EA4T 车轴不同加工工艺表面完整性分析

徐锋[1]，章武林[2]，杜永强[2]，宋川[3]，山荣成[1]，朱旻昊[2]

（1.中车青岛四方机车车辆股份有限公司 技术工程部，山东 青岛 266000；2.西南交通大学 牵引动力国家重点实验室摩擦学研究所，成都 610031；3.中国航发成都发动机有限公司，成都 610031）

摘 要：目的 探索不同加工工艺对 EA4T 车轴表面完整性的影响。**方法** 针对 EA4T 成品车轴精车加工的表面，以及精车之后再分别作打磨抛光、滚压处理的表面，运用里氏硬度仪、X 射线衍射残余应力分析仪、扫描电子显微镜以及三维光学显微镜等设备，进行表面硬度、表面残余应力状态、表面形貌及粗糙度检测。**结果** 精车后表面的平均硬度为 221HV，表面轴向、周向平均残余应力为–371、–231 MPa，表面粗糙度（*Ra*）为 1.432 μm。而精车之后再分别作打磨抛光、滚压处理，表面硬度分别提升了 2.3%、11.6%，表面轴向残余应力分别增加了 9.7%、23.5%，周向残余应力增幅分别为 18.6%、59.3%，同时表面粗糙度（*Ra*）大幅度下降到 0.442、0.318 μm。**结论** 滚压、打磨抛光皆能提升车轴表面的硬度和残余应力水平，降低表面粗糙度（*Ra*）。相比而言，滚压的效果更理想。

关键词： 滚压；打磨抛光；表面完整性；高速列车；车轴

中图分类号： TG356.28 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3660(2017)12-0277-06

DOI： 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.12.043

Analysis of Surface Integrity of EA4T Axle Being Processed in Different Technologies

XU Feng[1], *ZHANG Wu-lin*[2], *DU Yong-qiang*[2], *SONG Chuan*[3], *SHAN Rong-cheng*[1], *ZHU Min-hao*[2]

(1.Technical Engineering Department, CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd, Qingdao 266000, China; 2.Tribology Research Institute, Traction Power State Key Laboratory, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3.AECC Chengdu Engine Co., Ltd, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: The work aims to explore effects of different processing technologies on surface integrity of EA4T axles used in high speed trains. For EA4T finished axle surface subject to finish turning (FT) and the surface polished and rolled after FT, surface hardness, surface residual stress, surface microstructure and surface roughness were detected with the Leeb hardness tester, X-ray diffraction residual stress analyzer, scanning electron microscope and 3D optical microscopy. After FT, average roughness of the surface was 221HV, axial and circumferential average residual stress were –371 MPa and –231 MPa, respectively. Surface roughness (*Ra*) was 1.432 μm. However, for the surface being polished and rolled after FT, the hardness of increased by 2.3% and 11.6%, respectively; surface axial residual stress increased by 9.7% and 23.5%, respectively; the circumferential average residual stress increased by 18.6% and 59.3%, respectively. Meanwhile, the surface roughness (*Ra*) significantly dropped to 0.442 μm and 0.318 μm, respectively. Rolling and polishing can improve hardness and residual stress level of the

收稿日期：2017-05-27；修订日期：2017-06-05

Received：2017-05-27；**Revised**：2017-06-05

基金项目：校企合作项目（SF/JG-陶字-2016-156）

Fund：School-Enterprise Cooperation Project (SF/JG-The Tao Authorized-2016-156)

作者简介：徐锋（1983—），男，硕士研究生，高级工程师，主要研究轮对制造工艺。

Biography：XU Feng (1983—), Male, Master, Research focus: wheel manufacturing process.

