

Si₃N₄ 陶瓷-冷激铸铁在微量润滑条件下的摩擦学特性

Tribological Characteristics of Silicon Nitride-chilled Cast Iron with Oil-less Lubrication

项忠霞¹, 董刚², 林彬¹, 沈兆光¹

(1 天津大学机械工程学院, 天津 300072;

2 天津职业大学机电学院, 天津 300402)

XIANG Zhong-xia¹, DONG Gang², LIN Bin¹, SHEN Zhao-guang¹

(1 School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2 School of Mechatronics, Tianjin Professional College, Tianjin 300402, China)

摘要: 利用 MG-200 型高速高温摩擦磨损试验机, 采用块-盘式实验方法, 对 Si₃N₄ 陶瓷-冷激铸铁摩擦副从室温到 150℃ 进行了微量润滑摩擦磨损实验, 得到了该摩擦副的摩擦系数和 Si₃N₄ 陶瓷的磨损率。同时根据试件的 SEM 照片和能谱成分分析了摩擦磨损机理, 并与无润滑时所得实验结果进行了比较。结果表明: 微量润滑条件下 Si₃N₄ 陶瓷的磨损率和摩擦系数要比无润滑条件下小的多; Si₃N₄ 陶瓷的磨损率随载荷和温度的增大而增大, 滑动速度的影响要小于载荷的影响; 该摩擦副的摩擦系数随环境温度的提高而增大, 随速度的增大而减小, 载荷的变化对其影响不大; Si₃N₄ 陶瓷的磨损是化学磨损、机体物质脱落和磨粒磨损共同作用的结果, 其中化学磨损是引起其他两类磨损的主要原因。

关键词: Si₃N₄ 陶瓷; 冷激铸铁; 微量润滑; 磨损机理; 摩擦系数; 磨损率

中图分类号: TQ174.758 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006)04-0024-04

Abstract: The friction and wear tests for mated couples of silicon nitride(Si₃N₄) and chilled cast iron under the oil-less lubrication were carried out by means of block-on-disc with MG-200 wear machine from room temperature to 150℃, the friction coefficients of mated couples and wear rates of Si₃N₄ were gained, and the friction and wear behaviors were analyzed by the wear rates, friction coefficients, SEM images and percentages of chemical elements on worn surfaces. The results showed that the wear rate of Si₃N₄ and friction coefficient between Si₃N₄ and chilled cast iron with oil-less lubrication are much less than those with dry friction condition; the wear rate of Si₃N₄ increases with the increase of load and temperature, and the effect of sliding speed on wear rate of Si₃N₄ is not as significant as the effect of load; the friction coefficient between Si₃N₄ and chilled cast iron decreases with sliding speed, but increases with temperature, and the load has little effect on friction coefficient; the wear of Si₃N₄ is caused by interaction of chemical wear, abrasant wear and particles' peeling off, and chemical wear is origin in other two.

Key words: silicon nitride(Si₃N₄); chilled cast iron; oil-less lubrication; wear mechanism; friction coefficient; wear rate

陶瓷材料具有耐磨、耐热、耐腐蚀等诸多良好特性, 这些特性使其在摩擦系统中的应用越来越广泛。氮化硅陶瓷具有很多优异的性能, 有望成为通用的摩擦副材料^[1]。在很多场合下, 氮化硅陶瓷与铸铁摩擦副的摩擦学性能表现突出, 因此相关的理论和应用研究备受重视^[2-8]。实验表明, Si₃N₄ 陶瓷-冷激铸铁摩擦副在充分油润滑^[9] 和水润滑^[10] 条件下具有良好的摩擦学特性, 在无润滑条件下的摩擦学现象与前两种

条件下的明显不同^[11,12]。同时环境温度也是不可忽视的因素之一, 因此对摩擦副进行常温和不同环境温度下的微量润滑摩擦学特性研究是很有必要的。

1 实验

1.1 试件与实验设备

采用试块-试盘相对滑动方式进行实验。试块为

5mm × 5mm × 3mm 的 Si₃N₄ 陶瓷, 平均表面粗糙度 R_a 为 0.1, 采用热压烧结方法制备, 其基本物理性能如表 1 所示。试盘为 $\phi 70\text{mm} \times 10\text{mm}$ 的冷激铸铁, 平均表面粗糙度 R_a 为 0.2, 平均硬度 HRC 为 54。采用 MG-200 型高速高温摩擦磨损试验机进行摩擦磨损实验; 采用电感测微仪测量试件的磨损深度, 从而得到试件的磨损率, 磨损率以每小时试件的磨损深度来计量; 通过 Y6D-2 型动态应变仪和 XY 记录仪获得摩擦副的摩擦系数; 采用 FEI 公司 QUANTA 400 型环境扫描电子显微镜观察试件磨损表面形貌; 采用 OXFORD 公司的 INCA 型能谱仪对试件磨损表面进行化学成分的检测。

