

超音速微粒轰击表面纳米化及其对耐磨性的影响*

刘 阳, 吕晓仁, 张荣禄, 李 曙

(中国科学院金属研究所 金属腐蚀与防护国家重点实验室, 沈阳, 110016)

摘 要:采用超音速微粒轰击技术对 20 钢进行表面纳米化处理。研究了表面纳米化工艺对材料流失与形貌变化的影响, 并采用往复磨损试验机研究了纳米化表面的磨损性能。结果表明: 超音速微粒轰击在表面形成纳米层过程中使材料发生流失和表面粗糙度增大。在干摩擦和油润滑条件下, 微粒轰击样品的磨损率分别是未轰击样品的 2.77 和 1.83 倍, 轰击抛光样品的磨损率则比未轰击样品分别降低了 26% 和 42%。对其影响耐磨性的原因作了初步讨论。

关键词: 超音速微粒轰击; 表面纳米化; 20 钢; 耐磨性

中图分类号: TG115.5⁺⁸

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)06-0020-05

Surface Nanocrystallization Using Supersonic Fine Particles Bombarding and its Effect on the Wear Behaviors

LIU Yang, LV Xiao-ren, ZHANG Rong-lu, LI Shu

(Institute of Metal Research, State Key Laboratory for Corrosion and Protection, Shenyang 110016, China)

Abstract: Surface nanocrystallization of 1020 steel was conducted by supersonic fine particles bombarding (SFPB). The effect of surface nanocrystallization on the variation of surface was studied and the wear behaviors of nanocrystalline surface were examined by reciprocating wear tester as well, and compared with the untreated samples. Experimental results showed that SFPB treatment can prepare a nanocrystalline layer with the removal of material and increase of surface roughness. In dry and lubricated sliding conditions, the wear rate of SFPB sample was about thrice and twice as big as that of untreated one respectively, while after surface polishing the wear rate of SFPB sample was reduced by 26% and 42% in volume of untreated one. The wear mechanism was discussed preliminarily.

Key words: supersonic fine particles bombarding; surface nanocrystallization; 20 steel; wear resistance

0 引 言

通过强烈塑性变形使金属表面的粗晶逐渐碎化至纳米晶, 即进行金属表面纳米化^[1], 作为一种新的表面技术, 越来越受到人们的关注。目前, 有关金属表面纳米化的研究主要集中在表面结构、组织、力学性能、疲劳^[2]、腐蚀^[3]等方面, 但对制备工艺影响表面材料的流失和形貌变化, 以及纳米化表面摩擦磨损性能^[4]的报导较少。对工程应用而言, 尺寸精度、表面粗糙度和摩擦磨损性能都是评价新材料、新技术和新工艺价值的重要因素, 因此进行这方面的研究对金属表面纳米化的应用具有实际意义。

文中采用超音速微粒轰击^[5]实现金属表面纳米化, 分析了 20 钢产生的材料流失和表面形貌变化的影响, 探讨了纳米化表面对往复摩擦耐磨性的影响规律。

1 试验材料与方法

试验材料为 20 碳钢, 其化学成分(质量分数), $w(C)=0.20\%$, $w(Si)=0.27\%$, $w(Mn)=0.50\%$, $w(P)=0.035\%$, $w(S)=0.035\%$, 余为铁。样品尺寸为 15 mm × 40 mm × 10 mm。采用超音速微粒轰击技术对样品进行表面纳米化处理, 轰击前样品经 600 号砂纸机械抛光(表面粗糙度为 0.5 μm), 并用丙酮和酒精清洗, 在文献[5]介绍的设备上用压力 1.5 MPa 的压缩空气加速直径为 50 μm 的钢珠, 在 90° 攻角、20 mm 喷距下轰击样品, 微粒轰击时间在 1 ~ 15 min 进行调整。磨损试验选用了轰击时间为 10 min 的样

收稿日期: 2006-09-12; 修回日期: 2006-09-21

基金项目: *国家自然科学基金资助项目(50475159)

作者简介: 刘阳(1964-), 男(汉), 辽宁开原人, 高工。

品,用感量为 0.1 mg 的精密天平称量样品轰击前后的失重以确定材料的流失量。

微粒轰击前后样品的表面粗糙度(R_a)采用 2201 型表面形貌仪测量。利用金相显微镜观测微粒轰击样品的横截面组织。采用 SHIMADZU 型显微硬度计测量微粒轰击后的变形层硬度(载荷为 25 g,加载时间为 10 s)。在理学 D/max 2400 X 射线衍射仪上用 XRD 对未轰击和微粒轰击样品表面进行结构参量的表征。根据 Scherrer-Wilson 方程^[6],由衍射线宽化计算出平均晶粒尺寸和微观应变。

