

7050 铝合金表面亚微米晶层摩擦磨损性能*

杨祥伟¹, 揭晓华¹, 曾旭钊², 林焕立², 黄展原²

(1. 广东工业大学 材料与能源学院, 广州 510006; 2. 广东巨轮股份有限公司, 广东 揭阳 515500)

摘要: 采用增压喷丸方式在 7050 铝合金表面制备了亚微米晶层, 观察并分析了亚微米晶层的组织结构, 测试了喷丸前后的硬度, 研究了亚微米化前后以及亚微米化后经退火处理 3 种状态下 7050 铝合金表面的滑动磨损特性, 结果表明: 由于增压喷丸使 7050 铝合金表面发生了严重的塑性变形而形成了一层厚度为 30 ~ 40 μm 的亚微米晶层, 硬度比未喷丸材料提高了 2 倍, 喷丸后材料的磨损失重量明显减少, 约为未喷丸处理试样的一半, 特别是喷丸后经过退火的材料磨损失量更小, 表现出良好的耐磨性能。

关键词: 增压喷丸; 表面亚微米化; 7050 铝合金; 滑动磨损性能

中图分类号: TG175.3; TG115.58 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9289(2011)03-0038-05

Wear Performance of the Micro-crystallization Layer on the Surface of 7050 Al Alloy

YANG Xiang-wei¹, JIE Xiao-hua¹, ZENG Xu-zhao², LIN Huan-li², HUANG Zhan-yuan²

(1. Faculty of Material and energy, Guang dong University of technology, Guangzhou 510006; 2. Guang dong Greatoo Moulds Inc, Jieyang Guangzhou 515500)

Abstract: The micro-crystalline layer on the surface of 7050 Al alloy was obtained by the added-pressure shot peening process. The microstructure features of the surface layer were characterized. The micro-hardness of samples before and after the shot peening was measured. Sliding wear performance of 7050 Al alloy was studied on the three kinds of conditions of untreated, shot peening and after shot peening with annealing. The results showed that after shot peening treatment, serious plastic deformation of 7050 Al alloy was produced and formed micro-crystallization layer with the thickness about 30 ~ 40 μm . The micro-hardness rased 2 times more than that of untreated samples. Wear loss Samples with shot peening decreased with half of the untreated samples, and after annealing of samples with shot peening, wear loss was even becoming more smaller, which showed good wear performance.

Key words: added-pressure shot peening; surface micro-crystallization; 7050 Al alloy; sliding wear performance

0 引言

近年来,通过各种技术在多种金属材料表面制备纳米晶外层的研究已有大量报道,如采用表面机械加工方法在工业纯铁^[1]、低碳钢(Q 215、20 钢、10 钢)^[2-5]等材料表面获得了纳米晶外层;Zhu 等^[6]用表面机械研磨处理在 α -Ti 表面实现了纳米化;Liu^[7-8]等分别采用高能喷丸和超声喷丸在低碳钢和 316 不锈钢表面制备出纳米组织;巴德玛等用超音速微粒轰击 45 钢实现表面纳米化^[9]。制备出的纳米材料在相关领域的应用研究也取得较大进展。但应当指出的是,表面喷丸纳米化技术容易使材料表面产生损伤,因

而限制了其工业化应用的范围,而适当降低喷丸力度,使材料表面获得亚微米晶层的研究还鲜见报道,文中通过控制喷丸压力、弹丸直径、喷丸时间,在 7050 Al 合金表面获得了亚微米晶外层,研究了亚微米晶层的摩擦磨损性能。

1 试验材料与方法

1.1 试样制备

试验材料是 7050 铝合金,主要化学成分如表 1 所示。尺寸为 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 10 mm 块状铸态铝合金样品,先用丙酮和酒精进行超声波振荡清洗,然后采用喷丸对 7050 铝合金表面进行亚微米化处理,喷丸直径为 0.3 mm 的不锈钢钢丸,喷丸压力为 0.45 MPa,喷丸时间为 10 min,所用设备为 1010FK 型喷丸试验机。