通讯作者：朱旻昊（1968—），男，博士，教授，主要研究方向为摩擦学及表面工程。

Corresponding author：ZHU Min-hao (1968—), Male, Doctor, Professor, Research focus: tribology and surface engineering.

axle surface and reduce the surface roughness (*Ra*). In contrast, rolling has better effects.
KEY WORDS: rolling; polishing; surface integrity; high-speed train; axle

铁路是国家重要基础设施和交通运输的大动脉，世界各国都高度重视铁路交通的发展[1]。高速列车的服役安全性是铁路事业发展的重中之重，而车轴是轨道车辆和机车的走行机构核心部件之一，其可靠性直接关乎列车的行车安全[2]。大多数情况下，材料的失效破坏从表面开始[3]，材料失效与构件表面完整性（表面粗糙度、硬度、应力状态等）关系密切。目前，车轴表面的最终加工工艺有车削、磨削、滚压、打磨抛光等，不同加工工艺直接影响车轴的表面完整性。于鑫等[4]研究了车削加工工艺参数对车轴表面粗糙度、残余应力分布等的影响规律，并进行了工艺参数优选。李世涛等[5]通过 EA4T 车轴车削正交试验，研究了工艺参数与表面粗糙度之间的关系。景启明等[6]在国产 EA4T 车轴钢上截取光滑和缺口疲劳试样，对材料的缺口疲劳性能进行了研究。目前，对 EA4T 车轴表面完整性的研究主要是通过加工小比例试样，分析加工工艺对车轴表面完整性和疲劳寿命的影响规律，然而直接对 EA4T 成品轴表面完整性的研究较少。

本文以某高速列车成品 EA4T 新轴为研究对象，针对最终成形工艺为精车、滚压、打磨抛光的部位，进行表面硬度、残余应力、表面 SEM 形貌和三维形貌检测及粗糙度检测。通过试验结果，直观反映不同加工工艺对表面完整性的影响，为车轴的实际生产加工提供理论基础和数据支撑。

1 研究对象及参数

对于某型高速列车成品 EA4T 新轴，利用精车依次加工轴身与齿轮座处的过渡圆弧、轴身、轴身与轮座处的过渡圆弧。轴身与齿轮座处的过渡圆弧、轴身与轮座处的过渡圆弧在精车之后，再分别做滚压、打磨抛光处理。不同位置对应的最终成形工艺如图 1。滚压、打磨抛光后，通过样板检测仪检测圆弧位置尺寸精度。圆弧位置滚压之后，直径压缩量与打磨抛光之后材料的去除量都小于 0.01 mm，满足车轴加工技术要求。对精车（fine turning）、滚压（roll）、打磨抛光（polish）加工的车轴表面进行表面完整性分析。为了方便研究，忽略过渡圆弧与轴身几何外形差异对表面完整性的影响。

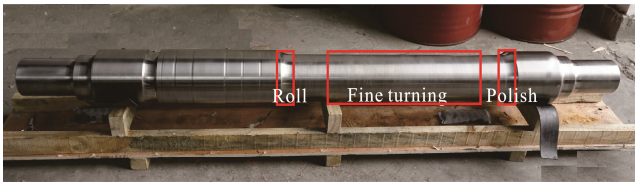


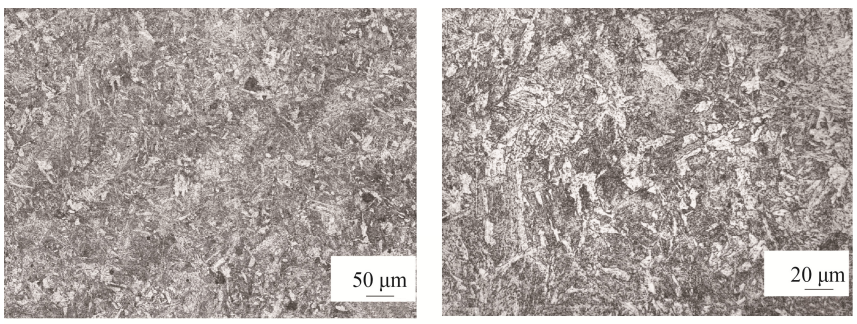
图 1 EA4T 车轴不同部位的加工工艺
Fig.1 Processing technology for different parts on EA4T axle

