

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, 王小明

(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 Microscopy (SEM) and Transmission Electron Microscopy (TEM). The micro-hardness of the sample before and after high speed particle bombarding 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 μm 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 1/2~1/3 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 nanocrystallization; 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^[1]。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, 王小明. 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^[2]。

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^[3-4]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。

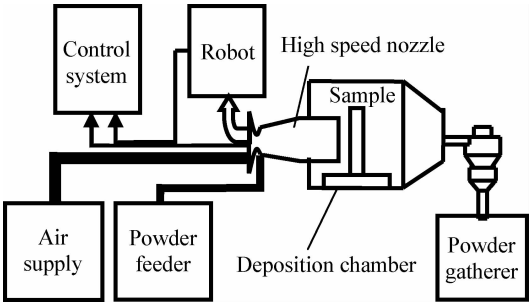


图 1 高速颗粒轰击装置示意图

Fig. 1 Schematic of high speed particle bombardment 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 $\Phi 5$ 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 μ m;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。

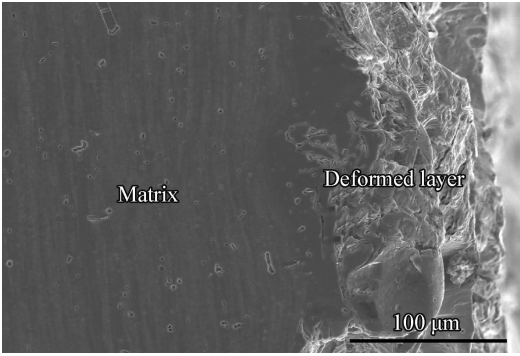
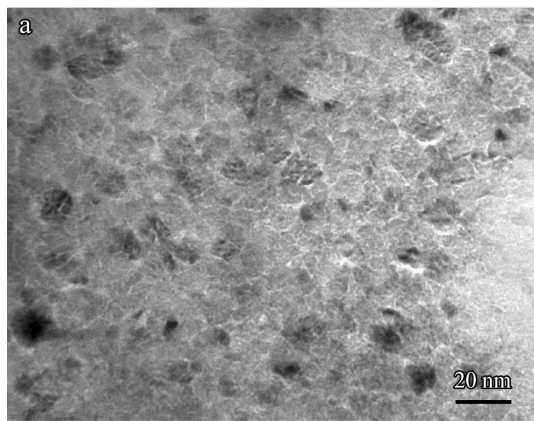
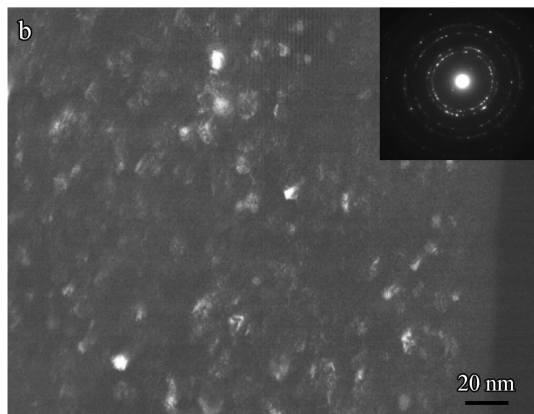


图 2 7A52 铝合金高速颗粒轰击后横截面的显微形貌
Fig. 2 Cross-sectional morphology of 7A52 aluminum alloy after high speed particles bombardment

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 $8 \sim 20 \text{ nm}$, 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^[5]。



(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面层 TEM 像
Fig. 3 TEM images of top surface layer of 7A52 aluminum alloy after high speed particles bombardment

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

$20 \mu\text{m}$ 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 $20 \sim 60 \mu\text{m}$ 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 $60 \sim 90 \mu\text{m}$ 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^[6]。

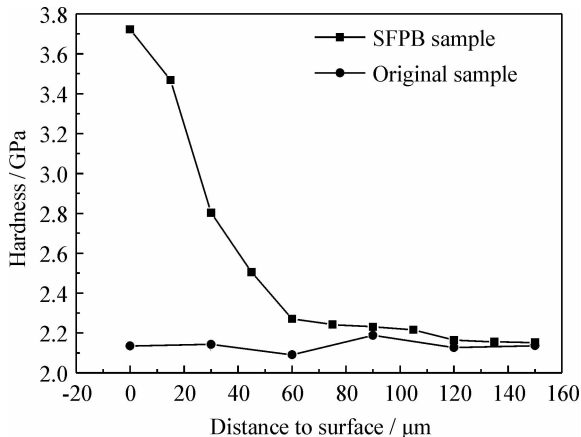


图 4 7A52 铝合金表面纳米化前后样品的显微硬度
Fig. 4 Micro-hardness of 7A52 aluminum alloy before and after surface nanocrystallization

