

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2021.10.004

新型 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/聚氨酯高阻尼复合材料制备及性能研究

吴松岭¹,高云霞²,王 辉¹,李 刚¹,王先平²,蒋卫斌²,方前锋²

(1. 中国核动力研究设计院,反应堆燃料及材料重点实验室,成都 610041;

2. 中国科学院 固体物理研究所,材料物理重点实验室,合肥 230031)

摘 要:采用胶结法制备了 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/聚氨酯高阻尼复合材料,成功实现了材料内部聚氨酯阻尼层的均匀可控分布以及 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al 合金层的紧密结合。采用多功能内耗仪测试了 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/聚氨酯复合材料的内耗特性,发现其内耗峰随着测试频率的增加向高温方向移动,表现出典型的弛豫特性。研究了内耗峰高与阻尼层厚度、阻尼层层数之间的变化关系,发现当阻尼层厚度增加至 2.0 mm 时,或者阻尼层数增加至 2 层时,内耗峰高达到最大。相较而言,抗弯性能则随着阻尼层厚度和层数的增加而单调增加。Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/聚氨酯复合材料的阻尼性能主要来源于聚氨酯阻尼层的贡献,而抗弯性能则主要来源于 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al 合金层的贡献。

关键词:铁锰基合金;聚氨酯;高阻尼复合材料;弛豫型内耗峰;抗弯性能

中图分类号: TB39

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2021)10-0020-06

Preparation and Properties of Novel Fe-17Mn-5Cr-1.5Al /Polyurethane High Damping Composites

WU Songling¹,GAO Yunxia²,WANG Hui¹,LI Gang¹,WANG Xianping²,
JIANG Weibin²,FANG Qianfeng²

(1. Science and Technology on Reactor Fuel and Materials Laboratory,Nuclear Power Institute of China,Chengdu 610041,China;

2. Key Laboratory of Materials Physics,Institute of Solid State Physics,Chinese Academy of Sciences,Hefei 230031,China)

Abstract: A novel Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/ Polyurethane(PU)high damping composite is successfully prepared via the adhesive welding method, which realizes a uniform controlled distribution of PU layers and their tight combinations with Fe-17Mn-5Cr-1.5Al layers. IF equipment is employed to measure the damping capacity of Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU composites,and the results indicate the peak position of Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU composite all shifts obviously toward higher temperature with the increasing measurement frequency,which indicates its typical relaxation features. The relationships among the IF peak height with the PU thickness or layer numbers have been studied,and the results indicate the relaxation strength of the IF peak reaches a maximum value when the PU thickness is 2.0 mm or the PU layers number is 2. The high damping of Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU composite is ascribed to the high damping of PU. In addition, the bending strength of Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU composite increases with the increasing of PU thickness and layer numbers,and its good bending strength is ascribed to perfect mechanical property of Fe-17Mn-5Cr-1.5Al alloy.

Key words: Fe-Mn based alloys;polyurethane;high damping composites;relaxation type IF peak;bending property

收稿日期:2021-02-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51971212;U1967211)

Fund:Supported by the National Natural Science Foundation of China(51971212;U1967211)

作者简介:吴松岭(1987—),男,硕士,助理研究员,主要研究方向为金属基复合阻尼材料。

通信作者:高云霞(1982—),女,博士,副研究员,主要研究方向为金属功能材料。

引用格式:吴松岭,高云霞,王 辉,等. 新型 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/聚氨酯高阻尼复合材料制备及性能研究[J]. 有色金属工程,2021,11(10):20-25.

WU Songling,GAO Yunxia,WANG Hui,et al.Preparation and Properties of Novel Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/Polyurethane High Damping Composites[J]. Nonferrous Metals Engineering,2021,11(10):20-25.

随着现代工业的快速发展,航空航天、现代船舶、石油化工、交通运输、精密加工等领域所需的高新技术日益突显,常规的振动和噪音以及某些精密仪器的微振动均成为影响其测量和加工精度的关键因素,减振降噪已成为社会生产和生活中亟待解决的关键问题,需要对其进行严格限制。实践证明,最有效的减振降噪技术就是利用结构材料本身所具有的高阻尼特性(将机械振动能转化为热能的本领,即内耗),而将系统的振动能很快地衰减下来^[1],因此,研发具有高阻尼特性的结构材料具有十分重要的现实意义^[2],由其制造的振动源构件可以从根本上有效地减少甚至避免由振动和噪音造成的危害。

