doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2014.05.012

# 表面超声滚压处理工艺对高速列车车轴钢 表面状态的影响\*

陈利钦<sup>1a</sup>,项 彬<sup>2</sup>,任学冲<sup>1b</sup>,刘鑫贵<sup>2</sup>,林国标<sup>1a</sup>

(1. 北京科技大学 a. 材料科学与工程学院, b. 国家材料服役安全科学中心, 北京 100083; 2. 中国铁道科学 研究院 金属与化学研究所, 北京 100081)

**摘** 要:为提高高速列车车轴钢的疲劳性能,对车轴钢 EA4T 进行了表面超声滚压处理(SURP)。综合运 用了粗糙度测量仪、扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射应力分析仪、显微硬度仪以及金相显微镜研究了表 面超声滚压处理工艺参数中静压力和进给速度对高速列车车轴钢表面粗糙度、表面残余应力状态、表层显微 硬度及微观组织的影响规律。结果表明:在试验参数范围内,静压力和进给速度越低,车轴钢的表面粗糙度 越低;SURP后,试样表面轴向残余压应力得到大幅度提高,并且随着静压力的增加而增加,随着进给速度的 增加而减小;表面硬度以及塑性变形层厚度随两参数的变化规律与残余应力的变化规律相似。

关键词:表面超声滚压处理;表面粗糙度;残余应力;显微硬度;微观组织

中图分类号: TG174.44; TG668 文献标志码: A 文章编号: 1007-9289(2014)05-0096-06

## Influences of Surface Ultrasonic Rolling Processing Parameters on Surface Condition of Axle Steel Used in High Speed Trains

CHEN Li-qin<sup>1a</sup>, XIANG Bin<sup>2</sup>, REN Xue-chong<sup>1b</sup>, LIU Xin-gui<sup>2</sup>, LIN Guo-biao<sup>1a</sup>

(1a. School of Materials Science and Engineering, 1b. National Center for Materials Service Safety, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083; 2. Materials & Chemistry Research Institute, China Academy of Railway Science, Beijing 100081)

**Abstract**: In order to improve the fatigue performance of the axle steel used in high speed trains, the surface ultrasonic rolling processing (SURP) was used. The influences of different static loads and feeding speeds on the surface roughness, surface residual stress, surface microhardness and microstructure of high speed train axle steel were investigated using a comprehensive application of roughness instrument, scanning electron microscope(SEM), X-ray stress analyzer, microhardness tester and metallurgical microscope. The results show that the lower the static loads and feeding speeds are, the smaller the surface roughness of processed specimens is. After SURP, the surface residual stress is significantly improved, and it increases with the increase of the static load, but decreases as the feeding speed increases. The change regulations of the surface hardness and plastic deformation thickness are the same as that of the residual stress.

Key words: surface ultrasonic rolling processing; surface roughness; residual stress; microhardness; microstructure

### 0 引 言

#### 表面超声滚压处理技术(Surface ultrasonic

rolling processing, SURP)是将超声冲击和滚压相结合,对金属表面进行微幅高速撞击和滚压处

收稿日期:2014-05-04;修回日期:2014-08-12;基金项目:\*国家自然科学基金(U1234207);北京高等学校青年英才计划 作者简介:陈利钦(1988-),男(汉),河北邯郸人,硕士生;研究方向:材料的疲劳断裂

网络出版日期: 2014-09-11 17:04; 网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140911.1704.002.html 引文格式:陈利钦,项彬,任学冲,等.表面超声滚压处理工艺对高速列车车轴钢表面状态的影响[J].中国表面工程,2014,27(5):96-101.

理,从而改善金属表面状态及性能的新技术[1]。 与其它表面强化技术相比,SURP 技术具有以下 优点:①将动态冲击和静态载荷相结合,有助于 工作头位置的自动调节,使其对加工表面的适应 性更强<sup>[2]</sup>;②相比滚压和喷丸技术,SURP能使被 加工表面获得更好的光洁度<sup>[3-5]</sup>;③SURP 装置的 工作头采用可滚动的硬质合金球,延长了工作头 的使用寿命,提高了加工效率<sup>[6-7]</sup>。

由于 SURP 技术对改善材料表面质量和提 高材料疲劳性能方面[8]具有独特的优势,近年来 国内外学者对 SURP 强化机理及其应用开展了 广泛的研究。吕光义等[9]研究了表面超声滚压 对 TC4 钛合金表面形貌和粗糙度的影响,发现加 工后的试件表面粗糙度 Ra 可由 2.32 μm 降低到 0.11 μm。刘宇等<sup>[10]</sup> 采用纳米压痕法对 SURP 处理后的 40Cr 钢的表层力学性能进行了研究, 发现加工次数的增加可使其表层弹性模量和硬 度以及高硬度值的深度增加,并且推算出其表层 最大残余压应力位于材料表面。Wang<sup>[2]</sup>等人对 40Cr 经 SURP 处理后的表层微观组织进行了观 察,发现材料表层发生了严重塑性变形,从而导 致其表层晶粒尺寸达到了 3~7 nm。这些研究表 明:SURP 对材料表面粗糙度的降低、硬度的提 高、残余应力的增加以及微观组织的改变均有明