收稿日期: 2011-03-03; 修回日期: 2011-05-23

基金项目: * 广东省教育部产学研结合项目(2009B090300119)

作者简介: 杨祥伟(1982—),男(汉),湖北武汉人,硕士生。

表 1 7050 铝合金化学成分(质量分数/%)

Table 1 7050 Al alloy chemical ingredients (w/%)

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
含量	0.12	0.15	2.0~2.6	0.1	1.9~2.6
元素	Cr	Zn	Ti	Zr	Al
含量	0.04	5.7~6.7	0.06	0.08~0.15	其它

1.2 试验方法

采用 SEM 观察变形层厚度,然后用 SEM 对横截面进行形貌分析。根 Scherrer - Wilson^[10-11] 方程近似计算出平均晶粒尺寸。采用 MVK-H3 型显微硬度计测量喷丸前后及退火后的硬度,并测试样品喷丸后表面至心部的硬度变化。摩擦磨损试验所用设备为 MPX-2000 型盘一销式摩擦磨损试验机,主轴转速 400 r/min,载荷 100 N, 10 号机油润滑,在室温条件下进行。摩擦副为退火态 45 钢。进行磨损试验前用酒精清洗试样,利用失重法比较原始样品与喷丸后样品的磨损量,并结合扫描电镜进行形貌观察并分析其摩擦磨损机制。磨损质量损失用精度为 0.1 mg ANDHR-200 型电子天平称测量。

2 试验结果与讨论

2.1 亚微米晶晶粒尺寸计算

采用 XRD 观察 Bragg 峰宽化,喷丸处理 20 min 和 10 min 后 X 射线连续扫描的谱线,图 1 是相应的样品晶面 (110) 和 (220) 步进扫描的衍射峰。从图中可以看出,与未经过处理的样品相比,喷丸后样品 X 射线的 Bragg 峰明显宽化。

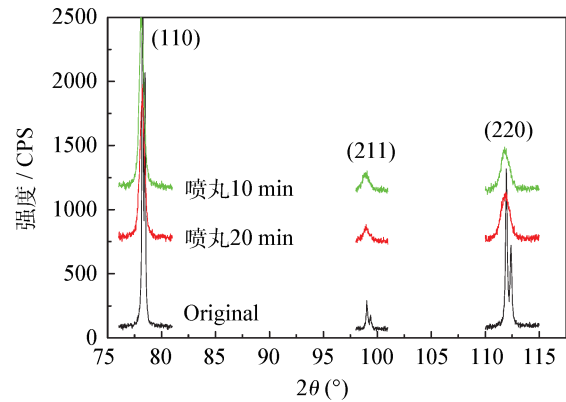


图 1 不同处理条件下样品的 X 射线衍射图

利用 Scherrer - Wilson^[10-11] 方程近似计算出平均晶粒尺寸,如公式(1)(2)所示:

$$\left(\frac{B\cos\theta}{\lambda}\right)^2 = \frac{1}{D^2} + 16\varepsilon^2\left(\frac{\sin\theta}{\lambda}\right)^2 \tag{1}$$

其中 B 为半峰宽, D 为晶粒尺寸, θ 为衍射角, $\lambda = 0.154184 \text{ nm}$, ε 为微观应变。实际宽化用式(2) 计算:

$$B^2 = B_m^2 + B_s^2 \tag{2}$$

其中 B 为晶粒细化和微观应变引起的峰宽化, B_m 为实测宽化, B_s 为仪器宽化,试验用标样制作仪器半高宽补成曲线,扣除仪器宽化。近似计算出喷丸后平均晶粒尺寸约为 100 nm。

2.2 亚微米晶层形貌分析

用 SEM 观察喷丸后塑性变形层的厚度,由图 2 可以看出,经过增压喷丸处理后,试样表面的附近区域均产生了一定厚度的塑性变形层,大约为 30~40 μm 。

试样表面产生塑性变形层是由于当单个具有很高动能的微粒轰击到金属表面时,轰击部位发生辐射状流变,当轰击力超过金属的屈服极限 ($\sigma_{0.2}$) 时,形成不可逆的永久性微凹坑,合金表面形成塑性变形层。当位错产生和湮灭的速度达到平衡时,不会因为应变的增加而使晶粒尺寸继续下降,从而使晶粒尺寸达到了稳定值^[13]。所以只有应变增加到一定程度,才能获亚微米组织。

