doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2012.01.005

# 表面纳米化 7A52 铝合金在油润滑条件下的耐磨性能\*

马世宁,王 翔,王晓明

(装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室,北京 100072)

**摘** 要:采用高速颗粒轰击技术在 7A52 铝合金表面制得一定厚度纳米结构表层,利用扫描电子显微镜和 透射电子显微镜观察了表面纳米晶层的微观结构特征,利用多功能纳米压痕仪和往复式摩擦磨损试验机测 试了样品表面纳米化前后的硬度和耐磨性能。结果表明:7A52 铝合金经高速颗粒轰击处理后样品表层形 成了厚度约 90 μm 塑性变形层,最表层晶粒尺寸约为 8~20 nm;表面纳米晶层的显微硬度约为原始样品的 1.76 倍;在油润滑的低载荷和中等载荷条件下,表面纳米化抛光样品的磨损量为原始样品的 1/2~1/3;表面 纳米化样品的磨损机制为磨粒磨损和黏着磨损,而原始样品的磨损机制为黏着磨损和疲劳磨损,表明其具有 优异的耐磨性能。

关键词:高速颗粒轰击技术;表面纳米化;7A52铝合金;耐磨性

中图分类号: TG174.4; TG115.58 文献标识码: A 文章编号: 1007-9289(2012)01-0028-05

## Wear Properties of 7A52 Alloy Aluminum After Surface Nanocrystallization in Oil Lubricating

MA Shi-ning, WANG Xiang, WANG Xiao-ming

(Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: Nanocrystallization surface layer was fabricated by means of high speed particles bombarding on the surface of 7A52 aluminum alloy. The microstructure features of surface nanocrystalline layer were characterized by Scan Electron Microscropy (SEM) and Transmission Electron Microscropy (TEM). The microhardness of the sample before and after high speed particle bombording was measured by nano-indentation and the wear performance was studied by tribometer. The result is that the deformation layer with the thickness about 90  $\mu$ m was formed and the size of grain on the top surface was about 8~20 nm after the sample was bombarded by supersonic fine particle; the micro-hardness of the surface nanocrystalline layer was 1.7 times more than that of the original sample. Under low loads, middle loads and lubricated conditions, the wear loss was about  $1/2 \sim 1/3$  of the original sample. The wear mechanism of surface nanocrystallization sample which showed good wear performance is abrasive and adhesive wear, while the wear mechanism of the original sample is adhesive and fatigue wear.

Key words: high speed particle bombarding; surface nanocrystallizaton; 7A52 aluminum alloy; wear resistance

#### 0 引 言

金属表面自身纳米化是采用非平衡处理方 法增加多晶材料表面自由能,使粗晶组织逐渐细 化至纳米量级<sup>[1]</sup>。金属表面自身纳米化采用传统的表面加工与热处理技术(或对其改进)即可 实现,在工业应用上不存在明显障碍,且所制备 的纳米晶层与基体之间无界面,不会发生剥层与

收稿日期: 2011-09-27;修回日期: 2011-10-30;基金项目: 装备维修产研资助(代号略)

作者简介:马世宁(1941-),男(汉),北京人,教授;研究方向:维修工程、表面工程

网络出版日期: 2012-02-13 22:22; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120213.2222.008.html 引文格式:马世宁,王翔,王晓明.表面纳米化7A52 铝合金在油润滑条件下的耐磨性能[J].中国表面工程,2012,25(1):28-32.

分离,因此具有广阔的应用前景。常用的表面自 身纳米化法有表面机械研磨、超音速微粒轰击、 超声冲击等<sup>[2]</sup>。

高速颗粒轰击技术可对大面积、复杂形状的 零件进行表面纳米化处理,具有效率高、成本低、 无污染等优点,是一种有效的表面自身纳米化技 术。目前该技术已在316L不锈钢、40Cr钢等<sup>[3-4]</sup> 多种金属材料上实现了表面纳米化,但关于铝合 金表面纳米化报道很少。文中采用高速颗粒轰 击技术对7A52铝合金进行表面纳米化处理,利 用扫描电子显微镜、透射电子显微镜等分析技术 研究了表面纳米晶层的微观结构特征,并用多功 能纳米测试仪、往复式摩擦磨损试验机测试了样 品表面纳米化前后的硬度和耐磨性能。

