

文章编号: 1004-0609(2004)05-0766-06

三维网络陶瓷增强铝基复合材料的 干摩擦磨损性能^①

尧军平¹, 王薇薇¹, 杨 滨²

(1. 南昌航空工业学院 材料科学与工程系, 南昌 330034; 2. 北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 设计和制备了一种新型的三维网络陶瓷(骨架)增强铝合金复合材料。研究了铝合金及不同成分复合材料在不同温度及载荷下的摩擦系数和磨损率; 用扫描电镜(SEM)观察其磨损表面, 并分析了三维网络陶瓷(骨架)对铝合金磨损机制的影响。结果表明: 复合材料的耐磨性远优于铝合金, 而且随着三维网络陶瓷体积分数、温度及载荷的增加, 复合材料的抗磨损性能明显提高; 这种新型复合材料的摩擦系数随载荷变化保持稳定; 在很宽的温度范围内, 摩擦系数的稳定性均优于铝合金。这是由于三维网络陶瓷在磨损表面形成硬的微凸体起承载作用, 其独特的结构制约了基体合金的塑性变形和高温软化, 有利于磨损表面氧化膜的留存。

关键词: 三维网络陶瓷(骨架); 铝基复合材料; 摩擦磨损性能; 干摩擦磨损

中图分类号: TB 321; TB 302

文献标识码: A

Dry friction and wear properties of aluminum matrix composites reinforced with 3D-network ceramics

YAO Jun-ping¹, WANG Wei-wei¹, YANG Bin²

(1. Department of Materials Science and Engineering, Nanchang Institute of
Aeronautical Technology, Nanchang 330034, China;

2. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: A new 3D-network ceramics(skeleton) reinforced aluminum alloy composites was designed and fabricated. The dry friction and wear behaviors of aluminum matrix composites were investigated. The friction coefficients and wear rates of the aluminum alloy and composites reinforced with ceramics of different volume fractions were measured at various temperatures and loads. The worn surface morphologies of the aluminum alloy and its composites were observed with a scanning electron microscope, and the effect of the 3D-network ceramics on the wear mechanisms were discussed accordingly. As the results, the composites has much better wear-resistance than the aluminum alloy has. The improvement in the wear-resistance of the composites became more prominent at higher ceramics volume fraction, high temperature, and large normal load. Moreover, the composites registered higher and more stable friction coefficients with increasing normal load. This was more apparent at elevated temperature. It was supposed that the 3D network ceramics was able to support the load applied onto the sliding surface and not only to restrict the plastic deformation and high-temperature softening of the alloy matrix, but also to protect the oxide film(Al_2O_3) on the worn surface, thus the composites showed greater improvement wear-resistance than the aluminum alloy did.

Key words: 3D-network ceramics(skeleton); aluminum matrix composites; property of friction and wear; dry friction and wear

① 基金项目: 江西省自然科学基金资助项目(985025); 江西省材料中心资助项目(ZX200301004)

收稿日期: 2003-09-02; 修订日期: 2003-11-17

作者简介: 尧军平(1965-), 男, 教授, 博士。

通讯作者: 尧军平, 教授; 电话: 0791-8223453; 传真: 0791-8224671; E-mail: yyyjpsz@126.com

颗粒、晶须增强铝基复合材料的密度低, 具有良好的导热性、高强度和较好的耐磨性能, 在航空、汽车领域的摩擦制动和传动装置中有广泛的应用前景^[1~4]。研究人员曾对其进行了大量的研究^[5~13]。Alpas 等^[8, 9]研究了载荷(0.90~98 N)对 A356-20% SiC_p 复合材料磨损率的影响。文献[11]报道在 A356 及 6061A1 中加入 20% SiC 或 20% Al₂O₃ 可以提高从轻微磨损到严重磨损的转变温度。Alpas^[11]和等 Wang^[12]研究了滑动距离对铝基复合材料的磨损机制的影响, 发现在稳定滑动前的磨合期易产生疏松磨粒, 使得磨损变为三体磨损。文献[14]报道 A356-20% SiC_p 在 6~75 N 载荷范围内呈现较好的抗磨损性能。但是, 在磨损过程中, 颗粒、晶须增强铝基复合材料中的增强体容易从基体中拔出、脱落, 磨屑形成硬磨粒, 降低材料的耐磨性; 在高温下, 由于基体软化, 增强体随着基体流失, 失去了其增强效应, 使耐磨性严重下降。为了克服上述不足, 进一步提高材料的耐磨性, 本文作者设计了一种新型复合材料, 这种复合材料是用铸造方法在具有三维连续网状结构的多孔陶瓷中浇入金属而成^[14]。它具有其他金属材料所没有的能渗透液体与气体的性能, 因而有“会呼吸的金属”与“多孔金属”之称; 且有很好的耐磨性, 同时其制造工艺简单, 成本低廉, 可批量生产。故这种材料有很大的应用潜力。本文作者系统地研究了这种新型三维网络陶瓷增强铝基复合材料的干摩擦磨损性能, 并分析了其磨损机制。

