

PMMA 转动微动摩擦学行为的研究

Study on Rotational Fretting Tribology Behavior of PMMA

杨 皎, 莫继良, C. VERRIER, 郑健峰, 廖正君, 朱旻昊

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室 摩擦学研究所, 成都 610031)

YANG Jiao, MO Ji-Liang, C. VERRIER, ZHENG Jian-feng,

LIAO Zheng-jun, ZHU Min-hao

(Tribology Research Institute, Traction Power State Key Laboratory,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

摘要: 在新型转动微动试验机上, 进行了 PMMA 与 GCr15 钢球(40mm 直径) 在转动角位移幅值为 $0.25^{\circ} \sim 2.5^{\circ}$ 和法向载荷为 100N 的转动微动试验。在摩擦动力学行为研究的基础上, 结合磨痕的微观分析, 研究了其转动微动磨损机理。结果表明: 随转动角位移幅值的增加, PMMA 的转动微动会依次呈现三个区域, 即部分滑移区、混合区和完全滑移区; 相比部分滑移区和完全滑移区, 混合区的摩擦系数明显较高; 部分滑移区摩擦系数保持在较低水平且损伤轻微, 微动的相对运动由弹性变形协调。在混合区和滑移区 PMMA 的转动微动磨损机制为伴随黏性流动的颗粒剥落和磨粒磨损。研究发现在混合区和滑移区的磨斑中央产生因黏性流动造成的损伤累积所致的材料隆起。

关键词: 摩擦磨损; 微动磨损; 转动微动; PMMA

中图分类号: TH117 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)07-0001-05

Abstract: Rotational fretting tests of polymethylmethacrylate (PMMA) flat against GCr15 steel ball (with diameter of 40mm) were performed on a new rotational fretting tester, with different angular displacement amplitudes from 0.25° to 2.5° and a normal load of 100N. Based on the study of the frictional kinetics of rotational fretting and the micro-analysis of the wear scar, the damage characteristics of PMMA were discussed in detail. The results indicated that three fretting running regimes were presented during the rotational fretting of the PMMA with the increase of the angular displacement amplitude, i. e. partial slip regime, mixed fretting regime and gross slip regime. To compare with the partial slip regime with the gross slip regimes, the friction coefficient of the mixed fretting regime was much higher. In the partial slip regime, a lower level of friction coefficient was held and slight damage was appeared, while the fretting motion was accommodated by elastic deformation. In the case of both mixed fretting and gross slip regimes, particles detached by delamination and abrasive wear accompanying with viscous flow were the main rotational fretting wear mechanisms. The research found that an upheaval was formed induced by damage accumulation of viscous flow at the center of wear scar in the mixed fretting and gross slip regimes.

Key words: friction and wear; fretting wear; rotational fretting; PMMA

微动是一种相对运动幅度很小的摩擦方式, 可以造成接触表面磨损, 引起构件咬合、松动或加速裂纹的萌生和扩展等。微动模式按球/平面接触模型可分为 4 种, 即: 切向、径向、转动和扭动微动^[1]。目前微动摩擦学的研究主要集中于切向模式。转动微动是指在交变载荷作用下, 接触副在接触界面发生微幅转动的相对运动, 其中回转轴平行于接触表面且固定不动^[2]。转动微动常发生在人工髋关节、肩关节和颞下颌关节等处, 是导致人工关节失效的主要原因之一。PMMA

由于其良好的综合力学性能, 对水溶性无机盐、硷及某些稀酸有一定稳定性, 特别是具有较好耐生物老化性能和生物相容性, 常用于颅骨修补材料、人工骨、人工关节、胸腔填充材料和人工关节骨黏固剂等方面^[3,4]。然而, 到目前为止对于 PMMA 转动微动摩擦学行为的研究报道很少, 仅见 B. J. Briscoe 等^[5-7]对 PMMA 转动运动中磨屑的形成、排出方式和接触区动力学等问题的研究, 但在转动微动的区域特性方面未深入研究, 因此本工作以此为研究对象, 深入研究 PMMA 在

不同转动角位移幅值下微动的区域特性和损伤行为,对揭示 PMMA 的转动微动摩擦学规律具有重要的理论和实际意义。

1 实验材料和方法

实验材料选用 PMMA 平板试样 ($20\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 4\text{ mm}$), 其硬度为 $HV_{50g} 21$, 表面粗糙度 $R_a = 0.02\text{ }\mu\text{m}$ 。对偶件为 $\phi 40\text{ mm}$ 的 GCr15 钢球, 硬度为 $HV_{50g} 870$, 表面粗糙度 $R_a = 0.3\text{ }\mu\text{m}$ 。