目前,阻尼材料主要分为阻尼合金和分子阻尼材料。根据阻尼机制的不同(如点缺陷、位错、晶界、畴界等)^[3],目前已开发的阻尼合金主要有复相型(灰铸铁、Zn-Al 等)^[4]、李晶型(MnCu、NiTi、Cu-Zn-Al等)^[5-7]、位错型(Mg、Mg-Zr 等)^[8-9]、铁磁型(FeCr、FeAl 等)^[10],均在相关减振降噪领域发挥着不可替代的作用。相比之下,分子阻尼材料具有比阻尼合金高 1~2 个量级的高阻尼特性。例如,聚氨酯(简称 PU)在 255 K 时的阻尼值高达 0.35,远高于常规的阻尼合金(≤ 0.05)^[11-12]。还有研究表明,这种高阻尼材料的综合性能是其他黏弹性阻尼材料诸如橡胶、塑料等无法比拟的^[13]。然而聚氨酯阻尼材料也存在诸如模量较低、抗蠕变性能差等问题,严重限制其作为结构材料得以直接应用。

此外,现代工业的高速度和强动力需求,对阻尼材料提出了高阻尼和优良力学性能的双高标准。因此,设想如果能将分子阻尼材料与阻尼合金进行复合,制备成复合结构,无疑是一种满足双高需求的好办法。张人德等^[14]研究了 S2 复合阻尼钢板的减振降噪的效果,与普通钢相比,内耗值提高 2~3 个量级,强度高于 120 MPa,达到了作为结构受力件的较好水平。王成国等^[15]通过计算机模拟和实验相结合的方式验证了“钢板-酚醛树脂氯丁橡胶-钢板”复合材料层间结合紧密,具备优良的减振性能。

本文主要研究新型阻尼合金基分子复合材料的制备及优化。阻尼合金选用兼具高强度(>700 MPa)、高阻尼特性(应变振幅为 10^{-3} 时,

阻尼值高达 0.035)以及低成本(仅为 Mn-Cu 合金的 1/4)的 Fe-Mn 基高阻尼合金^[16-17],与普通钢材相比,该合金不仅可以提供优良的强度和刚度,自身还具备高阻尼特性。高分子材料则选用综合性能优越的聚氨酯。相关研究可望为金属基高分子复合材料在航空航天、精密电子等领域的广泛应用提供理论支持。

1 实验

1.1 材料制备

实验室自行制备 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al(%)合金片(厚度 0.4 mm),表面打磨处理后超声清洗备用;阻尼层制备:将聚醚型聚氨酯颗粒浸泡在 N,N-二甲基甲酰胺溶剂中,不定时搅拌促进其充分溶解,均匀混合后将其倒入平底磨具中,置于 343 K 的干燥箱中挥发溶剂,制成聚氨酯薄膜。膜厚可通过改变聚氨酯颗粒的量来进行调控。

1) 单层阻尼层结构的复合材料制备

将上述 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al 合金薄片与聚氨酯阻尼夹层采用环氧树脂胶粘剂(AD-1202,黑龙江石油化工研究院)黏接在一起,然后在 333 K 的干燥箱中热固 24 h 后冷却成型。其中单层聚氨酯层的厚度分别控制为 0.5、1.0、2.0 和 2.5 mm。

2) 多层阻尼层结构的复合材料制备

将上述 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al 合金薄片与聚氨酯阻尼夹层交替堆放,采用环氧树脂胶粘接在一起,将其固定后置于 333 K 的干燥箱中热固 24 h 后冷却成型。其中复合材料中聚氨酯阻尼层的层数分别为 2 层和 3 层,每层聚氨酯膜厚度为 1.0 mm。

1.2 性能测试

采用多功能内耗仪装置测量试样的阻尼性能:采用强迫振动模式,应变振幅选取为 80×10^{-6} ,试样尺寸为 $50.0 \text{ mm} \times 2.0 \text{ mm} \times h$ (h 为厚度,随试样厚度调整),测量温区:173~373 K(真空保护,升温速率 1 K/min);利用电子万能材料试验机(Instron 3369)测试复合材料的层间结合强度和力学性能。其中层间结合强度测试加载速度为 0.5 mm/min,试样示意图如图 1 所示,Fe-17Mn-5Cr-1.5Al 合金薄片尺寸为 $0.4 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,聚氨酯层尺寸为 $0.4 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$;力学性能测试采用匀速加载三点弯曲试验,加载速率 0.5 mm/min,试样尺寸为 $40 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times h$ (可变),跨距为 20 mm。

