

嵌入式共固化复合材料阻尼结构湿热处理前后的摩擦磨损性能研究

梁森¹, 王辉¹, 雒磊¹, 梁天锡²

(1. 青岛理工大学 机械工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘要:按照 T300/QY8911 复合材料预浸料固化工艺曲线制成嵌入式共固化复合材料阻尼结构试件, 分别对其进行摩擦、磨损实验, 同时对湿热试验后试件作耐磨性对比, 获得了该复合材料的摩擦系数和磨损量随阻尼层厚度变化曲线, 并对实验数据进行分析 and 研究; 结果表明: 湿热处理前后, 阻尼结构的抗摩擦、磨损特性是随阻尼层厚度的增加而降低; 穿孔阻尼结构能较大幅度地提高嵌入式共固化复合材料阻尼结构的抗摩擦、磨损性能; 在相同阻尼薄膜厚度情况下, 穿孔阻尼结构在湿热处理前摩擦系数和磨损量分别降低了 9.85% 和 16.67%, 在湿热处理后摩擦系数和磨损量分别降低了 8.32% 和 11.43%; 为进一步探索全天候、超高速、高耐磨性能的嵌入式共固化复合材料有重要的指导意义。

关键词:嵌入式共固化复合材料阻尼结构; 摩擦磨损特性; 湿热处理; 穿孔阻尼结构

本文引用格式:梁森, 王辉, 雒磊, 等. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构湿热处理前后的摩擦磨损性能研究[J]. 四川兵工学报, 2015(1): 128 - 132.

Citation format: LIANG Sen, WANG Hui, LUO Lei, et al. Tribological Properties of Embedded Co-Cured Composite Damping Structures Before and After Hygrothermal Environment Treatment[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2015(1): 128 - 132.

中图分类号: TB535

文献标识码: A

文章编号: 1006 - 0707(2015)01 - 0128 - 06

Tribological Properties of Embedded Co-Cured Composite Damping Structures Before and After Hygrothermal Environment Treatment

LIANG Sen¹, WANG Hui¹, LUO Lei¹, LIANG Tian-xi²

(1. College of Mechanical Engineering, Qingdao Technological University, Qingdao 266033, China;

2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: According to the cure curve of T300/QY8911, the specimens of the embedded co-cured composite damping structure were manufactured. The friction and wear experiments of the specimens were completed and the tribological properties of the embedded co-cured composite damping structure vs. the thickness of damping membrane were obtained by making a comparison with specimens before and after hygrothermal environment treatment, respectively. The result shows that the friction and wear coefficients are enhancing with the increasing of damping layer thickness, and the embedded co-cured perforated damping layer composite structure can improve the tribological properties. In the same thickness of damping membrane, by comparing with a continuous damping structure, the friction and wear coefficients of a perforated damping layer composite structure are decreased by 9.85% and 16.67% before hygrothermal environment

收稿日期: 2014 - 06 - 27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375248); 中国工程物理研究院“仪表板的设计与开发”资助项目

作者简介: 梁森, 男, 教授, 主要从事大阻尼功能复合材料研究。

treatment, respectively. The friction and wear coefficients are reduced by 8.32% and 11.43% after hygrothermal environment treatment, respectively. The conclusion is very important for the theoretical prediction of the wear-resistant of the embedded co-cured perforated damping layer composite structure.