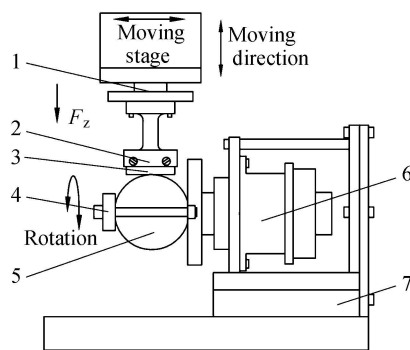
转动微动磨损实验在如图 1 所示的装置上进行^[2]。实验主要参数为: 转动角速度为 $(\omega) 0.4(^{\circ})/\text{s}$; 转动角位移幅值 $(\theta) 0.25 \sim 2.5^{\circ}$; 法向载荷 $(F_n) 100\text{ N}$; 循环次数 $1 \sim 10^3$ 次; 环境条件为大气下干态(温度 $20 \sim 23^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $50\% \sim 60\%$)。实验后用光学显微镜观察磨痕表面形貌, 用 Ambios 轮廓仪沿滑移方向测量磨痕轮廓。

2 结果与讨论

2.1 $F-\theta$ 曲线

在切向微动的研究中, $F-D$ 曲线常用于对接触界面的摩擦动力学特性进行分析^[1], 与此相似, 在转动微动条件下, 相应地也可利用实验获得的 $F-\theta$ 曲线对其摩擦动力学特性进行分析。图 2 示出了 PMMA 接触界面的摩擦力随转动角位移幅值变化的关系曲线。可见: 与切向微动磨损一致, $F-\theta$ 曲线也仅有三种基本类型, 即直线型、椭圆型和平行四边形型, 直线型和椭圆型 $F-\theta$ 曲线分别对应接触界面在弹性协调和伴随塑性变形的部分滑移相对运动, 而平行四边形型 $F-\theta$ 曲线则代表接触界面发生完全滑移的相对运动。在 $\theta = 0.25^{\circ}$ 时, $F-\theta$ 曲线一直为椭圆型, 说明接触界面相对运动一直由弹性变形协调, 微动运行于部分滑移状态, 根据微动图理论, 微动运行于部分滑移区。当 $\theta = 0.5^{\circ}$ 时, $F-\theta$ 曲线在前 300 次循环呈现椭圆型, 表明接触界面的相对运动由 PMMA 的黏弹性协调, 而后曲线闭合, 相对运动由弹性变形协调, 虽然 $F-\theta$ 曲线随循环周次的增加发生变化, 但接触中心始终保持接触, 微滑发生在接触边缘, 转动微动始终处于部分滑移状态, 即微动仍运行于部分滑移区。当 θ 增加到 1° 时, $F-\theta$ 曲线在循环初期呈现平行四边形型, 随循环次数的增加, 曲线由平行四边形型向椭圆型转变, 当曲线完全变成直线状后, 又随循环次数继续增加, 曲线逐渐打开, 这表明接触界面随着循环次数出现变化: 完全滑移 \rightarrow 部分滑移 \rightarrow 完全滑移, 说明此时微动运行于混合区。当

$\theta = 2.5^{\circ}$ 时, 曲线一直呈现平行四边形状, 说明接触界面一直处于完全滑移状态, 即微动运行于滑移区。以上结果表明, 随转动角位移幅值的增加, PMMA 转动微动与切向微动一样, 也会依次呈现三个区域即: 部分滑移区、混合区和完全滑移区。



1- Force sensor; 2- Upper steel holder; 3- Plated specimen (PMMA); 4- Lower holder for ball specimen; 5- Ball specimen; 6- Ultra low-speed reciprocating rotational driver; 7- Mounting for rotational driver

图 1 实验设备装置图

Fig. 1 Schematic of the fretting device

2.2 摩擦因数

在不同转动角位移幅值下, PMMA 的摩擦因数随循环次数的变化关系如图 3 所示。可见: 在部分滑移区($\theta \leq 0.5^{\circ}$) 时, 摩擦因数随循环次数几乎在较低水平上保持一定值; 在混合区($\theta = 1^{\circ}$) 时, 摩擦因数在较少的循环次数下开始迅速上升, 在 300 次循环左右趋于相对稳定, 但在接近 1000 次循环时, 略有下降(这可能对应于 $F-D$ 曲线转变为平行四边形型), 且摩擦因数明显高于部分滑移区和滑移区, 这可能与接触界面较大的塑性变形有关, 这与切向微动的摩擦学行为一致^[8]; 当 $\theta = 2.5^{\circ}$ 时, 微动运行于滑移区, 摩擦因数在经历初期跑合阶段后, 呈现持续缓慢上升的演变规律, 在 1000 次循环仍未达到稳定。

