of America. 2003, 113(6): 3111-3116.
- [4] Schaller R. Metal matrix composites, a smart choice for high damping materials[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2003, 355(1 - 2):131 - 135.
- [5] Zhang J, Perez R J, Lavernia E J. Documentation of damping capacity of metallic, ceramic and metal-matrix composite materials[J]. Journal of Materials Science, 1993, 28(9):2395-2404.
- [6] Buravalla V R, Remillat C, Rongong J A, et al. Advances in damping materials and technology[J]. Smart Materials Bulletin, 2001, 2001(8): 10-13.
- [7] Sugawara Y, Onitsuka K, Yoshikawa S, et al. Metal - ceramic composite actuators[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1992, 75(4): 996-998.