1 实验

1.1 试样制备

三维网络陶瓷是将多孔聚氨酯泡沫塑料浸涂陶瓷浆料制成坯体后烧结而成。实验采用孔径分别为 2.0 mm(大孔)、1.4 mm(中孔)及 0.8 mm(小孔)的各向同性三维网络 Al₂O₃ 作为增强体, 其三维形貌如图 1 所示(网络陶瓷的 3 个截面形貌均相同)。基体铝合金采用 ZL102 合金, 其化学成分(质量分数, %)为: Si10.0~13.0, Cu<0.3, Fe<1.0, Zn<0.1, Mn<0.5, Mg<0.1, 余量 Al, 采用压渗技术, 在 10 MPa, 660~700 °C 温度下, 压渗成网络陶瓷增强铝基复合材料, 其微观结构如图 2 所示。由图 2 可看到, 压渗制得的复合材料陶瓷与基体相结合紧密, 边界分明, 在界面处无孔洞等微观缺陷。

在相同压渗条件下制得的 ZL102 压铸铝合

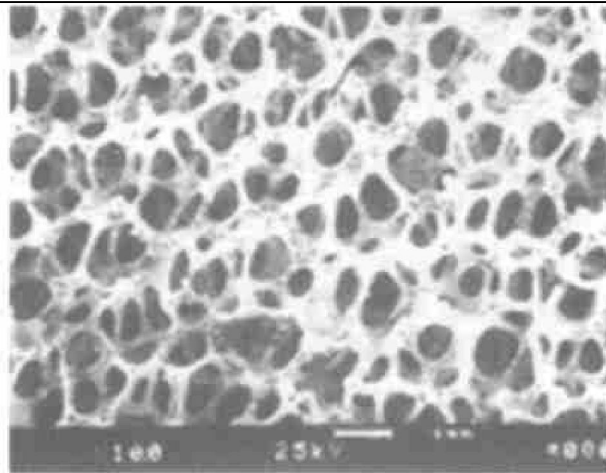


图 1 陶瓷网络的截面形貌

Fig. 1 Total morphology of 3D network ceramics

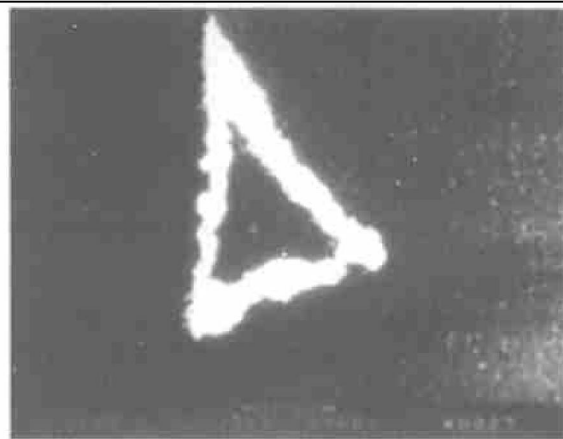


图 2 网络陶瓷(骨架)增强 Al 合金的微观结构

Fig. 2 Microstructure of network ceramics reinforced matrix alloy

金, 以便作对比实验。

1.2 磨损实验

在 GW/ML-MS 型销-盘式高温摩擦磨损试验机上进行摩擦磨损实验, 将压渗得到的复合材料和铝合金加工成尺寸为 51 mm×51 mm×7 mm 的试样, 将其磨损表面采用砂纸逐级精磨后抛光, 摩擦偶件选用直径为 6 mm 的 Si₃N₄ 陶瓷球。选用小孔 Al₂O₃ 网络增强复合材料进行变温摩擦磨损实验, 用中孔 Al₂O₃ 增强复合材料进行变载实验。采用 2201 型表面形貌测量仪测量样品的磨损截面积, 从而计算出试样的磨损体积损失, 用单位滑动距离的体积磨损损失表示试样的磨损率; 用扫描电子显微镜(SEM)观察试样磨损表面形貌。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