Key words: embedded co-cured composite damping structure; friction and wear property; hygrothermal environment treatment; perforated damping structure

复合材料结构本身的阻尼特性要比常见金属的高 10 ~ 100 倍,在一定程度上控制了结构的共振幅值、提高了结构的疲劳寿命和抗冲击能力^[1,2],但是在应用中仍然偏低^[3-6],复合材料力学性能的可设计性又为其阻尼性能的进一步提高和结构的优化提供了广阔的空间,嵌入式共固化复合材料阻尼结构(Embedded Co-cured Composite Damping Structure, EC-CDS)正是利用这一特性将三种不同性质的材料(如碳纤维、树脂和粘弹性阻尼材料),通过物理或化学的方法经人工或现代工艺复合而成的一种多相固体。从它的组成和结构上分析,其中有一相在层内基本上是连续的称为基体,如树脂,而另一相是分散被基体所包容的称为增强相,如碳纤维,还有一相是各向同性的粘弹性阻尼材料。其基体相、增强相和粘弹性阻尼材料在性能上起协调作用,从而达到大幅度地提高复合材料构件阻尼的目的,得到单一材料难以比拟的综合力学性能。与传统阻尼形式相比这种事先阻尼处理结构是镶嵌在基体材料内部的,具有不脱落、抗老化等优点,因此这种复合材料层合阻尼结构一经提出就成了众多国内外学者研究的热点内容^[4-9],然而目前的探索都是在自然环境下进行的^[8-12],要使这种材料应用于全天候、超高速的飞行器、运载器等设备,就必须对其在湿热环境处理后的抗摩擦、磨损性能进行探究,但时至今日相关文献报道非常稀少。为此本文通过实验研究嵌入式共固化复合材料在不同环境处理后摩擦系数和磨损量来探讨 ECCDS 的抗磨性能,并对实验结果进行详细分析与讨论,为进一步探索全天候、超高速、高耐磨性能的嵌入式共固化复合材料奠定坚实基础。

1 实验试件

1.1 连续阻尼结构试件制备

为研究嵌入式共固化复合材料的摩擦、磨损性能,本文根据参考文献[12,13]采用碳纤维/双马来酰亚胺(T300/QY8911)的共固化工艺制成嵌入式耐高温大阻尼复合材料试件,其中粘弹性阻尼层采用刷涂工艺制得,根据国标 HB7401—1996 通过高压水切割制成长为 50 mm,宽为 50 mm 的正方形复合材料试件,其厚度参数和最终试件分别见表 1 和图 1。

1.2 穿孔阻尼结构试件制作

穿孔阻尼复合材料结构能在几乎不降低整体结构刚度的前提下大幅度提高 ECCDS 的阻尼性能^[14],作为对比试件,本文使用穿孔阻尼结构试件,其层合结构如图 2 所示。

表 1 试件主要几何参数

试件编号	阻尼层厚度	试件总厚度
1#	0.05	2.05
2#	0.1	2.1
3#	0.2	2.2
4#	0.3	2.3
5#	0.4	2.4
6#	0.5	2.5
7#	0.6	2.6



图 1 嵌入式共固化复合材料试件

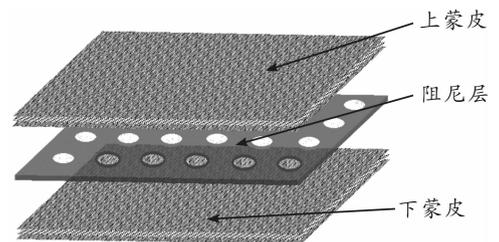


图 2 穿孔阻尼结构示意图

穿孔阻尼结构是在粘弹性材料层上按照指定尺寸要求穿孔后再与碳纤维预浸料进行共固化,从而制成穿孔阻尼复合材料结构试件。在共固化工艺中,上、下蒙皮的树脂会变成液态,在抽真空、加压和加热环境下,液态树脂会贯通阻尼穿孔层将两侧的复合材料部分相连,从而提高了阻尼结构的整体刚度。具体如图 3 所示。

