doi：10.3969/j.issn.1007-9289.2014.05.011

滚压工艺对 EA4T 车轴表面质量完整性的影响及预测模型建立 *

于 鑫[1]，孙 杰[1]，李世涛[2]，李剑峰[1]
（1. 山东大学 机械工程学院 高效洁净机械制造教育部重点实验室，济南 250061；2. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司，山东 青岛 266111）

摘 要：表面质量完整性是决定车轴使用寿命和机车行驶安全的关键因素，滚压工艺对车轴表面质量完整性产生重要影响。通过 EA4T 车轴滚压正交试验，研究了工艺参数对表面质量完整性影响规律，建立了滚压表面粗糙度与残余应力预测模型，并进行回归方程方差分析与残差分析，验证了预测模型的有效性。结果表明：工艺参数中进给速度对表面粗糙度和残余应力的作用最为显著，贡献率分别为粗糙度 91.70%、周向残余应力 48.95%、轴向残余应力 48.18%。此外，滚压道次与滚压深度分别对周向和轴向残余应力有较大影响，贡献率分别为 39.15%和 33.19%；与其它因素相比，滚压速度对表面硬度影响较大，贡献率达到 54.7%。

关键词：EA4T 车轴；工艺参数；表面粗糙度；表面残余应力；预测模型
中图分类号：TG174.4；TG668 **文献标志码：**A **文章编号：**1007-9289(2014)05-0087-09

Influences of Burnishing Process on Surface Quality Integrity of EA4T Axles and Establishment of Prediction Model

YU Xin[1], SUN Jie[1], LI Shi-tao[2], LI Jian-feng[1]
(1. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture of Ministry of Education, School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061; 2. CSR Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, Shandong)

Abstract: Surface quality integrity is a key factor to determine the axle service life and further the locomotive running security, and the burnishing process has an important influence on the surface quality integrity of axles. Orthogonal experiment of EA4T axles was conducted to investigate the influences of process parameters on surface quality integrity. A comprehensive prediction model that can reflect surface roughness and residual stress was established and its validity was verified through variance analysis (ANOVA) and residual analysis of regression equation. The results show that the feed rate has the most pronounced effect on the surface roughness and residual stress, and its contribution rates to the surface roughness, circumferential residual stress and axial residual stress are 91.70%, 48.95% and 48.18%, respectively. Additionally, burnishing passes and depth have great influences on the circumferential and axial residual stress, and their contribution rates are 39.15% and 33.19%, respectively. Compared with other factors, the burnishing speed has a significant influence on the surface hardness, and its contribution rate reaches 54.7%.

Key words: EA4T axles; process parameters; surface roughness; surface residual stress; prediction model

收稿日期：2014-06-14；**修回日期：**2014-08-15；**基金项目：**＊校企合作课题(SF/GY-邓字-2013-72)
作者简介：于鑫(1989－)，男(汉)，山东潍坊人，硕士生；**研究方向：**滚压工艺与残余应力

网络出版日期：2014-09-12 08：16；**网络出版地址：**http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20140912.0816.002.html
引文格式：于鑫，孙杰，李世涛，等. 滚压工艺对 EA4T 车轴表面质量完整性的影响及预测模型建立 [J]. 中国表面工程，2014，27(5)：87-95.

0 引 言

EA4T 车轴是一种欧洲标准[1](EN13261:2003)规定的高速、重载铁道车辆用车轴,广泛应用于英、法、德等国家的地铁及高速动车组机车中,具有优异的物理力学性能。近几年,我国已开展了EA4T 车轴的国产化研究并投入应用[2-3]。

梁益龙[4-6]、郑业方[7]等研究了 EA4T 钢材料的微观组织结构、热处理工艺等内容,改善了材料的强度、韧性等力学性能,并分析了材料热处理缺陷产生的原因;孟扬等[8]研究了两种不同成分 EA4T 车轴钢的高周疲劳性能,发现合金元素含量的增加能提高钢淬透性,使晶粒细化,有效提高疲劳强度;徐刚等[9]对 EA4T 车轴钢高温热变形行为进行了研究,为该钢种制订合理的轧制控制工艺提供了理论依据;Ivo Černý等[10]评估了 EA4T 车轴热处理时裂纹扩展速率,研究了不同微观组织结构对疲劳裂纹扩展的影响;M. Luke 等[11]采用有限元分析的方法预测了恒定载荷与变幅值载荷下 EA4T 车轴的疲劳裂纹扩展行为,并进行了 1∶1 与 1∶3 比例车轴的试验验证。可见,国内外学者主要对 EA4T 车轴的热处理工艺、热变形行为、裂纹扩展与疲劳寿命等方面进行了相关研究,而在通过改善加工工艺方法提高 EA4T 车轴使用寿命等方面少有介绍。