陶瓷网络增强铝基复合材料室温力学性能见表1。

由表1可知,与基体性能比较,复合材料强度、硬度和弹性模量均提高了,但延伸率急剧下降。这主要由于陶瓷网络严重阻碍位错运动,强化基体造成的。

表1 网状陶瓷增强铝基复合材料的室温力学性能

Table 1 Mechanical properties of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZL102}$ composites

Material	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	E/GPa	$\delta/\%$	Hardness HB
ZL102	260	194	68.3	3.0	84
10% $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZL102}$	286	248	89.1	2.2	96
20% $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZL102}$	305	267	97.8	1.4	112
30% $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZL102}$	349	291	106.2	0.6	135

2.2 Al_2O_3 含量对材料摩擦磨损性能的影响

图3示出了室温、6 N 载荷、1.02 m/s 速度下滑行 2 500 m 时,大、中、小3种孔径的三维网络 Al_2O_3 增强复合材料摩擦系数和磨损率随 Al_2O_3 体积分数的变化关系。可以看出,材料的摩擦系数随 Al_2O_3 体积分数的增加而增大,磨损率则随 Al_2O_3 体积分数的增加而降低。当 Al_2O_3 体积分数达 30% 时,其摩擦系数是基体合金的近 2 倍,而磨损率仅为基体合金的 10% 左右。复合材料抗磨性能提高的

主要原因是硬质三维网络 Al_2O_3 在磨损表面形成微凸体并起承载作用。

增强体独特的网络结构可制约基体合金的塑性变形,并减少偶件同基体合金的接触,从而有效地降低发生粘着磨损的机会。而摩擦系数的升高是由于 Al_2O_3 裸露在表面,增大表面的粗糙程度,使复合材料的摩擦系数增加,且随着 Al_2O_3 体积分数的增加而增加,但是增加的摩擦阻力大部分由耐磨的 Al_2O_3 承担,铝基体受到的磨损较少,因而使复合材料的磨损率低于基体合金,且随着 Al_2O_3 体积分数的增加,复合材料的磨损率更低,而对偶的磨损率却增加。此外,从图3还可以看出,网络 Al_2O_3 的孔径对复合材料摩擦磨损性能的影响不明显。

2.3 载荷对 Al_2O_3 增强复合材料摩擦磨损性能的影响

图4示出了室温、0.72 m/s 速度下滑行 2 500 m 时,铝合金以及三维网络 Al_2O_3 体积分数分别为 10%、20% 和 30% 的复合材料的摩擦系数和磨损率随载荷的变化。可以看出,铝合金和复合材料在 6~22 N 范围内的摩擦系数均较稳定(图4(a)); 铝合金在 6~18 N 之间的磨损率逐渐增加,在 18~22 N 时急剧增加(图4(b))。而三维网络 Al_2O_3 增强复合材料的磨损率显著低于合金的(在 18 N 载荷时,Al/30% Al_2O_3 复合材料的磨损率仅为铝合金的 6%),且在 18~22 N 载荷范围内磨损率随载荷的变化较为平缓。复合材料的耐磨性明显优于铝合金,这可能是由于随着载荷的增加,铝合金的塑性变形加剧,而复合材料中三维网络 Al_2O_3 的承载及