2.3 磨斑形貌分析

图 4 示出了 PMMA 在部分滑移区($\theta = 0.5^{\circ}$) 的磨痕形貌和表面轮廓。可见, PMMA 表面损伤轻微, 并且磨斑明显呈两个部分, 即发生微滑的圆环状接触边缘区和中心始终接触而几乎无损伤的中心区(见图 4(a)), 这与切向微动的 Mindlin 模型^[9] 基本一致; 磨斑轮廓也显示了在接触边缘的微滑区有轻微的损伤(见图 4(b))。

当微动运行于混合区($\theta = 1^{\circ}$) 时, 经历跑合阶段后, 在 50 次循环时已进入摩擦因数的上升阶段, PMMA 接触区表面已出现轻微损伤, 轮廓显示高低不平

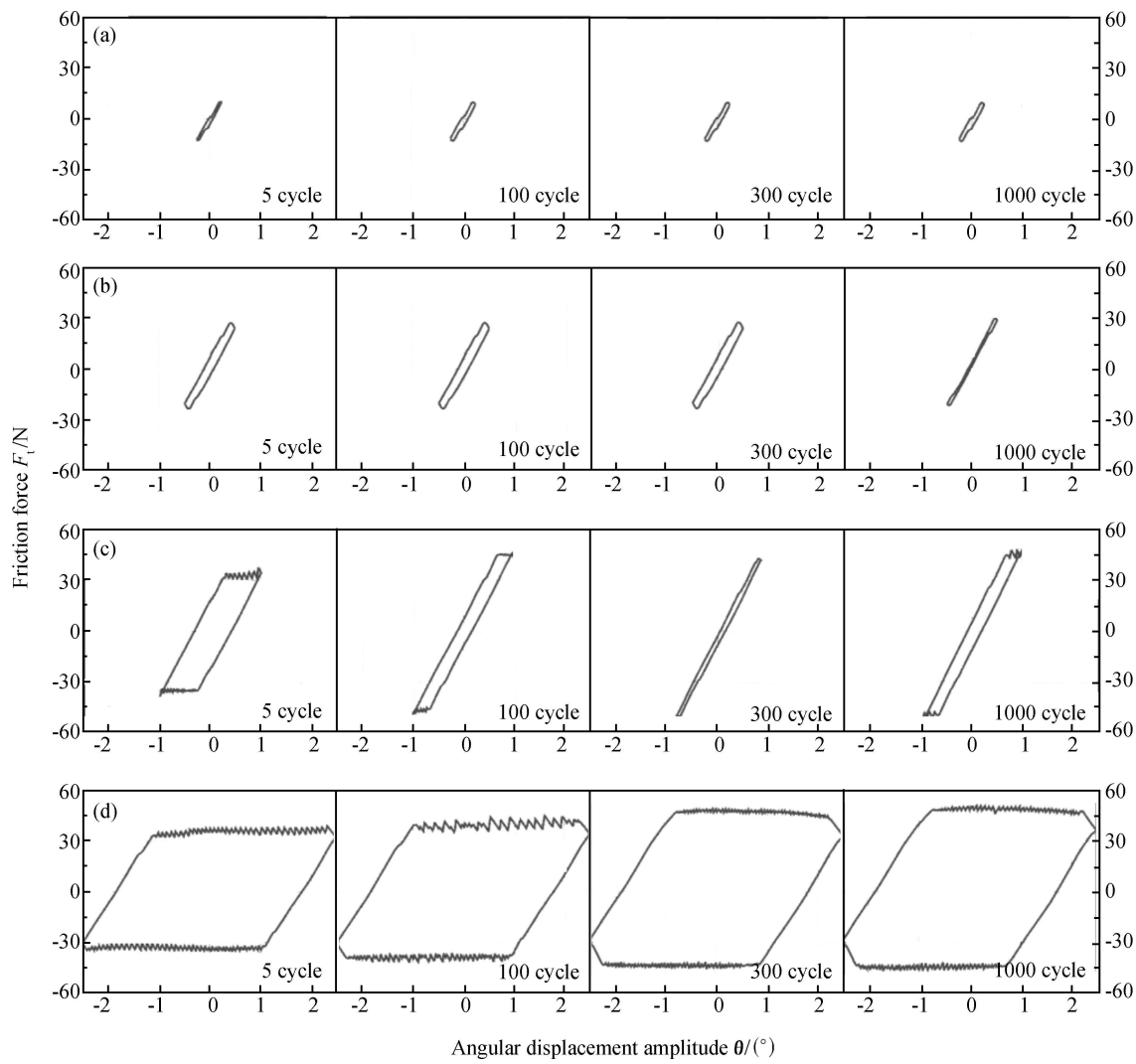


图 2 PMMA 在不同转角位移幅值和不同的循环次数下的 $F_T-\theta$ 曲线 (a) $\theta=0.25^\circ$; (b) $\theta=0.5^\circ$ (c) $\theta=1^\circ$; (d) $\theta=2.5^\circ$
Fig. 2 $F_T-\theta$ curves of PMMA under different angular displacement amplitude and cycles
(a) $\theta=0.25^\circ$; (b) $\theta=0.5^\circ$; (c) $\theta=1^\circ$; (d) $\theta=2.5^\circ$

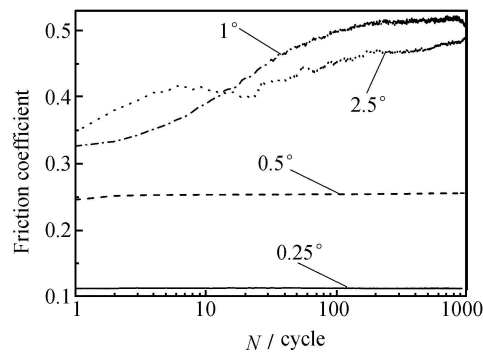


