

纯钛高能喷丸表面纳米化后粗糙度的分析*

杨 磊, 赵秀娟, 陈春焕, 陈婷婷, 徐祥来, 任瑞铭

(大连交通大学 材料科学与工程学院, 大连 116028)

摘 要: 通过高能喷丸方法 (HSP) 使工业纯钛获得约 60 μm 的表面纳米层, 并通过表面形貌仪对喷丸后表面粗糙度进行了测量, 结果表明, 纯钛表面 HSP 处理后, 表面粗糙度增大, 喷丸 10 min 时粗糙度达到最大值, 继续喷丸粗糙度降低, 喷丸 60 min 时粗糙度趋于稳定。喷丸时间 60 min 时表面粗糙度对其疲劳性能的影响最小, 表面纳米化效果最佳。

关键词: 表面纳米化; 工业纯钛; 表面粗糙度; 应力集中

中图分类号: TB383

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)04-0043-04

Analysis of Surface Roughness of Pure Titanium After Surface Nanocrystallization by High-energy Shot Peening

YANG Lei, ZHAO Xiu-juan, CHEN Chun-huan, CHEN Ting-ting, XU Xiang-lai, REN Rui-ming

(Dalian Jiaotong University, Dalian 116028 China)

Abstract: Surface nanocrystallization of pure titanium was obtained by means of HSP, and then the variation of R_a was measured by the profilometer. The results showed that R_a increases after surface nanocrystallization, which can cause stress concentration and accelerate the initiation of cracks on the surface, therefore will decrease the fatigue intensity. The effect of shot peening for 60 minutes was best.

Key words: surface nanocrystallization; pure titanium; surface roughness; stress concentration

0 引 言

表面纳米化作为表面强化的一种手段, 是近年来由中科院卢柯提出的一个全新的概念^[1~2], 即利用各种物理或化学方法将材料的表层晶粒细化至纳米量级, 制备出一定厚度的具有纳米晶粒结构的表层, 但是基体仍然保持原有的粗晶状态, 表面纳米晶组织与基体组织之间不存在明显的界面, 在使用过程中不会发生剥层和分离, 借以通过表面组织和性能的优化来提高材料综合的力学性能和服役行为。目前为止, 对于铜、不锈钢、铁、纯钛等^[3~7]材料通过高能喷丸方法 (HSP) 获得表面纳米化和表面纳米化机理研究较多, 并取得了一些阶段性成果, 而对表面纳米化后的粗糙度以及对疲劳性能的影响研究还未见报道。

表面粗糙度也称表面光洁度, 是指加工表面上具有的较小间隔和峰谷所组成的微观几何形状特

接影响零件的耐磨性、疲劳强度、接触刚度, 抗腐蚀性、密封性以及导电、导流性能等, 是影响零件及产品性能的一项重要指标^[8~9]。因此, 合理选择零件的表面粗糙度, 对机械和仪器的使用性能和使用寿命均起着重要的作用。

在研究中发现, 高能喷丸 (HSP) 处理后获得表面纳米化的同时, 引起了表面粗糙度的增大, 文中主要对粗糙度的变化规律、原理及粗糙度增大引起的应力集中进行了分析。

1 试验材料与方法

试验材料为 TA2 工业纯钛冷轧板, 将钛板切割成 10 mm × 10 mm × 3 mm 的试样, 用改进的 QPL30 型履带式抛丸机进行纳米化喷丸, 喷丸速度为 45 m/s, 弹丸直径为 1 mm 的淬火铬钼合金钢钢球。喷丸后的试样用超声波清洗并吹干, 用 SHIMADZU XRD-6000 型 X-射线衍射仪、SM-6360LV 扫描电镜和 H-800 型透射电镜进行纳米化表征, 用 FM-700 型半自动数字显微硬度计测量系统测量, 用 ZYGO Newview 5000 表面形貌仪测定粗糙度的变

收稿日期: 2006-04-05; 修回日期: 2006-04-13

基金项目: *国家自然科学基金资助项目(50171017)

作者简介: 杨磊(1980-), 男(汉), 山东菏泽市人, 硕士生。

征, 它是表征材料表面几何特征的参数之一。它直

化。

2 试验结果与分析

图 1 为工业纯钛原始试样和不同喷丸时间参数的 X 射线衍射谱图。从图中可以看出, 高能喷丸处理后试样的 X 射线衍射峰强度降低, 随着喷丸时间的延长, 工业纯钛的衍射峰逐渐宽化, 表明喷丸后的试样表层晶粒明显细化。利用谢乐公式: $\beta(2\theta) = \frac{0.94\lambda}{L \cos \theta}$, 得到不同时间参数喷丸处理后的试样表层晶粒尺寸, 如表 1 所示, 结果表明工业纯钛经高能喷丸后表层晶粒已达到纳米化。

