

FeMn-Si 形状记忆合金耐磨性的研究

林成新¹, 王桂新², 吴彦东³, 王金刚³

(1 大连海事大学 机电与材料工程学院, 辽宁 大连 116026;

2 河北工业大学 材料科学与工程学院, 天津 300130;

3 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130)

摘要:采用真空中频熔炼炉制备 Fe-16 86Mn-4 50Si-10 30Cr-4 20Ni 试验合金, 在 M-200 型摩擦磨损试验机上评价其在干摩擦和油润滑条件下的磨损性能, 利用扫描电子显微镜和 X 射线衍射仪观察和分析试验合金的磨损表面及其磨损机理。结果表明, 试验合金在油润滑条件下的耐磨性显著高于干摩擦下的耐磨性, 而且其磨损量并不随载荷增加而增大, 如当载荷 300 N 时的磨损量比 100 N 时的磨损量小。同 1Cr-18Ni-9Ti 不锈钢的耐磨性相比, 在干摩擦下试验合金的耐磨性较差, 而在油润滑下的耐磨性较好。在油润滑下试验合金的磨损表面存在大量 ϵ 马氏体, 而在干摩擦下其磨损表面没有 ϵ 马氏体, 由于摩擦力诱发 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变导致 Fe-Mn-Si 合金在干摩擦和油润滑条件下具有不同的磨损机理, 从而使得合金在油润滑下具有优良的耐磨性。

关键词: Fe-Mn-Si 形状记忆合金; 耐磨性; 应力诱发 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变

中图分类号: TG139. 6; TH117. 3

文献标识码: A

文章编号: 1004-0595 (2006) 04-0336-05

近年来, 人们在寻求提高 Fe-Mn-Si 合金形状记忆性能的同时也开始重视其他性能的研究, 如耐腐蚀性^[1,2]和抗氧化性^[3]等。国内外对形状记忆合金摩擦磨损性能的研究主要集中于 Ni-Ti 合金^[4~7]和 Cu 基合金^[8,9], 而对 Fe-Mn-Si 合金摩擦磨损性能的研究甚少。一般认为, Ni-Ti 合金的高耐磨性与其超弹性有关^[4~7], 而 Yang 等^[10]研究表明, 在 Fe-Mn-Si 形状记忆合金中, 由于应力诱发马氏体相变也能够产生一定的超弹性。由此可以推断, Fe-Mn-Si 形状记忆合金在摩擦过程中的应力诱发马氏体相变能够影响其摩擦磨损性能。本文作者研究了 1 种 Fe-Mn-Si 形状记忆合金在干摩擦和油润滑条件下的耐磨性, 初步探讨其磨损机理, 为揭示 Fe-Mn-Si 形状记忆合金的磨损机理提供实验依据。

1 实验部分

在真空中频熔炼炉内熔炼 Fe-16 86Mn-4 50Si-10 30Cr-4 20Ni 合金 (简称 Fe-Mn-Si 合金)。铸锭经 1 200 °C $\times$ 12 h 均匀化处理后, 加热至 1 100 °C 保温 1 h, 热锻成 35 mm $\times$ 35 mm 的坯料; 对比试验材料为 1Cr-18Ni-9Ti 不锈钢。

磨损试验在 M-200 型摩擦磨损试验机上进行。试验材料经过线切割、磨削加工成尺寸为 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 10 mm 的磨损试样, 其表面粗糙度 R_a 处于 0.4 μ m, 摩擦副选用经淬火处理的 GCr15 钢, 机加工成 ϕ 16 mm $\times$ ϕ 40 mm $\times$ 10 mm 的摩擦环 (对磨表面的粗糙度 R_a = 0.4 μ m, 硬度 63HRC), 磨损试验环境为干摩擦和高速真空泵油润滑 2 种, 摩擦速率为 30 m/min, 根据磨损率的大小, 磨损时间分别取为 5 min、10 min、15 min、30 min 和 60 min 不等。试样磨损前后经丙酮清洗干燥后, 在精度 0.1 mg 的 Sartorius BS224S 型电子精密天平上称量其磨损质量损失, 并以此表征耐磨性。