表 1 Si₃N₄ 陶瓷的基本性能
Table 1 Basic properties of Si₃N₄

Density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Hardness	Bending strength/MPa	Fracture toughness/ ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	Elastic modulus/GPa
3.41	80	700	6	300

1.2 实验方法

借助文献[11]中 Si₃N₄ 陶瓷-冷激铸铁在无润滑条件下的实验设计法进行实验点(载荷和速度)的选取。为了减少实验和测量过程中的误差, 每个实验点重复三次, 取结果的平均值做为最终实验结果。Si₃N₄ 陶瓷磨损率的值由系统磨损率(试盘和试块的磨损率之和)与冷激铸铁磨损率相减得到; 摩擦系数的值通过对 XY 记录仪进行标定, 得到摩擦力的值, 然后根据试件上施加的压力计算得到。实验用润滑油为奥吉娜发动机油, 采用滴油方式, 使摩擦界面具有微量润滑。

2 结果与讨论

2.1 常温条件下的磨损率及摩擦系数

表 2 为常温条件下采用微量润滑方式进行实验得到的 Si₃N₄ 陶瓷的磨损率 ε_{oil} , 以及与常温无润滑条件下的实验结果 ε_{dry} 进行的比较。

从表 2 中数据可以看出, 在常温微量润滑条件下, Si₃N₄ 陶瓷的磨损率要比无润滑条件下小的多, 磨损率随载荷(p)和速度(v)的变化规律与无润滑条件下基本相同, 总体趋势是随载荷的增大而增大, 速度对磨损率的影响小于载荷的影响。当载荷和速度均达到较大值时, Si₃N₄ 陶瓷的磨损率迅速增大。

图 1 为 Si₃N₄ 陶瓷-冷激铸铁在常温微量润滑条件下摩擦系数随载荷和滑动速度变化的曲线, 并与无润滑条件下的曲线进行了比较。由图 1 可知, 无论是

表 2 不同实验条件下 Si₃N₄ 陶瓷的磨损率

Table 2 The wear rates of Si₃N₄ with various test conditions

No.	p/MPa	$v/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$\varepsilon_{oil}/$ ($\mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)	$\varepsilon_{dry}/$ ($\mu\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$)
1	4.00	1.66	6.30	29.65
2	4.88	1.29	7.00	32.44
3	9.12	0.95	12.20	63.45
4	9.76	2.10	22.50	124.33

在微量润滑还是在无润滑条件下, 当载荷不变时, 摩擦副的摩擦系数均随速度的增大而减小; 当速度不变时, 载荷的变化对摩擦系数的影响不大。

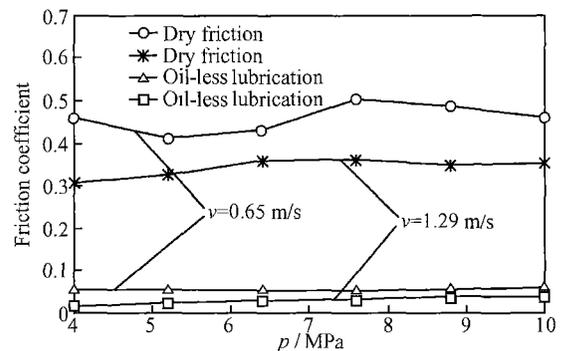


图 1 在常温微量润滑和无润滑条件下 Si₃N₄ 陶瓷-冷激铸铁的摩擦系数随载荷变化的曲线

Fig. 1 The curves of friction coefficient of Si₃N₄-chilled cast iron with the various loads

