

性能可调的自润滑叠层复合材料的摩擦学行为研究

张东亚, 林平, 董光能, 曾群锋, 毛军红
(西安交通大学润滑理论及轴承研究所, 710049, 西安)

摘要: 以硅钢叠片为强性层, 以含 MoS_2 、石墨和环氧树脂构成的复合自润滑材料为塑性层, 采用叠装-粘接工艺制备了强性层-塑性层相间的叠层复合材料. 通过控制叠片数量, 得到了塑性层含量可调的叠层复合材料. 采用球-盘摩擦实验机对叠层复合材料的干摩擦性能进行了评价, 结果表明: 与无塑性层的叠层复合材料相比, 含塑性层的叠层复合材料的摩擦学性能得到了明显改善. 在载荷为 6 N、往复频率为 4 Hz 的条件下, 塑性层的面积比为 40% 的叠层复合材料的摩擦系数为 0.15, 磨损率为 $3.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 比无塑性层的叠层复合材料分别降低了 76.7% 和 96%. 由磨痕表面的能谱分析发现, 叠层复合材料的强性层表面含有 C、S、Mo 等元素, 而在塑性层表面含有 Fe、Si 等元素, 表明在摩擦热作用下塑性层的润滑剂渗出, 并转移到摩擦表面形成转移膜, 同时塑性层具有嵌藏金属磨屑的能力. 在强性层与塑性层的协同作用下, 叠层复合材料具有优异的耐磨减摩性能.

关键词: 叠层复合材料; 自润滑; 摩擦; 磨损

中图分类号: TH117.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)11-0053-05

Study on Controllable Tribological Behaviors of Self-Lubricating Laminated Composites

ZHANG Dongya, LIN Ping, Dong Guangneng, ZENG Qunfeng, MAO Junhong
(Theory of Lubrication and Bearing Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Laminated composites reinforced with strong layers and plastic layers are prepared with lamination-bonding process. The strong layer is composed of silicon steel, and the plastic layer is composed of self-lubricating polymer composites fabricated with epoxy resin, MoS_2 and graphite powders. Dry tribological behaviors of the laminated composites are evaluated by a pin-on-disc tester. The results indicate that the laminated composites are endowed with remarkably low friction and wear, which have a low coefficient of friction of 0.15 and a low wear rate of $3.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, in the case of 40% filling ratio. C, S and Mo are found in the strong layers at wear scars. Fe and Si are examined in the plastic layers with energy dispersive spectroscopy. It is revealed that the self-lubricating ingredients permeate and transfer to the contact interface under rubbing heat and the plastic layer has trapped metal wear debris. The laminated composites show good wear resistance and anti-friction performances due to the synergistic effect of strong layer and the plastic layer.

Keywords: laminated composites; self-lubrication; friction; wear

叠层复合材料具有独特的结构特点和力学性能^[1], 其结构上的强性层和塑性层引发了力学性能

的各向异性. 基于此特性通过特定的设计, 使得叠层复合材料在外界激励下表现出较低的剪切强度和较高的承载能力, 从而满足摩擦学材料尤其是作为支承的独特要求, 实现了润滑性和承载能力的有效融合. 近年来, 叠层复合材料因其独特的摩擦性能, 在摩擦学研究中呈上升趋势^[2-5]. 在由 Si_3N_4 -TiN 制成的叠层复合材料^[2]中, TiN 的质量分数为 30%, 比纯 Si_3N_4 在常温下的断裂韧性增大了 3 倍, 耐磨性提高了 2 倍. Deng^[3]用热压成型法制备了 SiC 叠层陶瓷喷嘴, 研究表明叠层喷嘴具有优良的耐热冲蚀磨损性能. Qi 等人^[4]制备了具有自润滑性能的 Al_2O_3 -Mo 叠层复合材料, 在摩擦化学作用下形成了 MoO_3 固体润滑膜, 使摩擦系数降低到 0.25. Seong 等人^[5]叠装得到具有微细沟槽的碳纤维-环氧树脂叠层复合材料, 沟槽叠层复合材料比无沟槽试样在 8 MPa 下的摩擦系数降低了 20%, 由于沟槽内的润滑剂颗粒向摩擦界面转移, 因此起到了良好的润滑作用.