显作用。但目前关于 SURP 处理工艺对表面状 态的影响尚缺乏系统研究,在一定程度上限制了 SURP 的实际应用。

随着我国高速铁路的快速发展,高速列车安 全问题受到越来越高的重视。车轴是高速列车 走行系统中最关键的受力部件之一[11],承受高周 乃至超高周的旋转弯曲交变载荷作用,其失效形 式多为疲劳破坏[12-13]。因此使用能够提高车轴 疲劳性能的有效表面改性方法,对保证其运行安 全,延长其服役寿命具有重要的经济和社会价 值<sup>[14]</sup>。由于 SURP 的技术特点对车轴表面处理 具有独特的优势,文中将 SURP 技术应用于车轴 钢,对比分析了不同的加工参数对于其表面状态 的影响,为利用 SURP 技术提高车轴钢疲劳性能 提供了工艺基础及理论依据。

#### 材料与方法 1

#### 1.1 试验材料

试验材料为根据 EN13261 标准生产的高速 列车车轴钢 EA4T,其化学成分如表1所示。车 轴材料热处理为淬火后回火。车轴轴身外表层 拉伸试样的屈服应力为 620 MPa,抗拉强度为 774 MPa.

表1 车轴钢的化学成分

·.· (.1

Table 1 Chemical composition of the axle steel								
Element	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Ni	Fe
Content	0.28	0.34	0.74	0.012 9	0.002 9	1.07	0.28	Bal.

### 1.2 试验方法

所有试样均从车轴轴身外表层上截取,将其 车削加工成 $\phi$  14 mm×160 mm 的光滑圆柱试 样,试样长度方向与车轴长度方向一致。将圆柱 光滑试样利用不同的 SURP 参数进行处理。试 验设备采用 HKUSM30HB 型超声滚压设备及卧 式车床,SURP处理时,对不同试样主要改变压 头讲给速度、静压力两个参数,表面超声滚压处 理机床主轴转速、超声振动频率和振幅均相同, 分别为 300 r/min、30 kHz 及 8 µm。滚压头为直 径 7.4 mm 的硬质合金钢球。不同试样的 SURP 处理参数设置如表2所示。

表 2 不同试样表面超声滚压处理参数

Table 2	Surface	ultrasonic	rolling	processing	parameters	of	different	specimens
---------	---------	------------	---------	------------	------------	----	-----------	-----------

Specimen number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Static load/kN	1.0	1.0	1.0	1.5	1.5	1.5	2.0	2.0	2.0
Feeding speed/(mm $\cdot r^{-1}$ )	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3

"波浪状"纹理。

### 1.3 表征与分析

试样经 SURP 处理后,采用 TR-200 触针式表 面粗糙度仪对其表面粗糙度进行测量,用 Quanta 400 扫描电子显微镜观察试样表面形貌,在 Neophot-21 型金相显微镜下观察试样截面的表层微 观组织,用 FM-7 维氏显微硬度仪测量试样截面 表层硬度随深度的变化,加载力为 1.96 N、保持时 间为 10 s;试样表面轴向残余应力使用 MSF-2M X 射线应力分析仪测量,Cr 靶,管流为 9.0 mA, 管压 30 kV,采用同倾固定 $\varphi$ 法, $\varphi$ 分别取 0°、10°、 20°和 30°。

### 2 结果及讨论

### 2.1 表面粗糙度及形貌

SURP 处理前试样表面粗糙度 Ra 为(0.90± 0.04) μm,其表面形貌如图 1(a)所示,表面车削



(a) Before SURP

(b) Specimen 4

(c) Specimen 9







Fig. 2 Surface roughness of the specimens under different SURP parameters

### 2.2 表面残余应力

试验测得未经表面超声滚压处理试样的轴

向残余压应力为-97 MPa。不同参数 SURP 处 理试样的表面轴向残余应力值如图 3 所示。由 图可以看出:经过 SURP 后试样表面残余压应力 均达到了 600 MPa 以上,并且当进给速度相同 时,表面残余压应力随着静压力的增加而增加; 当静压力相同时,随着进给速度的增加,试样表 面残余压应力略有降低。

形成的刀痕清晰可见。图 1(b) 是静载 P 为

1.5 kN,进给速度 v 为 0.1 mm/r 的 4 号试样的表

面形貌,已观察不到表面车削形成的刀痕。图 1(c)