往复滑动磨损试验分干摩擦和油润滑条件,均在 MT8-002 往复磨损试验机上进行。对磨副为 $\phi 6$ mm 的 Si_3N_4 陶瓷球,干摩擦下载荷分别为 1, 3, 5, 8, 10 N;油润滑下载荷分别为 10、20、30、40 N,划痕长度 12.5 mm,往复频率为每分钟 50 次,磨损时间为 200 min。用表面形貌仪、读数显微镜测量划痕的横截面积和长度来计算体积磨损量。利用 XL-30FEG 扫描电镜观测磨痕形貌,以进行磨损机理分析。

2 试验结果与讨论

2.1 表层结构

图 1 为超音速微粒轰击后 20 钢的横截面金相组织。由图可见,表面形成了组织不同于基体的塑性变形层。目前对超音速微粒轰击后金属表面纳米化表层的结构已有研究,表明以该工艺对碳钢完全可以实现纳米化^[7],因此文中只采用 XRD 对微粒轰击表面晶粒尺寸的进行表征分析。图 2 为 20 钢未轰击和微粒轰击样品表面的 X 射线衍射谱。从图中可以看出,微粒轰击处理后,样品的 X 射线衍射线形明显宽化,这是由晶粒细化和微观应变增加所致。经 XRD 分析确定的晶粒尺寸和微观应变见表 1,可以看出,20 钢在微粒轰击后表面实现了纳米化。

2.2 微粒轰击对表面的影响

超音速微粒轰击中,高能固体颗粒使金属表面发生强烈塑性变形直至获得纳米化表面的过程中,形成一定厚度的变形层;同时伴有的法向冲蚀,必然造成材料的流失和表面形貌的变化。20 钢进行微粒轰击后材料的流失量、表面粗糙度 R_a 值及变形层厚度随微粒轰击时间变化结果见图 3。材料的流失量与微粒轰击时间基本成线性关系;表面粗糙度

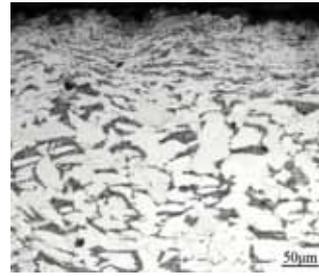


图 1 微粒轰击 10 min 样品表面横截面组织

Fig.1 The cross-sectional optical morphologies of the SFPB treated sample

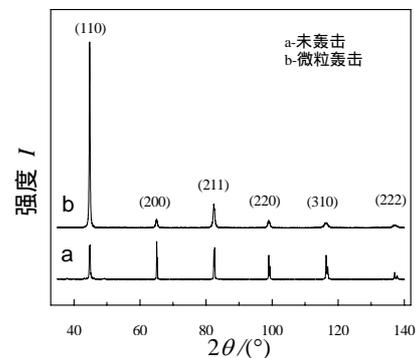


图 2 未轰击和微粒轰击样品 X 射线衍射谱

Fig.2 XRD patterns of the surface (a) untreated and (b) SFPB treated samples

表 1 微粒轰击和未轰击样品的平均晶粒尺寸和微观应变
Table 1 Average grain size and mean microstrain of the original and polished SFPB treated samples calculated from XRD data

样品	平均晶粒尺寸/nm	微观应变/%
未轰击	> 100	0.04+0.002
微粒轰击	21	0.12+0.006

R_a 值从微粒轰击一开始就急剧增加,当轰击区域趋于均匀则 R_a 值逐渐降低并保持稳定,这与文献报导的铝合金^[8]、钛合金^[9]结果类似。对微粒轰击样品表面进行 SEM 观察,发现表面形貌为鱼鳞状结构,见图 4;从微粒轰击样品横截面变形层厚度可以看出,经过一定的微粒轰击时间(10 min)后变形层厚度稳定,同时 R_a 值也趋于稳定,说明此时纳米化过程已完成,随后的微粒轰击只会带来轰击能量的损失和金属表层材料的流失。从能量观点出发,微粒轰击中球形颗粒正面冲击金属表面时只有 10% 的能量形成位错或晶体其它缺陷^[10],因此表面晶粒