图 3 PMMA 在不同转角幅值下的摩擦因数变化曲线
Fig. 3 Curves of friction coefficient of PMMA under various angular displacement amplitude

的形貌(见图 5(a)); 随循环次数增加, 在 300 次循环后接触中心可见明显的波纹状形貌, 即产生“银纹”, 轮廓显示磨损发生在磨斑两侧, 而中心区开始隆起(见图

5(b)); 循环周次进一步增加到 1000 次循环时, 在接触区中心形成的垂直于原始滑移方向的中心隆起非常显著, 呈波纹状特征, 在接触区滑移方向的两侧出现明显的凹形坑(见图 5(c)), 这是由于微动处于完全滑移区状态的结果。由图 5(c) 可见, 磨斑中心隆起区内存在明显的黏性流动痕迹, 以及由于高分子材料在流变过程中形成的垂直于滑移方向的波纹状微裂纹(银纹), 而在凹坑区, 存在分散分布的剥落颗粒, 和磨粒磨损形成的犁沟, 因此, PMMA 在混合区的磨损机制是在黏性流动的同时伴随剥落和磨粒磨损。

对比图 5 和图 6, 可以发现: 在滑移区($\theta=2.5^\circ$) 时, 经历 20 次循环, 配合阶段已完成, 损伤已开始在中心区凸显, 说明接触区域中间出现的隆起的时间更早, 隆起的程度更高, 并且银纹两边的凹槽内部也相对平滑, 这可能是因为转动角位移幅值增加, 增加了接触界

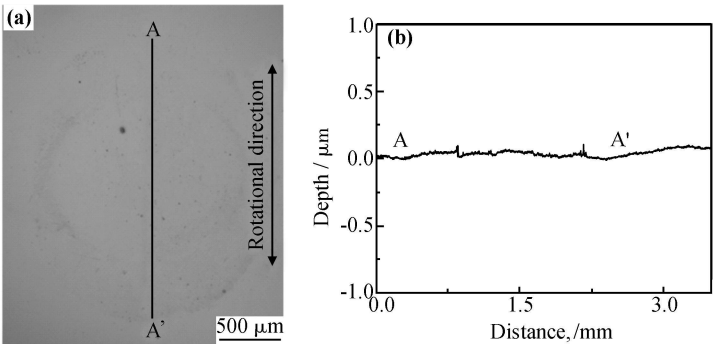


图 4 PMMA 在部分滑移区的磨痕形貌(a)和轮廓(b) ($\theta=0.5^\circ$, 1000 cycle)