参照 EN 13261—2003《铁路应用——轮对和转向架——车轴——产品要求》，EA4T 车轴钢各元素的成分如表 1 所示[7]。

该 EA4T 车轴为空心车轴，按照 EN 13261—2003 规定，在空心轴内孔表面和外圆表面之间的位置取样进行金相分析。本研究在轴身位置取样。利用 3%的硝酸酒精溶液腐蚀，在彩色 3D 激光显微镜（VK-9170）下观察车轴钢的微观组织，如图 2 所示，可知 EA4T 车轴微观组织主要由针状的贝氏体和板条状的马氏体组成。

表 1 标准 EN 13261—2003 中 EA4T 车轴钢各元素含量
Tab.1 Eelement content of EA4T axle steel as specified in standard EN 13261—2003

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Fe
含量/wt%	0.22~0.29	0.15~0.40	0.50~0.80	0.020	0.015	0.90~1.20	0.30	0.15~0.30	0.30	0.06	Bal.



a 400× b 1000×

图 2 EA4T 车轴微观金相组织
Fig.2 Micro metallographic structure of EA4T axle steel

2　测试方法

2.1　表面硬度检测

预先清洁轴身及过渡圆弧表面，然后采用 TH110 便携式里氏硬度仪对该表面进行硬度测量，测试结果选择显示常用的维氏硬度值（HV）。在轴身和每段圆弧上各选 3 个测试截面，每个截面上沿圆周方向均布 9 个测点。

2.2　表面 X 射线残余应力检测

使用 X 射线残余应力分析仪（μ-X360n）检测轴身、过渡圆弧表面的残余应力。表 2 为 X 射线衍射法测试残余应力的相关参数。在轴身和每段圆弧上各选 2 个测试截面，每个截面上的 2 个测点呈 120°分布（参照 EN 13261—2003 中的要求）[9]。

表 2　X 射线衍射法测试残余应力相关参数
Tab.2 Test parameters for residual stress in XRD method

Target material	Detector	Power/W	Diffraction plane	Collimator diameter/mm	Diffraction angle/(°)
Cr	Full 2D detector	30	(211)	1	156.396

2.3　表面形貌分析及粗糙度检测

通过线切割，分别在精车、滚压、打磨抛光加工的表面沿圆周方向均匀截取 6 个试样。在超声环境下先后使用煤油、无水乙醇除去试样表面污物。然后采用扫描电子显微镜（JSM-6610LV）观察表面加工纹理。通过三维光学显微镜（3D Optical Microscopy，Bruker，Contour GT-K）观察表面三维形貌，并测量试样表面粗糙度。

3　检测结果及讨论

3.1　表面硬度检测

精车、打磨抛光和滚压三种工艺加工的表面硬度测试结果如图 3 所示。从图 3 可以看出，精车之后的表面平均硬度为 216HV，而经打磨抛光、滚压处理后，表面硬度分别为 221HV 和 241HV，分别增加了 2.3% 和 9.3%。

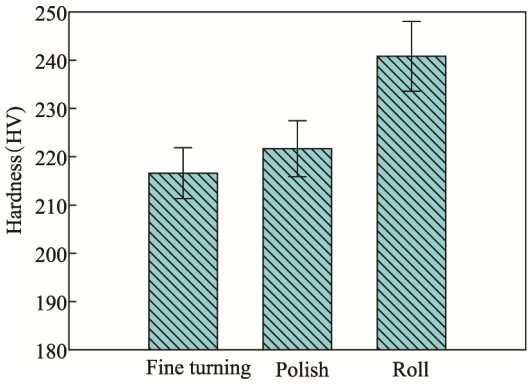


图 3　不同工艺加工的表面硬度检测结果
Fig.3 Surface hardness test results of different processing technologies

在机械加工过程中，金属表面层发生塑性变形，在塑性变形作用下金属发生强化的现象称为加工硬化[8]。打磨抛光过程中相当于切削刃的百叶轮磨粒以及滚压过程中的滚压头，挤压车轴表面使之发生塑性变形，导致车轴表面材料位错密度增加，形成位错缠结和位错胞，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[9]，达到提升表面的强度、硬度和耐磨性的效果。从表面硬度数值上看，滚压对表面硬度的提升效果比打磨抛光更显著。