在 XL301TMP 型扫描电子显微镜 (SEM) 上观察合金的磨损表面微观形貌, 用数码相机记录试样的磨痕表面宏观形貌, 在 D/max-3B 型 X 射线衍射仪 (XRD) 上对磨损表面相组成进行分析。

2 结果与讨论

图 1 所示为在干摩擦下 Fe-Mn-Si 合金在 3 种不同载荷下磨损量随磨损时间变化的关系曲线。可见, 在干摩擦下, Fe-Mn-Si 合金的磨损量随磨损时间

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目 (503038)。

收稿日期: 2005-09-16; 修回日期: 2006-01-10 林成新, e-mail: lch_xin@126.com

作者简介: 林成新, 男, 1963 年生, 博士, 教授, 目前主要从事机械设计和形状记忆合金及其应用的研究。

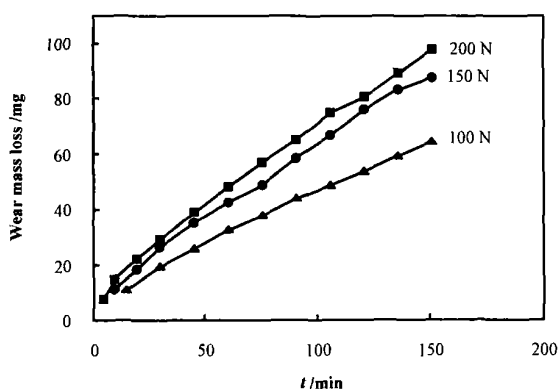


Fig 1 Wear mass loss of the Fe-Mn-Si alloy vs time in dry friction under different loads

图 1 干摩擦下不同载荷时 Fe-Mn-Si 合金磨损量与时间的关系曲线

的增加基本上呈线性增加,且载荷越高,磨损量越大.图 2 所示为在干摩擦下 Fe-Mn-Si 合金和不锈钢

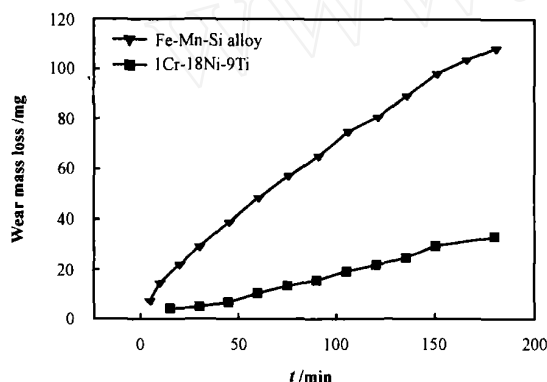


Fig 2 Wear mass loss of the Fe-Mn-Si alloy and the stainless steel vs time in dry friction under 200 N

图 2 干摩擦下 Fe-Mn-Si 合金和不锈钢在 200 N 时磨损量与时间的关系曲线

在载荷 200 N 下的磨损量随磨损时间变化的关系曲线.可以看出,在相同载荷下,Fe-Mn-Si 合金的磨损量比不锈钢大.

图 3 所示为在油润滑下 Fe-Mn-Si 合金在 3 种不同载荷下磨损量随磨损时间变化的关系曲线.可以看出,合金的磨损量并不随磨损载荷增加而增大,在试验范围内,载荷 300 N 时的磨损量最小.相对于干摩擦(比较图 1 和图 3),油润滑下 Fe-Mn-Si 合金的耐磨性大幅提高.图 4 所示为在油润滑下 Fe-Mn-Si 合金和不锈钢在载荷 300 N 下磨损量随时间变化的关系曲线.可见,在油润滑相同载荷下,Fe-Mn-Si 合金的磨损量比不锈钢的磨损量小.图 5 所示为在油润滑下 Fe-Mn-Si 合金和不锈钢在载荷 500 N 下磨损

