

40Cr 钢表面高能喷丸纳米化及其耐磨性能

田峰, 杨辉

(河南科技学院 机电学院, 新乡 453003)

[摘要] 为了研究 40Cr 钢表面纳米化对其耐磨性能的影响,对 40Cr 钢表面进行高能喷丸处理,获得纳米结构表层,分析了材料表面高能喷丸前后的微观组织变化,测定了纳米化材料表层的残余应力及显微硬度,研究了纳米化表层的磨损性能。结果表明:高能喷丸使 40Cr 钢表层发生了严重塑性变形,显微硬度较基体提高了 68%,并使材料表面分布了较高幅值残余压应力,最大可达 -736 MPa,残余压应力层深度达 0.9 mm;高能喷丸表面纳米化能在一定程度上降低 40Cr 钢表面的摩擦系数,且大大减小其磨损失重,显著改善了 40Cr 钢的耐磨性能。

[关键词] 40Cr 钢; 高能喷丸; 表面纳米化; 耐磨性能

[中图分类号] TG176; TH117.1

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2013)05-0052-03

Experimental Study on Wear Behavior of Nano-crystallization Surface of 40Cr

TIAN Feng, YANG Hui

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

[Abstract] High Energy Shot Peening (HESP) was used to treat the material surface in order to study the effects of nano-crystallization surface of 40Cr on wear behavior. The nano-crystalline layer was obtained on surface. Micro-structure after HESP was analyzed, residual stress and micro-hardness after nano-crystallization were measured. Wear behaviors of nano-crystalline surface were examined as well. The experiment results show that, HESP causes severe plastic deformation on surface, and the micro-hardness increases by 68% compared to matrix. There exists compressive residual stress with large magnitude on surface, and the maximum value is -736 MPa, meanwhile, the compressive residual stress layer come up to 0.9 mm. The frictional wear experiments show that, HESP nano-crystallization can apparently decrease friction factor, and the wear loss is less than 1/5 of untreated samples, HESP largely improved the wear-resisting property of 40Cr.

[Key words] 40Cr steel; HESP; surface nano-crystallization; wear-resisting property

各类机械零部件及结构件在实际应用中,往往会因疲劳、摩擦、磨损等问题,在达到设计使用寿命前就失效。调查发现,金属结构件的失效多起始于表面^[1],因此利用各种工艺手段来改善金属构件材料表面的抗疲劳、抗磨损和耐腐蚀性能,对于保证机械设备安全正常运行,延长服役寿命,具有极大的意义。

对金属构件材料的表面进行纳米化,使得低成本、高工艺水平地提高金属构件抗疲劳性能、耐摩擦腐蚀性能成为可能。高能喷丸(High Energy Shot Peening, HESP)是将外在能量作用于金属材料表面,使得表面的原始粗晶组织细化,逐步转变为纳米晶,获得一定厚度的纳米层,从而实现表面纳米化^[2-3]。纳米化表面的活性高,这一特性可以用来改善金属构件在油润滑工况下的耐磨性能。因此高能喷丸纳米化材料的表面耐磨性能逐渐成为了研究热点^[4-5]。调质处理 40Cr

钢具有良好的综合力学性能、优良的低温冲击韧性及缺口敏感性,在机械制造行业广泛使用,通过表面纳米化提高其服役性能具有良好的经济效益,但目前针对 40Cr 钢高能喷丸后的表面耐磨性能研究很少。文中拟通过研究,填补这方面的空白,为 40Cr 材料的表面纳米化提供技术参考。

1 实验

1.1 高能喷丸

所用调质处理 40Cr 钢试样的尺寸为 60 mm×60 mm×10 mm,其化学成分(以质量分数计)为:C 0.37%~0.45%,Si 0.17%~0.37%,Mn 0.50%~0.80%,Cr 0.80%~1.10%,S 0.01%,P 0.02%,Ni 0.12%,Cu 0.15%。试样表面先用 300#—1200#氧化铝静电砂纸

[收稿日期] 2013-05-19; **[修回日期]** 2013-06-15

[作者简介] 田峰(1977—),男,河南新乡人,硕士,讲师,主要研究方向为机械工程、材料加工工程。

打磨,降低粗糙度,再利用丙酮和酒精溶液清洗,然后进行高能喷丸。高能喷丸采用改进后的 QPL30 履带式抛丸机,主要工艺参数如下:系统振动频率 50 Hz, Cr-Mo 钢球弹丸直径 1 mm,弹丸喷射速度 55 m/s,喷嘴与试样距离 25 mm,纳米化喷丸时间 300 min。