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

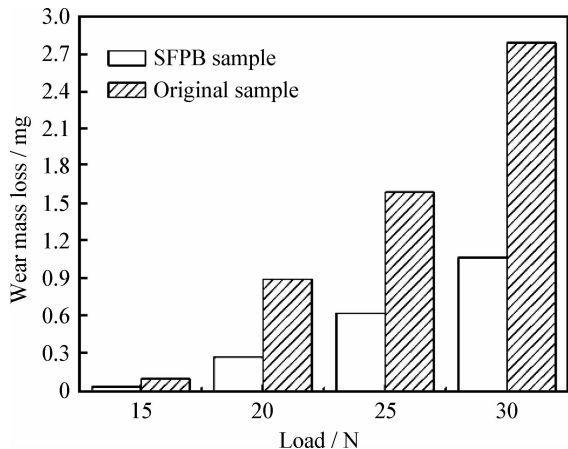


图 5 7A52 铝合金表面纳米化前后在不同载荷下质量磨损量损失
Fig. 5 The mass wear loss of 7A52 aluminum alloy before and after surface nanocrystallization under different loads

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^[7-8]。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^[9]。

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磨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^[10];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。

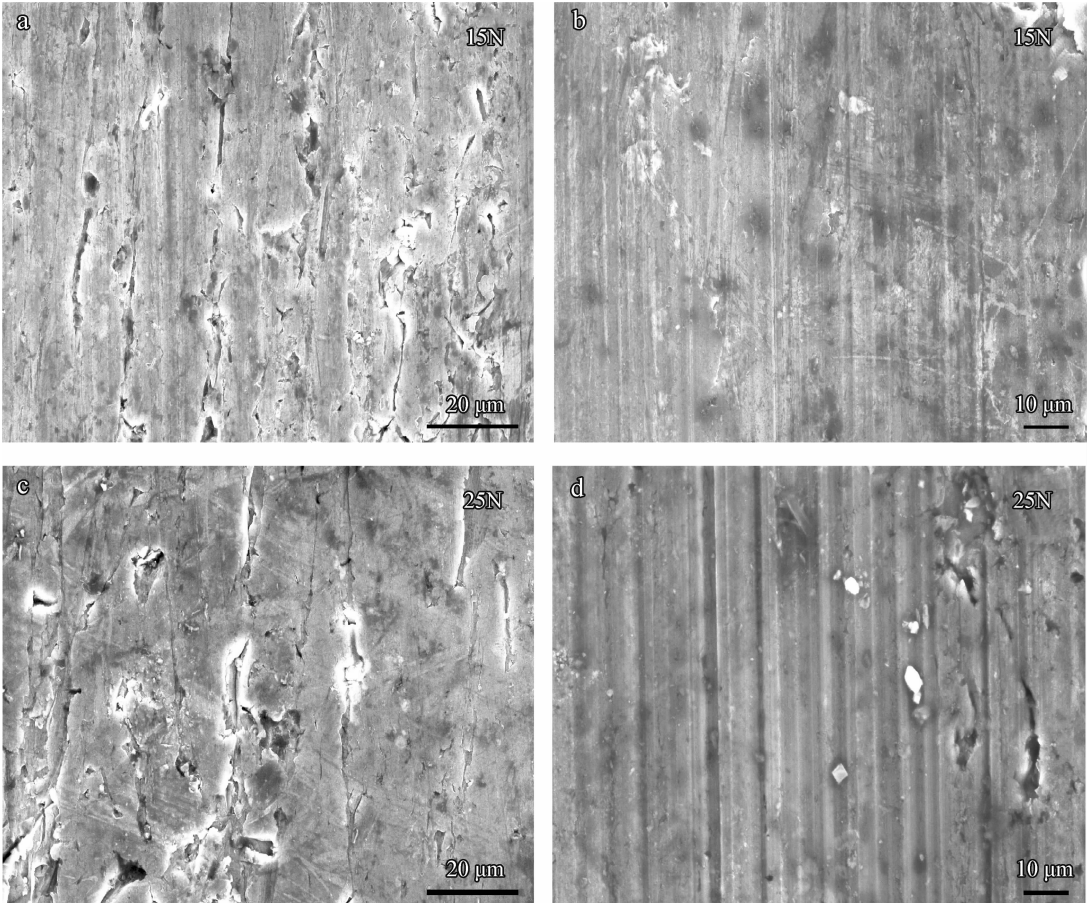


图 6 原始抛光样品(a)、(c)和表面纳米化抛光样品(b)、(d)在不同载荷下的磨痕形貌

Fig. 6 Wear morphologies of the original polished sample (a), (c) and surface nanocrystallization polished sample (b), (d) under different loads

(常青 供稿)