滚压表面强化技术(简称滚压)是一种简单有效的可以显著改善零件表面应力状态从而提高其抗疲劳性能的终加工工艺手段[12],自 1929 年首次在德国被用于机车轴的表面强化,目前已广泛应用于航空航天、汽车机车、精密机械、国防工业等领域[13],在诸多表面强化处理方法中具有显著优势[14]。为此,基于正交试验研究 EA4T 车轴滚压加工工艺,改善其表面粗糙度与残余应力分布等表面质量完整性指标,并建立表面质量完整性预测模型,提高 EA4T 车轴滚压加工质量。

1 方法与表征

根据 $L_{16}(4^5)$正交表设计四因素(滚压速度 v、进给速度 f、滚压深度 h 与滚压道次 n)4 水平正交试验,研究 EA4T 车轴滚压工艺对加工表面粗糙度与残余应力的影响。

1.1 滚压正交试验过程

采用肯纳可转位车刀在 CKA6136 数控车床上进行试件粗加工后,装夹 JH-DG 单滚 R 型滚压工具(滚轮直径 36 mm)完成滚压加工,因素水平设置如表 1 所示,滚压加工实况如图 1 所示。

表 1 试验因素水平

Table 1 Factors and levels of the experiment

Factors	Levels			
	1	2	3	4
Burnishing speed, v/(m·min^{-1})	80	100	120	140
Feed speed, f/(mm·r^{-1})	0.05	0.1	0.15	0.2
Burnishing depth, h/mm	0.02	0.04	0.06	0.08
Burnishing passes, n	1	2	3	4

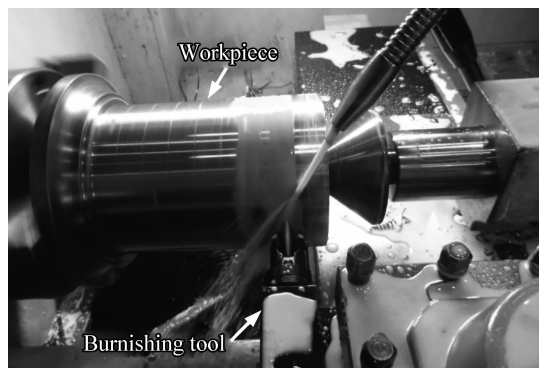


图 1 滚压加工试验

Fig. 1 Experiment of the burnishing process

1.2 试验测试

试验完成后采用 TR200 手持粗糙度仪测试表面粗糙度(滚压前表面粗糙度 Ra=2.446 μm)。采用芬兰 Xstress3000 应力分析仪选用 Cr 靶、156.31°衍射角测试表面圆周方向与轴线方向残余应力(滚压前表面轴向残余应力 σ=463.7 MPa,周向残余应力 σ=481.3 MPa),每组工艺参数对应圆周表面均匀间隔取 3 个测量点求平均值。之后,制作相应试件抛光处理并采用 MH-6 型显微硬度计测量表面维氏硬度(载荷 0.01 kg,滚压前表面显微硬度 116.48 $HV_{0.01}$)。测试结果见表 2 和图 2。

1.3 试验结果

从表 2 和图 2 看出,滚压加工不仅引起加工表面粗糙度、残余应力的波动变化,而且影响了表面硬度。加工表面残余压应力轴向大于周向,且两方向残余应力变化规律相似。表面粗糙度与残余应力变化规律具有一定相关性,在残余压应力较大的工艺参数下,表面粗糙度往往较小。