2.2 较高环境温度下的磨损率及摩擦系数

表 3 为在 100℃ 和 150℃ 环境温度下采用微量润滑方式进行实验得到的 Si₃N₄ 陶瓷的磨损率 $\varepsilon_{100^\circ\text{C}}$, $\varepsilon_{150^\circ\text{C}}$ 和摩擦副的摩擦系数 $\mu_{100^\circ\text{C}}$, $\mu_{150^\circ\text{C}}$, 并与常温下实验结果 ε_{oil} 和 μ_{oil} 进行比较。从表中数据可以看出, 在载荷和滑动速度不变的条件下, 摩擦副的摩擦系数和 Si₃N₄ 陶瓷的磨损率均随温度的升高而增大。

2.3 摩擦磨损机理分析

图 2a-c 是在常温微量润滑条件下, 分别采用表 2 中 1, 3, 4 实验点所给参数进行实验, 分别得到的 Si₃N₄ 陶瓷表面的电子显微照片。表 4 为不同载荷和速度下 Si₃N₄ 陶瓷表面主要元素的原子分数。从图 2a 可以看到, 在轻载和中等速度条件下, Si₃N₄ 陶瓷表面非常光滑, 又从表 4 给出的图 2 中 A 点区域氮元素和氧元素的原子分数分析, 陶瓷表面的物质已发生了化学和氧化反应, 反应后的表面变得粗糙。从化学成分和实验条件分析, 反应物中应含有凝胶状的硅酸盐或无定形 SiO₂ 水合物^[4]。由于凝胶状物质的存在, 使得 Si₃N₄ 陶瓷表面形成一层光滑的表面膜。从表 4 中 B 点区域氮元素和氧元素的原子分数得知, 该区域氮元

素含量较高,说明分解反应不明显;氧元素含量较 A 点少,说明氧化反应不严重。图 2b 是在较大载荷和较小速度条件下得到的 Si_3N_4 陶瓷表面的显微照片,可以明显地看到表面膜被破坏的痕迹。表 4 中 D 点区域的成分与 B 点区域相比,氮原子减少,氧原子增多,而 C 点区域的氮原子完全消失,氧原子增加的更多。这说明,氮元素已完全被分解成气体,充分分解后的表面材料变得粗糙,难以使表面膜附着其上。图 2c 是在

较大载荷和速度条件下得到的陶瓷表面的显微照片,与图 2a 相比,其表面组织结构粗糙,孔洞较多。从表 4 中的数据可知, E 和 F 两点区域的氮原子均被完全分解成气体,表面粗糙的 E 点区域的氧元素含量较 F 点区域高,说明氧化程度高的表面更粗糙。图 2d 是在无润滑及较大载荷和速度条件下得到的 Si_3N_4 陶瓷表面的显微照片,与图 2a-c 相比明显不同。

当环境温度分别为 100°C 和 150°C 时,采用微量润

表 3 不同环境温度下 Si_3N_4 陶瓷的磨损率和摩擦副的摩擦系数

Table 3 The wear rates of Si_3N_4 and friction coefficient with various temperatures

No.	p/MPa	$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$\varepsilon_{0.1}/$ ($\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)	$\varepsilon_{100^\circ\text{C}}/$ ($\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)	$\varepsilon_{150^\circ\text{C}}/$ ($\mu\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$)	Friction coefficient		
						$\mu_{0.1}$	$\mu_{100^\circ\text{C}}$	$\mu_{150^\circ\text{C}}$
1	9.12	0.95	12.20	20.00	30.59	0.033	0.039	0.044
2	4.88	1.29	7.00	9.40	16.44	0.042	0.049	0.057

滑得到的摩擦副的摩擦系数 $\mu_{100^\circ\text{C}}$, $\mu_{150^\circ\text{C}}$ 和 Si_3N_4 陶瓷的磨损率 $\varepsilon_{100^\circ\text{C}}$, $\varepsilon_{150^\circ\text{C}}$ 均随温度的升高而增大。从实验现象看,摩擦表面颜色较深,实验中有轻微烟雾出现,但摩擦副表面形貌与常温下的比较无明显不同。造成上述现象的主要原因是:当温度升高时,促使摩擦表面润滑油汽化,导致接触表面润滑条件变差,从而使

$\mu_{100^\circ\text{C}}$, $\mu_{150^\circ\text{C}}$, $\varepsilon_{100^\circ\text{C}}$, $\varepsilon_{150^\circ\text{C}}$ 较常温时增大。