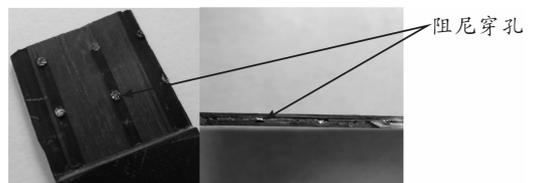


图 3 穿孔阻尼层共固化后的复合材料结构

1.3 湿热处理

为了研究 ECCDS 湿热后的摩擦、磨损性能,作为对比实验,根据国标 HB7401-1996 分别将相同条件制作的试件进行湿热处理,即将试样先干燥,使其达到工程干态后,然后在 $78^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$ 的蒸馏水中进行浸泡,每 5 h 取出称重直至其重量变化量小于 0.02% 后,再进行烘干达到工程干态,就制成湿热处理后的 ECCDS 试件。

2 摩擦、磨损分析实验

2.1 实验所用仪器

摩擦实验采用的是美国 CERT 公司的 UMT-3,实验仪器和试件装夹分别如图 4、图 5 所示。

磨损试验采用的是天辰公司 MHR-3 数显立式万能磨损试验机,实验仪器如图 6 所示,实验试件的夹持如图 7 所示。

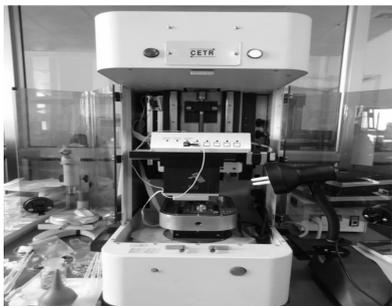


图 4 CERT 摩擦系数测量仪

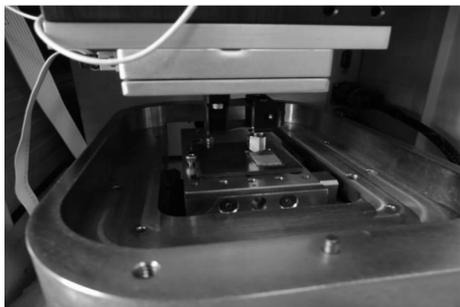


图 5 实验试件的装夹



图 6 MHR-3 立式万能磨损试验机

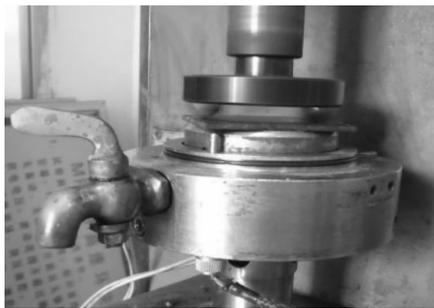


图 7 实验试件的装夹

2.2 实验方法

将嵌入式共固化复合材料试件用强力胶水固定在实验仪器的实验台上,摩擦实验的加载力为 2.5 N,加载时间 5 min,采用直径为 5 mm 的钢球与试件进行往复干摩擦;磨损实验采用 50 N 的加载力,磨损时间为 30 min,转速为 500 r/min,采用 3 个成 120° 角分布的直径为 17 mm 的钢球进行干磨损,注意要保证试件装夹牢固可靠,避免在摩擦和磨损实验时造成试件脱落,磨损后的试件如图 8 所示。



图 8 磨损后的嵌入式共固化复合材料试件

2.3 测试结果及对比

2.3.1 ECCDS 测试结果

通过试验测得 ECCDS 试件的摩擦系数随阻尼层厚度的变化如表 2 所示;ECCDS 试件的磨损量随阻尼层厚度的变化如表 3 所示。

表 2 摩擦系数随阻尼层厚度的实验结果

试件编号	阻尼层厚度/mm	摩擦系数
1#	0.05	0.040 92
2#	0.1	0.068 17
3#	0.2	0.099 94
4#	0.3	0.128 44
5#	0.4	0.158 31
6#	0.5	0.219 34
7#	0.6	0.247 43