### 1 试验材料和方法

试验材料为经自然时效处理的 7A52 铝合金, 化学成分(元素质量分数)为 0.25%Si,0.30%Fe, 0.05%~0.20%Cu,0.20%~0.50%Mn,2.00%~ 2.80%Mg,0.15%~0.25%Cr,4.00%~4.80% Zn,0.05%~0.18%Ti,0.05%~0.15%Zr、余 量 Al。

首先试样经线切割加工 25 mm×20 mm× 10 mm 的块状,并用磨床将两面磨平;其次采用 丙酮对试样进行超声波清洗,以除去表面油污; 最后采用高速颗粒轰击技术对试样进行表面纳 米化处理,实验装置如图 1 所示,表面纳米化主 要工艺参数如下:空气进口压力为 0.7 MPa,进 口温度为 300 K;颗粒为直径 0.3 mm 不锈钢弹 丸;轰击角度为 90°,轰击时间为 120 s。



图1高速颗粒轰击装置示意图

Fig. 1 Schematic of high speed particle bombarding device

利用 QUANTA 2000 型扫描电子显微镜观察 7A52 铝合金高速颗粒轰击前后样品横截面的显 微形貌变化;利用 JEOL-2000FX 型透射电子显微 镜统计样品最表面层的晶粒大小,工作电压 160 kV,金属薄膜样品经机械研磨和离子减薄 制成。

利用 NANOTEST PLATFORM 型多功能 纳米仪测量表面纳米化样品从表面至基体的硬 度变化以及未处理样品的显微硬度。

往复滑动摩擦磨损实验在 MS-T4000 摩擦磨 损试验机上运行。摩擦副接触形式为点接触,对 磨偶件为 Φ 5 mm 的 GCr15 钢球,硬度为 770 HV。 试验前采用 2000 号碳化硅砂纸轻微打磨表面纳米 化样品和显微样品表面。油润滑条件下摩擦磨损 性能测试试验条件:45 号机油润滑,以涂抹在试 样表面形式在室温、大气环境条件下进行,载荷 分别为 15 N、20 N、25 N、30 N,摩擦频率 4 Hz, 摩擦时间为 10 min。采用精度为 0.1 mg AND-200 型 的 电 子 天 平 计 算 质 量 磨 损 量;采 用 QUANTA 2000 型扫描电子显微镜观察磨痕形 貌以分析磨损机制。

#### 2 试验结果与分析

#### 2.1 显微组织

图 2 为 7A52 铝合金高速颗粒轰击(简称 SFPB)后样品横截面的显微形貌。从图中可以 看出,试样经高速颗粒轰击处理后,试样表层发 生了强烈的塑性变形,靠近表面塑性变形程度较 大,如表层材料发生了剥落以致表层变得凹凸不 平,且表层出现了微裂纹;塑性变形在局部范围 内沿各个方向随机发生,塑性变形沿厚度方向逐 渐减弱,塑性变形层的厚度不均匀,约为 90 μm; 与基体区域内的纤维状组织相比,塑性变形区域 内组织比较均匀致密。



图 2 7A52 铝合金高速颗粒轰击后横截面的显微形貌 Fig. 2 Cross - sectional morphology of 7A52 aluminum alloy after high speed particles bombarding

图 3 为 7A52 铝合金高速颗粒轰击后样品最 表面层 TEM 像。由图中明场像和暗场像可见, 样品表面晶粒已细化至纳米量级,晶粒形状不规 则以及晶粒大小不均等,晶粒尺寸为 8~20 nm, 平均晶粒尺寸约为 16 nm;内部衍射环由相对连 续的衍射斑点组成,外部衍射环由不连续衍射斑 点组成,表明晶粒尺寸较分散,纳米晶的取向是 随机的<sup>[5]</sup>。



(a) Bright field image



(b) Dark field image and diffraction ring

图 3 7A52 铝合金高速颗粒轰击后最表层 TEM 像 Fig. 3 TEM images of top surface layer of 7A52 aluminum alloy after high speed particles bombarding

