

表面纳米化对 7055 铝合金耐磨性能的影响

田 龙 张 伟

(安阳工学院机械工程学院, 安阳 453000)

摘 要 为了研究表面纳米化对 7055 铝合金耐磨性能的影响,利用高能喷丸(high energy shot peening, HESP)技术对 7055 铝合金材料进行表面纳米化处理;在 7055 铝合金表面获得纳米结构。利用透射电镜分析纳米化前后微观组织的变化,同时对纳米化材料表层进行残余应力及显微硬度测定,并采用球盘磨损试验机研究了纳米化表面对固定载荷条件下 7055 铝合金材料磨损性能的影响。结果表明:表面纳米化使 7055 铝合金材料表面发生严重塑性变形,材料表面分布较高幅值残余压应力,最大可达到 -369 MPa ,残余压应力层深度达 0.6 mm ;纳米化后试样显微硬度较基体提高了 50% 。摩擦磨损实验表明:表面纳米化从一定程度降低了 7055 铝合金材料表面摩擦系数,且磨损失重是未处理试样的 32% ,表明高能喷丸表面纳米化有效改善了 7055 铝合金材料的耐磨性能。

关键词 7055 铝合金 高能喷丸 表面纳米化 耐磨性能

中图分类号 TG178; **文献标志码** B

在实际工程应用中,各类机械零部件往往会因疲劳、摩擦、磨损等问题导致在远未达到设计使用寿命前失效破坏,经过调查发现,大量金属结构件的失效破坏多源于零部件的表面^[1];因此利用各种表面处理技术来改善金属构件材料表面耐摩擦、磨损和耐腐蚀性能,保证大型机械设备长期正常安全运行,从而延长机械设备的服役寿命对于工业生产具有极强的现实意义。

高能喷丸(high energy shot peening, HESP)通过将外部作用的机械能施加在金属材料表面,使得金属材料表面的原始粗晶组织细化,逐步转变为纳米晶,在金属材料表面获得一定厚度的纳米层,从而达到实现表面纳米化的目的^[2-4]。通过对金属零部件表面进行高能喷丸纳米化,使得提高金属零部件耐摩擦性能、耐摩擦腐蚀性,从而有效延长零部件使用寿命。因此,材料表面高能喷丸纳米化的耐磨性能研究正在成为一个热点研究领域。文献[5]将 0Cr18Ni9Ti 作为研究对象,利用高能喷丸工

艺对其进行表面纳米化,研究了高能喷丸自纳米化机理。实验结果表明,0Cr18Ni9Ti 经过高能喷丸后表面层产生晶粒细化,喷丸表面晶粒尺寸达 52 nm ,并且有效深度为 $72\text{ }\mu\text{m}$ 。表面纳米化后 0Cr18Ni9Ti 展现了良好地耐摩擦性能。文献[6]研究了高速颗粒轰击技术表面纳米化对 7A52 铝合金油润滑条件下耐磨性能的影响,结果表明,高速颗粒轰击处理后 7A52 铝合金表面晶粒细化,硬度明显提高,在低载及中载条件下磨损机制明显改善。

表面纳米化主要是通过纳米化层高的表面活性这一特性来改善油润滑工况下金属构件耐磨性能;但目前对于航空领域广泛使用的 7055 铝合金高能喷丸表面纳米化耐磨性能研究很少,7055 铝合金具有良好的综合力学性能,在航空航天领域广泛使用。因此,采用表面纳米化提高 7055 铝合金材料服役性能具有良好的经济效益。本文以 7055 铝合金为研究对象,利用高能喷丸工艺制备了 7055 铝合金表面纳米化样品,对试样表面纳米化后残余应力、显微硬度进行测定,同时对纳米化样品固定载荷油润滑条件下摩擦磨损行为进行测试,分析了 7055 铝合金纳米化后耐磨性能改善的原因,为 7055 铝合金材料的表面纳米化技术提供了技术参考与理论指导。

2013 年 7 月 17 日收到,8 月 2 日修改

第一作者简介:田 龙(1976—)男,硕士,讲师。研究方向:机械工程、材料加工研究与教学。E-mail: tianlong_teacher@163.com。

1 实验材料及方法

实验材料为自然时效处理 7055 铝合金,其化学成分见表 1。试样尺寸为 50 mm × 50 mm × 10 mm 方块试样,实验前用 200# ~ 1600#氧化铝静电砂纸对试样表面进行打磨,以提高表面质量,然后利用酒精溶液清洗试样表面。表面纳米化是在改进后的 QPL30 履带式抛丸机上进行的,主要喷丸工艺参数如下:系统振动频率 50 Hz,Cr-Mo 钢球弹丸直径 1 mm,弹丸速度 65 m/s,样品与弹丸距离 20 mm,纳米化喷丸时间 250 min。

