

铝硅酸盐微晶玻璃摩擦磨损性能研究

赵运才^{1,2}, 肖汉宁¹, 张力军¹

(1 湖南大学 材料科学与工程学院, 湖南 长沙 410083;

2 湖南理工学院 材料表面工程研究所, 湖南 岳阳 414000)

摘要: 在MRH-5A型环-块摩擦磨损试验机上考察了不同载荷下耐磨微晶玻璃与45#钢对摩时的摩擦磨损性能, 用扫描电子显微镜和定点探针观察和分析磨损表面形貌和成分, 并探讨了材料的磨损机理。结果表明: 磨损率随着载荷的增加出现波动, 当载荷低于40 N时, 磨损率随载荷增加而明显增大; 而当载荷超过40 N时, 磨损率随载荷增加而明显降低; 在较低载荷下, 耐磨微晶玻璃的磨损失效主要源于轻微点蚀和疲劳剥落; 在较高载荷下, 其磨损失效主要源于表层晶粒塑性变形及疲劳脆性断裂。

关键词: 耐磨微晶玻璃; 摩擦磨损性能; 磨损机理

中图分类号: TQ 171.1; TH 117.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595(2004)01-0011-05

微晶玻璃也称作玻璃陶瓷(glass-ceramics), 具有机械强度高、耐磨损及化学稳定性好等特性, 在机械、航天航空、建筑和化学工业领域具有广阔的应用前景, 已成为陶瓷新材料研究和新技术应用的热点之一^[1~3]。陶瓷材料作为摩擦学构件的研究和应用在摩擦学和新材料领域受到了广泛关注^[4,5]。然而, 针对微晶玻璃摩擦学特性的研究报道较少。为此, 我们研制了晶粒尺寸接近纳米量级且具有优良机械和力学性能的耐磨铝硅酸盐微晶玻璃^[6~9] (简称为耐磨微晶玻璃)。本文报道所研制的耐磨微晶玻璃在不同载荷下同45#钢对摩时的摩擦磨损性能, 并探讨其磨损机理, 以期为其应用推广提供相关实验数据。

1 实验部分

1.1 试样制备

制备耐磨微晶玻璃的配方组成(质量分数)为48%~54% SiO₂、7%~12% Al₂O₃、8%~15% CaO、10%~20% MgO、3%~5% R₂O、4%~7% CaF₂、0.5%~1.5% Cr₂O₃、4%~9% ZrO₂。将一定量的石英、方解石、白云石和滑石等矿物原料同复合晶核剂混合均匀, 置于高铝质陶瓷坩埚中, 在硅钼棒电炉中升温至1400~1450℃熔炼2 h; 待玻璃熔化均匀后, 浇注尺寸为φ30 mm×30 mm的试块; 将浇注试块经600℃左右退火、冷却、切割, 再经790℃×1.0 h核

化和930℃×0.5 h晶化处理, 即得到耐磨微晶玻璃试样。所制备的微晶玻璃试样以透辉石为主晶相, 以硅灰石为次晶相, 组织致密、均匀, 粒状晶尺寸小于100 nm (见图1)。其密度为2.72 g/cm³, 显微硬度为