2.3 亚微米层的磨损性能

图 3 为 7050 铝合金表面喷丸前后的表面磨损质量损失随时间的变化。可以看出磨损质量损失均随磨损时间的延长而增大,但在开始阶段(1 h 之前)原始样品的磨损速率明显大于喷丸亚微米化的样品。原始样品的磨损速率在 1 h 后基本稳定,而亚微米化后的样品在 2 h 之后逐渐趋向稳定。原始样品在开始时磨损速率高可能受表面粗糙度的影响。随时间的延长磨损因数趋于稳定,磨损速率也就趋于稳定。从图中还可看出,随磨损时间的延长,表面亚微米化后样品的磨损质量损失明显低于原始样品,由此可见,在低载荷和润滑条件下,表面亚微米化提高了样品的耐磨性能。100 $^{\circ}\text{C}$ 下喷丸退火 1 h 后的磨损质量损失明显低于喷丸样品,这可能由于温度升高,合金表面发生氧化生成致密的氧化铝薄膜,而氧化铝具有很高的硬度,对合金耐磨性提高有

Fig. 1 X-ray diffraction of the samples under different pretreatment conditions

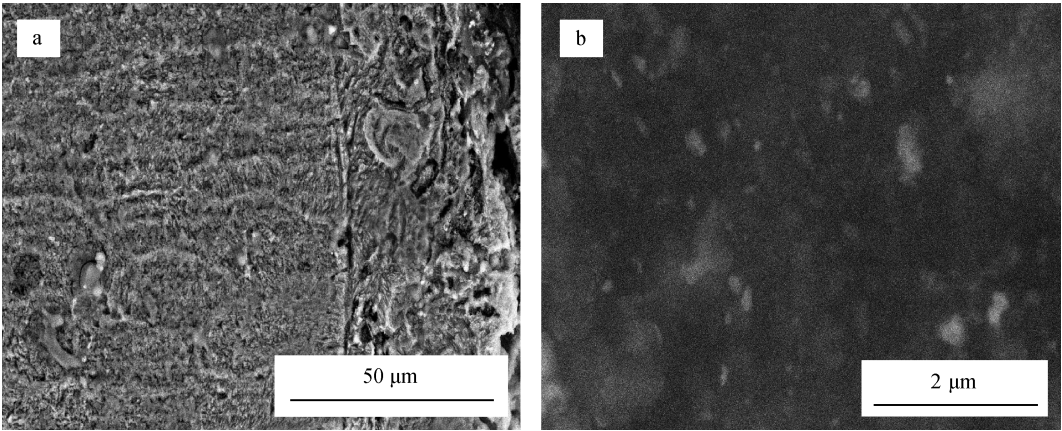


图 2 喷丸后样品变形层厚度(a)及(SEM)表面形貌(b)

Fig. 2 Deformation layer thickness (a) and surface morphology (b) of the samples after shot peening