表 2　$L_{16}(4^5)$正交试验测试结果

Table 2　Test results of $L_{16}(4^5)$ orthogonal experiment

No.	Parameters				Test results			
	Burnishing speed, v/(m·min^{-1})	Feed speed, f/(mm·r^{-1})	Burnishing depth, h/mm	Burnishing passes, n	Surface roughness, Ra/μm	Microhardness/ $HV_{0.01}$	Surface residual stress, σ/MPa	
							Axial direction	Circumferential direction
1	80	0.05	0.02	1	0.38	117.85	-602.7	-332.9
2	80	0.10	0.04	2	0.57	124.34	-681.9	-359.7
3	80	0.15	0.06	3	0.96	124.68	-648.0	-323.2
4	80	0.20	0.08	4	1.18	126.44	-636.8	-309.9
5	100	0.05	0.04	3	0.31	145.72	-710.7	-381.8
6	100	0.10	0.02	4	0.60	162.71	-594.0	-352.2
7	100	0.15	0.08	1	1.18	152.01	-655.0	-281.0
8	100	0.20	0.06	2	1.29	166.74	-576.0	-305.0
9	120	0.05	0.06	4	0.30	120.00	-732.0	-371.3
10	120	0.10	0.08	3	0.61	123.23	-748.0	-367.6
11	120	0.15	0.02	2	1.08	156.80	-596.9	-314.2
12	120	0.20	0.04	1	1.59	167.85	-508.5	-225.5
13	140	0.05	0.08	2	0.24	162.60	-799.4	-390.9
14	140	0.10	0.06	1	0.61	146.67	-678.0	-319.4
15	140	0.15	0.04	4	1.07	166.32	-660.7	-360.4
16	140	0.20	0.02	3	1.81	145.50	-583.1	-338.2

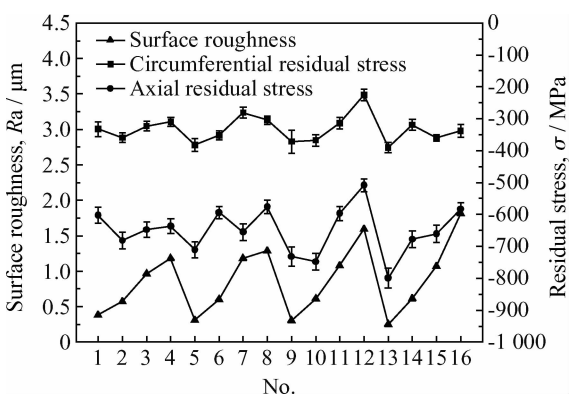


图 2　加工后表面粗糙度与残余应力

Fig. 2　Surface roughness and residual stress after burnishing

滚压后，表面粗糙度从 2.446 μm 降到 0.244～1.812 μm，残余应力状态从拉应力变为压应力，且表面硬度也有不同程度提高。表明滚压加工能显著改善加工表面粗糙度、残余应力状态，引起表面层金属不同程度的硬化，最大硬化率达 44.10%。

2　结果分析与工艺参数优化

采用方差分析（Analysis of variance，ANOVA）和信噪比（Signal-to-noise ratio）的方法对试验结果进行统计学分析，得到影响表面质量完整性显著性因素与最优参数水平。

2.1　方差分析

分别以表面粗糙度、残余应力与显微硬度为评价指标进行方差分析，置信水平为 95%，结果如表 3 所示。

方差分析 F 值的大小反应出某一因素是否显著，如果某一因素是显著的，则此因素任何小的变动都会对评价指标造成较大影响。贡献率为各因素离差平方和所占比例，从表 3 看出，在影响表面粗糙度的因素中，进给速度贡献率为91.70%，是显著性影响因素。进给速度与滚压道次是影响

表 3 方差分析结果

Table 3 Results of the variance analysis

Evaluation index	Factors	Sum of squares	DOF	Mean squared errors	F	Contribution rate/%
Surface roughness	Burnishing speed, v	0.059	3	0.020	0.932	1.73
	Feed speed, f	3.142	3	1.048	49.332	91.70
	Burnishing depth, h	0.081	3	0.027	1.274	2.37
	Burnishing passes, n	0.080	3	0.027	1.256	2.34
	Errors	0.064	3	0.021		1.86
	Total	3.427	15			100
Circumferential residual stress	Burnishing speed, v	2 236	3	745	2.852	8.45
	Feed speed, f	12 957	3	4 319	16.527	48.95
	Burnishing depth, h	130	3	43	0.166	0.49
	Burnishing passes, n	10 362	3	3 454	13.217	39.15
	Errors	784	3	261		2.96
	Total	26 469	15			100
Axial residual stress	Burnishing speed, v	4 985	3	1 662	3.414	6.03
	Feed speed, f	39 802	3	13 267	27.262	48.18
	Burnishing depth, h	27 415	3	9 138	18.777	33.19
	Burnishing passes, n	8 948	3	2 983	6.129	10.83
	Errors	1 460	3	487		1.77
	Total	82 610	15			100
Microhardness	Burnishing speed, v	2 887	3	962	3.964	54.70
	Feed speed, f	686	3	229	0.942	13.00
	Burnishing depth, h	324	3	108	0.445	6.14
	Burnishing passes, n	653	3	218	0.896	12.37
	Errors	728	3	243		13.79
	Total	5 278	15			100