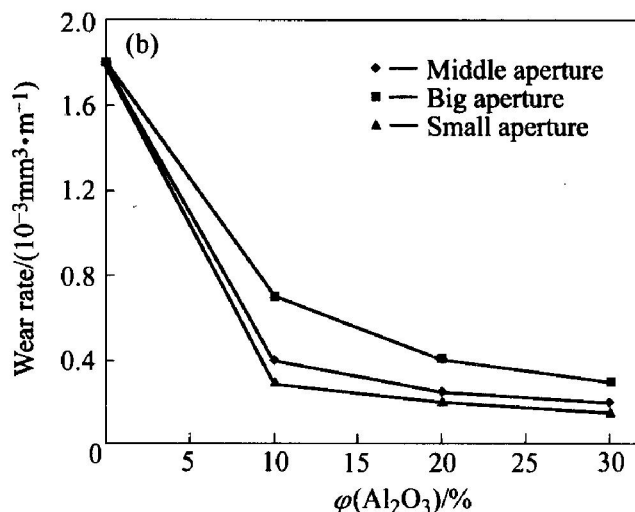
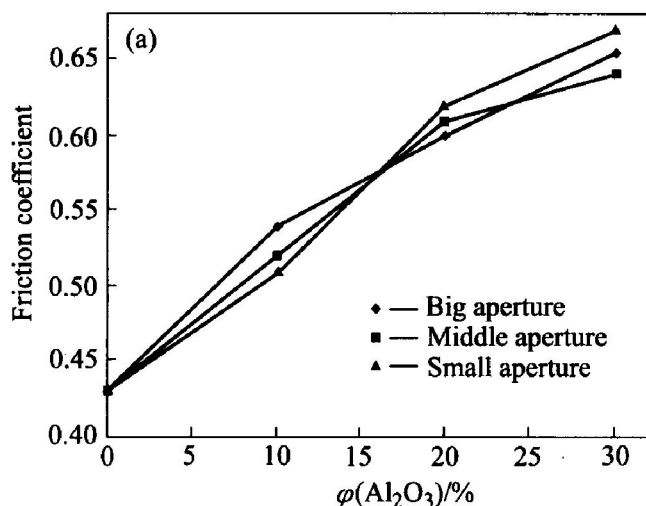


图3 三维网络 Al_2O_3 体积分数对复合材料摩擦磨损性能的影响

Fig. 3 Effects of 3D network volume fraction of Al_2O_3 on friction and wear properties of composites

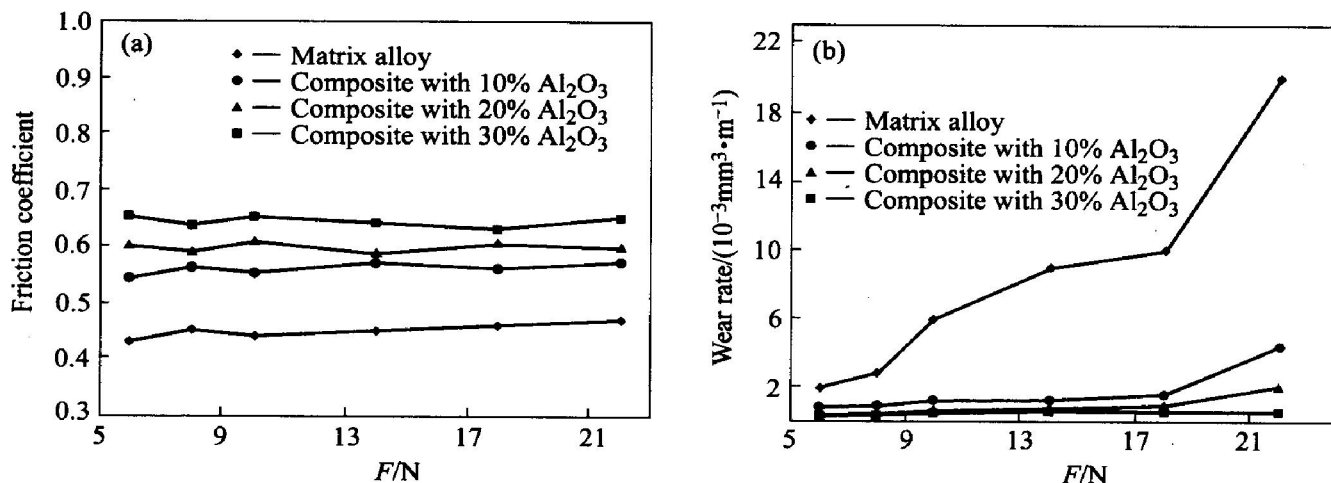


图 4 基体合金和复合材料的摩擦磨损性能与载荷的关系

Fig. 4 Effects of load on friction and wear properties of matrix alloy and composites

抑制塑性变形的作用更明显, 从而使得复合材料表现出更好的耐磨性能所致。

2.4 温度对 Al₂O₃ 增强复合材料摩擦磨损性能的影响

在 6 N 载荷、0.72 m/s 速度下滑行 2 500 m 时, 复合材料和基体合金摩擦磨损性能随温度的变化如图 5 所示。可见, 随着温度的升高, 铝合金的摩擦系数和磨损率先降低然后升高; 加入 10% 的三维网络 Al₂O₃ 后, 其摩擦系数和磨损率基本保持基体合金的变化趋势, 但在 100 °C 后, 摩擦系数和磨损率的升高幅度明显小于基体合金; 当增强体体积分数进一步增加时, 其摩擦系数和磨损率在 100 °C 时略有降低, 随后保持较高的稳定性, 而且三维网络 Al₂O₃ 体积分数越高, 抗磨损性能越稳定。在室温, 粘着磨损是基体合金的主要磨损机制; 随着温度的升高在磨损表面形成一层氧化膜, 氧化磨损是