一定的贡献;其次,退火会减小喷丸产生的残余应力,如果应力过大会使合金表面产生裂纹,而裂纹会降低摩擦磨损性能。

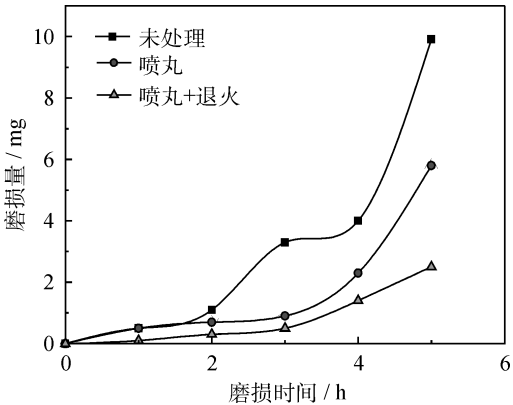


图 3 磨损质量损失随磨损时间的变化

Fig. 3 Changes in the surface wear loss with wear time

采用失重法衡量经增压喷丸处理与未处理样品的耐摩擦磨损性能,从图 3 可以看出增压喷丸后,试样的磨损量明显减少,而喷丸后经过退火的样品磨损量就更小了。从图 4 试样磨损痕迹图的照片可以看出,未经增压喷丸处理的试样表面的犁沟深且磨痕间隔紧密,而喷丸亚微米化后的表面犁沟较浅且磨痕间隔稀松,亚微米化并退火后的表面犁沟更浅,磨痕间隔就更少了。这可能是由于表面生成了致密的氧化铝膜和退火减小了残余应力两方面共同作用的结果。总之,材料表面耐磨性的提高应该是表面亚微米化后材料的表面硬度提高和亚微米表面具有较高的表面活性而容易吸附油膜,使得轰击过的样品在油润滑的条件下比轰击样品表现出优异的耐磨性能。

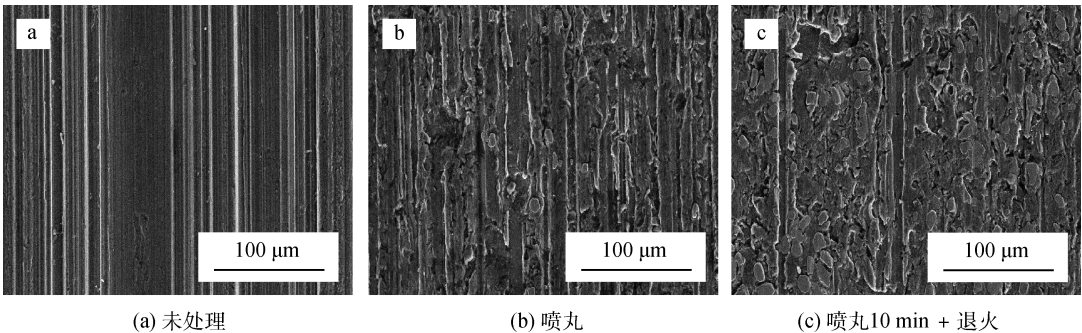


图 4 试样磨损痕迹图

Fig. 4 Morphologies of the samples after wear testing

2.4 亚微米晶层的摩擦因数分析

摩擦因数是构件表面摩擦学的重要参数,也是对构件表面耐磨性的间接反应。故设计了一

个湿摩擦试验,比较增压喷丸表面亚微米化样品与未处理样品的摩擦因数,试验在 MPX-2000 型盘销式摩擦磨损试验机上进行,载荷选用 100 N,

10 号机油润滑。根据库仑定律:

$$F = \mu \times N \quad (1)$$

式中 F 是摩擦力; μ 是摩擦因数; N 是正压力。

正压力是试验时的载荷值。摩擦力矩 M 由试验机的控制装置的面板上读, $M = \text{格数} \times 0.04$, 其中每格代表 $0.04 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。摩擦力乘以试样摩擦半径 0.013 m 就是本试验机所测得的摩擦力矩 M (牛顿·米):

$$M = 0.013 \times F = 0.013 \times \mu \times N \quad (2)$$

故摩擦因数 μ 可以由式(3)计算得到。

$$\mu = \frac{M}{0.013 N} \quad (3)$$

2.5 摩擦因数与磨损过程的关系

从图 5 中可以看到未经喷丸处理样品一开始摩擦因数较大, 约经 200 s 随后逐渐减少, 从 0.09 下降到 0.03 左右后基本趋于稳定; 而经喷丸表面亚微米化处理后的样品, 摩擦因数的变化从一开始就比较平稳, 在 0.02 附近徘徊, 基本进入相对稳定阶段。这个现象可以通过文献^[13]理解, 试样在磨损过程中, 先经过磨合阶段, 再进入稳定磨损阶段。磨合阶段是表面不断被磨平, 实际接触面积不断增大的过程, 摩擦因数较大, 随着磨损的进行, 接触面积趋于稳定, 摩擦因数也逐渐减少并趋于稳定。因为经喷丸表面亚微米化处理后的样品的表面粗糙度 ($R_a \approx 0.8$) 较未处理样品粗糙度 ($R_a \approx 2.0$) 大, 使得经喷丸表面亚微米化处理后的样品很快进入相对稳定阶段, 并且摩擦因数未出现相对较大的波动。而退火后, 由于减小了表面残余应力, 在刚开始阶段, 会使摩擦因数减小, 然后进入相对稳定期, 摩擦因数有所回升, 而表面生成的致密氧化铝膜, 使得摩擦因数进一步减小, 接下来才进入稳定的磨损阶段。