Fig. 4 Optical microscope observation (a) and laser profile (b) of the wear scar on the surface of the PMMA when it was running in the partial slip regime ($\theta=0.5^\circ$, 1000 cycle)

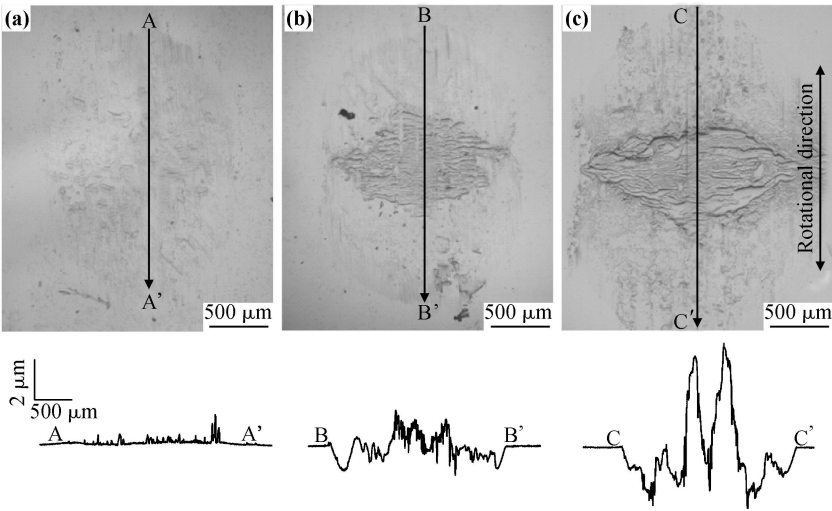


图 5 PMMA 在混合区的磨痕形貌和轮廓($\theta=1^\circ$) (a) 50 cycle; (b) 300 cycle; (c) 1000 cycle

Fig. 5 Optical microscope observation and laser profile of the wear scars on the surface of the PMMA when it was running in the mix-slip regime($\theta=1^\circ$) (a) 50 cycle; (b) 300 cycle; (c) 1000 cycle

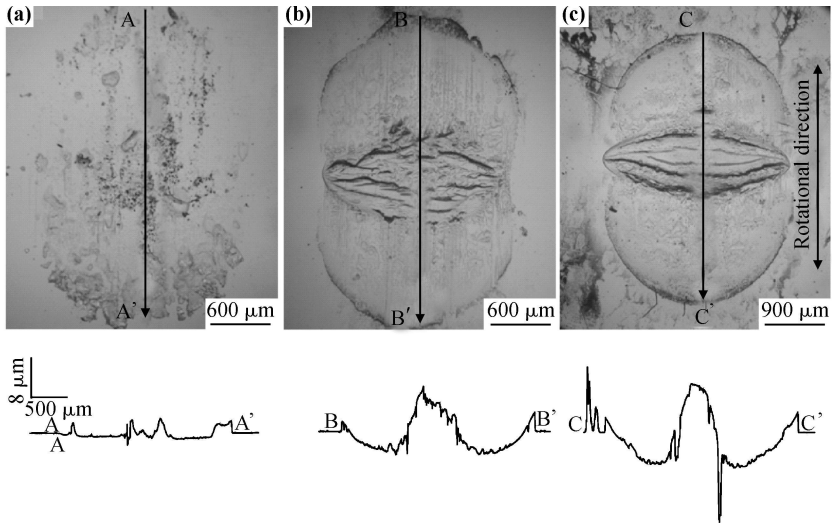


图 6 PMMA 在滑移区的磨痕形貌和轮廓($\theta=2.5^\circ$) (a) 20 cycle; (b) 300 cycle; (c) 1000 cycle

Fig. 6 Optical microscope observation and laser profile of the wear scar on the surface of the PMMA when it was running in the gross-slip regime($\theta=2.5^\circ$) (a) 20 cycle; (b) 300 cycle; (c) 1000 cycle