是静载 P 为 2.0 kN,进给速度 v 为 0.3 mm/r 的

9号试样的表面形貌,从中能够看到被挤压出的

粗糙度的变化。由图可见:表面超声滚压处理工

艺对表面粗糙度影响显著。当进给速度较低且

静压力也较低的情况下,经 SURP 处理后试样表

面粗糙度显著降低。从图 2 还可以看出,随着静 压力以及进给速度的增加,表面粗糙度逐渐增

加。这是由于进给速度的增加影响试样表面加 工的连续程度;同时如果静压力过大,则表面会

发生严重不均匀塑性变形,被挤压出周向细纹,

严重时会出现"鳞片状"纹理。

图 2 为不同静压力和进给速度下,试样表面

#### 2.3 表层显微硬度

图 4 为 4 号试样截面表层显微硬度测量后留 下的压痕,最表层压痕中心距表面的距离为 40 μm,压痕中心的间距为 80 μm。图 5 为不同 SURP 后以及未处理试样显微硬度随深度的变 化。由图可见,经过 SURP 处理后试样表层显微 硬度均明显提高。硬度沿深度方向逐渐减小,最 终趋于稳定。并且当进给速度相同时,加工硬化 层的深度随着静压力的增加而增加。如 1~3 号







图 4 4 号试样显微硬度坑 Fig. 4 Microhardness pit of the specimen 4

试样的硬化层深度平均值为 200 μm, 而 4~6 号 试样的硬化层深度平均值为 360 μm, 7~9号试样 的硬化层深度平均值达 480 μm。当静压力相同 时,随着进给速度增加,表层硬度及硬化层深度 略有减小。

### 2.4 表层微观组织

图 6 为未经 SURP 处理车轴钢试样表层微 观组织,其主要为贝氏体 + 回火马氏体组织,符 合 EN13261 标准要求。由于篇幅所限,文中仅选 取典型试样说明静压力和进给速度对表层微观 组织的影响。图 7 为进给速度为 0.1 mm/r,静压 力分别为 1.0 kN 和 2.0 kN 的 1 号和 7 号试样 表层组织。由图可见:表层由于剧烈的塑性变形 导致明显的形变组织。对比图 6(b)和图 7(c),可 以发现 SURP 后经过严重的塑性变形,表层微观 组织发生细化。相关研究<sup>[2,15-16]</sup>均表明,表面严 重塑性变形能使表层晶粒细化,甚至达到纳米级 别<sup>[2]</sup>,这是因为塑性变形导致位错的运动,随着 塑性变形量的增加,位错密度增加,形成位错缠 结和位错胞,这将导致亚晶粒的形成,这些亚晶 粒生长成新的晶粒,从而使晶粒细化。

对比图 7(a)和图 7(b)可以看出,当进给速度 为 0.1 mm/r 时,静压力为 1.0 kN 的 1 号试样塑 性流变区的厚度约为 100 μm,而静压力为 2.0 kN 的 7 号试样塑性流变区的厚度约为 400 μm 左右。



图 5 不同 SURP 条件下试样表层显微硬度随深度的变化 Fig. 5 Microhardness along the depth of specimens with different SURP parameters



(a) Low magnification

(b) High magnification







Fig. 7 Surface microstructure of the specimens processed with different static load P at 0.1 mm/r

图 8 为静压力为 1.5 kN,进给速度分别为 0.1 mm/r 和 0.3 mm/r 时 4 号和 6 号试样横截 面的表层微观形貌。由图可见:4 号试样表层塑 性流变区的厚度约为 250 μm,6 号试样的约为 150 μm。可见当进给速度相同时,随着静压力的 增大,材料塑性变形程度加重,并且塑性流变区 沿深度方向扩展。当静压力相同时,随着进给速度的增加,塑性流变区的厚度减小。但是相对于静压力对塑性变形区厚度的影响,进给速度的影响较弱。正是由于材料表层塑性变形的产生,使得 SURP 试样表面状态发生改变。对于车削试样,加工刀痕是表面粗糙度较高的主要原因。在



(a) Specimen 4, v=0.1 mm/r

(b) Specimen 6, v=0.3 mm/r

100

图 8 静压力(P=1.5 kN)相同,进给速度 v不同时试样的表层金相组织 Fig. 8 Surface microstructure of the specimens processed with different feeding speed v at 1.5 kN 作头高频 [2] Wang T, Wang D P, Liu G, et al. Investigations on nano-生均匀的 [J]. Applied Surface Science, 2008, 255(5), 1824-9.