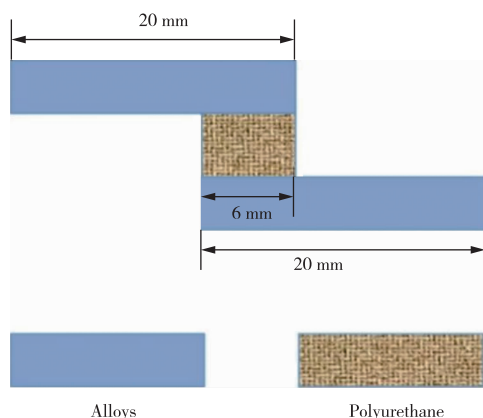


图 1 用于层间结合强度测量的三明治复合材料试样示意图
Fig. 1 The schematic diagram of composite sample for layers bonding strength measurement

2 结果与讨论

2.1 层间结合强度

图 2 为胶结法制备的 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/聚氨酯高阻尼复合材料的层间拉伸曲线。一般地,层间结合强度计算公式如下:

$$\tau = \frac{P}{L\omega} \quad (1)$$

其中, τ 为层间结合强度, N/mm^2 ; P 为试样层间破坏的最大载荷, N ; L 为聚氨酯的长度, mm ; ω 为聚氨酯的宽度, mm 。

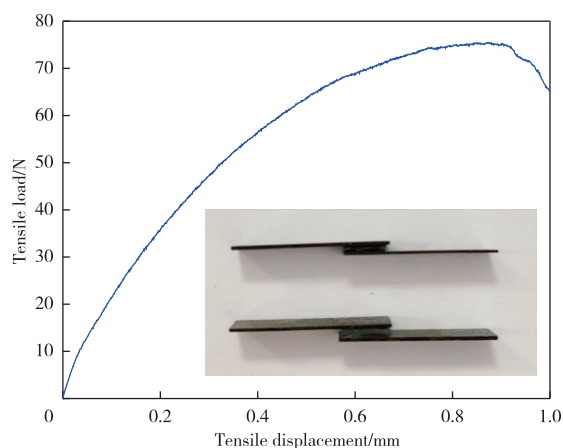


图 2 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/聚氨酯复合材料的层间拉伸曲线, 其中插图为测试试样

Fig. 2 The interlaminar tensile curve of Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU composites, inset: samples for layers bonding strength measurement

由图 2 可知,层间破坏的最大载荷为 75 N,由公式(1)计算得出层间结合强度为 $2.5 \text{ N}/\text{mm}^2$ 。

该数据与 NiTi/聚氨酯复合阻尼材料的层间结合强度基本一致^[11],说明胶结法可以较好地实现 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al 合金薄片与聚氨酯阻尼层间的紧密结合。这是因为 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al 合金表面打磨后粗糙度较大,表面凹陷和空隙较多,环氧树脂胶粘剂在外力的作用下会均匀分散到 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al 合金表面无数细小的凹陷和空隙(切割和表面砂纸打磨所致)中,从而形成类似于“销钉”功能的稳定结合,表现出很好的结合强度。

2.2 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU 复合材料的阻尼性能

图 3 为纯聚氨酯在四个不同测试频率(1、2、4 和 10 Hz)下的内耗-温度谱。从图 3 中可以看出,聚氨酯的阻尼温区较宽,高阻尼分布在整个测试区间(223~373 K)。特别地,随着测试频率的增加,内耗峰峰温逐渐向高温方向移动,对应的强度(峰高)也在逐渐升高,例如当测试频率为 1 Hz,峰温约为 290 K,内耗值约为 0.145;当测试频率增加至 10 Hz 时,峰温增加至 296 K,内耗值也升高到 0.175。说明聚氨酯材料在玻璃化转变温区内表现出典型的弛豫特性^[18],该现象与其他的高分子材料一致,其形成机制与高分子链段的运动有关。频率较低时,与聚氨酯内部固有高分子链运动的松弛时间相比,外力作用时间足够长,分子链具备足够多的时间,因此会按阻力最小的方式运动,造成分子链摩擦减弱,而呈现出来的内耗值则因材料内部消耗能量减小而降低;反之随着频率的逐步增大,外力作用时间变短,聚氨酯分子链内部摩擦增加,故内耗值增大^[11]。