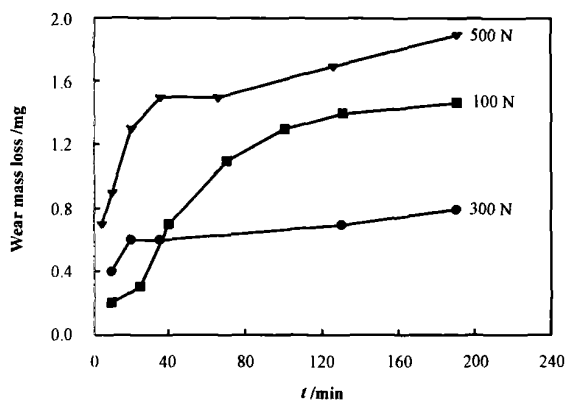


Fig 3 Wear mass loss of the Fe-Mn-Si alloy vs time in oil lubrication under different loads

图 3 油润滑下不同载荷时 Fe-Mn-Si 合金磨损量与时间的关系曲线

不同时间后的磨痕形貌数码照片.可以看出,Fe-Mn-Si 合金磨损 585 min 后的磨痕宽度比不锈钢磨

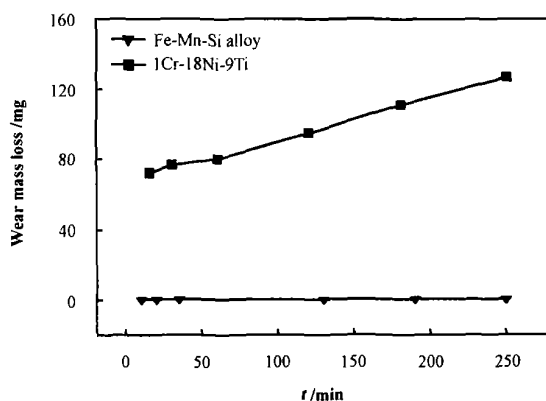
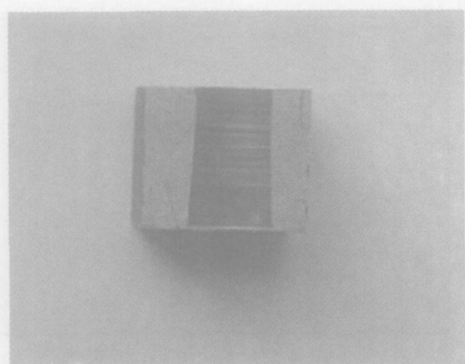


Fig 4 Wear mass loss of the Fe-Mn-Si alloy and the stainless steel vs time in oil lubrication under 300 N

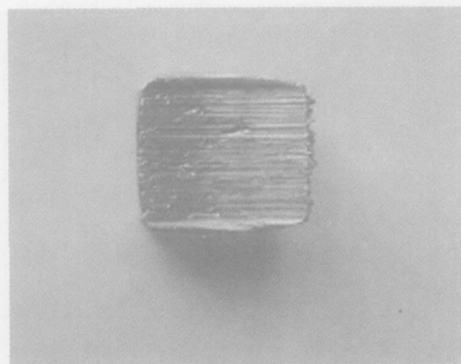
图 4 油润滑下 Fe-17Mn-5Si-10Cr-4Ni 合金和不锈钢在 300 N 时磨损量与时间的关系曲线

损 15 min 后的磨痕宽度小得多.