利用 FM—7000 型半自动数字显微硬度计测试纳米化表面显微硬度,载荷为 20 g,载荷保持时间为 20 s。摩擦磨损实验在 MS—T4000 摩擦磨损试验机上进行,润滑油选择 45 号机油,摩擦副为球盘接触式,载荷设置为 20 N,主轴转速 300 r/min,室温条件下进行。利用电子天平计算磨损量,利用 QUAN-TA—2000 型扫描电子显微镜观察磨痕形貌。利用 XStress3000 型 X 射线应力分析仪测试纳米化表面残余应力分布,测试参数:电压 30 kV,电流 6.7 mA。

表 1 7055 铝合金化学成分及质量分数 w/%

化学成分	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
质量分数	0.07	0.11	2.30	0.02	1.92	0.03	7.93	0.04	Bal.

2 实验结果与分析

2.1 表面结构

图 1 所示为 7055 铝合金试样表面纳米化前后

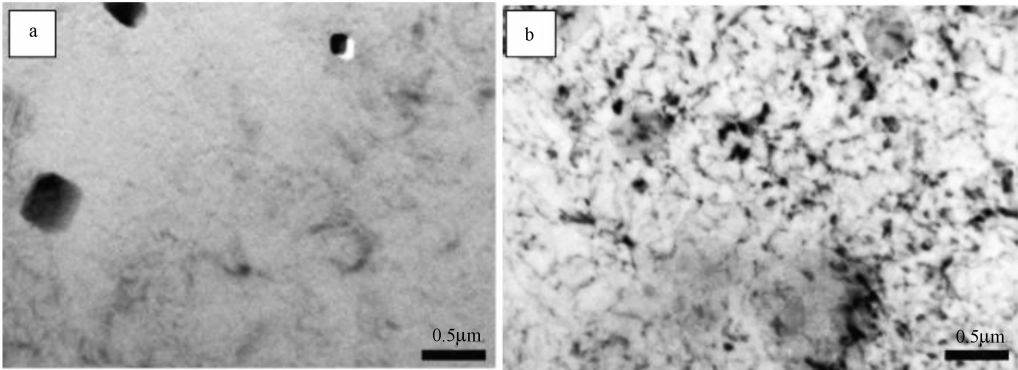


图 1 表面纳米化前后试样表面结构 TEM 图像

透射电镜(TEM)拍摄的的微观组织照片。从图中能够看出,表面纳米化之前 7055 铝合金的 TEM 图中可见少量析出物,而表面纳米化后处理区域的晶粒明显细化,位错密度升高,并出现了大量位错缠结,这表明表面纳米化 7055 铝合金能够细化塑性变形层的晶粒,在晶粒内部产生高密度的位错,从而使得塑性变形层材料的屈服强度明显增强,材料的力学性能得以提高。

2.2 显微硬度

对未处理试样及表面纳米化试样厚度方向上硬度变化进行测试分析,测试结果如图 2 所示。从中可以看出,7055 铝合金基体硬度约为 270 HV,表面纳米化使距离试样表面硬度值最大提高到了 400 HV,表面纳米化使 7055 铝合金表面硬度极大提高,并且随着距离表面深度的不断增加,硬度值逐渐减小并趋于稳定,最终达到基体硬度值,材料表面硬度增大主要是因为 7055 铝合金试样表面在经过高能喷丸作用后发生晶粒细化及冷加工硬化。硬度的增加为 7055 铝合金材料耐磨性能的改善提供了良好地基础,并且能提高材料在滑动摩擦过程中的抗犁削及耐磨性。另外,从试样组织与力学性能对应关系中可以看出,试样硬度在厚度方向逐渐减小,而晶粒尺寸则逐渐增大,这与其他研究人员^[7]对于超细晶材料力学性能研究结论基本一致,因此可以确定高能喷丸表面纳米化对于材料表面强化具有重要作用,晶粒细化是试样表面硬度提高的主要原因。