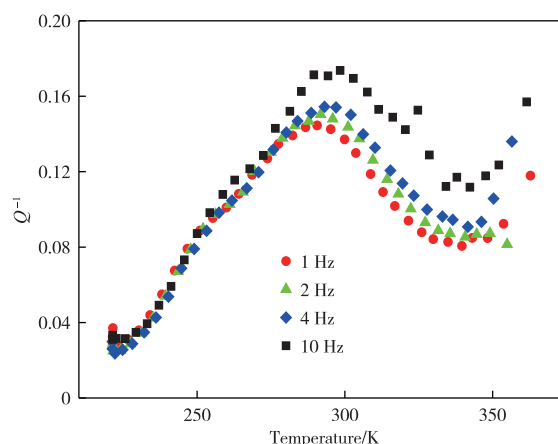


图 3 纯聚氨酯的内耗温度谱

Fig. 3 Temperature dependence of the IF(Q^{-1}) for pure PU

内耗峰的峰温与测量频率之间的关系如公式(2)^[19]所示:

$$T = \frac{-\Delta H f}{R(\ln \omega - \ln \omega_0)} \quad (2)$$

其中, ΔH 为运动单元活化能; T 为玻璃化转变温度; f 为振动频率; R 为常数。

因为 ΔH 为定值, 当振动频率 f 升高后, 材料的玻璃化转变温度也升高, 即峰值向高温方向移动。

同样地, 我们测试了单层阻尼层结构的 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU 复合材料的阻尼性能, 以单层聚氨酯厚度为 1.0 mm 为例, 图 4 给出了它的内耗温度谱。由图 4 可知, 内耗峰峰温和峰值随测试频率的变化趋势和纯聚氨酯一致, 只是变化幅度较小。由此可见, Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU 复合材料的阻尼特性主要来源于聚氨酯阻尼层的贡献。

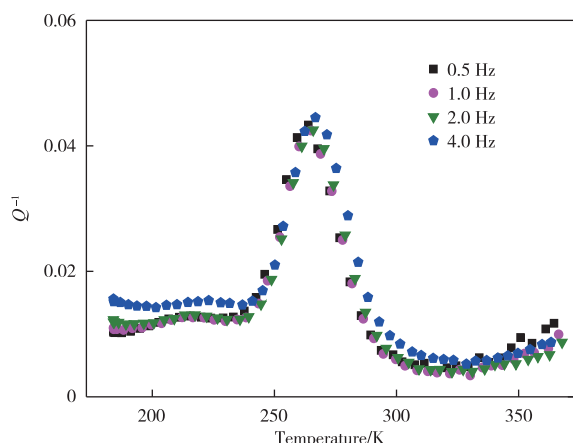


图 4 单层阻尼层结构的 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU 复合材料的内耗温度谱

Fig. 4 Temperature dependence of the IF(Q^{-1}) for Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU composites with one PU layer

对比不同聚氨酯厚度的 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU 复合材料在测量频率为 1 Hz 下的阻尼性能, 如图 5(a) 所示, 随着聚氨酯层厚度的增加, 复合材料的阻尼温区逐渐变宽, 当阻尼层厚度增加至 2.0 mm 时, 阻尼温区基本保持不变。而阻尼值则随着阻尼层厚度的增加先增加后降低, 如图 5(b) 所示。当阻尼层厚度为 2.0 mm 时, 阻尼值存在一个最大值, 约为 0.11。图 5(b) 的插图为不同厚度的单层阻尼层结构的 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU 复合材料的实物图。由此可见, 采用胶结法制备的 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al 合金片与聚氨酯阻尼层结合紧密, 无开裂现象, 且聚氨酯层的厚度均匀可控, 完全复合本实验对阻尼层结构的设计要求。