面间的排屑能力。显然, 滑移区的磨损较混合区和部分滑移区大, 磨斑区域也越大, 在相同的时间内产生的磨屑较多, 可能磨屑参与承载, 因此在微动滑移区的摩擦系数比混合区低(见图 3)。根据图 6 的形貌可知, 从磨损机制来说, 滑移区与混合区没有本质性的差异。然而, 根据 B. J. Briscoe 等人^[5,6]的观点, 磨屑首先产生于接触区的两端, 随后以滚动的形式向中间区域积聚, 但从图 5 和图 6 不同循环周次磨斑形貌的演变来看, 这种说法不能成立, 中心隆起区更可能是不断的黏性流动累积而成。黏性流动累积过程可描述为: 在微动循环的前半周期, PMMA 高分子材料随球试样的转动, 发生黏性流动, 其中分子链拉长、变形、滑移甚至断裂, 而在相对运动的前端形成银纹则是黏性流动的结果, 由于黏性流动具有不可逆性, 前半次循环的损伤保留下来; 在接下来的后半周期中, 发生完全相反的相对运动, 材料发生相反方向的黏性流动, 产生对称于前半周期的相同损伤。由于前后半个不同循环损伤的叠加, 形貌上表现出一种类似“眼睛”的特征, 其中分布着黏性流动形成的银纹和微裂纹。

3 结论

(1) 根据转动微动的动力学曲线, PMMA 的转动微动随着转动角位移幅值的增加也呈现三个区域即: 部分滑移区、混合区和完全滑移区。

(2) 在部分滑移区, 摩擦因数保持在较低水平, 且损伤形貌轻微, 呈环状; 在混合区有最高的摩擦因数; 在混合区和滑移区, 随转动角位移幅值增大, 微动损伤加剧, PMMA 的转动微动磨损机制主要为伴随黏性流动的剥落和磨粒磨损。

(3) 在混合区和滑移区, 发现 PMMA 的转动微动的磨斑中央发生隆起, 且隆起程度随转动位移幅值的

增加而增加, 研究揭示这是材料黏性流动造成的损伤累积的结果。

参考文献

- [1] 周仲荣, 朱旻昊. 复合微动磨损[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2004.
- [2] 莫继良, 朱旻昊, 廖正君, 等. 转动微动的模拟与试验研究[J]. 中国机械工程, 2009, 6: 631–635.
- [3] 罗先正, 邱贵兴. 人工髋关节学[M]. 北京: 中国协和医科大学出版社, 2003.
- [4] 蔡振兵, 高姗姗, 何莉萍, 等. 聚甲基丙烯酸甲酯的扭动微动摩擦学特性[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2009, 41(1): 96–101.
- [5] BRISCOE B J, CHATEAUMINOIS A, LINDLEY T C, et al. Fretting wear behavior of poly-methylmethacrylate under linear motions and torsional contact conditions[J]. Tribology International, 1998, 31: 701–711.
- [6] BRISCOE B J, CHATEAUMINOIS A, LINDLEY T C, et al. Contact damage of poly (methylmethacrylate) during complex micro-displacements [J]. Wear, 2000, 240: 27–39.
- [7] BRISCOE B J, CHATEAUMINOIS A. Measurements of friction-induced surface strains in a steel/polymer contact [J]. Tribology International 2002, 35: 245–254.
- [8] 周仲荣, VINCENT L. 微动磨损[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [9] MINDLIN R D. Compliance of elastic bodies in contact [J]. ASME, Journal of Applied Mechanics, 1949, 16: 259–268.

基金项目: 国家重大基础研究计划项目(2007CB714704); 国家自然科学基金(50821063); 教育部优秀博士论文基金资助(200536)

收稿日期: 2009-04-16; 修订日期: 2010-03-05

作者简介: 杨皎(1985—), 女, 硕士研究生, 主要从事摩擦学研究, 联系地址: 西南交通大学牵引动力国家重点实验室摩擦学研究所(610031), E-mail: yangjiao1960@126.com

通讯作者: 朱旻昊(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事摩擦学和表面工程研究, 联系地址: 西南交通大学牵引动力国家重点实验室摩擦学研究所(610031), E-mail: zhuminhao@swjtu.cn

德研制出较强延展性非晶体金属材料

德国莱布尼茨固态与材料研究所发表公报说, 该所研究人员成功改造了一种非晶体金属材料, 使其既保持了原本的优点, 又具有较强的可延展性。

金属通常是晶体。如果使金属熔体在瞬间冷凝, 使金属原子来不及排列整齐就被“冻结”, 就能产生具有玻璃性质的非晶体金属, 俗称“金属玻璃”。这种材料具有玻璃耐锈、耐腐蚀的特点, 强度可与陶瓷媲美, 其较轻的质量更令其在航空等领域具有优势。但是金属玻璃较脆, 无法承受拉伸负荷。

研究人员以铜锆合金作为研究对象。这种合金具有特殊的“记忆”特性, 即在外力下产生形变后, 在特定温度下又会恢复到原来形状。研究人员对非晶体铜锆合金进行改造, 使其更坚固、可塑性更强。