图 6(a)所示为 Fe-Mn-Si 合金试样在 3 种不同载荷下干摩擦 150 min 后的磨损表面 XRD 谱图.可见,XRD 谱图上出现 γ 和 α 相衍射峰,且 α 相衍射强度随载荷增加而增大,表明在干摩擦下 Fe-Mn-Si 合金磨损表面的相组成为 $\gamma + \alpha$.相对于未经磨损的原始试样,组织中增加了 α 马氏体.图 6(b)为 Fe-Mn-Si 合金试样在 3 种不同载荷下油润滑 190 min 后的磨损表面 XRD 谱图.可见,其中含有 γ 、 ϵ 和 α 衍射峰,表明在油润滑下 Fe-Mn-Si 合金磨损表面的相组成为 $\gamma + \epsilon + \alpha$,较未经磨损的原始试样增加了 ϵ 和 α 马氏体,与干摩擦一样,在油润滑下 Fe-Mn-



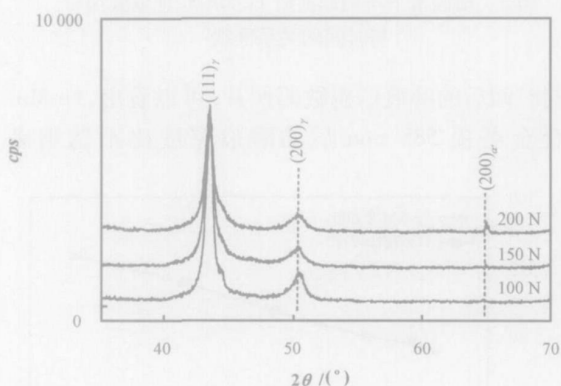
(a) Fe-Mn-Si alloy, 585 min



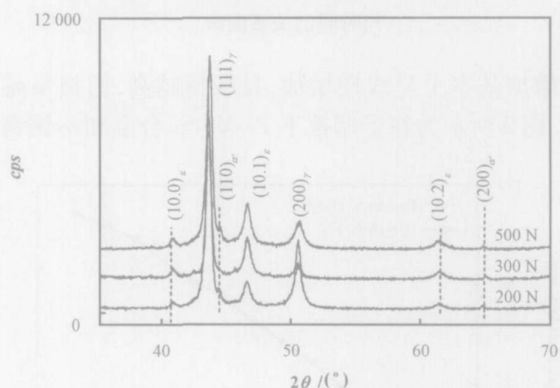
(b) 1Cr-18Ni-9Ti, 15 min

Fig 5 Digital photographs of the worn surface of the Fe-Mn-Si alloy and the stainless steel in oil lubrication under 500 N

图 5 油润滑下 Fe-Mn-Si 合金和不锈钢在 500 N 时的磨痕照片



(a) Dry friction, 200 N, 150 min



(b) Oil lubrication, 500 N, 190 min

Fig 6 XRD patterns for worn surface of the Fe-Mn-Si alloy after dry friction and oil lubrication

图 6 Fe-Mn-Si 合金在干摩擦和油润滑下的磨损表面 XRD 谱图

Si 合金磨损表面的 α 相衍射强度随载荷增加而增大。

由以上 XRD 分析可以看出, Fe-Mn-Si 合金在磨损过程中发生了 ϵ 和 α 的马氏体相变, 为摩擦应力诱发 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 和 $\gamma \rightarrow \alpha$ 马氏体相变的产物, 由图 6 (b) 可见, 油润滑下, Fe-Mn-Si 合金磨损表面的 XRD 谱图中 ϵ 相衍射峰强度较 α 相高, 表明在摩擦力作用下, 摩擦表面以应力诱发 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变为主, 这与单向拉伸作用下 Fe-Mn-Si 合金的马氏体相变特征相似^[11]。

图 7 给出了 Fe-Mn-Si 合金在干摩擦 (200 N, 150 min) 和油润滑 (500 N, 190 min) 后磨损横截面形貌的 SEM 照片。可见, 在干摩擦下, 合金试样的磨损表面基本没有 ϵ 马氏体, 但在磨损的内部却存在一定的 ϵ 马氏体。这是由于摩擦温度高于应力诱发 ϵ 马氏体的最高温度 M_d 而不能发生摩擦应力诱发 ϵ 马氏体相变; 另外, 由于摩擦温度高于 A_s 或 A_f 温度 ($A_s \approx 50^\circ\text{C}$, $A_f \approx 180^\circ\text{C}$), 即使发生了应力诱发 ϵ