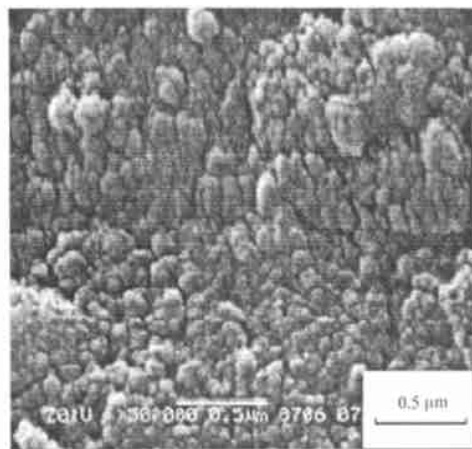


Fig 1 SEM photograph of the glass-ceramic

图1 微晶玻璃材料的显微结构

7.98 GPa, 断裂韧性为2.43 MPa·m^{1/2}, 弯曲强度为278 MPa, 弹性模量为76 GPa。

1.2 摩擦磨损试验

采用MRH-5A型环-块摩擦磨损试验机评价材料的摩擦磨损性能。将所制备的耐磨微晶玻璃试样用金刚石车刀精车成几何形状和尺寸如图2所示的试

基金项目: 国家自然科学基金及上海宝钢集团联合资助项目(50174024); 湖南省高校青年骨干教师计划项目(00X533)。

收稿日期: 2003-04-29; 修回日期: 2003-06-12/联系人肖汉宁, email: hnxiao@hnu.cn

作者简介: 赵运才, 男, 1964年生, 博士研究生, 目前主要从事微晶陶瓷制备及性能研究

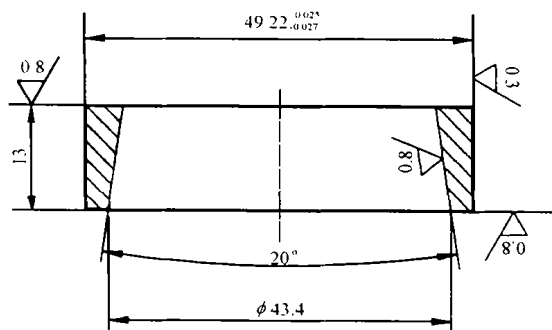


Fig 2 Schematic of the glass-ceramic ring

图2 耐磨微晶玻璃试环的形状和尺寸

环,经 400[#] 水砂纸研磨至表面粗糙度 $R_a < 0.3 \mu\text{m}$; 偶件 45[#] 钢尺寸 $12.32 \text{ mm} \times 12.32 \text{ mm} \times 19.05 \text{ mm}$, 经 820°C 淬火, 480°C 回火处理后平均硬度为 22HRC , 表面粗糙度 R_a 小于 $0.16 \mu\text{m}$. 试验前,所有试样均经丙酮清洗和热风吹干. 摩擦磨损试验条件为转动速度 250 r/min , 载荷 20 N 、 40 N 、 60 N 和 80 N , 室温,相对湿度 $43\% \sim 56\%$, 摩擦总行程 36 km . 每隔一定的摩擦行程 (3 km), 用 TG328A 型光学读数分析天平测量试样磨损前后的质量损失,再换算为磨损体积损失,以单位载荷单位磨损行程的磨损体积表示磨损率. 根据摩擦力矩值计算出摩擦系数. 用 KY-2800 型扫描电子显微镜 (SEM) 和定点探针观察分析试样磨损表面形貌及成分.

2 结果与分析

2.1 摩擦磨损性能

图 3 示出了所制备的耐磨微晶玻璃试样在不同

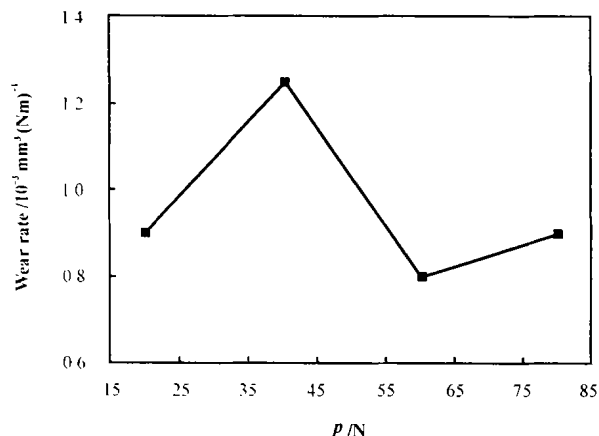


Fig 3 Variation of wear rate of glass-ceramics with load

图3 微晶玻璃试样磨损率随载荷变化的关系曲线

载荷下的磨损率. 可以看出,随着载荷的增加,试样的磨损率出现较大的波动. 当载荷低于 40 N 时,磨损率

随载荷增加而明显增大, 40 N 载荷下的磨损率约为 $1.25 \times 10^{-3} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; 而当载荷超过 40 N 时,磨损率随载荷的增加而明显降低,当载荷为 60 N 时相应的磨损率最小. 其原因在于,随着载荷的增加,摩擦表面局部温度升高并超过材料发生蠕变的温度,材料在摩擦应力作用下发生塑性变形,使单位摩擦表面的接触点显著增加,摩擦应力分布趋于均匀并可经由塑性变形而被吸收,降低裂纹的扩展速率,从而使磨损率有所降低. 相应的磨损机理主要为塑性变形.