3.2　表面 X 射线残余应力检测

精车、打磨抛光和滚压加工的表面 X 射线残余应力检测结果如图 4 所示。结果表明，三种工艺加工后，表面皆为压缩残余应力，且总体上轴向应力水平高于周向应力水平。精车的表面轴向残余应力为–371 MPa，周向为–231 MPa；打磨抛光加工的表面轴向、周向残余应力分别为–407、–274 MPa，在精车的基础上提升幅度分别为 9.7%和 18.6%；滚压加工表面的轴向和周向残余应力分别为–458、–368 MPa，提升幅度分别为 23.5%和 59.3%。

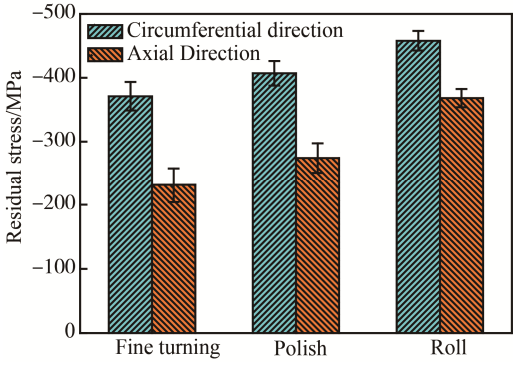


图 4　不同工艺加工的表面残余应力状态
Fig.4 Residual stress state of different processing technologies

研究表明[10]，导致金属材料表面残余应力产生的原因有不均匀的塑性变形、不均匀的相变、热作用、化学变化等。精车、打磨抛光和滚压加工过程对车轴表面造

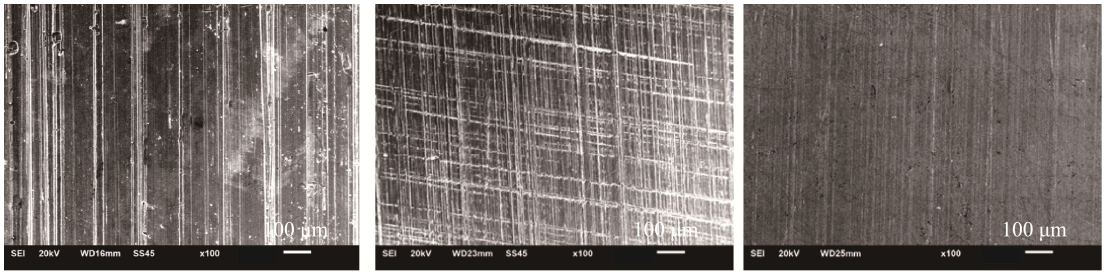
成不均匀塑性变形和切削热导致的不均匀温度场，这两者综合影响着表面的残余应力水平。根据测试结果，车轴所关注部位表面皆为残余压应力，符合标准 EN 13261—2003 的要求。滚压和打磨抛光都能在精车的基础上提升车轴表面残余压应力的水平，且滚压对表面残余应力的作用效果更显著，并与表面硬度的变化趋势相吻合。通常情况下，材料表面适当的压缩残余应力能提高材料的耐磨性、疲劳强度等[10]，所以相比而言，滚压效果优于打磨抛光。

3.3　表面形貌分析及粗糙度检测

精车、打磨抛光和滚压加工表面的 SEM 形貌见图 5。在三维光学显微镜下的表面三维形貌见图 6。

结合图 5 与图 6 进行分析，精车之后的表面纹理为规律的“波浪形”周向螺旋纹，每道车削纹理宽度约为 150 μm，该纹理的形成与车刀刀尖的圆弧半径、进给量、主轴回转速度和刀具与工件之间的振动等因素有关[11]。打磨抛光后的表面未观察到车削加工的螺旋纹，表面周向、轴向纹理呈交织的细小密集网状。打磨抛光的过程中，百叶轮磨头旋转轴线与车床主轴轴线垂直正交，充当切削刃的百叶轮磨粒对车轴表面进行磨削加工，但由于磨粒外露程度、破碎后的尖锐度差异，造成了表面局部加工纹理深浅不一。滚压加工后的表面光洁平整，观察不到车削螺旋纹，滚压头挤压车轴表面使表层材料发生局部微量塑性变形，从而辗平表面微观不平度[12]。