加工表面周向残余应力的显著性因素，贡献率分别为 48.95%和 39.15%，而影响轴向残余应力的显著性因素为进给速度与滚压深度，贡献率分别为 48.18%和 33.19%。相对其它工艺参数，滚压速度对表面显微硬度影响较大，贡献率为 54.7%。

2.2 信噪比

在正交试验研究中，影响评价指标的因素分为两类，控制因素与噪声因素。控制因素为试验过程中可以控制的变量，如工艺参数，而噪声因素为试验过程中不可控制且对评价指标有影响的变量。控制因素占的比例越大或者噪声因素占的比例越小，则信噪比值越大，试验效果越好。常通过损失函数计算信噪比，对于表面粗糙度这类越小越好的评价指标与表面残余压应力这类越大越好的评价指标，分别采用式(1)和式(2)计算信噪比[15]，16 组试验结果对应的信噪比值如表 4 所示。根据每个工艺因素对应水平的平均信噪比值的大小，进行水平优选，以达到最好的试验效果，工艺因素对应水平的平均信噪比值与水平优选结果如表 5 所示，信噪比均值效应如图 3 所示。

表 4　信噪比

Table 4　Signal-to-noise ratio　(dB)

No.	Surface roughness	Surface residual stress	
		Axial direction	Circumferential direction
1	8.38	50.45	55.60
2	4.87	51.12	56.67
3	0.36	50.19	56.23
4	-1.43	49.82	56.08
5	10.17	51.64	57.03
6	4.47	50.94	55.48
7	-1.41	48.97	56.33
8	-2.19	49.69	55.21
9	10.40	51.40	57.29
10	4.27	51.31	57.48
11	-0.66	49.94	55.52
12	-4.04	47.06	54.13
13	12.25	51.84	58.06
14	4.25	50.09	56.63
15	-0.60	51.14	56.40
16	-5.16	50.58	55.32

表 5　平均信噪比与最优水平

Table 5　Average signal-to-noise-ratio and optimum level

Index		Signal-to-noise ratio/dB				Optimum level
		Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	
1#	v	3.04	2.76	2.49	2.69	1
	f	10.30	4.46	-0.58	-3.21	1
	h	1.76	2.60	3.20	3.42	4
	n	1.80	3.57	2.41	3.21	2
2#	v	50.40	50.31	49.93	50.91	4
	f	51.33	50.86	50.06	49.29	1
	h	50.48	50.24	50.34	50.49	4
	n	49.14	50.65	50.93	50.82	3
3#	v	56.15	56.01	56.10	56.60	4
	f	57.00	56.56	56.12	55.18	1
	h	55.48	56.06	56.34	56.99	4
	n	55.67	56.36	56.52	56.31	3

Note: "1#", "2#" and "3#" represent surface roughness, circumferential residual stress and axial residual stress, respectively.

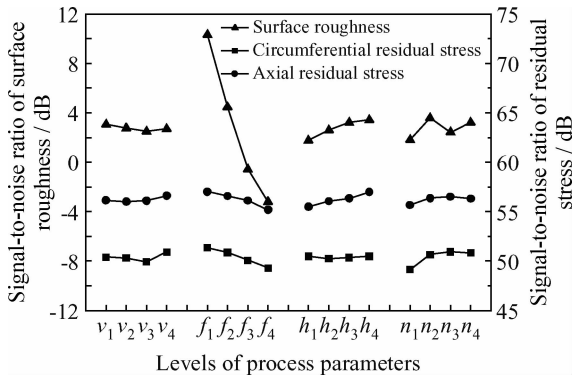


图 3　信噪比均值效应图

Fig. 3　Mean curves of the signal-to-noise ratio

其中，η_{ij} 为信噪比，n 为评价指标数，这里 $n=1$，y_{ij} 为每组试验参数下评价指标测试值。

$$\eta_{ij} = -10\lg\left(\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} y_{ij}^2\right) \tag{1}$$

$$\eta_{ij} = -10\lg\left(\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n} 1/y_{ij}^2\right) \tag{2}$$

从图 3 看出，对于表面粗糙度曲线，相对其它因素，信噪比随进给速度变化波动最大。这表明：进给速度为影响表面粗糙度的显著性因素，并且随着进给速度增加，信噪比减小，表面粗糙度增大。对于周向残余应力曲线，信噪比随进给速度与滚压道次的变化波动较大；而对于轴向残余应力曲线，信噪比随进给速度与滚压深度的变化波动较大，表明进给速度与滚压道次、进给速度与滚压深度分别是影响周向与轴向残余应力的显著性因素，并且随进给速度增加，信噪比减小，表面残余压应力减小，这与前述方差分析结果是一致的。