2.3.2 湿热处理后 ECCDS 测试结果

为了比较,这里将做过湿热处理后的试件再次进行摩擦、磨损实验,现将所测摩擦系数随阻尼层厚度的变化列入表 4,湿热处理前、后试件摩擦系数随阻尼层厚度的变化曲线

绘于图9;并将湿热处理后 ECCDS 试件的磨损量随阻尼层厚度的变化列入表5,湿热处理前、后 ECCDS 试件的磨损量随阻尼层厚度的变化关系绘于图10。

表3 磨损量随阻尼层厚度的实验结果

试件编号	阻尼层厚度/mm	磨损量/mg
1#	0.05	2.1
2#	0.1	2.2
3#	0.2	2.4
4#	0.3	2.5
5#	0.4	2.8
6#	0.5	3.4
7#	0.6	3.6

表4 湿热后 ECCDS 试验结果

试件编号	阻尼层厚度/mm	摩擦系数
1#	0.05	0.049 89
2#	0.1	0.100 85
3#	0.2	0.120 50
4#	0.3	0.157 44
5#	0.4	0.215 31
6#	0.5	0.253 34
7#	0.6	0.256 68

表5 湿热后 ECCDS 磨损试验结果

试件编号	阻尼层厚度/mm	磨损量/mg
1#	0.05	2.5
2#	0.1	2.7
3#	0.2	3.3
4#	0.3	3.8
5#	0.4	4.2
6#	0.5	3.9
7#	0.6	3.7

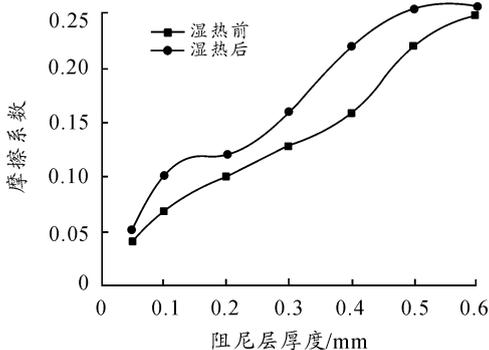


图9 湿热处理前、后摩擦系数曲线对比

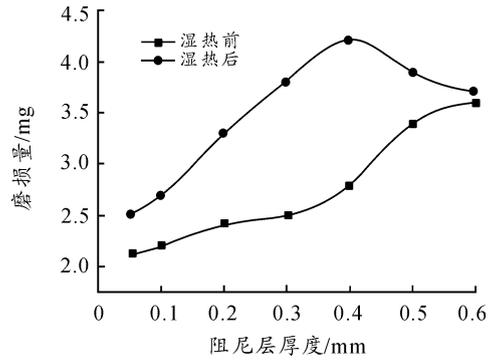


图10 湿热处理前、后磨损量曲线对比

2.3.3 穿孔阻尼结构的测试结果

这里采用穿孔孔径为 2 mm,孔距为 10 mm,阻尼层厚度为 0.2 mm 的 ECCDS 进行摩擦、磨损实验。结果与相同厚度连续阻尼试件对比如表 6 所示。

表6 穿孔阻尼摩擦、磨损试验结果及对比

试件	湿热前		湿热后	
	摩擦系数	磨损量/mg	摩擦系数	磨损量/mg
穿孔阻尼	0.090 10	2.0	0.110 47	2.9
连续阻尼	0.099 94	2.4	0.120 50	3.3

3 数据分析

3.1 连续阻尼结构测试结果分析

由于高分子材料的摩擦、磨损是一个非常复杂的动态过程,它主要与材料的硬度和密度因素有关。根据 Archard 的摩擦、磨损规律,即硬质材料与软质材料对磨时,软质材料的磨损量与其硬度成反比^[15]。从图9和图10可知:随着嵌入式共固化复合材料阻尼层厚度的增加,ECCDS的摩擦系数和磨损量都是增加的,这是由于ECCDS的整体刚度随着阻尼层厚度的增加而降低^[16,18-21]。当钢球在相同外力的作用下压在阻尼薄膜较厚的试件表面时,在试件表面压入的凹坑就比较深,也就是说试件的表面硬度比较低,从而导致磨损量随阻尼层厚度的增加而增加。对于相同材质和表面粗糙度的试件,其表面硬度越小,摩擦系数就会变大,从而使试件更容易被磨损,所以ECCDS的抗摩擦、磨损性能也随着阻尼层厚度的增加而有不同程度地降低。