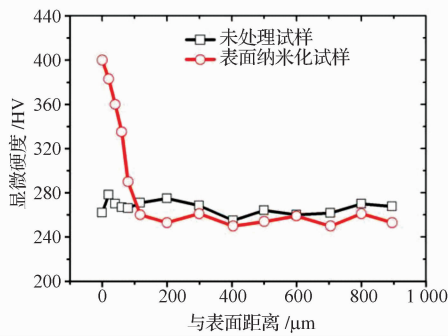


图2 试样厚度方向显微硬度测试

2.3 残余应力

采用电化学材料去除法测试未处理试样及表面纳米化试样材料表层残余应力分布情况,残余应力测试结果如图3所示。从图中可以看出,表面纳米化试样表面呈高幅值残余压应力分布,残余应力最大值为 -369 MPa ,且残余压应力层深度达 0.6 mm ;从原始试样表面向下 2 mm ,残余应力分布几乎无变化,与基体残余应力分布大致相同。表面纳米化在7055铝合金试样表面产生高密度、均匀稳定的位错,高密度位错等晶体缺陷引起原子点阵受压产生畸变,使得宏观表现为较高幅值的残余压应力分布,而高幅值残余压应力可以在一定程度上改善金属构件的抗疲劳性能与耐磨性能。

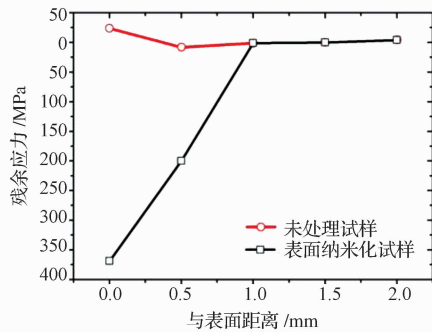


图3 试样厚度方向残余应力分布

2.4 耐磨损性能

利用线切割将7055铝合金棒材未处理试样及表面纳米化试样制备成 6 mm 厚的圆盘试样,对磨偶件选用GCr15钢球,硬度为 750 HV ,表面粗糙度 $Ra < 0.01\text{ mm}$ 。实验条件为室温、油润滑,实验过程记录摩擦力矩,除以相应载荷便求得对应摩擦系数

值 f 。利用电子天平对未处理及表面纳米化试样在磨损实验前后测量,测量结果如表2所示,经过计算可知,经过表面纳米化后,7055铝合金表面纳米化试样磨损量仅为未处理试样磨损量的32%,由此可见7055铝合金经过表面纳米化后其耐磨性能明显提高。

表2 7055 铝合金表面纳米化前后磨损失重对比

类型	磨损前/g	磨损后/g	重量损失/g
去处理	60.321 6	60.310 4	0.011 2
纳米化细晶	61.172 0	61.170 7	0.001 3

未处理试样及表面纳米化试样摩擦系数与磨损时间的关系如图4所示,从中能看出,在磨损过程中,表面纳米化试样摩擦系数始终小于未处理试样。在磨损实验的开始阶段,由于润滑油在材料表面尚未形成保护油膜,摩擦副之间为固体摩擦,摩擦系数较大;待油膜形成后,摩擦系数则下降呈平稳趋势;摩擦将近结束时,摩擦系数小幅上升,这主要是由于7055铝合金试样表面出现了一定程度磨损。

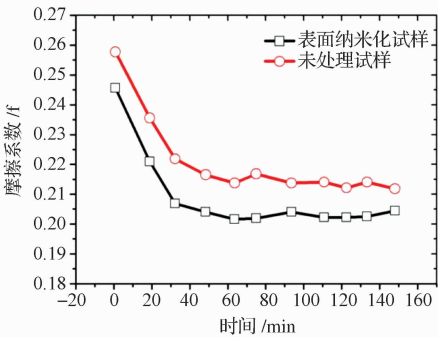


图4 表面纳米化前后摩擦系数对比

利用SEM对磨损试验前后试样表面进行扫描分析,扫描图像如图5所示,图5(a)为SEM扫描的未处理试样摩擦实验后的图像,图5(b)为表面纳米化试样摩擦实验后的图像。从扫描结果能够看出,经过磨损实验后,7055铝合金未处理试样表面分布明显微裂纹和少量剥落特征,同时出现一些凹坑,表现出了典型的疲劳磨损现象。而经过磨损实验后,表面纳米化处理7055铝合金试样表面沿滑动方向呈现出些许小而浅的犁沟特征,此外,还出现了轻微片状剥落层,呈现为典型磨粒磨损破坏机制。