马氏体相变, 也会因为 $\epsilon \rightarrow \gamma$ 马氏体逆相变而消失。在油润滑下, 试样的磨损表面存在较多 ϵ 马氏体。这是由于 Fe-Mn-Si 合金冷却充分而摩擦表面温度较低 (略高于室温), 低于 M_d 温度 ($120 \sim 150^\circ\text{C}$), 为摩擦应力诱发 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变创造了条件。同时摩擦表面温度也不足以发生 $\epsilon \rightarrow \gamma$ 马氏体逆相变, 所以在油润滑下 Fe-Mn-Si 合金表面存在较多 ϵ 马氏体。

图 8 为 Fe-Mn-Si 合金在干摩擦 (载荷 200 N, 150 min) 和在油润滑 (500 N, 190 min) 后的磨损表面形貌 SEM 照片。可见, 干摩擦条件下的磨损严重, 磨损表面呈现出典型的粘着磨损特征; 而在油润滑下, 合金磨损较轻, 磨损表面呈浅平滑型沟, 在犁沟两侧存在隆起的金属塑性变形, 粘着磨损特征不明显。

一般认为, 互相接触的 2 个摩擦表面在摩擦过程中属局部接触, 造成局部应力过高而导致形变和位错, 随着摩擦时间增加, 位错不断堆积并相互割

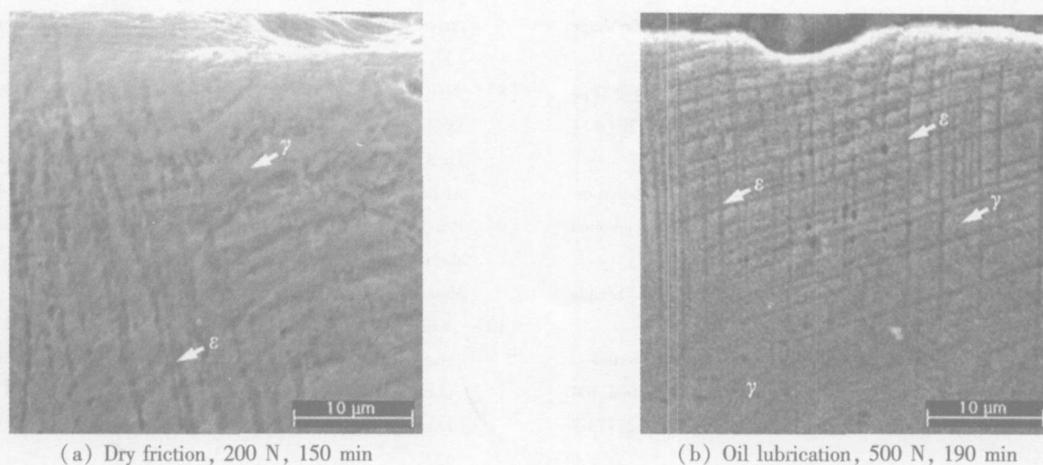


Fig 7 SEM morphologies for cross section of worn surface in Fe-Mn-Si alloy

图 7 Fe-Mn-Si 合金磨损横截面形貌 SEM 照片

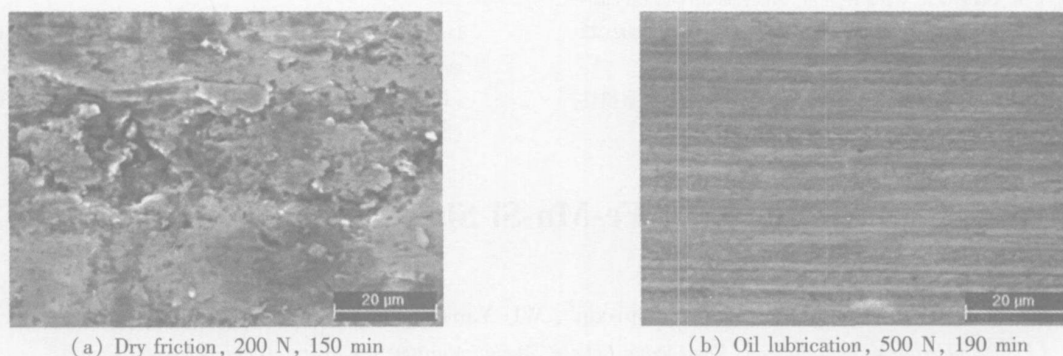


Fig 8 SEM morphologies for worn surface in Fe-Mn-Si alloy

图 8 Fe-Mn-Si 合金磨损表面形貌的 SEM 照片