3.2 湿热处理后 ECCDS 测试结果分析

由图9和图10知:湿热处理后试件的摩擦系数和磨损量均比湿热前大,这是由于阻尼结构在湿热环境下大量水分子进入ECCDS中,当试件烘干后,水分蒸发,在ECCDS中留下大量的微观孔洞,形成如图11所示的细微多孔组织,使ECCDS的密度降低,从而使试件的抗摩擦、磨损性能下降。这里的降低是由硬度和密度共同作用的结果,从而使得湿热处理后ECCDS摩擦系数和磨损量均比湿热前大。当阻尼层厚度超过一定值时(如这里0.4 mm),湿热试验后试件的摩

擦系数和磨损量会略高于湿热前试件,这是由于当阻尼层厚度达到一定值时,整体结构的刚度就不随阻尼层厚度的增加而发生显著变化,也就是说湿热前、后其表面的硬度几乎不再随阻尼层厚度的变化而显著变化,而湿热实验处理后的多孔结构导致密度降低在起作用。因此,出现了较厚阻尼层的 ECCDS 试件其湿热试验后试件的摩擦、磨损性能略高于湿热处理前的试件。

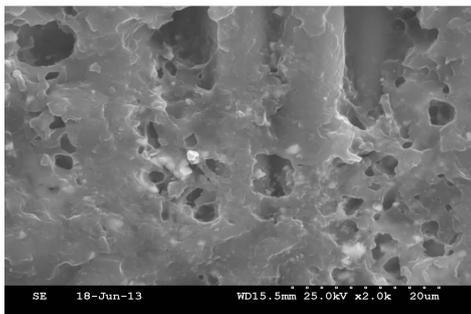


图 11 试件湿热处理后的 SEM 图

3.3 穿孔阻尼结构测试结果分析

从表 6 可知:湿热前穿孔阻尼结构其摩擦系数和磨损量比连续阻尼结构分别降低了 9.85% 和 16.67%,湿热后穿孔阻尼结构摩擦系数和磨损量比连续阻尼结构分别降低了 8.32% 和 11.43%。

究其原因是在穿孔阻尼结构在上、下蒙皮之间有许多由树脂构成的“树脂钉”,正如图 3 所示,这些树脂钉的存在,使上、下蒙皮之间的硬支撑点增加,穿孔结构越多即孔距越小^[14,16],硬支撑点也多,每个支撑点之间的距离越短,从而使整体结构的刚度有很大程度地提高,相当于 ECCDS 试件表面的硬度增加,正是由于穿孔阻尼结构提高了整体结构的刚度,从而提高 ECCDS 的表面硬度,使得整个结构的抗摩擦、磨损性能提高。因此,穿孔阻尼结构可以有效地提高 ECCDS 的抗摩擦、磨损性能。

4 结论

摩擦、磨损性能直接影响着 ECCDS 在超高速、全天候运载工具中的应用前景,本文通过对不同阻尼薄膜厚度的 ECCDS 试件进行摩擦、磨损实验,测得不同阻尼层厚度的摩擦系数和磨损量,并与湿热实验后试件、穿孔阻尼薄膜试件的研究结果进行了对比,主要结论:

湿热实验前、后的 ECCDS 试件其摩擦系数和磨损量都随着阻尼层厚度的增加而增加。在相同阻尼层厚度时,湿热处理后试件的摩擦系数和磨损量均大于湿热处理前试件的摩擦系数和磨损量,说明湿热处理能降低 ECCDS 结构的抗摩擦磨损性能。穿孔阻尼复合材料结构能提高 ECCDS 的抗摩擦、磨损性能。即在同等条件下,湿热实验处理前穿孔阻尼结构与相同厚度的连续阻尼结构相比其抗摩擦、磨损性能分别提高 9.85% 和 16.67%;湿热实验后穿孔阻尼的抗摩