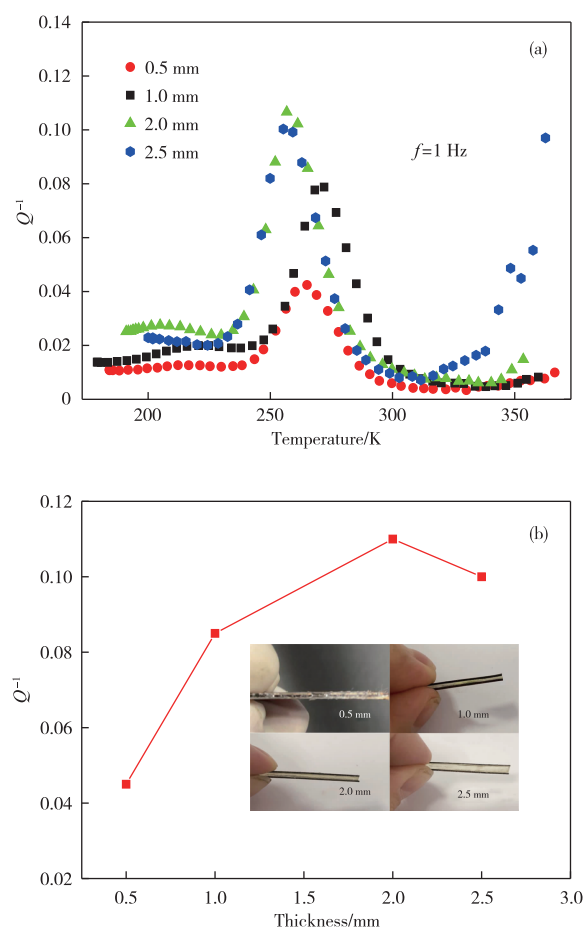


图 5 (a) 不同聚氨酯厚度的单层阻尼层结构的 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/聚氨酯复合材料内耗温度谱; (b) 内耗值随聚氨酯厚度的变化曲线, 其中插图为不同聚氨酯厚度的复合材料阻尼测试试样

Fig. 5 (a) Temperature dependence of the IF(Q^{-1}) for Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU composites with different PU thickness; (b) IF(Q^{-1}) for Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU composites as a function of the PU thickness, insert: Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU composite samples with different PU thickness

图 6 为不同聚氨酯阻尼层层数的 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU 复合材料的内耗-温度关系变化曲线(频率为 1 Hz)。从图 6 中可以看出, 阻尼温度区间基本上不随聚氨酯层数的变化而变化, 而内耗峰值有所增加, 但当聚氨酯层数为 2 时, 内耗峰峰值达到最大, 约为 0.09。插图为曲线对应的多层聚氨酯结构的 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU 阻尼复合材料, 由此可见, 当聚氨酯层数为 3 时, 复合材料的总层数达到 7 层, 采用该胶结法制备, 仍然可以很好地实现 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al 金属片与聚氨酯阻尼层的紧密结合, 得到聚氨酯厚度均匀可控的阻尼复合材料。

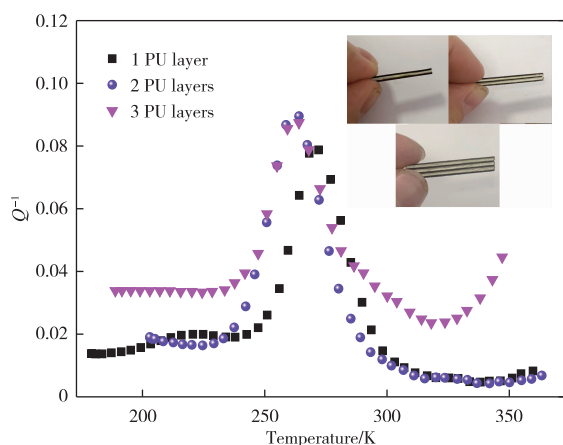


图 6 不同聚氨酯层数的 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU 复合材料的内耗温度谱,其中插图为数据对应的复合材料测试试样

Fig. 6 Temperature dependence of the $IF(Q^{-1})$ for Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU composites with different PU multilayers, insert: corresponding measurement samples with different PU multilayers

2.3 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU 复合阻尼材料的抗弯性能

图 7 为上述胶结法制备的单层阻尼层结构的 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU 复合材料的弯曲载荷-位移关系变化曲线。由图 7 可知,复合材料的弯曲载荷快速增加,当超过一定值后增加变缓直至达到一个最大值,即出现载荷屈服平台。特别地,该屈服平台还随着阻尼层厚度的增加而不断升高。例如当聚氨酯层厚度为 2.5 mm 时,阻尼复合材料的最大弯曲载荷明显大于其他厚度的阻尼复合材料,说明其具有最佳的抗弯能力。