图 3a 是采用常温微量润滑,在轻载和中等速度条件下得到的冷激铸铁表面的电子显微照片。可以看出,摩擦过的表面比未经摩擦的表面光滑的多。图 3b 是采用常温微量润滑,在载荷和速度都较大的条件下得到的冷激铸铁表面的电子显微照片。可以看出,摩

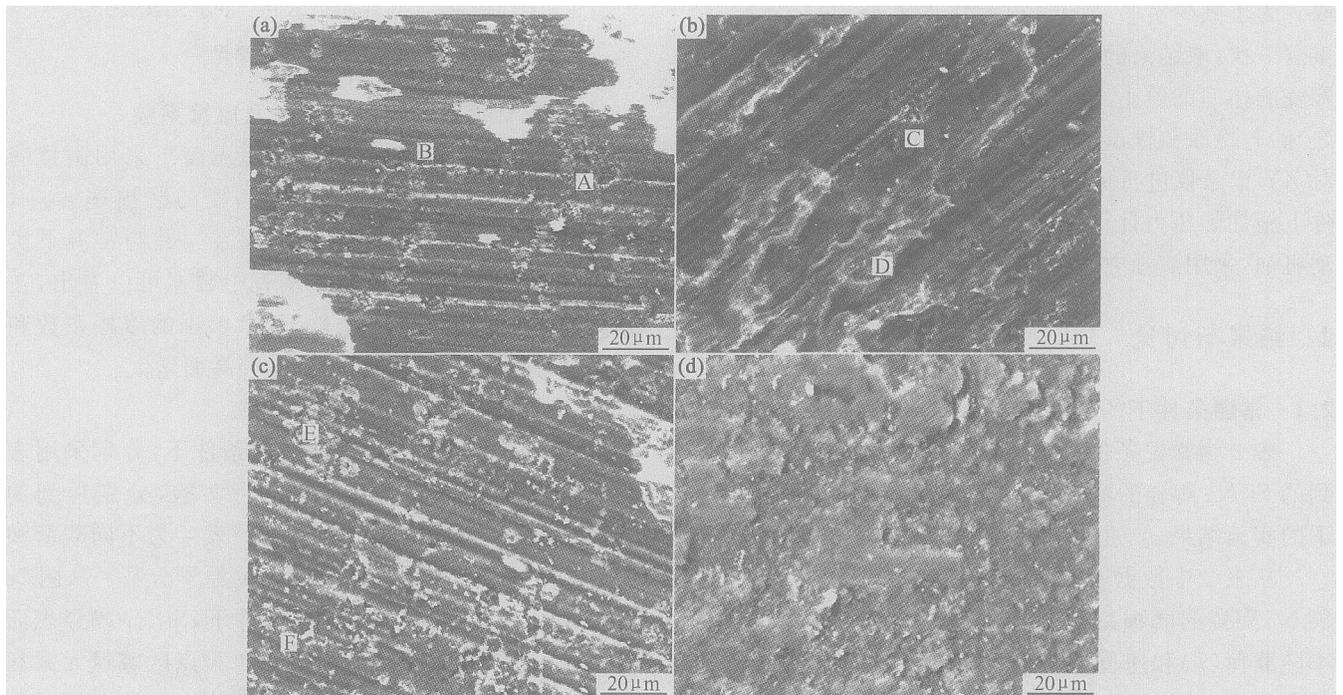


图 2 常温下不同载荷(p)和速度(v)下 Si_3N_4 陶瓷表面的电子显微照片

- (a) $p = 4.00\text{MPa}$, $v = 1.66\text{m/s}$, 微量润滑; (b) $p = 9.12\text{MPa}$, $v = 0.95\text{m/s}$, 微量润滑;
(c) $p = 9.76\text{MPa}$, $v = 2.10\text{m/s}$, 微量润滑; (d) $p = 9.76\text{MPa}$, $v = 2.10\text{m/s}$, 无润滑

Fig. 2 SEM images of Si_3N_4 with various loads and sliding speeds at room temperature

- (a) $p = 4.00\text{MPa}$, $v = 1.66\text{m/s}$, oil-less lubrication; (b) $p = 9.12\text{MPa}$, $v = 0.95\text{m/s}$, oil-less lubrication;
(c) $p = 9.76\text{MPa}$, $v = 2.10\text{m/s}$, oil-less lubrication; (d) $p = 9.76\text{MPa}$, $v = 2.10\text{m/s}$, dry friction