本文采用叠装-粘接技术在金属叠层复合材料的金属层间形成了薄的塑性层(弱界面), 即由热膨胀系数不同的金属区(硅钢片为强性层)和非金属区(聚合物复合自润滑材料为塑性层)交替分布构成, 实现了叠层复合材料承载与自润滑相结合. 文中考察塑性层含量以及运行条件对叠层复合材料摩擦学性能的影响, 并分析了润滑减摩机理.

1 实验部分

1.1 叠层复合材料的制备

选用型号为 35W230 的硅钢片, 弹性模量为 150 GPa, 泊松比为 0.24, A 型钢片和 B 型钢片的规格分别为 $40\text{ mm} \times 0.35\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 和 $40\text{ mm} \times 0.35\text{ mm} \times 28\text{ mm}$, 实验时用石油醚和乙醇超声清洗硅钢片去除表面污染物后干燥备用, 用喷枪把环氧树脂均匀喷涂在钢片表面, 并按照一定顺序将数目不同的 A、B 型钢片叠装. 由于 A、B 型钢片的高度不同而形成沟槽, 将 MoS_2 和石墨以及环氧树脂的混合物填充到沟槽, 形成了强性层与塑性层相间的复合结构(见图 1).

叠层复合材料固化成型的条件为 $80\text{ }^\circ\text{C}$, 保温 2 h 后, 升温到 $160\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 1 h, 最后随炉冷却. 然后, 分别用 400 目、600 目、1 000 目、1 500 目金相砂纸抛光表面($R_a=0.02\text{ }\mu\text{m}$).

塑性层的含量用面积比表示, 定义面积比为塑

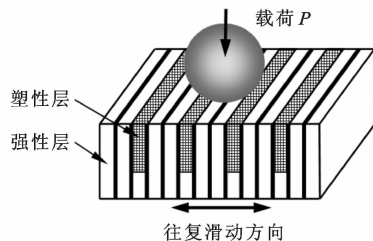


图1 叠层自润滑复合材料示意图

性层的厚度与整个叠层材料的厚度之比, 选择 A、B 型钢片的数目比分别为 $4:1$ 、 $3:2$ 、 $2:3$ 、 $1:4$ 进行叠装, 得到塑性层的面积比为 20%、40%、60% 和 80% 的叠层复合材料(分别简称为 S2、S4、S6 和 S8), 同时制备了不含润滑剂的叠层复合材料(简称 S0), 以及表面涂覆润滑涂层的叠层复合材料(简称 S10)作为对比试样.

1.2 机械性能测试

压缩实验在 INSTRON4505 电子万能材料试验机上进行, 下移速率为 1.0 mm/min , 压缩方向垂直于摩擦面, 试样(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)为 $40\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的长方体. 同时, 测量了叠层复合材料的横向(平行于叠装方向)压缩弹性模量和纵向(垂直于摩擦面)压缩弹性模量, 载荷设定为 1 MN.

1.3 摩擦学性能测试

在 UMT-2 摩擦试验机上进行摩擦学性能测试, 上试样为 52100 钢球($\Phi 9.5\text{ mm}$, HRC: 60-63), 下试样为叠层复合材料试样和对比试样. 其中上试样固定, 下试样做往复滑动(见图 1), 往复行程为 6 mm, 载荷 P 为 4、6、8、10 N. 按照球-盘赫兹接触模型得到的初始接触压力分别为 670、770、850 和 910 MPa. 往复运动频率 f 为 4、6、8、10 Hz, 测试时间为 30 min, 环境温度为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度为 50%.

用磨损体积率来评价叠层复合材料的耐磨性, 磨损体积按球缺模型进行计算^[6]. 磨损表面形貌采用日本电子公司 JSM-6460 型扫描电子显微镜(SEM)进行观察, 磨损表面成分采用英国牛津公司(Oxford)的 INCA Energy+型能谱仪进行分析.

2 结果与讨论

2.1 叠层复合材料的结构表征

图 2a 为 S2 的扫描电镜照片, 图中标记的 a 区域为硅钢片(强性层), b 区域为非金属区(塑性层), c 区域为粘接层. 由图 2a 可见, 经过叠装后的叠片紧密粘接在一起. 对抛光后的强性层区进行能谱分析(见图 2b), 发现该区域仅含有 Fe 和 Si, 无 S、Mo

和 C 元素,表明在制备过程中覆盖在强性层上的润滑材料已被清理干净.