2.6 硬度对摩擦因数的影响

喷丸表面亚微米化处理后的样品的摩擦因数明显小于未经喷丸处理的样品, 这主要是因为喷丸表面亚微米化后, 样品的表面硬度明显提高 (这一点可从下图 6 得到证实)。再者, 亚微米表面具有表面活性而容易吸附油膜, 从而有效降低了摩擦因数。图 6 是样品经喷丸后, 退火前后硬度随厚度方向的变化曲线, 从图中可以看到硬度从表面到心部呈阶梯形分布, 与心

部组织相比, 硬度提高了 $20\% \sim 40\%$ 。故可认为表面硬度的提高可归结为晶粒细化和加工硬化的共同作用, 说明表面亚微米化对材料表面的强化有一定的贡献。而退火样品硬度提高 (见图 6) 是由于表面致密的氧化铝膜和残余应力减小共同作用的结果。

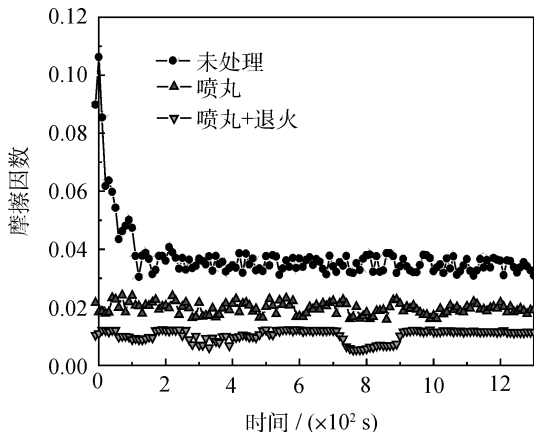


图 5 喷丸前后摩擦因数随时间的变化

Fig. 5 Changes in friction coefficient with time before and after the shot peening

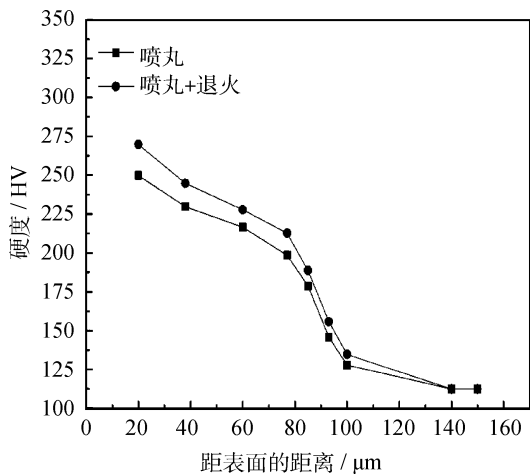


图 6 退火前后硬度随厚度方向的变化

Fig. 6 changes in hardness with thickness direction before and after annealing

3 结 论

(1) 采用增压喷丸方式可使 7050 铝合金表面获得约 $30 \sim 40 \mu\text{m}$ 厚的亚微米晶层, 表面硬度比基体提高 2 倍。

(2) 在载荷 100 N 、10 号机油润滑的条件下, 样品喷丸亚微米化后试样的磨损量明显减少, 约为未处理试样的一半, 退火后磨损量进一步减

小。并且样品的摩擦因数由 0.4 下降到 0.2, 退火后摩擦因数进一步减小。

(3) 样品喷丸亚微米化后进行退火处理, 残余应力减小, 其与表面致密的氧化铝膜共同作用, 使合金退火后硬度没有减少反而增大, 在载荷 100 N、10 号机油润滑的条件下, 表现出良好的耐磨性能。