表 4 不同载荷和滑动速度下 Si₃N₄ 陶瓷表面主要元素的原子分数

Table 4 Main atoms' percentage on the surface of Si₃N₄ with various loads and sliding speed

Element	Point	Point	Point	Point	Point	Point
	A / %	B / %	C / %	D / %	E / %	F / %
N	8.43	42.87	0	30.94	0	0
Si	41.73	39.28	30.22	42.40	29.50	67.33
O	28.03	14.90	36.17	20.20	26.29	11.45
Fe	0.27	0	0.89	0	0	0

擦表面比较光滑,且表面已发生了严重的塑性变形,并有磨粒磨损的痕迹,这与无润滑条件下得到的图 3c 的显微照片完全不同。由此可见,微量润滑和无润滑这两种条件下的磨损机理有很大不同。图 3c 所显示的无润滑条件下的冷激铸铁表面具有明显的粘附磨损的痕迹,使得图 2d 陶瓷表面的成分中含有大量的铁元素^[11]。而当采用微量润滑时,即使在载荷和速度均较大的条件下,也没有发现铸铁表面的铁元素被粘附到陶瓷表面上(通过试盘表面的能谱成分测试得到该结论)。

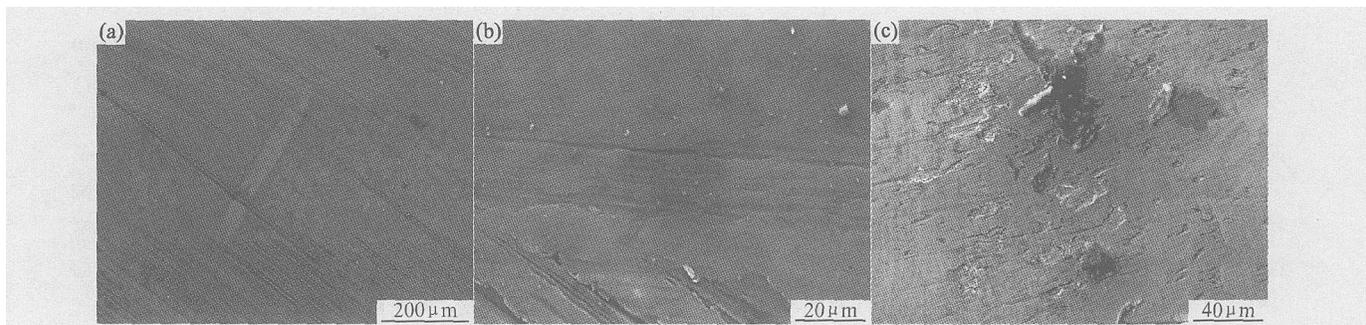


图 3 常温下不同载荷(p)和速度(v)下冷激铸铁表面的电子显微照片

(a) $p = 4.00\text{ MPa}$, $v = 1.66\text{ m/s}$, 微量润滑; (b) $p = 9.76\text{ MPa}$, $v = 2.10\text{ m/s}$, 微量润滑; (c) $p = 9.76\text{ MPa}$, $v = 2.10\text{ m/s}$, 无润滑

Fig. 3 SEM images of chilled cast iron with various loads and sliding speeds at room temperature

(a) $p = 4.00\text{ MPa}$, $v = 1.66\text{ m/s}$, oil-less lubrication; (b) $p = 9.76\text{ MPa}$, $v = 2.10\text{ m/s}$, oil-less lubrication;

(c) $p = 9.76\text{ MPa}$, $v = 2.10\text{ m/s}$, dry friction

以上分析表明,在微量润滑条件下,化学磨损是 Si₃N₄ 陶瓷磨损的主要形式之一。另外,由于化学反应使得 Si₃N₄ 陶瓷表面变得粗糙,组织结构较松散,因此在载荷的作用下很容易使粗糙表面的物质以微小颗粒的形式从机体上脱落下来,这是 Si₃N₄ 陶瓷磨损的第二种形式,这也是载荷对磨损率的影响要大于速度对其影响的原因。再有,从机体脱落下来的微粒很容易在摩擦表面间形成磨粒,从图 2a-c 中均可看到分布在陶瓷表面的微小颗粒以及磨粒磨损的痕迹,因此磨粒磨损也是 Si₃N₄ 陶瓷磨损的形式之一。