能发生强烈塑性变形需要一定的能量；随着微粒轰击时间的延长，即轰击能量不断增加，纳米层和变形层厚度的不断增加；而当纳米层厚度趋于稳定时，由于纳米晶的强烈塑性变形能力已显著减小^[11]，在随后的微粒轰击过程很容易剥落而亚表面的微晶继续塑性变形成为纳米晶，因此纳米层厚度并不增加，仅仅带来表面材料的冲蚀。

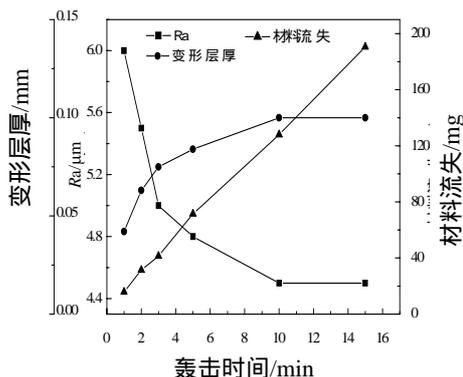


图3 材料表面随微粒轰击时间的变化

Fig. 3 Variation of material loss, surface roughness and thickness of deformed layer with SFPB treated time

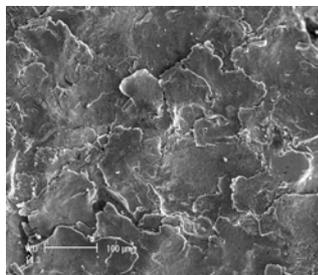


图4 微粒轰击样品表面的微观形貌

Fig.4 The surface microscopic morphologies of the SFPB treated sample

当变形层厚度稳定后，对纳米化表层的硬度进行测量。可见变形层由外向内形成了一个先增加再降低的硬度梯度，最高硬度值是在距表面大约 20 μm 处，其硬度值较未轰击前的基体硬度提高了近一倍，应该是材料表面纳米化的结果，见图 5。表层出现软化的原因可能是由于轰击能量产生塑性变形的同时，还导致一定程度的冲击发热而造成退火^[12]，从而减弱了纳米化的效应。

2.3 磨损试验

微粒轰击后样品表层内晶粒尺寸细化至纳米

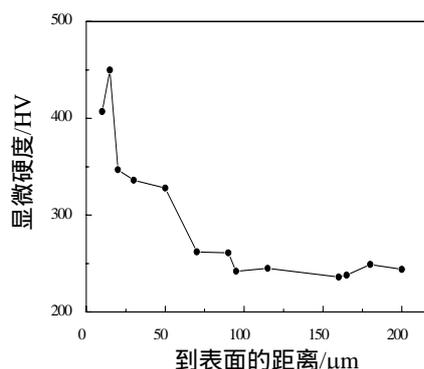


图5 微粒轰击样品表层硬度分布曲线

Fig.5 Hardness profile on cross-section of the SFPB treated sample

晶及表面硬度的提高，有望使材料的抗磨粒磨损性能得到改善。用于磨损试验的样品为未轰击样品（original）、微粒轰击样品（SFPB treated）和轰击抛光样品（polished SFPB treated）。将微粒轰击样品进行抛光目的在于去掉表面的软层，使其表面 Ra 值与未轰击表面一致。图 6 为往复滑动干磨损试验条件下，3 种样品的磨损量随载荷的变化曲线。

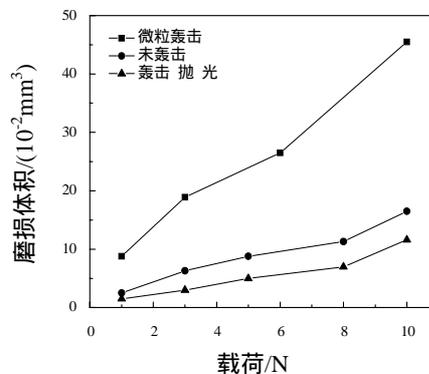


图6 3种样品在干摩擦下磨损量随载荷的变化曲线

Fig.6 Variation of wear loss with load in dry sliding

在试验的载荷范围内，微粒轰击样品的磨损体积始终是最大的，而轰击抛光样品的磨损量要小于未轰击样品。微粒轰击后样品表面产生的鱼鳞状表层在磨损过程中由于抗塑性变形能力下降，往复犁削中容易被折断易造成片状脱落从而使其磨损量大于未轰击样品。从图 7(a) 的磨痕 SEM 照片可见微粒轰击样品，磨损表面存在较多的裂纹和微坑，这是超音速微粒轰击对表面造成的软层和累积损伤造成的。经抛光后，微粒轰击表面的金属表面磨