擦、磨损性能与相同厚度的连续阻尼结构相比分别提高 8.32% 和 11.43%。因此,穿孔阻尼结构可以有效改善 ECCDS 的摩擦、磨损特性。如果改变穿孔阻尼结构的孔径和孔距就能设计穿孔阻尼复合材料结构表面的抗摩擦、磨损性能。

参考文献:

- [1] Ioana C, Finegan, Ronald F, Gibson. Recent research on enhancement of damping in polymer composites[J]. Composite Structures, 1999, 44(10): 89-98.
- [2] 张少辉, 陈花玲. 国外纤维增强树脂基复合材料阻尼研究综述[J]. 航空材料学报, 2002, 22(1): 58-62.
- [3] Ross D, Ungar E, Kerwin EM. Damping of plate flexural vibrations by means of viscoelastic laminae[M]. New York: ASME, 1959: 78-120.
- [4] Shao Hui Zhang, Hua Ling Chen. A study on the damping characteristics of laminated composites with integral viscoelastic layers[J]. Composite Structures, 2006, 74(11): 63-69.
- [5] MD Rao, S He. Dynamic analysis and design of laminated composite beam with multiple damping layers[J]. AIAA Journal, 1993, 31(4): 736-745.
- [6] Mohan D Rao. Recent applications of viscoelastic damping for noise control in automobiles and commercial unresolved problems and recommendations for future research directions airplanes[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 262: 457-474.
- [7] Robinson M J, Kosmatka J B. Embedding viscoelastic damping materials in low-cost VARTM composite structures[J]. SPIE Proceedings Smart Structure and Materials, 2005, 5760: 349-360.
- [8] Holland J. Adaptation in natural and artificial systems[M]. Ann Arbor, Michigan: University of Michigan Press, 1975.
- [9] 梁森, 梁磊, 米鹏. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构的新进展[J]. 应用力学学报, 2010, 27(4): 767-771.
- [10] Rotz C, Barrett D. Cured damping layers in composite structures[C]//The 23rd International SAMPE Technical Conference, 1991: 352-363.
- [11] Olcott D, Rotz C, Barrett D. Improved damping in composite tubes through stress coupling and co-cured damping layers[J]. Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 1991: 373-387.
- [12] 张忠胜, 梁森. 嵌入式高温共固化复合材料阻尼结构层间结合性能[J]. 复合材料学报, 2013, 30(4): 185-191.
- [13] 张忠胜, 梁森. 嵌入式中温共固化复合材料阻尼结构制作工艺及层间结合性能[J]. 航空学报, 2012, 33(5): 43-48.

同时,由于在平直出口段,流体继续膨胀,速度继续增加,因而喷管内的速度最大值区域增加。

3) 当 Re 较小时,随着喷管出口平直长度 l 的增加,流量系数 C_d 随 l 的增加先增大再减小。随着 Re 的增加,流量系数的变化较小。

分析认为,在喷管出口壁面附近,由于喷管出口平直段对流体的挤压与约束,喷管出口处流体流向偏离 x 方向的发散度减小。因而,适当的喷管出口长度将提高流量系数 C_d 。

当 Re 较小时,随着喷管出口平直长度 l 的增加,粘滞阻力的影响增加,因而较大的喷管出口长度 l 使得流量系数 C_d 减小。

4) 当 Re 较小时,随着喷管出口平直长度 l 的增加,推力系数 η_F 随 l 的增加先增大再减小。随着 Re 的增加,推力系数的变化较小。

分析认为,在喷管出口壁面附近,由于喷管出口平直段对流体的挤压与约束,喷管出口处流体流向偏离 x 方向的发散度减小,喷管出口 x 方向的推力增加,因而,适当的喷管出口长度将提高喷管的推力。