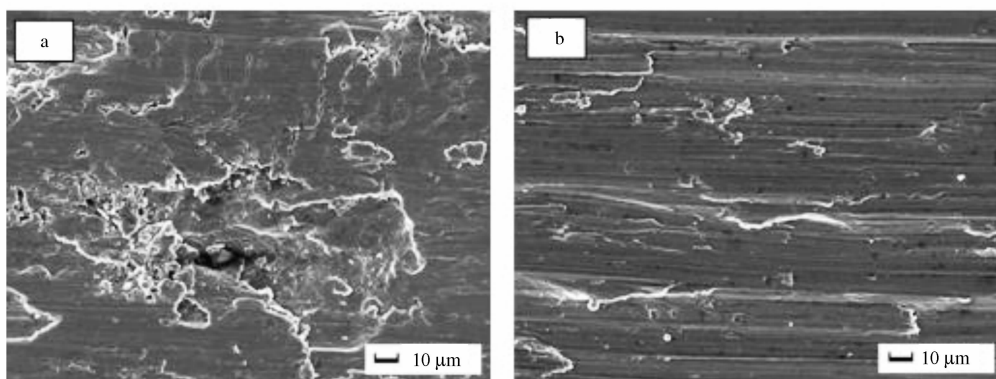


图 5 磨损实验后 7055 铝合金试样表面 SEM 图像

对比后可知,表面纳米化处理能够提高 7055 铝合金材料的磨损抗力,其主要原因是:(1) 表面纳米化处理能够在 7055 铝合金试样表面产生大量凹坑,这些凹坑具有优异的储油功能,在磨损实验过程中,随着实验温度升高,润滑油从凹坑中溢出,对摩擦表面起到一定润滑作用,同时表面纳米层良好的活性对油膜具备极强的吸附作用;(2) 表面纳米化后表面分布高幅值残余压应力能够抵消摩擦拉应力,有效抑制摩擦表层疲劳裂纹萌生,另外,晶粒细化对疲劳裂纹的萌生也具有一定阻碍作用。

3 结论

(1) 表面纳米化 7055 铝合金试样后,材料表面形成了 0.6 mm 厚的残余压应力层,且最大残余压应力达到 -369 MPa,该残余压应力分布有效提高了 7055 铝合金材料的摩擦抗力及疲劳抗力。

(2) 7055 铝合金表面纳米化后发生晶粒细化及硬度的提高,硬度的提高能够明显改善 7055 铝合金材料的抗犁削及耐磨性,并且晶粒细化使得铝合金材料力学性能得到改善。

(3) 对于未处理试样,表面纳米化 7055 铝合金摩擦系数相明显减小,磨损量仅为未处理试样的

12%,表明表面纳米化有效改善了 7055 铝合金耐磨性能。

参 考 文 献

- 1 徐滨士. 表面纳米工程. 北京:化学工业出版社,2004:352—375
- 2 温爱玲,陈春焕,郑德有,等. 高能喷丸表面纳米化对工业纯钛组织性能的影响. 金属学报,2003;(4):347—350
- 3 Wang Tiansheng, Yu Jinku, Dong Bingfeng. Surface nano-crystallization induced by shot peening and its effects on corrosion resistance of 1Cr18Ni9Ti stainless steel. Surface & Coatings Technology, 2006;(200):4777—4781
- 4 Bagherifard S, Fernandez I, Ghelichi P R, *et al.* Fatigue properties of nanocrystallized surfaces obtained by high energy shot peening. Procedia Engineering, 2010:1683—1690
- 5 韩 靖,盛光敏,胡国雄. 高能喷丸 0Cr18Ni9Ti 不锈钢自纳米化机理. 中南大学学报,2009;4(3):644—649
- 6 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. 中国表面工程,2012;25(1):28—32
- 7 Sun Changmin, Song Gilho, Sun Minsoo, *et al.* Fatigue and mechanical characteristics of nano-structured tool steel by ultrasonic cold forging technology. Materials Science and Engineering A, 2007;443:101—106

Effects of Surface Nano-crystallization on Wear Behavior of 7055 Aluminum Alloy

TIAN Long, ZHANG Wei

(College of Mechanical Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 455000, P. R. China)

[Abstract] High Energy Shot Peening (HESP) was used to treat the material surface in order to study the effects of surface nano-crystallization of 7055 aluminum alloy on wear behavior. The nano-crystalline layer was obtained on sample surface. TEM was used to analyze the microstructure before and after nano-crystallization, meanwhile, residual stress and micro-hardness were measured on surface, and wear behaviors of nano-crystalline surface were examined by reciprocating wear tester as well. The experiment results show that, HESP caused severe plastic deformation on surface, and there exists compressive residual stress with large magnitude on surface, and the maximum value is -369 MPa, meanwhile, the compressive residual stress layer comes up to 0.6 mm. The micro-hardness increases by 50% compared to matrix. The frictional wear experiments show that, HESP nano-crystallization can apparently decrease friction factor, and the wear loss is only 32% of untreated samples, HESP largely improved the wear-resisting property of 7055 aluminum alloy.

[Key words] 7055 aluminum alloy HESP surface nano-crystallization wear-resisting property