阶,出现裂纹而最终产生磨损.在油润滑条件下,Fe-Mn-Si合金在摩擦应力驱动下发生 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变而产生相变变形,可抑制滑移和位错而导致局部应力松弛,使其具有较高的接触疲劳强度,从而提高合金的耐磨性.另外,摩擦表面的 ϵ 马氏体强化作用、HCP晶体结构较低的粘着特性以及润滑和冷却作用等均使油润滑下Fe-Mn-Si合金的耐磨性提高.相反,在干摩擦下,Fe-Mn-Si合金的磨损表面主要为 γ 奥氏体相,其FCC晶体结构具有较高的粘着特性且摩擦力大、摩擦温度高,由此导致干摩擦下合金呈粘着磨损特征,耐磨性较差.

综上所述,摩擦过程中的应力诱发 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变是造成Fe-Mn-Si合金在干摩擦和油润滑下磨损机理不同的根本原因.载荷通过影响摩擦过程中的应力诱发 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变而影响Fe-Mn-Si合金的耐磨性,因此,存在特定的载荷可使应力诱发 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变,从而使合金具有最佳的耐磨性.在本试验范围内,在载荷300 N的油润滑下Fe-Mn-Si

合金的耐磨性最佳.

3 结论

a Fe-Mn-Si合金在干摩擦下的耐磨性较差,而在油润滑下的耐磨性优良,与1Cr18Ni9Ti不锈钢的耐磨性相比,在干摩擦条件下Fe-Mn-Si合金比不锈钢稍差,而在油润滑条件下Fe-Mn-Si合金比1Cr18Ni9Ti不锈钢好.

b 在油润滑下,Fe-Mn-Si合金的磨损量不随载荷增加而增大,在本试验范围内,载荷300 N时合金的耐磨性最佳.

c 摩擦力诱发 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 马氏体相变导致Fe-Mn-Si合金在干摩擦和油润滑下具有不同的磨损机理,使得合金在油润滑下具有优良的耐磨性.

参考文献:

- [1] Long N D, Zhu J H. Cavitation erosion resistance of Fe-26Mn-6Si-7Cr-1Cu shape memory alloy[J]. Mater Sci and Tech, 2003, 19 (2): 1 733-1 736.