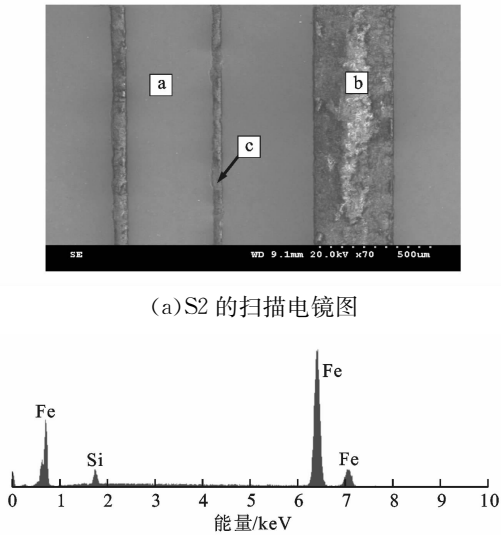


图 2 叠层复合材料的结构特征

2.2 叠层复合材料的机械性能

叠层复合材料的压缩强度如图 3a 所示,其中 S2 的压缩强度最大,随着塑性层含量的增加,叠层复合材料的压缩强度有所降低. 图 3b 为叠层复合材料的压缩弹性模量,可见叠层复合材料具有力学性能的各向异性,其中纵向弹性模量远远大于横向弹性模量,表明叠层复合材料具有较好的法向承载能力.

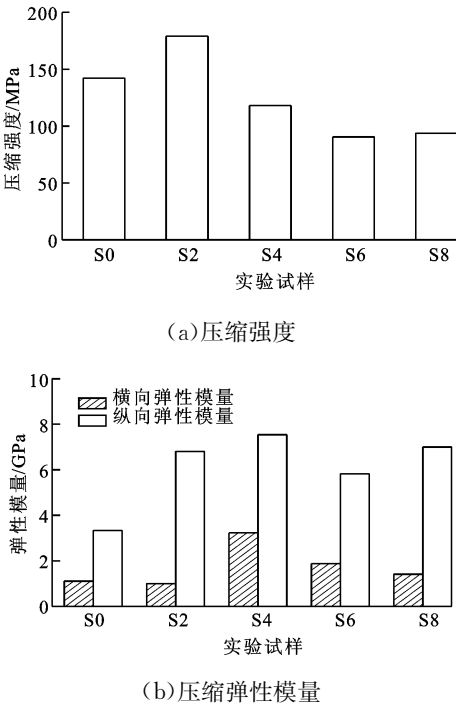


图 3 叠层复合材料的机械性能

2.3 叠层复合材料的摩擦学性能

在 $P=6\text{ N}$ 、 $f=4\text{ Hz}$ 时,叠层复合材料的摩擦系数与磨损率随塑性层含量的变化关系如图 4 所示. 由图 4a 可知, S0 的摩擦系数急剧上升,很快达到最大值 0.7. 摩擦开始阶段, S2 的摩擦系数急剧上升,前 600 s 的摩擦系数低于 S0 的摩擦系数. 在 800 s 后, S2 的摩擦系数较稳定,平均摩擦系数为 0.55. S4、S6、S8 均保持较低而稳定的摩擦系数,其中 S4 的平均摩擦系数为 0.16, S6、S8 和 S10 的平均摩擦系数分别为 0.22、0.25 和 0.27. 图 4b 为叠层复合材料的磨损率,其中 S0 的磨损率为 $14\times 10^{-6}\text{ mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$,约为 S4 的 25 倍, S6 的 9.65 倍, S8 的 4.42 倍.

当增加塑性层含量时,叠层复合材料的摩擦系数、磨损率均先降后增加,由于 S2 的塑性层太薄(仅有 $300\text{ }\mu\text{m}$),摩擦时渗出的润滑剂量又太少,因此导致了 S2 与金属直接接触时增大了材料的摩擦、磨损. 具有较高塑性层的叠层复合材料所储存的润滑剂有效地受热渗出、覆盖整个摩擦表面,表现出较好的润滑性和耐磨性,但并不是塑性层越多越有利于润滑,当塑性层含量增多时,会降低叠层材料的法向承载能力,从而导致材料耐磨性降低.