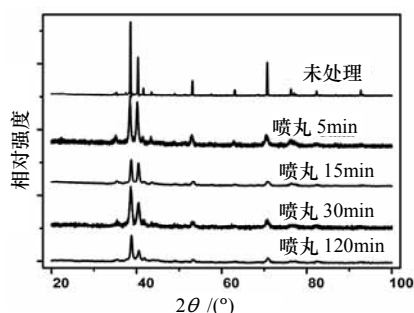


图 1 不同喷丸时间 X 射线衍射结果

Fig.1 X-ray patterns of TA2 after shot peening for various durations

表 1 工业纯钛不同喷丸时间后的表层晶粒尺寸

Table 1 The mean grain size of surface layer in TA2 samples after shot peening for different durations

喷丸时间 t/min	5	15	30	60	120
晶粒尺寸 L/nm	40	40	29	37	28

图 2 为喷丸 30 min 试样的扫描电镜照片, 从图中可以看出, 变形区从喷丸表面到心部大致可以分为 3 个区域: 最表层剧烈塑性变形区、过渡区、基体。距表面 0~60 μm 为剧烈塑性变形区, 变形非常剧烈, 基本看不清组织; 过渡区依稀能够看见晶界, 还可以看出孪晶的交割, 而且孪晶数量很多。

图 3 为喷丸 30 min 试样最表层选区电子衍射和暗场象, 测得试样表层的晶粒尺寸在 10~40 nm 之间, 选区电子衍射花样为平滑的衍射环, 表明晶粒细小, 取向随机。这与 X 射线衍射试验计算的结果基本吻合。

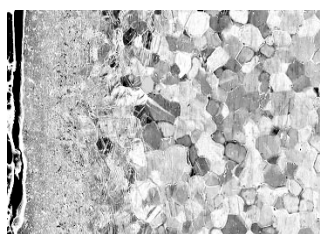


图 2 喷丸 30 min 试样扫描电镜照片

Fig.2 SEM image of 30 min shot peened sample

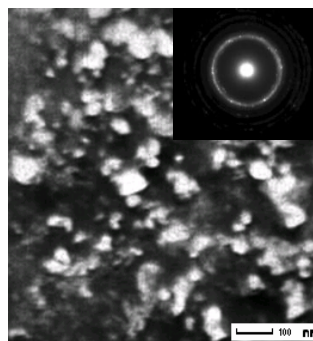


图 3 喷丸 30 min 试样表层选区电子衍射和暗场像

Fig.3 Dark-field TEM image and selected area electron diffraction pattern of 30min peened sample's surface layer

常用的评定表面粗糙度的参数有轮廓算数平均偏差 R_a 和轮廓最大高度 R_y , 轮廓算术平均偏差 R_a , 即在取样长度内纵坐标绝对值的算术平均值, R_a 既能反映加工表面的微观几何形状特征, 又能反映凸峰高度, 因此常用 R_a 来评定轮廓表面的粗糙度。图 4 为不同喷丸时间参数下的轮廓算数平均偏差 R_a 变化规律, 从图中可以看出, 未喷丸原始试样表面粗糙度较小, R_a 为 0.32 μm , 当喷丸 1 min 之后, 粗糙度数值变化较大, 达到 7.4 μm , 继续延长喷丸时间, 表面粗糙度明显减小, 喷丸 3 min 时达到一个极小值, 然后随着喷丸时间的延长粗糙度开始增大, 喷丸 10 min 时表面粗糙度达到最大值, 然后逐渐下降, 至喷丸 60 min 时表面粗糙度逐渐趋于稳定。喷丸 1 min 粗糙度明显增大是因为表面覆盖率还没有达到 100%, 即喷丸表面还没有被弹丸完全撞击到, 从而造成喷丸表面的起伏较大, 因此当喷丸表面覆盖率达到 100% 时 (对应喷丸 3 min 时), 粗糙度明显减小。继续喷丸, 表面粗糙度开始逐渐增大, 原因是此时表面硬度不是太高且不均匀, 每个弹丸撞击的能量不同, 导致材料表面形成较大的峰谷, 粗糙度增大, 随着喷丸时间的延长, 由于弹丸连续的

高能量的撞击，表面加工硬化现象逐渐增加，材料表面峰谷降低，表面粗糙度趋于一定值。表面硬度随喷丸时间的变化规律如图 5 所示，随喷丸时间的增加表面硬度迅速增大，喷丸 10 min 后变化幅度变小，表面硬度趋于稳定。这与表面粗糙度的变化规律相吻合。