痕比较平整，犁沟较浅，见图 7(b)。而未经轰击的表面则出现典型的犁沟，见图 7(c)，呈现 20 钢常规的磨粒磨损形式。磨痕形貌验证了硬度高且去除

软层的轰击抛光样品的耐磨性好，更能体现金属表面纳米化的优点。

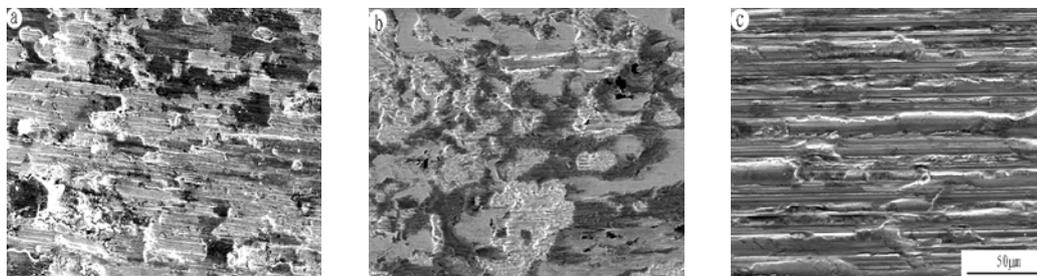


图 7 3 种样品 10N 载荷下的干摩擦磨痕照片

Fig.7 Wear morphologies of samples in dry sliding under the load of 10N, (a) SFPB treated, (b) polished SFPB treated, (c) original sample

对工程应用而言，如果金属表面得到的纳米层厚度比较薄，抗犁削能力差，则在干摩擦条件下的应用范围比较窄。而在油润滑的条件下，由于载荷剪切力的降低及纳米晶的特性，纳米化表面优异的耐磨性可能会得到更好的体现，因此选择在油润滑条件进行磨损试验。图 8 是 3 种样品在液体石蜡条

件下的磨损试验结果，可见微粒轰击样品的磨损体积依然最大。在磨损过程中鱼鳞状表层由于油膜的挤压及往复犁削，仍然非常容易被剥落，磨痕见图 9(a)。在干摩擦条件下，虽然轰击抛光样品的磨损量最小，但其磨损率（磨损体积与载荷的斜率）与未轰击样品却基本一样；而在油润滑条件下，两者的磨损率与载荷的关系截然不同。试验载荷（20~40 N）下，经过抛光处理的微粒轰击样品在油润滑条件下的磨损体积最小，并且随载荷增加并不线性增大，在 40 N 时还有所降低；而未轰击样品的磨损量随载荷呈近线性的增加。从磨痕的照片也可以看出，未轰击表面的犁沟深，材料剥落比较严重，而轰击抛光后表面犁沟较浅，仅出现较少的剥落，见图 9(b)和(c)。这应该是纳米化后材料的表面硬度提高和纳米表面具有较高的表面活性而容易吸附油膜，使得轰击抛光的样品表现出优于未轰击样品的耐磨性。

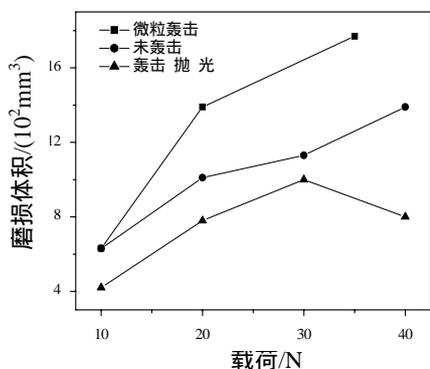


图 8 3 种样品在油润滑下磨损量随载荷的变化曲线 Fig.8 Variation of wear loss with load in lubricating

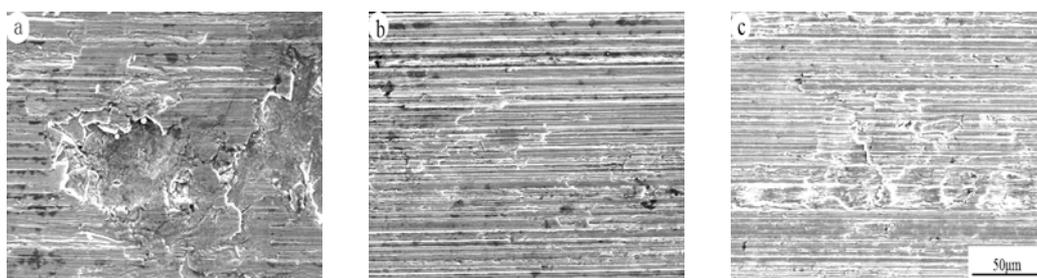


图 9 3 种样品 20N 载荷下的干摩擦磨痕照片

Fig.9 Lubricated wear morphologies of samples under the load of 20N, (a) SFPB treated, (b) polished SFPB treated, (c) original sample