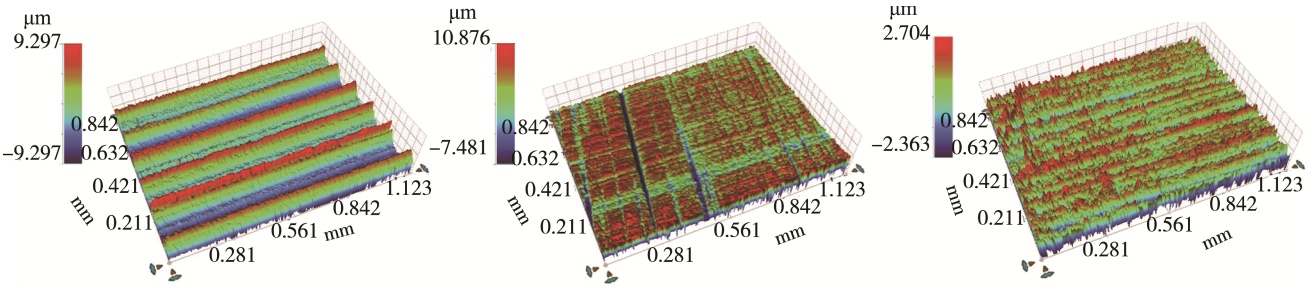
为进一步观察加工纹理的周向轮廓，处理三维光学显微镜采集的轮廓数据，如图 7 所示。可知精车加工纹理的轮廓波动非常有规律，类似“正弦曲线”，峰-峰宽度约 150 μm，波峰值在 3~4 μm 之间，波谷值在 2~3 μm 之间。打磨抛光和滚压去除了精车粗糙的表面纹理，表面非常平整，轮廓线波动范围为±1 μm。



a 精车加工表面　　b 打磨抛光加工表面　　c 滚压加工表面

图 5　不同工艺加工的表面 SEM 形貌

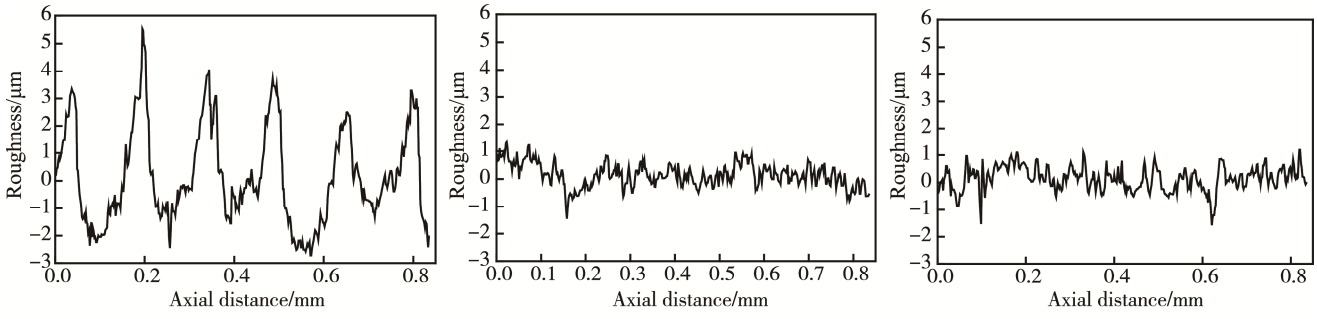
Fig.5 SEM morphology of surface processed in different technologies: (a) fine turning, (b) polishing, (c) rolling



a 精车加工表面　　b 打磨抛光加工表面　　c 滚压加工表面

图 6　不同工艺加工的表面三维形貌

Fig.6 3D morphology of surface processed in different technologies: (a) fine turning, (b) polishing, (c) rolling



a 精车轮廓　　b 打磨抛光轮廓　　c 滚压轮廓

图 7　不同工艺加工的表面周向轮廓

Fig.7 Circumferential profile of surface processed in different technologies: (a) fine turning, (b) polishing, (c) rolling