主要的磨损机制, 摩擦系数和磨损率有所降低; 但温度进一步升高, 基体合金软化, 磨损表面的氧化膜遭到破坏, 裸露出新鲜的基体, 由于氧化膜脱落和粘着磨损的双重作用, 摩擦系数和磨损率显著升高^[10]。而当加入三维网络 Al₂O₃ 后进行高温磨损时, 具有稳定高温性能的三维网络 Al₂O₃ 保持其在复合材料中的承载作用, 同时约束了基体的塑性变形和高温软化, 使得在磨损表面形成的连续氧化膜不易破坏。这层氧化膜使复合材料的摩擦系数和磨损率在温度升高时有所降低, 并保持较高的稳定性。

2.5 磨损表面及截面形貌

图 6 所示为基体合金及复合材料在室温、20 N 载荷、0.72 m/s 速度下滑行 2 500 m 时磨损表面及磨损截面的光学与扫描电镜微观组织。可见, 基体合金和复合材料表面的差异很明显, 基体合金磨损表面产生了明显的“切削沟槽”, 表现为典型的粘着

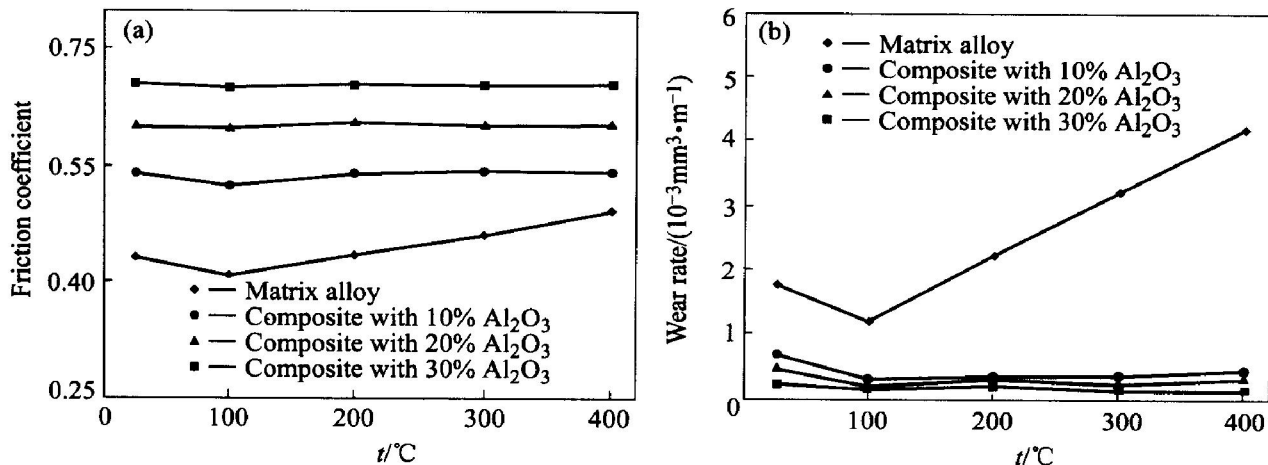


图 5 基体合金和复合材料的摩擦磨损性能与温度的关系

Fig. 5 Effects of temperature on friction and wear properties of matrix alloy and composites

图 6 基体合金和复合材料磨损截表面和磨损截面的 SEM 像
Fig. 6 SEM images of worn surface and subsurface region
of matrix alloy and composites

(a) —Surface of matrix alloy; (b) —Surface of composites;
(c) —Subsurface region of matrix alloy; (d) —Subsurface region of composites

磨损和犁削磨损,其下部约 50 μm 的亚表层共晶铝、硅相发生严重变形,破碎的铝、硅共晶相以一定角度滑动方向塑性流动,形成清晰流线(见图 6(c)),复合材料磨损表面平直且光滑,表现为磨粒磨损(见图 6(b)),邻近磨损表面组织未发现塑性变形层(见图 6(d))。这进一步证实了三维网络陶瓷在磨损表面形成硬的微凸体并起承载作用,同时其独特的结构制约了基体合金的塑性变形和高温软化,有利于磨损表面氧化膜的留存,抗磨损性能明显提高。