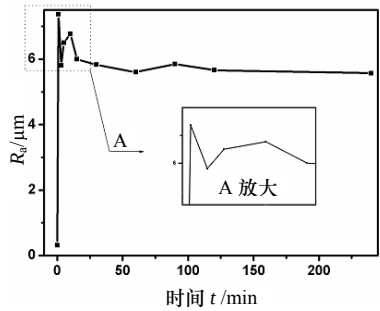


图 4 不同喷丸时间的粗糙度 R_a 变化曲线

Fig.4 R_a curve of TA2 after peening for various durations

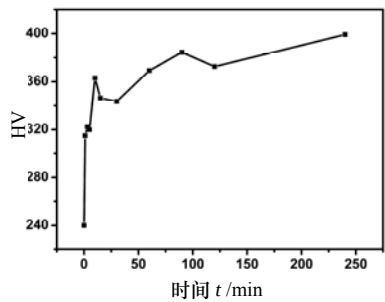


图 5 不同喷丸时间的表面硬度变化曲线

Fig.5 Surface HV curve of TA2 after peening for various durations

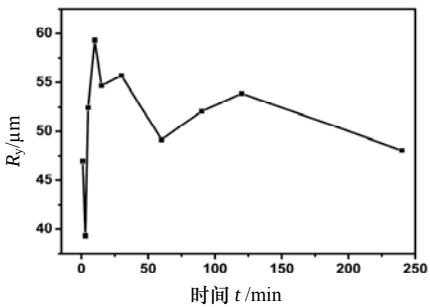


图 6 不同喷丸时间的轮廓最大高度 R_y 变化曲线

Fig.6 R_y curve of TA2 after peening for various durations

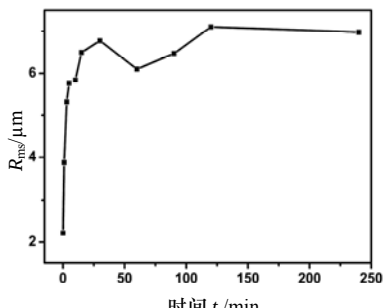


图 7 不同喷丸时间的轮廓单元的平均宽度 R_{ms} 变化曲线

Fig.7 R_{ms} curve of TA2 after peening for various durations

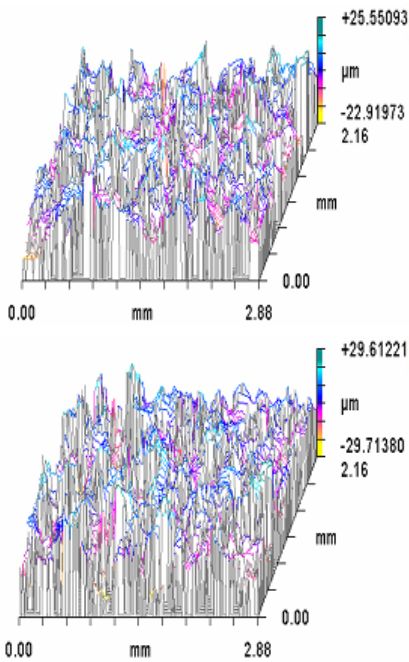


图 8 喷丸 10 min 和 60 min 纯钛表面三维形貌

Fig.8 Surface profile of 10 min and 60 min shot peened samples

轮廓最大高度 R_y ，即在取样长度内最大轮廓峰高和最大轮廓谷深之和的高度，它不能反映轮廓的微观几何形状特征，但可以反映表面轮廓的最大高度，尤其可以用来控制表面不平度的极限情况，常用于某些零件不允许出现较深的加工痕迹及小零件的表面，图 6 为纳米化喷丸后的轮廓最大高度变化规律，由图可知，纳米化喷丸后试样表面的轮廓最大高度随喷丸时间的的变化幅度较大，喷丸 10 min 时，达到最大值 59 μm ，而喷丸 60 min 时出现极小值，为 48 μm 。图 7 为纳米化喷丸后的轮廓单元平均宽度 R_{ms} 的变化规律，它主要表征表面粗糙峰的平均宽度，由图可知，试样表面的轮廓单元的平均宽度喷丸 10 min 时，达到极大值 6.8 μm ，而喷丸