为了定量评价加工后的表面光洁度，遂对车轴表面粗糙度进行检测。常用的评定表面粗糙度的参数有轮廓算数平均偏差 *Ra* 和轮廓最大高度 *Rz*。其中，轮廓算数偏差 *Ra* 既能反映加工表面的微观几何形状特性，又能反映凸峰高度，因此用 *Ra* 来评定轮廓表面的粗糙度[13]。表 3 为三维光学显微镜测试车轴表面粗糙度（*Ra*）的结果。

表 3　精车、打磨抛光和滚压加工后表面粗糙度（*Ra*）
Tab.3 Surface roughness (*Ra*) after fine turning, polishing and rolling

Processing	Roughness(*Ra*)/μm						Mean roughness/μm
	1	2	3	4	5	6	
Fine turning	1.416	1.430	1.437	1.413	1.415	1.429	1.423
Polish	0.412	0.414	0.423	0.436	0.470	0.495	0.442
Roll	0.334	0.305	0.329	0.310	0.315	0.316	0.318

表 3 中的测试结果显示，精车之后表面平均粗糙度约为 1.423 μm；经过打磨抛光后，表面粗糙度约为 0.442 μm，相比精车下降了 68.9%；滚压处理的表面粗糙度约为 0.318 μm，相比精车下降了 77.7%。有研究表明[14-15]，材料表面的粗糙度越大，材料表面应力集中越明显，疲劳寿命随粗糙度的增加而大幅下降，疲劳裂纹全部从表面凹痕根部处萌生、扩展，从而使材料失效。从 *Ra* 数值上看，打磨抛光和滚压都能在精车的基础上降低车轴表面粗糙度，且对表面粗糙度的影响水平基本相当。但是结合表面 SEM、三维形貌以及加工轮廓等结果，滚压之后表面纹理分布细腻平整、均匀，粗糙度更小，效果更加理想。

4　结论

1）滚压和打磨抛光能提升精车之后车轴表面的硬度，打磨抛光使表面硬度提升 2.3%，滚压使硬度提升 11.6%。

2）车轴精车、滚压、打磨抛光之后，表面皆为压缩残余应力。在精车的基础上打磨抛光和滚压，都能提高车轴表面轴向、周向压缩残余应力水平。相比而言，滚压对残余应力的影响更大。

3）精车后表面粗糙度 *Ra* 约为 1.423 μm。打磨抛光和滚压都能提高车轴表面的光洁度。打磨抛光使车轴表面粗糙度下降了 68.9%，滚压使表面粗糙度下降 77.7%。

参考文献：

[1] 翟婉明, 赵春发. 现代轨道交通工程科技前沿与挑战[J]. 西南交通大学学报, 2016, 51(2): 209-211.
ZHAI Wan-ming, ZHAO Chun-fa. Frontiers and Challenges of Sciences and Technologies in Modern Railway Engineering [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(2): 209-226.

[2] 李玉婵, 于维, 卢琥宇. 机加工工艺对轮轴疲劳可靠性的影响分析[J]. 铁道车辆, 2012, 50(2): 4-7.
LI Yu-chan, YU Wei, LU Xiao-yu. Analysis on the Effect of Machining Process on Axle Fatigue Reliability [J]. Journal of Railway Vehicle, 2012, 50(2): 4-7.

[3] SONG C, ZHU M H. An Investigation on Rotatory Bending Fretting Fatigue Damage of Railway Axles [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2014, 37: 72-84.