从图 2a-c 中还可以看到,陶瓷表面有很多微小的孔洞,这些孔洞可分为两类,一类是 Si₃N₄ 陶瓷在制备过程中所产生的气孔,另一类是由于在摩擦过程中陶瓷表面物质脱落而形成的凹坑。由于气孔和凹坑的存在,使得 Si₃N₄ 陶瓷的局部组织结构较松散,但这些孔洞却为润滑油在陶瓷表面的储存提供了有利条件,当陶瓷表面只有少量润滑油时,也能使润滑条件大大改善。由于润滑油的存在,基本避免了无润滑条件下出现的粘附磨损现象,从而使磨损率大大降低。由于表面膜的生成,使得摩擦过程中需克服的摩擦力不再是机体的剪切强度^[11],而是凝胶状表面膜的粘度,因此摩擦系数大大降低。由于高速摩擦产生的摩擦热较

多,使得表面膜的粘度降低,所以当载荷不变时,摩擦系数随速度的增大而减小。

当环境温度升高时,由于少量润滑油的汽化,削弱了润滑油的作用,而且温度越高,汽化现象越明显,从而导致 Si₃N₄ 陶瓷-冷激铸铁摩擦副的摩擦系数和 Si₃N₄ 陶瓷的磨损率随温度的升高而增大。

3 结论

(1) 在微量润滑条件下, Si₃N₄ 陶瓷的磨损率和 Si₃N₄ 陶瓷-冷激铸铁摩擦副的摩擦系数要比无润滑条件下小的多; Si₃N₄ 陶瓷的磨损率随载荷的增大而增大,滑动速度对其影响要小于载荷的影响;摩擦副的摩擦系数随速度的增大而减小,载荷的变化对其影响不大。

(2) 在微量润滑条件下, Si₃N₄ 陶瓷的摩擦磨损机理与无润滑条件下的明显不同。Si₃N₄ 陶瓷的磨损是化学磨损、机体物质脱落和磨粒磨损共同作用的结果,其中化学磨损是引起其它两类磨损的主要原因。

(3) 在载荷和滑动速度不变的条件下, Si₃N₄ 陶瓷-冷激铸铁摩擦副的摩擦系数和 Si₃N₄ 陶瓷的磨损率随温度的升高而增大。

(下转第 32 页)

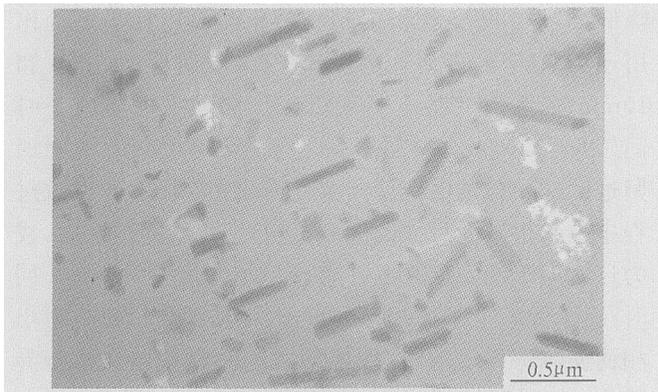


图 10 12 号试样回归 20min 的微观形貌

Fig. 10 Microstructure of No. 12 sample after 20min of retrogression

(2) 当二级时效温度为 155℃ 时, 强度指标虽然较高, 试样的断裂韧度和电导率却很低。随着二级时效温度的升高和时效时间的延长, 合金具有较高的电导率和断裂韧性, 强度指标有所降低, 但降低幅度小于断裂韧度和电导率的提高幅度。RRA 工艺强度指标较高, 断裂韧度、电导率指标中等(与二级时效温度为 170℃ 时相近)。

(3) 要使强度、断裂韧性和抗应力腐蚀性能达到最佳配合, 应该采用第 9 号和 12 号工艺。比较第 9 号和 12 号工艺, 前者的电导率指标略高, 其断裂韧度提高了 30.18%, 屈服强度降低了 20%。采用双级时效制度 115℃ × 7h + 185℃ × 13h 时, 断裂韧性和抗应力腐