当 Re 较小时,随着喷管出口平直长度 l 的增加,粘滞阻力的影响增加,因而喷管出口的推力将减小。

3 结论

通过数值计算分析了喷管出口接近真空环境下,分析了喷管有无平直出口段以及平直出口段长度 l 对扩张比为 5.4 的收缩-扩张微喷管内压力和速度分布影响,进而分析了微喷管的流量系数和推力效率影响。

与喷管出口无平直出口段比较,当喷管出口有平直出口段时,在喷管出口附近,压力分布和速度分布出现明显变化,

喷管内的压力最低值和速度最大值靠近喷管出口中心区域,其影响区域增加。当 Re 较小时,随着喷管出口平直长度 l 的增加,流量系数 C_d 和推力系数 η_F 随 l 的增加先增大再减小,随着 Re 的增加,流量系数 C_d 和推力系数 η_F 变化较小。

参考文献:

- [1] Kim S C. Calculations of low-Reynolds-number resistojet nozzles[J]. Journal of Spacecraft and Rocket, 1994, 31(2): 259-264.
- [2] Bayt R L Analysis, Fabrication and Testing of a MEMS-based Micro propulsion System [D]. Ph. D. Dissertation, MIT, Cambridge.
- [3] 张根短. 基于多孔介质内燃烧的微小型化学推进系统的数值研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2006.
- [4] Wang M R, Li Z X, Numerical simulations on performance of Mems-based nozzles at moderate or low temperatures[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2004(1): 62-70.
- [5] Ivanov M S, Markelov G N. Numerical study of cold gas micro-nozzle flows. AIAA 99-0166.
- [6] 童军杰, 徐进良. 喉部结构对微喷管性能的影响[J]. 航空动力学报, 2009, 24(5): 15-19.
- [7] Wang M R, Li Z X. Numerical simulations on performance of Mems-based nozzles at moderate or low temperatures[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2004(1): 62-70.
- [8] 王福军. 计算流体力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 7-13.

(责任编辑 蒲东)

(上接第 132 页)

- [14] 梁森, 王辉, 修瑶瑶. 基于遗传算法的嵌入式共固化穿孔阻尼层复合材料结构优化[J]. 振动与冲击, 2013, 32(11): 51-55.
- [15] Sen Liang, Yaoyao Xiu, Hui Wang. A Research on Sound Insulation Characteristics and Processing of the Embedded and Co-cured Composite Damping Structures. Journal of Composite Materials, 2013, 47(9): 1169-1177.
- [16] 王辉, 梁森, 王常松. 嵌入式共固化穿孔阻尼层复合材料结构动力学性能研究[J]. 复合材料学报, 2014, 31(1): 185-191.
- [17] 辛少波. 环氧树脂基复合材料的摩擦磨损性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2008.
- [18] 米鹏, 梁森, 张义霞. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构低速冲击性能的数值模拟[J]. 振动与冲击, 2012, 31(14):

98-101.

- [19] 李焯, 梁森, 吴宁晶, 常园园. 嵌入式共固化复合材料阻尼结构阻尼性能的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(6): 1510-1513.
- [20] 谢莹, 李笃信, 赵丽. GF 增强 PA6 复合材料的力学与摩擦性能研究[J]. 工程塑料应用, 2010, 38(11): 12-15.
- [21] Sen Liang, Keyao Liang, Lei Luo, Qian Zhang, Changsong Wang. Study on Low-velocity Impact of Embedded and Co-cured Composite Damping Panels with Numerical Simulation Method[J]. Composite Structures, 2014, 107: 1-10.
- [22] 陈东, 罗明波, 陈晓琴, 等. 离子喷涂 NiCr-Cr3C2 基复合自润滑涂层的组织及摩擦学性能[J]. 表面技术, 2013, 42(3): 52-55.

(责任编辑 杨继森)