[4] 于鑫, 李世涛, 孙杰. EA4T 车轴车削表面完整性研究[J]. 工具技术, 2014, 48(9): 77-79.
YU Xin, LI Shi-tao, SUN Jie. Research on Turning Surface Integrity of EA4T Axle [J]. Tool Engineering, 2014, 48(9): 77-79.

[5] 李世涛, 于鑫, 孙杰, 等. EA4T 车轴车削工艺参数与表面粗糙度关系研究[J]. 工艺与检测, 2014(8): 113-114.
LI Shi-tao, YU Xin, SUN Jie, et al. Study on the Relationship between Turning Process Parameters and Surface Roughness for EA4T Axle [J]. Technology and Test, 2014(8): 113-114.

[6] 景启明, 曲顺德, 季亚奇, 等. 国产 EA4T 车轴钢的缺口疲劳性能[J]. 机械工程材料, 2015, 39(10): 106-107.
JING Qi-ming, QU Shun-de, JI Ya-qi, et al. Notch Fatigue Property of Domestic EA4T Axle Streel [J]. Material for Mechanical Engineering, 2015, 39(10): 106-107.

[7] BS EN 13261—2003, 铁路应用——轮对和转向架——车轴——产品要求[S].
BS EN 13261—2003, Railway Application—Wheelsets and Bogies—Axles—Product Requirements[S].

[8] 周子同, 陈志同, 蒋理科. 钛合金 TB6 铣削加工硬化试验[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(1): 136-137.
ZHOU Zi-tong, CHEN Zhi-tong, JIANG Li-ke. Experiment on Work Hardening of Milling TB6 [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics, 2014, 40(1): 136-137.

[9] 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): 97-98.

CHEN Li-qin, XIANG Bin, REN Xue-chong, et al. Influences of Surface Ultrasonic Rolling Processing Parameters on Surface Condition of Axle Steel Used in High Speed Trains [J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 97-98.

[10] 刘海涛, 卢泽生, 孙雅洲. 切削加工表面残余应力研究的现状与进展[J]. 航空精密制造技术, 2008, 44(1): 17-19.
LIU Hai-tao, LU Ze-sheng, SUN Ya-zhou. Status and Development of Residual Stress on the Surface in the Cutting [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2008, 44(1): 17-19.

[11] 王思越, 徐宏海, 张超英. 外圆车削表面纹理建模与仿真分析[J]. 中国制造业信息化, 2005, 34(8): 120-123.
WANG Si-yue, XU Hong-hai, ZHANG Chao-ying. Modeling and Simulation on the Texture of Turning Part Surface [J]. Manufacture Information Engineering of China, 2005, 34(8): 120-123.

[12] 赵亚东. 工件表面滚压加工应用研究[J]. 机床与液压, 2000(2): 81.
ZHAO Ya-dong. The Application of Rolling on Workpiece Surface[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2000(2): 81.

[13] 吕光义, 朱有利, 李礼, 等. 超声深滚压对 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): 39-41.
LYU Guang-yi, ZHU You-li, LI Li, et al. The Effect of Ultrasonic Deep Rolling (UDR) on Surface Topography and Surface Roughness of TC4 Titanium Alloy [J]. China Surface Engineering, 2007, 20(4): 39-41.

[14] 朱莉娜, 邓彩艳, 王东坡, 等. 表面粗糙度对 Ti-6Al-4V 合金超高周疲劳性能的影响[J]. 金属学报, 2016, 52(5): 583-591.
ZHU Li-na, DENG Cai-yan, WANG Dong-po, et al. Effect of Surface Roughness on Very High Cycle Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V Alloy [J]. ACTA Metallurgica Sinica, 2016, 52(5): 583-591.

[15] 李金魁, 王长利, 姚枚. 喷丸表面粗糙度及其对疲劳极限的影响[J]. 金属科学与工艺, 1991, 10(8): 12-18.
LI Jin-kui, WANG Chang-li, YAO Mei. Surface Roughness of Shot-peened Specimens and Its Influence on Fatigue Limits [J]. Metal Science & Technology, 1991, 10(8): 12-18.