蚀性能可以在不大量牺牲强度的前提下达到最大值。

参考文献

- [1] ROBINSON J S. Influence of retrogression and reaging on fracture toughness of 7010 aluminum alloy[J]. *Materials Science and Technology*, 2003, 19(3): 1697- 1703.
- [2] 候太学, 吴运学. 热处理对 LC9 合金锻件断裂韧性的影响[J]. *金属热处理*, 1991, (17) 2: 38- 43.
- [3] 程勇胜, 李秋菊. 时效制度对 7475 铝合金组织与性能的影响[J]. *轻合金加工技术*, 2001, 29(6): 44- 47.
- [4] 郑子樵, 李红英, 李伟, 等. 铝合金的晶粒微细化研究[J]. *湘潭矿业学院学报*, 2003, 18(2): 41- 43.
- [5] BURLEIGH T D. The postulated mechanisms for stress corrosion cracking of aluminum alloy: a review of the literature 1980- 1989[J]. *Corrosion*, 1991, 47(2): 89- 93.
- [6] 曾渝, 尹志民, 朱远志, 等. RRA 处理对超高强铝合金微观组织与性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(7): 1192- 1194.
- [7] KANNO M, ARAKI I, CUI Q. Precipitation behavior of 7000 alloys during retrogression and reaging treatment[J]. *Mater Sci and Technol*, 1994, 10(7): 599- 605.
- [8] 郑子樵, 李红英, 莫志民. 一种 7055 型铝合金的 RRA 处理[J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11(5): 771- 776.

收稿日期: 2005-04-25; 修订日期: 2005-12-15

作者简介: 李红英(1963-), 女, 教授, 主要从事材料的强韧化研究, 联系地址: 湖南长沙中南大学材料科学与工程学院(410083)。

(上接第 27 页)

参考文献

- [1] 北英纪(日). 低摩擦、低磨损陶瓷的开发[J]. 王冰, 梅长虹编译. *国外金属加工*, 2004, 25(2): 1- 4.
- [2] GAO Y M, FANG L, SU J Y. The effect of tribofilm formation on the characteristics of ceramic-cast iron sliding pairs[J]. *Wear*, 1997, 210: 1- 7.
- [3] 翟文杰, 王闯. Si₃N₄ 陶瓷电化学研磨特性及机理分析[J]. *摩擦学报*, 2004, 24(4): 360- 363.
- [4] 刘维民. 聚乙烯醇及磷酸脂气象润滑下 Si₃N₄ 陶瓷的磨损特性研究[J]. *摩擦学报*, 1998, 18(2): 108- 112.
- [5] 斯松华, 方亮, 高义民, 等. Si₃N₄ 陶瓷与灰铸铁配副的摩擦学性能[J]. *摩擦学报*, 1997, 17(1): 32- 37.
- [6] KANO M, TANIOTO I. Wear resistance properties of ceramic rocker arm pads[J]. *Wear*, 1991, 145: 153- 165.
- [7] 吴明明, 肖俊建. Si₃N₄ 陶瓷在现代制造业中的应用[J]. *佛山陶瓷*, 2004, 14(5): 30- 32.
- [8] 任靖日, 李花, 金石三. 高温下氮化硅的摩擦学性能研究[J]. *延边大学学报*, 2003, 29(3): 212- 215.
- [9] OGAWA Y, MACHIDA M, MIYAMURA N, et al. Ceramic rocker arm insert for internal combustion engines[C]. New York: Society of Automotive Engineers, 1986.
- [10] 高义民, 方亮, 苏俊义, 等. 蒸馏水润滑下 Si₃N₄ 冷激铸铁摩擦面上表面膜的分析[J]. *西安交通大学学报*, 1997, 32(2): 77- 83.
- [11] 项忠霞, 陈树昌, 王铮, 等. Si₃N₄ 陶瓷/冷激铸铁的摩擦学性能研究[J]. *摩擦学报*, 2000, 20(3): 183- 185.
- [12] XIANG Z X, DONG G, ZHANG Y H, et al. Analysis on wear properties and impact factors for Si₃N₄ ceramic mated with chilled cast iron[A]. *Proceedings of 11th World Congress in Mechanism and Machine Science* [C]. Beijing: China Machine Press, 2004. 2306- 2310.

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金资助项目(20030723)

收稿日期: 2005-04-11; 修订日期: 2005-10-25

作者简介: 项忠霞(1964-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事材料摩擦学及机械动力学方面的研究, 联系地址: 天津市南开区卫津路 92 号, 天津大学机械工程学院(300072)。