#### 2.2 显微硬度

图 4 为 7A52 铝合金表面纳米化前后样品横 截面的显微硬度沿厚度方向的变化。从图中可 以看出,表面纳米化样品的显微硬度约为 3.736 GPa,原始样品的显微硬度约为 2.127 GPa,提高了约 76%。从图中还可以看 出,样品经表面纳米化处理后,从表面至基体,显 微硬度逐渐减小,并趋于稳定。其中在距表面约 20 μm 区域内,显微硬度下降较缓慢,主要原因 是该区域内表面应变速率较高,塑性变形较大, 晶粒细小;在距表面约 20~60 μm 区域内,显微 硬度迅速下降,主要原因是该区域内应变速率下 降,塑性变形沿厚度方向减弱,晶粒增大;在距表 面约 60~90 μm 区域内,显微硬度逐渐趋于稳 定,主要原因是该区域内塑性变形很弱,晶粒粗 大。这表明晶粒细化是表面纳米化样品显微硬 度提高的主要原因<sup>[6]</sup>。



图 4 7A52 铝合金表面纳米化前后样品的显微硬度 Fig. 4 Micro - hardness of 7A52 aluminum alloy before and after surface nanocrystallization

#### 2.3 耐磨损性

图 5 为 7A52 铝合金表面纳米化前后在不同 载荷下的磨损质量损失。从图中可以看出,两种 样品的磨损量均随载荷的增大而增加,其中表面



图 5 7A52 铝合金表面纳米化前后在不同载荷下质量磨 损量损失

Fig. 5 The mass wear loss of 7A52 aluminum alloy before and after surface nanocrystallizaton under different loads 纳米化样品的磨损量明显小于原始样品的磨损 量,如当载荷由 25 N 增大到 30 N时,原始样品 的磨损量由 1.62 mg 变为 2.78 mg,表面纳米化 样品的磨损量由 0.61 mg 变为 1.13 mg。这表 明在油润滑的低载荷和中等载荷下,表面纳米化 样品表现出优异的耐磨性能。

图 6 为原始抛光样品和 7A52 铝合金表面纳 米化抛光样品在油润滑、载荷为 15 N和 25 N条 件下的磨痕形貌。从图中可以看出,当载荷为 15 N时,原始抛光样品的表面出现了许多微裂纹 和少量的剥落,磨损机制表现为典型的疲劳磨 损;表面纳米化抛光样品表面有沿滑动方向的犁 沟,犁沟小而浅,以及轻微的片状剥层,磨损机制 主要表现为磨粒磨损<sup>[7-8]</sup>。当载荷为 25 N时,原 始抛光样品表面的部分区域遭到严重破坏,裂纹 较深,剥落较多且较明显,磨损机制为疲劳磨损 和剥层磨损;表面纳米化抛光样品表面沿滑动方 向的犁沟较深和微观切削形成的沟槽较宽,并且 出现了微裂纹,磨损机制为磨粒磨损和黏着 磨损<sup>[9]</sup>。

在油润滑的低载荷和中等载荷条件下,磨损 质量损失和磨痕形貌表明表面纳米化抛光样品 耐摩性能明显优于原始样品,主要原因是:①表 面纳米晶层表面存在大量的凹坑,其具有良好的 储油作用,当摩擦副相对运动时,摩擦表面温度 升高,润滑油受热发生膨胀从凹坑中溢出,润滑 膜厚度增加,起到良好的润滑作用;②表面纳米 晶层具有较高的表面活性,容易吸附油膜<sup>[10]</sup>;③ 表面纳米晶层较高硬度提高了样品表面抗磨粒 压入能力;④表面纳米化晶层的残余压应力抵消 了摩擦力所引起的一部分拉应力,阻碍了疲劳裂 纹在表层形核;⑤表面纳米晶层的组织有效地阻 止了疲劳裂纹在表层的萌生,且心部的粗晶组织 抑制了裂纹的扩展。



图 6 原始抛光样品(a)、(c)和表面纳米化抛光样品(b)、(d)在不同载荷下的磨痕形貌 Fig. 6 Wear morphologies of the original polished sample (a),(c) and surface nanocrystallization polished sample (b), (d) under different loads