1.2 测试分析

1) 利用 XStress3000 型 X 射线应力分析仪测试纳米化表面的残余应力分布。

2) 利用 FM-7000 型半自动数字显微硬度计测试纳米化表面的显微硬度,载荷为 20 g,载荷保持时间为 20 s。

3) 利用透射电镜(TEM)分析 40Cr 钢高能喷丸前后的微观组织。

4) 对 40Cr 钢棒材进行高能喷丸,采用线切割方法将未处理试样及高能喷丸试样切成 8 mm 厚的圆片,在 CJS111A 型球盘式试验机上进行摩擦磨损实验。摩擦配副选用 40Cr 材料,采取球盘接触式,润滑油选择液体石蜡,载荷设置为 25 N,主轴转速 340 r/min,实验温度为室温。在实验过程中,记录摩擦力矩,除以相应载荷,即得对应摩擦系数。利用电子天平称取试样实验前后的质量,计算磨损质量损失。实验后,利用 XL-30FEG 扫描电子显微镜观察磨损形貌。

2 结果与分析

2.1 残余应力

采用电化学材料去除法,对原始试样和纳米化试样深 2 mm 的表层进行残余应力测试,测试结果见图 1。可以看出,纳米化试样表面呈高幅值残余压应力分布,最大为 -736 MPa,且残余压应力层深度达 0.9 mm;原始试样表面至表面下 2 mm,残余应力状态几乎无变化,与基体残余应力分布相同。高能喷丸能在 40Cr 钢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因受压而产生畸变,宏观表

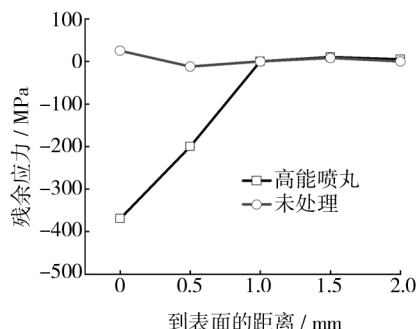


图 1 距离表层 2 mm 的残余应力分布

Fig. 1 Residual stress distribution 2 mm to surface

现为较高幅值的残余压应力分布,而高幅值残余压应力可在一定程度上改善金属构件的抗疲劳性能与耐磨性能^[6]。

2.2 显微硬度

原始试样及纳米化试样硬度随深度的变化规律如图 2 所示。图 2 表明,基体硬度约为 250HV,高能喷丸后,在距离表面 40 μm 的范围之内,硬度值提高到了 300 ~ 420HV,表面硬度明显增大,随着深度的增加,硬度值逐渐减小并趋于稳定,最终与基体硬度值接近。高能喷丸作用在 40Cr 材料表面的晶粒细化机制及冷加工硬化,是硬度增大的主要原因。硬度的增加为 40Cr 材料的耐磨性能改善提供了基本条件,能在一定程度上提高滑动摩擦中的抗犁削及耐磨性。另外,从试样组织与力学性能的对应关系中可以看出,试样硬度在厚度方向上逐渐减小,而晶粒尺寸则逐渐增大,这与其他研究者关于超细晶材料力学性能的研究结论基本一致,因此可以确定,高能喷丸纳米化能够提高材料表面的耐磨性及抗疲劳特性。

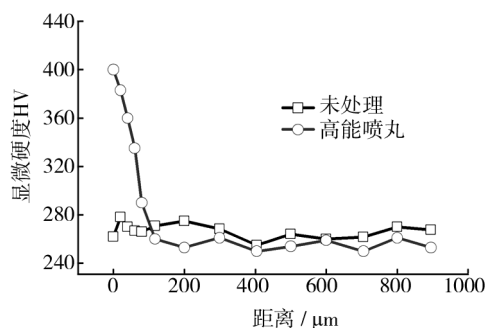


图 2 厚度方向上的显微硬度变化

Fig. 2 Variation of micro-hardness along depth

2.3 微观结构

图 3 为 40Cr 钢纳米化前后的微观组织。可以看出,40Cr 钢高能喷丸前的 TEM 图中仅有少量析出物,而高能喷丸后,处理区域的晶粒明显细化,位错密度显著增加,并出现了位错缠结,这表明高能喷丸能够细化 40Cr 钢塑性变形层的晶粒,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,

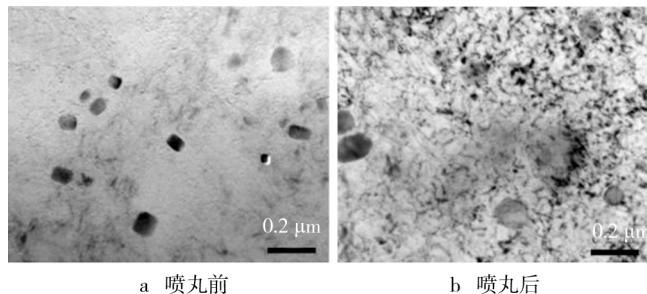


图 3 40Cr 钢高能喷丸前后的微观组织

Fig. 3 Microstructure of 40 Cr Steel before and after HESP

材料的力学性能得以提高。巴德玛等人^[7]研究了超音速微粒轰击技术对 38CrSi 钢表面纳米化的影响,发现经过超音速微粒轰击后,材料表层严重细化,形成了纳米结构层,一定深度处出现了大量位错线和高密度的位错缠结。文中的结果与巴德玛的结论具有较好的一致性。