磨损实验的结果表明,20钢获得的纳米化表面在抛光和油润滑时体现出较好的耐磨性能,有望在一定条件下实际应用。

3 结论

超音速微粒轰击使20钢实现表面纳米化的过程中出现材料流失和表面粗糙度增加,变形层硬度提高,而最表层有少量的软化。鱼鳞状表层使微粒轰击样品在干摩擦和油润滑条件下的磨损量都要大于未轰击样品。经抛光处理的微粒轰击样品,由于硬度高并有好的表面活性,耐磨性较好,油润滑下表现出优异的耐磨性能。

参考文献:

- [1] Lu K, Lu J. Surface nanocrystallization (SNC) of metallic materials-presentation of the concept behind a new approach [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 1999, 15(3):193-197.
- [2] Roland T, Reirant D, Lu K, Lu J. Fatigue life improvement through surface nanostructuring of stainless steel by means of surface mechanical attrition treatment [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54:1949-1954.
- [3] Rajia K S, Namjoshi S A, Misra M. Improved corrosion resistance of Ni-22Cr-13Mo-4W Alloy by surface nanocrystallization [J]. *Materials Letters*, 2005, 59(5):570-574.
- [4] Wang Z B, Tao N R, Li S, et al. Effect of surface nanocrystallization on friction and wear properties in low carbon steel [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, 352(1-2):144-149.
- [5] 熊天英, 刘志文, 李智超, 等. 超音速微粒轰击金属表面纳米化新技术 [J]. *材料导报*, 2003, 17(3):69-71.
- [6] Klug H P, Alexander L E. *X-ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials* [M]. New York: Wiley; 1974, 661-662.
- [7] Liu Y L, Xiong T Y, Yang K. Thermal stability of 40Cr steel with surface nanocrystallization [J]. *Material Science Forum*, 2006, 510-511:434-437.
- [8] Dai K, Villegas J, Stone Z, Shaw L. Finite element modeling of the surface roughness of 5052 Al alloy subjected to a surface severe plastic deformation process [J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(20):5771-5782.
- [9] 杨磊, 赵秀娟, 陈春焕, 等. 纯钛高能喷丸表面纳米化后粗糙度的分析 [J]. *中国表面工程*, 2006, 19(4): 43-46.
- [10] 李诗卓, 董祥林. *材料的冲蚀磨损与微动磨损* [M]. 机械工业出版社, 1987.
- [11] Gawne D T, Lewis G M. Strain hardening of high-strength steels [J]. *Materials Science and Technology*, 1985, 1:128-135.
- [12] Cousens A K, Huntchings I M. A critical of the erosion of an aluminium alloys by solid spherical particles at normal impingement [J]. *Wear*, 1981, 88:335-348.

作者地址: 沈阳市沈河区文化路 72 号 110016

Tel:(024)23971982 Fax: (024)23971778

E-mail: liuyang@imr.ac.cn

·学术动态·

第九次全国热处理大会征文

由全国热处理学会主办的第九次全国热处理大会将于 2007 年召开,现在征文,论文截止日期为 2007 年 3 月 15 日,会议主题是材料热处理的自主创新与科学发展,征文范围: 材料研究与产业化; 热处理与表面改性的基础研究; 热处理新技术、新工艺、新设备; 渗碳、渗氮、渗金属等化学热处理; 热处理的节能与清洁生产; 可控气氛与真空热处理; 表面处理、表面改性及涂层; 热处理质量检测、过程控制技术与装备; 冷却与畸变控制; 热处理信息化与智能技术; 热处理专业化生产与企业现代化管理; 其他相关的新材料、新工艺、新产品等。

论文格式要求以《材料热处理学报》为准,中英文的题目、作者、工作单位、摘要、关键词以及正文内的图题、表题均为双语;作者简介、参考文献应信息齐全、规范。论文一般在 6000 字以内,未经正式发表。经专家审阅录用后将发表在《材料热处理学报》(增刊)上,每篇版面费 500 元(超出 4 页部分每页加收 150 元/页),不交版面费和不参加会议者不编入增刊。投稿方式:电子邮件或光盘(Word 格式),并注明“第九次全国热处理大会征文”字样。