60 min 时出现极小值, 为 $6.2 \mu\text{m}$, 差别不大。图 8 是纳米化喷丸 10 min 和 60 min 时表面的三维轮廓图, 由图可知, 纳米化喷丸 10 min 时试样表面粗糙峰参差不齐, 峰高差别较大, 而喷丸 60 min 时表面粗糙峰峰高差别较小, 表面轮廓较为平缓。图 9 为表面粗糙峰的示意图, 可用轮廓最大高度 R_y 表征粗糙峰的谷深, 用轮廓单元的平均宽度 R_{ms} 表征粗糙峰的宽度, 把这些分布紧密的粗糙峰等效地近似为不同形状的微观缺口, 则粗糙峰谷底的应力可用缺口应力公式^[10]计算:

$$\sigma = 2k \left\{ 1 + \ln \left(1 + \frac{\chi}{R} \right) \right\}$$

式中: χ 一是从缺口根部算起的距离, 即轮廓最大高度 R_y 。

R 是缺口曲率半径, 与轮廓单元的平均宽度 R_{ms} 成正比。

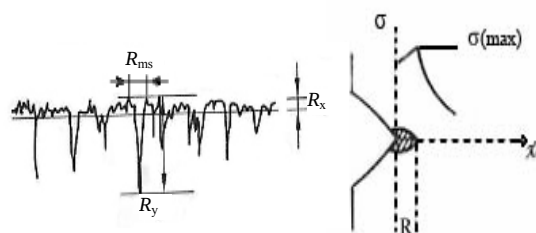


图 9 喷丸表面粗糙峰的示意图

Fig.9 Scheme of sample surface after peening

则由上述公式可知, 试样表面轮廓最大高度 R_y 越小, 轮廓单元的平均宽度 R_{ms} 越小, 粗糙峰谷底的应力越大, 即高能喷丸造成的试样表面粗糙峰谷底的应力集中程度与轮廓最大高度成正比, 与轮廓单元的平均宽度成反比。喷丸 10 min 时造成的应力集中程度比喷丸 60 min 大的多。而一般来说硬度越高, 材料对缺口和粗糙度的敏感性就越大。试样经高能喷丸后, 表面加工硬化现象严重, 在表面粗糙峰谷底形成应力集中, 在交变应力作用下会形成疲劳源, 产生疲劳裂纹并不断扩展, 从而降低材料的疲劳强度。因此, 通过高能喷丸获得表面纳米化的同时为了减小喷丸粗糙度对其疲劳性能的影响, 喷丸 60 min 效果最佳。

3 结 论

通过高能喷丸在工业纯钛表面获得约 $60 \mu\text{m}$ 的纳米层; 同时高能喷丸也使表面粗糙度增大, 喷丸 10 min 时粗糙度达到最大值, 继续喷丸粗糙度降低, 喷丸 60 min 时粗糙度趋于稳定; 喷丸后表面粗糙度的变化规律主要与表面覆盖率和加工硬化有关, 当表面覆盖率达到 100 % 后, 随材料加工硬化逐渐增大, 粗糙度趋于稳定; 高能喷丸 10 min 引起的表面粗糙峰应力集中程度较大, 喷丸 60 min 应力集中程度最小, 为了减小喷丸粗糙度对其疲劳性能的影响, 选择 60 min 为最佳喷丸时间。

参考文献:

- [1] 刘刚, 雍兴平, 卢柯. 金属材料表面纳米化的研究现状 [J]. 中国表面工程, 2001, 14(3): 1-5.
- [2] Lu K, Lu J. Surface nanocrystallization (SNC) of metallic materials-presentation of the concept behind a new approach [J]. Mater. Sci. Technol. 1999, 15(3): 193-197.
- [3] 雍兴平, 刘刚, 吕坚, 等. 低碳钢表面纳米化处理及结构特征 [J]. 金属学报, 2002, 38(2): 157-160.
- [4] 冯淦, 石连捷, 吕坚, 等. 低碳钢超声喷丸表面纳米化的研究 [J]. 金属学报, 2000(3): 300-303.
- [5] Zhang H W, Hei Z K, Liu G, et al. Formation of nanostructured surface layer on AISI 304 stainless steel by means of surface mechanical attrition treatment [J]. Acta Materialia, 2003(51): 1871-1881.
- [6] 张洪旺, 刘刚, 黑祖昆, 等. 表面机械研磨诱导 AISI 304 不锈钢表层纳米化 [J]. 金属学报, 2003 (4): 347-350.
- [7] 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 [J]. 表面技术, 2003, 32(3): 16-18.
- [8] 汪恺. 表面结构 [M]. 中国计划出版社, 2004: 4-6.
- [9] 李伯奎, 刘远伟. 表面粗糙度理论发展研究 [J]. 工具技术, 2004, 38(1): 63-67.
- [10] 林吉忠, 刘淑华. 金属材料的断裂与疲劳 [M]. 中国铁道出版社, 1989: 149.

作者地址: 大连交通大学研究生部 206# 116028
大连交通大学材料科学与工程学院 金属材料教研室
Tel: (0411) 81283746 E-mail: ylg_wen@163.com