图 4 示出了微晶玻璃试环在不同载荷下同 45[#]

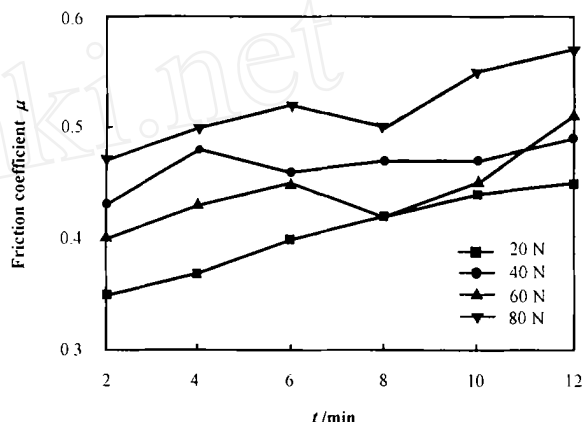


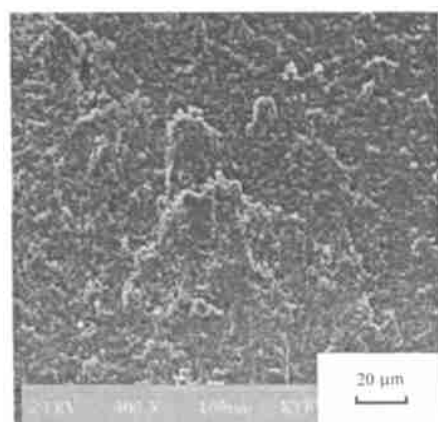
Fig 4 Variation of friction coefficient with test duration

图4 不同载荷下摩擦系数随时间变化的关系曲线

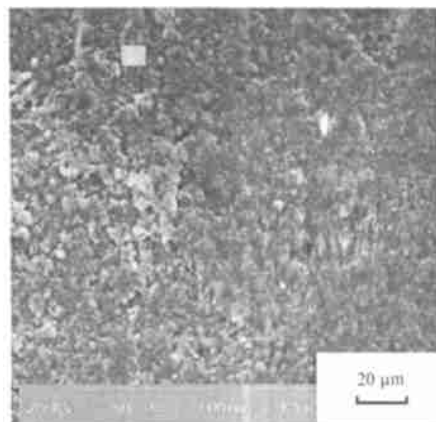
钢对磨时的摩擦系数随试验时间变化的关系曲线. 可以看出,载荷对摩擦系数具有一定影响,总体而言,摩擦系数随着载荷的增加而有所增大. 这是因为摩擦系数反映材料表面形貌、接触形式及载荷和滑动速度之间的相互作用. 当耐磨微晶玻璃试样表面较硬的微突体 (质点) 压入相对较软的偶件 (45[#] 钢) 表面时,裸露于微晶玻璃试样表面的硬质点将对 45[#] 钢表面产生犁削作用,并导致 45[#] 钢表面发生塑性变形,形成犁沟,此时摩擦力的主要分量为犁削力,载荷增加导致犁削作用增强,因而摩擦系数有所增大. 当载荷过大 (80 N) 时,试样摩擦表面塑性变形加剧,温度明显上升,从而使得粘着、微断裂和剥落倾向加剧,相应的摩擦系数高达 $0.48 \sim 0.58$.

2.2 磨损表面形貌及组成分析

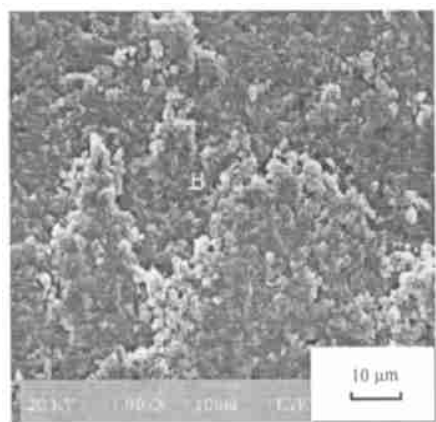
图 5 示出了微晶玻璃试样分别在不同载荷和时间下同 45[#] 钢对磨的磨损表面形貌 SEM 照片. 可以看出: 20 N 载荷下的微晶玻璃试样磨损表面较为光滑,存在轻微的点蚀坑,而无明显犁沟和脆性鳞状剥落痕迹 [见图 5(a)]; 而 40 N 载荷下的微晶玻璃试样磨损表面较为粗糙,点蚀坑直径和深度明显增大,局



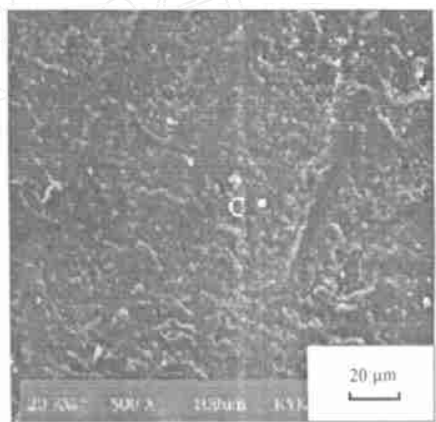
(a) Worn surface of glass-ceramic at 20 N