2.4 摩擦磨损性能

试样的磨损质量损失见表 1。高能喷丸试样的磨损量不到未处理试样的 1/5,由此可见,40Cr 钢表面经过高能喷丸纳米化后,耐磨性能明显提高。

表 1 40Cr 钢高能喷丸前后的磨损质量损失对比

Tab.1 Weight loss of both HESP and untreated samples of 40Cr

试样	磨损前质量/g	磨损后质量/g	质量损失/g
未处理	104.3688	104.3573	0.0115
高能喷丸	105.8592	105.8570	0.0022

未处理试样及高能喷丸试样摩擦系数与磨损时间的关系如图 4 所示,可以看出,在磨损过程中,后者的摩擦系数始终小于前者。在磨损开始阶段,由于润滑油在材料表面尚未形成保护膜,摩擦副之间为固体摩擦,摩擦系数较大。油膜形成后,摩擦系数下降,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 40Cr 试样表面出现了一定程度的磨损。

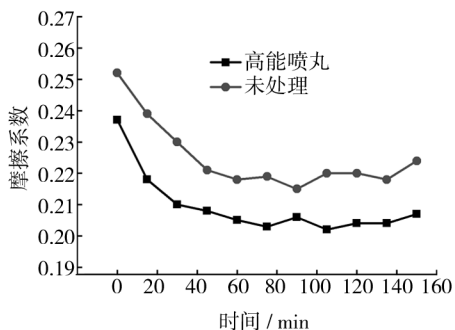


图 4 未处理试样和高能喷丸试样的摩擦系数

Fig.4 Friction factor of untreated sample and HESP sample

试样磨损表面的 SEM 照片如图 5 所示。可以发现,未处理试样经磨损实验后,表面有少量微裂纹及剥落,同时可见凹坑,表现为典型的疲劳磨损。高能喷丸试样经磨损试验后,表面沿滑动方向分布着小而浅的犁沟,并出现了轻微片状剥落层,呈现出磨粒磨损机制。经过对比可知,高能喷丸纳米化改善了 40Cr 钢的抗磨损能力。主要原因在于:1) 高能喷丸使 40Cr 钢表面产生大量凹坑,具有优良的储油效果,在摩擦过程中,随着温度渐渐升高,润滑油会从凹坑中溢出,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) 高能喷丸纳米化后,表面分布的高幅值残余压应力能够抵消摩擦拉应力,

抑制摩擦表层疲劳裂纹的萌生,另外,晶粒细化对疲劳裂纹的萌生也具有一定阻碍作用。

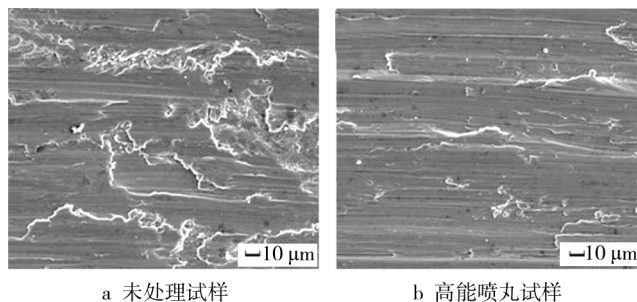


图 5 试样的磨损形貌

Fig.5 SEM morphology of sample surface

3 结论

1) 40Cr 钢经高能喷丸纳米化后,表面形成了 0.9 mm 厚的残余压应力层,且最大残余压应力达到 -736 MPa。残余压应力的存在在一定程度上改善了 40Cr 材料的抗疲劳特性和耐磨性能。

2) 高能喷丸作用使 40Cr 钢在晶粒细化的同时,硬度得以提高,从一定程度上改善了 40Cr 材料的抗犁削性能,提高了耐磨性。

3) 高能喷丸试样的摩擦系数相对于未处理试样明显减小,磨损量不足未处理试样的 1/5,表明高能喷丸表面纳米化改善了 40Cr 钢的耐磨性能。

[参考文献]

- [1] 徐滨士. 表面纳米工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004:352—375.
- [2] WANG Tian-sheng, YU Jin-ku, DONG Bing-feng. Surface Nanocrystallization Induced by Shot Peening and Its Effects on Corrosion Resistance of 1Cr18Ni9Ti Stainless Steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2006(200):4777—4781.
- [3] 田志强, 王崇碧, 孔小东, 等. 锈层对船体钢耐腐蚀性能影响研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(3):66—70.
- [4] 刘莉莉, 揭晓华, 于能, 等. 45 钢表面增压喷丸纳米化及其耐磨性研究[J]. 热加工工艺, 2009, 38(14):124—126.
- [5] 葛利玲, 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, 2008, 37(2):11—13.
- [6] SUN Chang-min, SONG Gilho, SUN Minsoo, et al. Fatigue and Mechanical Characteristics of Nano-structured Tool Steel by Ultrasonic Cold Forging Technology[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 443:101—106.
- [7] 巴德玛, 马世宁, 李长青, 等. 超音速微粒轰击 38CrSi 钢表面纳米化的研究[J]. 材料工程, 2006(12):3—7.