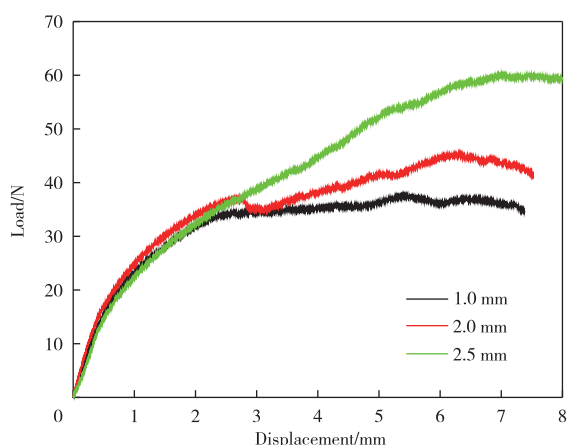


图 7 单层聚氨酯结构的 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/聚氨酯复合材料弯曲载荷与位移曲线

Fig. 7 The bending load-displacement curve of Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU composites with one PU layer

图 8 为单层、双层及三层聚氨酯阻尼层结构的阻尼复合材料的弯曲载荷-位移的关系变化曲线。

由图 8 可知,最大弯曲载荷除了和阻尼层厚度有关联之外,还随着阻尼层层数的增加而持续升高。例如三层阻尼层结构的复合材料最大弯曲载荷约为单层阻尼层复合材料的 4 倍,可见,相比之下三层阻尼层结构的复合材料的抗弯能力最好。

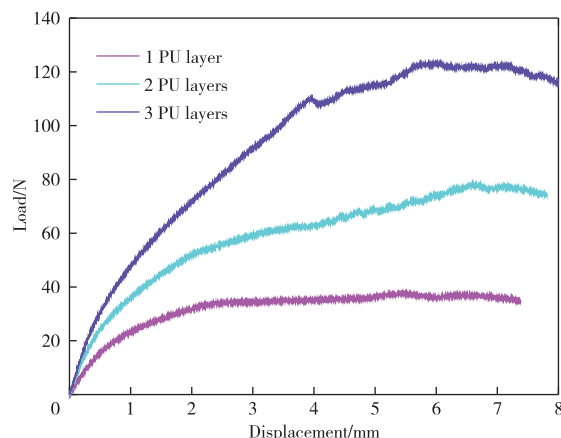


图 8 不同聚氨酯层数的 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU 复合材料弯曲载荷与位移曲线

Fig. 8 The bending load-displacement curves of Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU composites with PU multilayers

3 结论

1) 采用胶结法制备 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/聚氨酯复合材料,且成功实现了材料内部聚氨酯阻尼层的均匀可控分布以及与 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al 合金薄片的紧密结合。

2) 聚氨酯及 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/聚氨酯复合材料均出现了随测试频率的增加向高温方向移动的弛豫型内耗峰,表明复合材料的阻尼特性主要来源于聚氨酯阻尼层的贡献。

3) 单层阻尼层结构的 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU 复合材料的内耗值随着阻尼层厚度的增加,先增大后降低,当阻尼层厚度为 2.0 mm 时,达到最大值,约为 0.11。

4) 多层阻尼层结构的 Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/PU 的内耗值随着阻尼层数的增多而增大,当聚氨酯层数为 2 时,内耗峰峰值达到最大,约为 0.09。

5) Fe-17Mn-5Cr-1.5Al/聚氨酯复合材料的抗弯性能随着阻尼层厚度和阻尼层数的增加而增加,当阻尼层厚度为 2.5 mm 时,抗弯性能最佳;当阻尼层数为 3 层时,抗弯性能优于其他阻尼层结构的复合材料。

参考文献:

- [1] LU H, WANG X P, ZHANG T, et al. Design, fabrication, and properties of high damping metal matrix