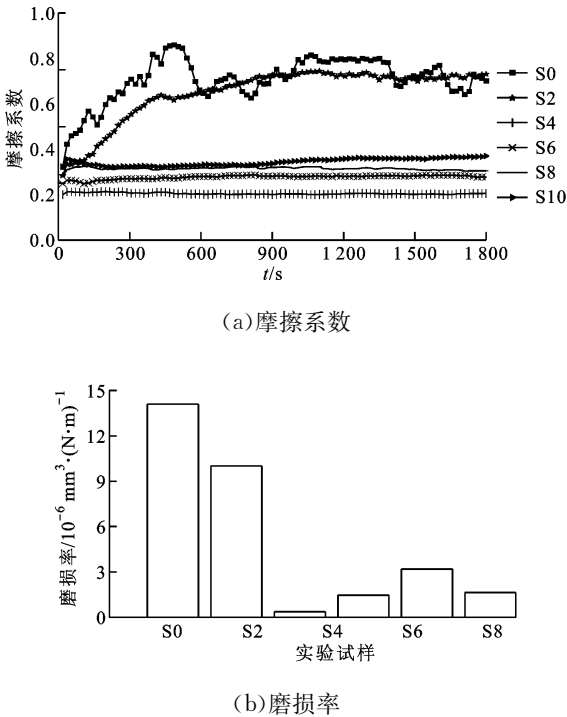


图 4 叠层复合材料的摩擦学性能

当 $f=10\text{ Hz}$ 时,叠层复合材料的平均摩擦系数随载荷的变化关系如图 5 所示,可见 S4 的摩擦系数均低于其他 2 种材料. 随着载荷的增大, S4 的摩擦系数先增大后稳定, S6 的摩擦系数先增大后减

小, S8 的摩擦系数先增大后减小再增大. 当 $P=4\text{ N}$ 时, 叠层复合材料的平均摩擦系数随 f 的变化关系如图 6 所示, 可以看出, 随着 f 逐渐增大, S4 的摩擦系数呈现出先增大后降低再增大, S6、S8 的摩擦系数则缓慢增大. 当 $f=4\text{ Hz}$ 时, S4 的最低摩擦系数为 0.17, 且在不同的 f 下, S4 的摩擦系数均低于其他 2 种材料.

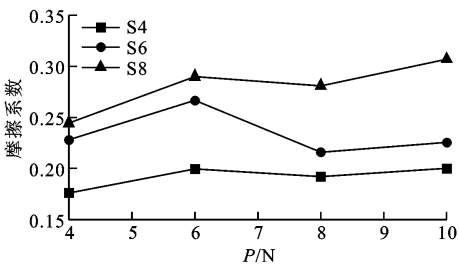


图 5 载荷对叠层复合材料摩擦系数的影响

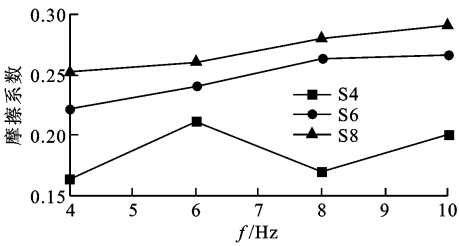


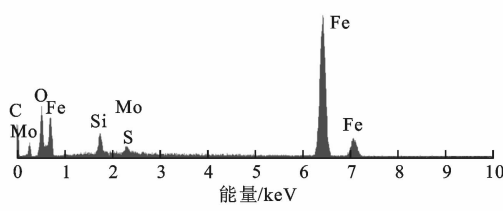
图 6 往复频率对叠层复合材料摩擦系数的影响

2.4 磨痕表面分析

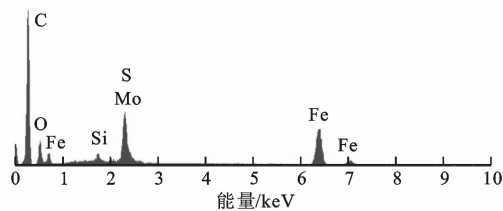
图 7a 为 S4 在 $P=6\text{ N}$ 、 $f=4\text{ Hz}$ 下运行 30 min 后, 其强性层区的磨损表面能谱图, 由图可见强性层区含有 Mo、S、C 等润滑元素. 由于在摩擦热作用下, 润滑剂受热膨胀渗出到摩擦表面, 并在钢球的拖拽作用下涂抹到整个摩擦表面, 因此形成了有效的转移膜. 在塑性层表面发现了 Fe 和 Si 等元素(见图 7b), 当脱落的金属磨粒运动到塑性层表面时, 磨粒被嵌藏在塑性层内, 不再滑动, 从而避免了磨粒的犁沟.