- [3] 王婷,王东坡,沈煜,等. 超声表面滚压加工参数对 40Cr表 面粗糙度的影响 [J]. 天津大学学报,2009,42(2):169 -172.
- Yang X J, Zhou J X, Ling X. Study on plastic damage of AISI 304 stainless steel by ultrasonic impact treatment [J]. Materials and Design, 2012, 36: 477-481.
- [5] 张新华,曾元松,王东坡,等. 超声喷丸强化 7075-T651 铝合金表面性能研究 [J]. 航空制造技术,2008(13):78-80.
- [6] 王东坡,宋宁霞,王婷,等.纳米化处理超声金属表面 [J].天津大学学报,2007,40(2):228-233.
- [7] Yan W L, Fang L, Sun K. Effect of surface work hardening on wear behavior of Hadfield steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 460-461(15): 542-549.
- [8] Brain Vihauer, Caroline R Bennett, Adolfo B Matamoros, et al. Fatigue behavior of welded coverplates treated with ultrasonic impact, treatment and bolting [J]. Engineering Structures, 2012, 34: 163-172.
- [9] 吕光义,朱有礼,李礼,等. 超声深滚对 TC4 钛合金表面 形貌和表面粗糙度的影响 [J]. 中国表面工程,2007,20 (4):38-41.
- [10] 刘宇. 金属表面超声滚压加工理论及表层力学性能的研究 [D]. 天津:天津大学,2012.
- [11] 赵利华,张开林,张红军.高速动车应力谱分析及疲劳寿命 可靠性预测[J].交通运输工程学报,2008,8(5):27-28.
- [12] 周建斌. 机车车轴疲劳问题分析及对策 [J]. 电力机车与 城轨车辆, 2008, 31(2): 5-7.
- [13] 黄国重,黄红磊,袁清华,等. XCQ16和20Mn2车轴用钢 疲劳失效微观机理[J].北京科技大学学报,2009,31(8): 988-994.
- [14] 王婷, 王东坡, 刘刚, 等. 40Cr 超声表面滚压加工纳米化 [J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 177-183.
- [15] Wu X, Tao N, Hong Y, et al. Microstructure and evolution of mechanically-induced ultrafine grain in surface layer of Al-alloy subjected to USSP [J]. Acta Material, 2002, 50(8): 2075-84.
- [16] Fan Z, Xu H, Li D, et al. Surface nanocrystallization of 35 # type carbon steel induced by ultrasonic impact treatment (UIT)
   [J]. Procedia Engineering, 2012, 27: 1718-22.
- [17] Schijve J. Fatigue of structures and materials, second edition[M]. Sturtz GmbH Wurzburg: Springer, 2009, 89-102.

 作者地址:北京市海淀区学院路 30 号
 100083

 北京科技大学材料科学与工程学院
 Tel: (010) 6232 2740

 E-mail: chenliqin07@163.com

合适的工艺参数下,SURP 过程中,工作头高频 超声机械振动及静压力使试样表面产生均匀的 塑性变形,在材料表面起到削"峰"填"谷"作用, 从而对车削试样的表面粗糙度起到改善作用。 但当静压力过大时,工作头与试样表面间的压强 过大,接触部位的塑性变形过于严重,甚至出现 表层褶皱和剥离,从而导致表面粗糙度升高。

SURP 过程中,由于试样表层不同深度处塑 性变形程度的不一致,越靠近表面塑性变形越 大,因此在试样表面产生残余压应力。当静压力 越大时,表面材料与内部塑性变形程度的差异越 大,产生的残余压应力也越大。表面塑性变形的 产生会导致材料发生加工硬化,并且塑性变形程 度越大,加工硬化程度越大。同时,塑性变形程 使表层微观组织细化,加工硬化和组织细化共同 导致试样表层显微硬度升高,静压力越大,材料 硬化层深度也越深。大量研究表明,材料的疲劳 强度与表面状态有密切关系<sup>[17]</sup>,尤其是材料表面 的粗糙度和残余应力状态。由于 SURP 对高速 列车车轴材料表面状态具有明显的影响,其工艺 参数对材料疲劳性能的定量影响有待进一步 研究。

### 3 结 论

(1) SURP 处理中,试样表面粗糙度随静压 力及进给速度的降低而降低。经一定工艺参数 SURP 处理后,试样表面粗糙度得到明显的改善,

(2) SURP 处理后试样表面轴向残余压应力 和表层硬度得到了很大提高,它们随静压力的增 加而增加,随进给速度增加而减小,但是前者对 它们的影响更大。

(3)试样表面残余压应力及表层硬度的增加 主要是由于试样表层在 SURP 处理过程中发了 明显的塑性变形及微观组织细化。残余压应力 及表层硬度的变化与塑性变形程度具有明显的 一致性,它们受 SURP 处理工艺参数影响的规律 相同。

### 参考文献

[1] 郑建新,罗傲梅,刘传绍.超声表面强化技术的研究进展
 [J].制造技术与机床,2012(10):32-33.