- composites—A review [J]. *Materials*, 2009 (2): 958-977.
- [2] 蒋鞠慧,尹冬梅,张雄军. 阻尼材料的研究状况及进展[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2010(4):76-80.
- JIANG Juhui, YIN Dongmei, ZHANG Xiongjun. Research situation and progress of damping materials[J]. *Fiber Reinforced Plastics/Composites*, 2010(4):76-80.
- [3] FANG Q F, LIU T, WANG X P, et al. Damping mechanisms in oxide materials and their potential applications [J]. *Key Engineering Materials*, 2006, 319(8):167-172.
- [4] ZHANG J J, WANG Q Z, JIAO Z X, et al. Effects of combined use of inoculation and modification heat treatment on microstructure, damping and mechanical properties of Zn-Al eutectoid alloy [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2020, 790: 139740. DOI: 10.1016/j.msea.2020.139740.
- [5] ZHANG S, GUO X P, TANG Y, et al. Microstructure and properties of Mn-Cu-based damping alloys prepared by ball milling and hot-press sintering[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019, 28(3):1-8.
- [6] 李刚,王辉,王先平,等. 新型轻质高阻尼 Mn-27Cu 多孔合金的制备及其性能研究[J]. *有色金属工程*, 2020, 10(5):1-5.
- LI Gang, WANG Hui, WANG Xianping, et al. Preparation and properties of novel Mn-27Cu porous alloy with a low density and high damping capacity[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2020, 10(5):1-5.
- [7] 赵新娥,张平,杨猛,等. Cu73Al17Mn10 形状记忆合金的显微组织和阻尼性能[J]. *有色金属工程*, 2015, 5(5):13-16.
- ZHAO Xin'e, ZHANG Ping, YANG Meng, et al. Microstructures and damping properties of Cu73Al17Mn10 shape memory alloy [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2015, 5(5):13-16.
- [8] WAN D Q, WANG H B, YE S T, et al. High damping and good mechanical properties combined in as-cast Mg-0.6%Zr-Zn ternary alloys[J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2019, 32(5/6):1-4.
- [9] NIU R L, YAN F J, WANG Y S, et al. Effect of Zr content on damping property of Mg-Zr binary alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2018, 718(7):418-426.
- [10] XU X Q, XU Y G. Higher damping capacity induced by negative magnetostriction of Fe-16Cr-2.5Mo similar to 0.2V alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 852:156673. DOI:10.1016/j.jallcom.2020.156673.
- [11] 肖宇. 超弹性 NiTi 合金/聚氨酯阻尼复合材料的制备与表征[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2013.
- XIAO Yu. Preparation and characterization of superelastic NiTi/polyurethane damping composite materials[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [12] 郁为民,宫涛. 聚氨酯弹性体的发展概况与应用前景[J]. *聚氨酯工业*, 1998, 13(1):1-5.
- YU Weimin, GONG Tao. Developments and applications of PU elastomers [J]. *Polyurethane Industry*, 1998, 13(1):1-5.
- [13] 叶梅. 聚氨酯弹性体复合材料的制备及结构性能研究[D]. 苏州:苏州大学, 2006.
- YE Mei. Synthesis and characterization of polyurethane elastomers composite materials [D]. Suzhou: Suzhou University, 2006.
- [14] 张人德,赵钧良. 减振降噪阻尼材料及其应用[J]. *上海金属*, 2002, 24(2):18-23.
- ZHANG Rende, ZHAO Junliang. Damping material of reducing vibration and noise and its application [J]. *Shanghai Materials*, 2002, 24(2):18-23.
- [15] 王成国,孙希泰,朱静,等. 层压减振复合钢板的结构设计[J]. *机械工程学报*, 1999, 35(4):103-106.
- WANG Chengguo, SUN Xitai, ZHU Jing, et al. Structural design for laminated damping steel sheet [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 1999, 35(4):103-106.
- [16] 张程,黄进峰,沈玉萍,等. Fe-17Mn 阻尼合金的反常振幅内耗效应[J]. *材料热处理学报*, 2016, 37(1):7-11.
- ZHANG Cheng, HUANG Jinfeng, SHEN Yuping, et al. Abnormal effect of amplitude internal friction in Fe-17%Mn damping alloy [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2016, 37(1):7-11.
- [17] 李兴,陈礼清,袁晓云,等. 冷却方式和时效时间对 Fe-19%Mn 合金阻尼性能的影响[J]. *辽宁科技大学学报*, 2016, 39(6):430-439.
- LI Xing, CHEN Liqing, YUAN Xiaoyun, et al. Effect of cooling method and aging time on damping capacity of Fe-19%Mn alloy [J]. *Journal of University of Science and Technology Liaoning*, 2016, 39(6):430-439.
- [18] 李先雨,郝刚领,王伟国. Ti/Al 复合粉末压坯低温烧结过程的内耗特征[J]. *有色金属工程*, 2019, 9(9):51-55.
- LI Xianyu, HAO Gangling, WANG Weiguo. The internal friction behaviors of Ti/Al composite powder compact during low-temperature sintering process [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2019, 9(9):51-55.
- [19] 过梅丽. 高聚物与复合材料的动态力学热分析[M]. 北京:化学工业出版社, 2002.
- GUO Meili. Dynamic mechanical thermal analysis of superpolymer and composites [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.