- [2] Wang Z Y, Zhu J H. Cavitation erosion of Fe-Mn-Si-Cr shape memory alloys[J]. *Wear*, 2004, 256: 66-67.
- [3] 周迎春, 田延军, 冯世宏, 等. FeMnSiCr 铁基形状记忆合金管接头耐腐蚀抗氧化性能的研究 [J]. *金属热处理*, 2004, 29 (4): 37-38
Zhou Y C, Tian Y J, Feng S H, *et al* Corrosion and oxidation resistance of Fe-based FeMnSiCr shape memory alloy pipe junction [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2004, 29 (4): 37-38.
- [4] Li D Y. Wear behavior of TiNi shape memory alloys[J]. *Scripta Materialia*, 1996, 50 (2): 195-200.
- [5] Liu R, Li D Y. Experimental studies on tribological properties of pseudoelastic TiNi alloy with comparison to stainless steel 304 [J]. *Metallurgical Transactions A*, 2001, 31A (11): 2 773-2 783.
- [6] 黄学文, 董光能, 王慧, 等. 超弹 TiNi 合金的摩擦学特性研究 [J]. *摩擦学学报*, 2002, 22 (6): 409-413.
Huang X W, Dong G N, Wang H, *et al* Study on tribological characteristics of pseudoelastic TiNi alloy [J]. *Tribology*, 2002, 22 (6): 409-413.
- [7] 任万才, 董元源, 王成名, 等. 镍钛记忆合金自补偿磨粒磨损性能研究 [J]. *摩擦学学报*, 2004, 24 (4): 378-381.
Ren W C, Dong Y Y, Wang C M, *et al* Study of self-healing abrasive wear behavior of super-elastic Ni-Ti shape-memory alloy [J]. *Tribology*, 2004, 24 (4): 378-381.
- [8] 芦笙, 林萍华, 任合, 等. Cu-Al-Be 形状记忆合金湿磨粒磨损性能研究 [J]. *摩擦学学报*, 2003, 23 (5): 445-447.
Lu S, Lin P H, Ren H, *et al* Wet abrasive wear behavior of Cu-Al-Be shape memory alloys [J]. *Tribology*, 2003, 23 (5): 445-447.
- [9] Pen J, Gil F J, Guilemany J M. Effect of microstructure on dry sliding wear behavior in CuZnAl shape memory alloys [J]. *Acta Materialia*, 2002 (50): 3 115-3 124.
- [10] Yang J H, Chen H, Wayman C M. Development of Fe-based shape memory alloys associated with face-centered cubic-hexagonal close-packed martensitic transformations Part I Shape memory behavior [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1992, 23A: 1 431-1 437.
- [11] 林成新, 张建军, 谷南驹. Fe-Mn-Si 形状记忆合金应力诱发马氏体相变的 X 射线分析 [J]. *材料热处理学报*, 2004, 25 (2): 1-4.
Lin C X, Zhang J J, Gu N J. X-ray analysis for stress-induced martensitic transformation in Fe-Mn-Si based shape memory alloy [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2004, 25 (2): 1-4.

Wear Resistance of Fe-Mn-Si Shape Memory Alloy

L N Cheng-xin¹, WANG Gui-xin², WU Yan-dong³, WANG Jin-gang³

(1. *Electromechanics and Materials Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;*

2. *School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China;*

3. *School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)*

Abstract: Alloy of Fe-16.86Mn-4.50Si-10.30Cr-4.20Ni was melted in a vacuum induction furnace. Wear characteristics of the alloy were investigated by means of M-200 friction wear test. Wear mechanism of the experimental alloy was analyzed by XRD and SEM. Results show that the alloy exhibits better wear resistance in oil lubrication than that in dry friction, and wear loss of the alloy does not increase with increasing friction load. Compared with 1Cr-18Ni-9Ti stainless steel, the alloy exhibits lower wear resistance in dry friction and it exhibits better in oil lubrication. There are large amount of ϵ martensites in the worn surface of Fe-17Mn-5Si-10Cr-4Ni alloy after oil lubrication, but there is no ϵ martensite in the worn surface of the alloy after dry friction. Stress-induced $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensitic transformation leads to different wear mechanisms of Fe-Mn-Si alloy in dry friction and oil lubrication, and that is the reason of the alloy for excellent wear resistance in oil lubrication.

Key words: Fe-Mn-Si shape memory alloy, wear resistance, stress-induced $\gamma \rightarrow \epsilon$ martensitic transformations

Author: L N Cheng-xin, male, born in 1963, Ph D., Professor, e-mail: lch_xin@126.com