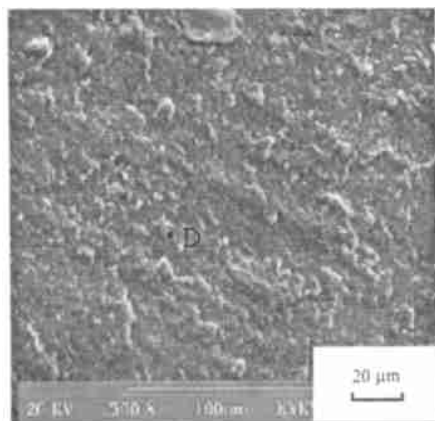
(b) Worn surface of glass-ceramic at 40 N



(c) Local ablation on worn surface at 60 N



(d) Plastic deformation at 80 N and 4 h



(e) Fracture and stripping at 80 N and 9 h

Fig 5 SEM morphologies of worn surfaces of glass-ceramics sliding against A ISI-1045 steel at various loads and test durations

图 5 微晶玻璃试样分别在不同载荷和时间下同 45# 钢对摩的磨损表面形貌 SEM 照片

部出现了明显的犁沟和混晶裂纹[见图 5(b)];当载荷升高至 60 N 时,由于微晶玻璃表面粗糙微突体塑性变形加剧,接触区域局部瞬时温度升高,材料表面硬度明显降低;虽然陶瓷材料脆性较强,晶粒流动性差,但微晶玻璃多晶材料含有少量玻璃相且晶粒微细,故在摩擦过程中可以产生表层晶粒流动,甚至可以引发近表层基体的塑性变形;与此同时,材料表面

的组织状态也发生了变化,局部发生轻微“烧损”[见图 5(c)],软化后的材料表面被碾压、凿削,导致表层与基体相脱落,最终形成恶性循环,引发材料表层开裂、剥落;当载荷进一步增加至 80 N 时,微晶玻璃接触表面塑性变形进一步加剧,并呈现粘着迹象[见图 5(d)]

微晶玻璃试样在干摩擦条件下同 45# 钢对摩时

可能发生塑性变形、脆性断裂和摩擦化学作用。随着载荷的增加,磨损表面压应力增大,接触表面从塑性变形逐渐向微裂纹、裂纹扩展和表面剥落转化,直至发生磨损失效。与此同时,随着载荷的增加,接触表面温度升高,微晶玻璃中所含的玻璃相和低熔点相可发生熔化及摩擦化学反应,从而在接触面产生“热活化粘附”,进而导致轻微粘着磨损以至造成材料的断裂和剥落[见图5(e)]。随着摩擦时间的延长,摩擦副接触表面的粘着点可因剪切而产生“滑移”,并导致摩擦力增大^[10](见图4)。

对图5(a, c, d和e)中的部分接触点进行电子探针(EP)分析,其结果列于表1。可以看出:图5(a)中

表1 不同载荷下微晶玻璃试样磨损表面典型区域元素组成的电子探针分析结果

Table 1 Elemental compositions in typical zones of worn surfaces of glass-ceramics sliding against AISI-1045 steel at various loads

Point	Atomic composition/%		
	Si	Ca	Fe
A	43.02	12.72	0.15
B	42.45	18.32	5.97
C	40.54	15.76	12.62
D	41.75	18.34	23.27

位于剥落区附近的A点的Fe元素含量很低,表层材料成分基本不变;图5(c和d)中的B点及C点的Fe元素含量较高且随载荷增加而明显增大,表明偶件钢试环表面材料在摩擦过程中向微晶玻璃试块磨损表面发生了转移;与此同时,Si和Ca的含量同图5(a)相比亦明显不同。据此可以认为,随着载荷的增加,接触区域温度升高,较软的45#钢表面发生软化和转移,从而表现出粘着磨损特征;由于摩擦副材料接触表面在不同载荷下的塑性变形程度和粘着转移行为不同,故相应的抗磨性能呈现明显差异。