图 8a 为在 $P=4\text{ N}$ 、 $f=4\text{ Hz}$ 时, S2 的强性层区的 SEM, 其磨痕表面有一些深浅不同的犁沟, 可见少量的润滑剂不能形成有效的转移膜, 因此磨损较为严重, 层间粘接处出现微裂缝. 图 8b 为 S4 的强性层区的 SEM, 其磨痕表面平滑, 仅有轻微的粘着痕迹, 没有明显的磨痕, 转移膜呈现带状分布. 图 8c、8d 为 S6 和 S8 在强性层区的磨损形貌, 它们的磨损表面有轻微的粘着痕迹和细小的堆积物, 高含量的塑性层可向表面渗出足够的润滑剂, 在摩擦表面形成连续的转移膜. 随着摩擦的进行, 润滑剂受热

渗出的量越来越多, 形成的转移膜也越厚, 在周期应力作用下, 转移膜塑性变形逐渐脱落并堆积在摩擦表面上.

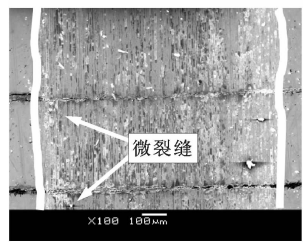


(a) 强性层区

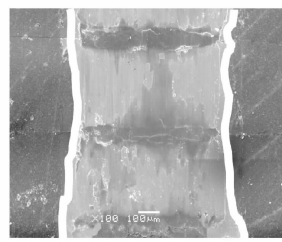


(b) 塑性层区

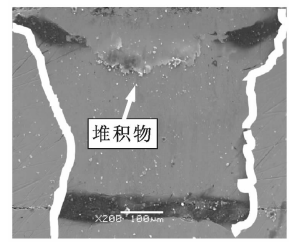
图 7 S4 的磨损表面能谱图



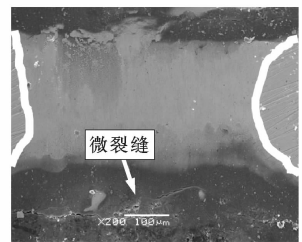
(a) S2



(b) S4



(c) S6



(d) S8

图 8 叠层复合材料的强性层区的磨损形貌

S2 和 S8 的磨损表面有微裂纹, 由于干摩擦时会产生大量的热量, 而塑性层又是热的不良导体, 因此摩擦热聚集在表面升温可达到 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上^[7]. 当钢球离开接触区后, 摩擦表面的温度降低, 由于热膨胀系数和导热系数的差异形成了热应力, 因此导致强韧层和塑性层界面上产生了微裂纹, 而 S8 上的表面裂纹可能是塑性层过厚造成冷却不均而产生的. 可见, 当塑性层和强性层厚度差异较大时, 可在粘接

界面处产生很大的热应力,同时钢球在塑性层上滑动时的法向变形大于刚性层,因此在软硬材料的结合面处受到切向力的作用,而在摩擦切向力和热应力的共同作用下,会促使粘接界面逐渐产生微裂纹。

2.5 润滑机理分析

如图 9 所示,叠层复合材料由刚性层和塑性层交替分布构成。在摩擦开始阶段,摩擦热较少,仅有少量的塑性层受热膨胀渗出到摩擦表面(见图 9a),在钢球的粘着作用下,塑性层在接触区表面发生塑性流动,形成不连续的转移膜(见图 9b),当摩擦表面积聚足够的摩擦热时,可激发塑性层渗出更多的润滑剂到摩擦表面,并形成连续的转移膜(见图 9c),实现了叠层复合材料的自润滑。适当含量的塑性层叠层复合材料可以使摩擦表面的润滑剂得到补充,在钢球反复碾压和冲击的作用下,转移膜上出现微裂纹,最终局部剥落(见图 9d)。