参考文献

- [1] 张立德, 牟季美. 纳米材料和纳米结构 [M]. 科学出版社, 2001 年 2 月.
- [2] 卢柯, 周飞. 纳米晶体材料的研究现状 [J]. 金属学报, 1997, 33(1): 99.
- [3] Lu K, Wang J T, Wei W D. A new method for synthesizing nanocrystalline alloys [J]. J Appl Phys, 1991, (69): 522.
- [4] 邓忠民, 洪友士, 朱展. SPD 纳米材料制备方法及其力学性能 [J]. 力学进展, 2003, 33(1): 56.
- [5] Tao R N, Wang Z B, Tong W P, et al. An investigation of surface nanocrystallization ion mechanism in Fe by surface mechanical attrition treatment [J]. Acta Mater, 2002, 50: 4603.
- [6] 冯淦, 石连捷, 吕坚, 等. 低碳钢超声喷丸自纳米化的研究 [J]. 金属学报, 2000, 36(3): 300.
- [7] Gu J F, Bei D H, Pan J S, et al. Improved nitrogen transport in surface nanocrystallized low carbon steels during gaseous nitridation [J]. Mater Lett, 2002, 55:

340.

- [8] Liu G, Wang S C, Lou X F, et al. Low carbon steel with nanostructured surface layer induced by high energy shot peering [J]. Scr Mater, 2001, 44(8): 1791.
- [9] 王镇波, 雍兴平. 表面纳米化对低碳钢摩擦磨损性能的影响 [J]. 金属学报, 2001, 37(12): 1251.
- [10] Liu G, Lu J, Lu K, et al. Surface nanocrystallization of 316 stainless steel induced by ultrasonic shot peening [J]. Mater Sci Eng, 2000, A286: 91.
- [11] 张洪旺, 刘刚, 黑祖昆, 等. 表面机械研磨诱导 AISI304 不锈钢表层纳米晶化 I——组织与性能 [J]. 金属学报, 2003, 39(4).
- [12] 徐滨士. 表面纳米工程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004, 352-353; 373-375.
- [13] 麦永津. Al-Mg 合金轮胎模具材料表面增压喷丸纳米化的研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2009.
- [14] 堀茂德, 赵镛浩. 铜合金新的退火硬化现象 [J]. 金属热处理学报, 1990, 11(3): 48-55.

作者地址: 广州市广东工业大学

510006

大学城校区外环西路 100 号

Tel: 136 4231 3546

E-mail: yangxiangwei@126.com

• 学术动态 •

第十届全国摩擦学大会将于武汉召开

根据中国机械工程学会摩擦学分会工作条例和 2010 年 10 月 9 日中国机械工程学会摩擦学分会第七届常务理事会的决定, 定于 2011 年 11 月在武汉召开第十届全国摩擦学大会。大会的主题是“面向节能环保的摩擦学问题”。会议将通过学术活动和产品展示交流我国摩擦学界在摩擦学研究和应用方面取得的最新成果。会议期间将对摩擦学分会第七届理事会四年来的工作进行总结, 同时还将产生中国机械工程学会摩擦学分会第八届委员会。会议将邀请摩擦学领域的院士、专家和有关部委及省市领导出席。有关媒体将对会议举行全程报道。

欢迎广大在企事业、高等院校和研究机构从事摩擦学研究和应用的摩擦学工作者踊跃参加本次大会和投稿, 促进我国摩擦学科学、工程及技术的发展。2011 年 9 月 30 日前请将论文详细摘要或论文主要内容的全文的电子版通过 E-Mail 邮寄至大会秘书组 (tribo@cmes.org), 请注明会议论文。另外, 摩擦学分会网站将在近期开通网上投稿平台, 请关注摩擦学分会网站“中国摩擦学信息网”, 网址: <http://www.cntribo.org>

联系人: 白秀琴 邮 箱: tribo@cmes.org

电 话: 027-8654 9879; 138 7120 3123

(王文字 供稿)