3 结论

1) 采用压渗技术,制备出三维陶瓷网络(骨架)增强铝合金复合材料,在本实验条件下所制备复合材料的干摩擦磨损性能明显优于基体铝合金;随着三维网络 Al_2O_3 体积分数的增加,其摩擦系数维持较高值,而磨损率很低。

2) 随着温度和载荷的增加,复合材料的抗磨性能明显提高;且随着载荷增大其摩擦系数变化平

缓,在较宽温度范围内的摩擦系数稳定性均优于铝合金。

3) 由于三维网络 Al_2O_3 在磨损表面形成硬的微凸体起承载作用,抑制基体合金的塑性变形和高温软化,减少偶件同基体合金的接触,减轻粘着磨损,有利于氧化膜在磨损表面的留存,故复合材料表现出良好的干摩擦磨损性能。

REFERENCES

- [1] Wang L D, Fei W D, Jiang L S, et al. New aluminum matrix composite with much lower coefficient of thermal expansion and higher strength [J]. J Mater Sci Lett, 2002, 21(9): 737 - 742.
- [2] 操光辉,王恒志,吴申庆. 硅酸铝纤维增强 Al-12Si 合金复合材料的摩擦行为[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(S1): 1 - 5.
CAO Guang-hui, WANG Heng-zhi, WU Shen-qing. Wear behavior of Al-12Si composites reinforced by Al_2SiO_5 fibre [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1998, 8(S1): 1 - 5.
- [3] Kwon S J, Goo B C. A study on the friction and wear

- characteristics of brake pads for Al MMC brake disc[J]. Key Eng Mat, 2000, 183(1): 1225 - 1229.
- [4] 郭继伟, 金云学, 吕奎龙, 等. TiC 颗粒增强铝基复合材料的制备及其微观组织[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(2): 193 - 197.
- GUO Ji-wei, JIN Yun-xue, LU Kui-long, et al. Fabrication and microstructure of Al-based composite reinforced by TiC particles[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(2): 193 - 197.
- [5] 姜龙涛, 武高辉, 孙东立, 等. $\text{Al}_2\text{O}_3_p/\text{Al}$ 复合材料中颗粒粒径与形态对组织和性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(3): 516 - 519.
- JIANG Long-tao, WU Gao-hui, SUN Dong-li, et al. Effect of particle size and morphology on microstructure and properties of $\text{Al}_2\text{O}_3_p/\text{Al}$ composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2002, 12(3): 516 - 519.
- [6] Xu X J, Chen K M, Dai F Z, et al. Investigation on superplasticity of SiC particulate reinforced aluminum matrix composite[J]. Acta Metall Sinica, 2002, 38(5): 544 - 550.
- [7] Biermann H, Kemnitzer M, Hartmann O. On the temperature dependence of the fatigue and damage behavior of a particulate reinforced metal matrix composite[J]. Mater Sci Eng A, 2001, 319: 671 - 678.
- [8] Alplpas A T, Zhang J. Wear regimes and transitions in Al_2O_3 particulate reinforced aluminum alloys[J]. Mater Sci Eng A, 1993, A161: 273 - 279.
- [9] Alplpas A T, Zhang J. Wear rate transition in cast aluminum silicon alloys reinforced with SiC particles[J]. Scripta Metall, 1992, 26: 505 - 511.
- [10] Wilson S, Alpas A T. Effect of temperature on the sliding wear performance of Al alloys and Al matrix composites[J]. Wear, 1996, 196, 270 - 277.
- [11] Alpas A T, Embury J D. Sliding and abrasive wear behavior of an aluminum (2014)-SiC particle reinforced composite[J]. Scripta Metall, 1990, 24: 931 - 938.
- [12] Wang A, Rack H J. Transition wear behavior of SiC-particulate and SiC-whisker-reinforced 7091 Al metal matrix composites[J]. Mater Sci Eng A, 1991, A147: 211 - 216.
- [13] Pramila B N, Ramasesli B S, Surappa M K. Dry sliding wear of A356-Al-SiC_p composites[J]. Wear, 1992, 157: 295 - 300.
- [14] 尧军平, 王薇薇, 马新生, 等. 压渗法制备陶瓷网络复合材料研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(1): 46 - 50.
- YAO Jun-ping, WANG Wei-wei, MA Xin-sheng, et al. The study on ceramics network composites fabricated by die casting method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(1): 46 - 50.

(编辑 陈爱华)