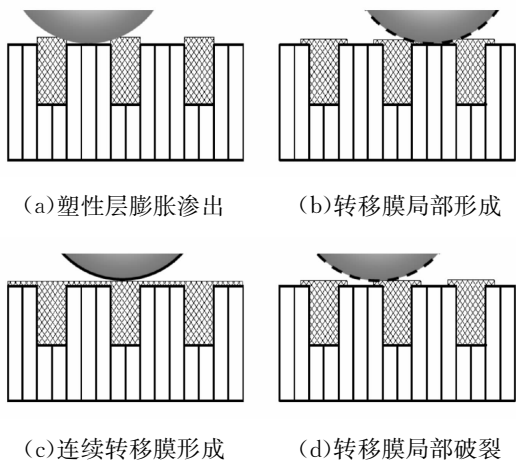


图 9 叠层复合材料的润滑机理示意图

3 结 论

(1) 本文将金属刚性层与含固体润滑剂的塑性层通过叠装-粘接,得到了叠层复合自润滑材料。实验表明,塑性层的面积比为 40% 的叠层自润滑复合材料,在 6 N、4 Hz 的条件下,摩擦系数为 0.15,磨损率为 $3.8 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,比无润滑剂的叠层复合材料分别降低了 76.7% 和 96%。

(2) 塑性层的面积比为 40% 的材料的摩擦系数随载荷和速度的变化不大,但 60%、80% 的材料的摩擦系数则随载荷和速度的增加而增大。

(3) 由叠层复合材料的减摩机理可知,塑性层的润滑剂受摩擦热渗出,在摩擦副表面形成有效的润

滑膜,同时塑性层还可以嵌藏摩擦界面的磨屑,从而有利于减少犁沟的形成及材料的磨损。

参考文献:

- [1] 关春龙,赫晓东,李垚. 叠层状复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2004, 18(4): 49-53.
GUAN Chunlong, HE Xiaodong, LI Yao. Research status of laminated composites [J]. Materials Review, 2004, 18(4): 49-53.
- [2] HADAD M, BIUGAN G, KUBLER J, et al. Tribological behavior of Si_3N_4 and Si_3N_4 -%TiN based composites and multi-layer laminates [J]. Wear, 2006, 260(6): 634-641.
- [3] DENG Jianxin. Wear behaviors of ceramic nozzles with laminated structure at their entry [J]. Wear, 2009, 266 (1/2): 30-36.
- [4] QI Ya, ZHANG Yongsheng, HU Litian. High-temperature self-lubricated properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Mo}$ laminated composites [J]. Wear, 2012, 280(1/2): 1-4.
- [5] KIN S S, LEE H G, LEE D G. Tribological behaviors of carbon composite grooved surfaces [J]. Composite Structures, 2005, 71(2): 238-245.
- [6] 陈莹卷. 基于阳极微孔氧化膜的铝合金表面织构的摩擦学行为研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2008.
- [7] 尹延国,姚巍,俞建卫,等. 环氧树脂粘接润滑涂层摩擦学特性[J]. 高分子材料科学与工程, 2011, 27(9): 80-83.
YIN Yanguo, YAO Wei, YU Jianwei, et al. Tribological properties of epoxy adhesive lubricating coating [J]. Polymer Material Science and Engineer, 2011, 27 (9): 80-83.

[本刊相关文献链接]

- 侯书增,鲍崇高,付青然,等. 硬质合金/高铬铸铁基复合材料的界面特性及磨损性能研究. 2012, 46(5): 73-78.
- 衣明东,许崇海,蒋振钰,等. Al_2O_3 粉末对 $\text{ZrO}_2\text{-TiB}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米复合陶瓷材料力学性能的影响. 2011, 45(3): 125-128.
- 张贵锋,郭咏华,徐明志,等. 高效搅拌摩擦钎焊制备铝/钢双金属复合板的可行性研究. 2010, 44(12): 93-98.
- 张旭辉,陈祖煌,马宁,等. 液固混合烧结制备渗流型镍锌铁氧体/钛酸钡复相陶瓷. 2010, 44(12): 110-113.
- 张贵锋,张建勋,李思玉,等. 铝基复合材料的活性液相扩散焊新工艺. 2009, 43(11): 71-74.
- 邵建敏,裴旭明,刘建秀,等. 钢基表层复合材料制备及其磨损性能研究. 2009, 43(9): 81-85.

(编辑 管咏梅)