3 结论

a 耐磨微晶玻璃在干摩擦条件下同45#钢对摩时的摩擦磨损性能同载荷密切相关,当载荷小于40N时,耐磨微晶玻璃试样的磨损率随载荷增加而增大,当载荷超过40N时,磨损率随载荷增加而明显降低。

b 在较低载荷下,微晶玻璃主要呈现轻微点蚀和疲劳剥落特征,在较高载荷下则主要呈现表层晶粒塑性变形、疲劳脆性断裂及粘着特征。

参考文献

- [1] Oscar Peital, Edgar Dutra Zanotto. Highly bioactive P_2O_5 - Na_2O - CaO - SiO_2 glass-ceramics[J]. J Non-Cry Solids, 2001, 292: 115-126.
- [2] Moisescu C, Hoche T. Influence of the Ca/P ratio on the morphology of fluorapatite crystals in SiO_2 - Al_2O_3 - CaO - P_2O_5 - K_2O -F glass-ceramics[J]. J Non-Cry Solids, 2001, 289: 123-134.
- [3] Wang P W, Zhang L P, Lu L, et al. Surface modification of lead silicate glass under X-ray-irradiation[J]. Applied Surface Science, 1995, 84: 75-83.
- [4] Liu Y (刘越), Yu B H (于宝海), Wang Z B (王镇波), et al. A study on the wear and friction behaviours of TiC/NiCr cements (TiC/NiCr 金属陶瓷复合材料摩擦磨损性能)[J]. Tribology (摩擦学学报), 2000, 20 (2): 90-94.
- [5] Xiang Z X (项忠霞), Chen S C (陈树昌), Wang Z (王铮), et al. Study on the tribological behavior of Si_3N_4 ceramic against chilled cast iron (Si_3N_4 陶瓷/冷激铸铁的摩擦学性能研究)[J]. Tribology (摩擦学学报), 2000, 20 (3): 183-185.
- [6] Zhao Y C (赵运才), Xiao H N (肖汉宁), Tan W (谭伟). Optimal design of nucleating and crystallizing technology of glass-ceramic with good abrasion resistance (耐磨铝硅酸盐微晶玻璃核化及晶化制度的优化)[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society (硅酸盐学报), 2003, 31 (1): 103-108.
- [7] Zhao Y C (赵运才), Xiao H N (肖汉宁), Tan W (谭伟). Effect of heating conditions on crystallization and properties of glass-ceramic with abrasion resistance (热处理条件对耐磨微晶玻璃晶化及性能的影响)[J]. Journal of the Chinese Coal Society (煤炭学报), 2002, 27 (6): 653-656.
- [8] Zhao Y C (赵运才), Xiao H N (肖汉宁), Tan W (谭伟). Analysis on the fabrication technology and the mechanism of the glass-ceramics with good strength (高强玻璃陶瓷的制备工艺及机理探讨)[J]. China Ceramics (中国陶瓷), 2002, 38 (5): 11-13.
- [9] Zhao Y C (赵运才), Xiao H N (肖汉宁), Tan W (谭伟). Effect of different amount of CaF_2 added on crystallization and properties of a glass-ceramic (CaF_2 添加量对微晶玻璃晶化过程及材料性能的影响)[J]. China Ceramic Industry (中国陶瓷工业), 2002, 9 (6): 33-37.
- [10] He C, Wang Y S, Wallace J S, et al. Effect of microstructure on the wear transition of zirconia-toughened alumina [J]. Wear, 1993, 162-164: 314-321.

Friction and Wear Behavior of Aluminous Silicate Glass-Ceramics

ZHAO Yun-cai^{1,2}, XIAO Han-ning¹, ZHANG Li-jun¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Institute of Materials Surface Engineering, Hunan College of Science and Technology, Changsha, 414000, China)

Abstract: The friction and wear properties of wear-resistant aluminous silicate glass-ceramics sliding against AISI-1045 steel at various loads and sliding velocities were evaluated on an MRH-5A ring-on-block friction and wear tester. The morphologies of the worn surfaces of the glass-ceramics were observed on a scanning electron microscope, while the elemental distributions on the worn surfaces were determined by means of electron microprobe analysis. As the results, the friction and wear behaviors of the glass-ceramics were greatly dependent on the applied load and sliding velocity. Namely, the wear rate of the glass-ceramics increased with increasing load up to 40 N, then it decreased significantly with further increase of the load and reached the minimum at 60 N. The glass-ceramics sliding against the steel at a relatively smaller load were characterized by mild pitting and fatigue spalling, while they were dominated by superficial plastic deformation and fatigue-induced brittle fracture at a larger normal load.

Key words: wear-resistant glass-ceramics; friction and wear behavior; wear mechanism

Author: XIAO Han-ning, male, born in 1963, Ph. D., Professor, e-mail: hnxiao@hnu.cn