#### 3 结 论

(1)利用高速颗粒轰击技术在 7A52 铝合金
表面制得约 90 μm 塑性变形层,最表层晶粒尺寸
约为 8~20 nm。

(2)随着载荷的增加,表面纳米化样品的磨损机制由磨粒磨损转为黏着磨损,表面纳米化减弱了原始样品的黏着磨损和疲劳磨损。

(3)在载荷为25N的油润滑条件下,表面纳 米化抛光样品耐磨性能明显提高,主要原因是表 面纳米晶层较高的表面活性、高硬度和残余压 应力。

### 参考文献

- [1] 徐滨士. 纳米表面工程 [M]. 化学工业出版社, 2004.
- [2] 杨银辉, 严彪, 张俊宝, 等. 金属材料表面自身纳米化研究 进展[J]. 材料导报, 2009, 23(11): 17-21.
- [3] 熊天英,李铁潘,吴杰,等. 超声速微粒轰击金属材料表 面纳米化方法[P]. 中国发明专利: CN 1410560A, 2003.
- [4] 葛丽玲, 路彩虹, 井晓天, 等. 40Cr 钢表面纳米化组织与

性能的研究 [J]. 表面技术, 37(2): 11-14.

- [5] 路彩虹,井晓天,葛利玲,等. 40Cr 钢表面纳米化的研究 [J]. 西安理工大学学报,2008,24(4):480-484.
- [6] 逯瑶,陈芙蓉,解瑞军,等.7A52 铝合金焊接接头高能喷 丸前后的性能分析[J]. 兵器材料科学与工程,2010,33 (2):8-11.
- [7] 黄平.摩擦学教程 [M]. 高等教育出版社, 2008.
- [8] 杨祥伟,揭晓华,曾旭钊,等.7050 铝合金表面亚微米晶 层摩擦磨损性能[J].中国表面工程,2011,24(3): 38-43.
- [9] Cai Zhen-bing, Zhu Min-hao, Lin Xiu-zhou. Friction and wear of 7075 aluminum alloy induced by torsional fretting [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2010: 371-376.
- [10] 何静. 7A52 超硬铝合金焊接接头表面纳米化的试验研究 [D]. 内蒙古工业大学硕士学位论文,2009.

作者地址:北京市丰台区杜家坎 21 号 100072
装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室
Tel: 132 6186 8096(王翔)
E-mail: wangxiang198608@126.com

#### 第 20 届国际热处理及表面工程联合会大会征文通知

国际热处理与表面工程联合会(IFHTSE)于 1971 年成立于瑞士,其成员包括多国相关行业的科学 和技术学会、协会团体和热处理及表面工程领域的著名跨国公司等,其核心职能是促进热处理及表面 工程领域在科学、实践和工业应用的重要问题进行国际交流。国际热处理及表面工程联合会大会是国 际热处理及表面工程联合会的系列会议之一,是国际热处理及表面工程领域水平最高的学术大会,至 今已举行了 19 届,在国际上具有广泛的影响。第 20 届国际热处理及表面工程联合会大会,将于 2012 年 10 月在中国北京召开。

第 20 届国际热处理及表面工程联合会大会由中国机械工程学会热处理学会主办,这是该系列会 议第三次在中国举行,1983年、2004年,中国机械工程学会热处理分会先后主办了第 3 届、第 14 届大 会,这两次大会向世界充分展示了我国热处理及表面工程领域的研究成果,促进了国际学术交流,提高 了我国在国际学术界的地位,扩大了影响,推动了学科发展和技术进步。时隔 8 年,我国在热处理及表 面工程领域又取得了多方面突破性进展,在国际学术界和业界占有重要地位。2012年金秋时节,借第 20 届国际热处理及表面工程联合会大会机会,诚挚邀请海内外学者及行业翘楚汇聚一堂,就热处理及 表面工程领域的最新研究成果及业界动态进行广泛、深入的交流和探讨。本次大会将秉承历届大会的 优良传统,涵盖热处理及表面工程领域的最新进展,云集世界各地学术界和工业界优秀代表,创造和谐 的学术研讨和信息交流的最佳氛围。预计本次会议将有 40 多个国家和地区约 500 人参加,会议已邀 请十几位国际著名学者和院士到会做特邀报告。欢迎国内外广大热处理及表面工程工作者踊跃参会 投稿,届时莅临大会一展风采。

征文具体要求参见 http://www.bmgc.org/pages/news\_detail.asp?id=1503