根据表 5 得出了滚压正交试验理论最优参数水平，而在实际工艺参数选择时，可以根据表 3 影响评价指标的显著性因素确定与其对应的最优参数水平。之后，其它非显著性因素的参数选择可以根据实际情况进行适当调整。

3　工艺参数与表面质量完整性关系模型

在机床特性、滚压工具结构与工件材料确定的条件下，建立滚压工艺参数与表面质量完整性之间的经验模型[16]，如式(3)所示。线性化后采用多元线性回归分析的方法求得回归方程，求解过程如式(4)～式(6)所示，确定关系模型。之后，进行回归方程、回归系数的显著性检验与残

差分析，判断多元线性回归模型的好坏。

$$Ra(\sigma) = Kv^{b_1} f^{b_2} h^{b_3} n^{b_4} \tag{3}$$

$$Y = X_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 \tag{4}$$

其中，$Y = \lg Ra(\lg\sigma)$，$X_0 = \lg K$，$X_1 = \lg v$，$X_2 = \lg f$，$X_3 = \lg h$，$X_4 = \lg n$，K 为与机床特性、滚压工具与工件材料等相关的系数，b_1、b_2、b_3、b_4 为常数。

考虑试验误差 ε，由正交试验可以建立式(5)多元线性回归方程：

$$Y = Xb + \varepsilon \tag{5}$$

其中，

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdots \\ Y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & X_{13} & X_{14} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & X_{23} & X_{24} \\ & & \cdots & & \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & X_{n3} & X_{n4} \end{bmatrix},$$

$$b = \begin{bmatrix} X_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}, \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \cdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

计算得

$$b = (X^T X)^{-1} X^T Y \tag{6}$$

3.1 工艺参数与表面粗糙度关系模型

采用多元线性回归分析得到滚压工艺参数与表面粗糙度关系模型如式(7)所示，回归方程如式(8)所示。

$$Ra = 4.075 v^{0.088} f^{1.14} h^{-0.142} n^{-0.0898} \tag{7}$$

$$\lg Ra = 0.61 + 0.088\lg v + 1.141\lg f - 0.142\lg h - 0.0898\lg n \tag{8}$$

从上述预测模型看出，进给速度 f 对应指数的绝对值相对较大，其小的变动会对粗糙度 Ra 产生较大影响，且随进给速度 f 增加，粗糙度 Ra 增大。这是由于进给速度 f 直接影响到滚压过程未滚压金属残留面积，进给速度 f 增加，未滚压金属残留面积增大，粗糙度 Ra 增大。

根据式(7)得到粗糙度预测值，与测试值进行比较，如图 4 所示，经计算，预测误差(|预测值－测试值|/测试值)的均值为 8.65%。

3.2 工艺参数与表面残余应力关系模型

采用多元线性回归分析得到滚压工艺参数与表面残余应力关系模型如式(9)和式(10)所示，回归方程分别如式(11)和式(12)所示。

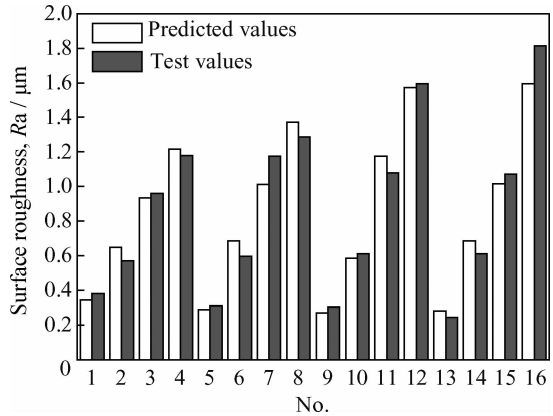


图 4 粗糙度预测值与测试值

Fig. 4 Predicted and test values of the surface roughness

$$\sigma_{周向} = -153.853 v^{0.0604} f^{-0.164} h^{-0.0013} n^{0.147} \tag{9}$$

$$\sigma_{轴向} = -446.282 v^{0.0818} f^{-0.138} h^{0.116} n^{0.0602} \tag{10}$$

$$\lg(-\sigma_{周向}) = 2.19 + 0.0604\lg v - 0.164\lg f - 0.0013\lg h + 0.147\lg n \tag{11}$$

$$\lg(-\sigma_{轴向}) = 2.65 + 0.0818\lg v - 0.138\lg f + 0.116\lg h + 0.0602\lg n \tag{12}$$

从上述预测模型看出，进给速度 f 对应指数的绝对值相对较大，其小的变动会对两方向残余应力产生较大影响，且随进给速度 f 增加，表面残余拉应力增大。这是由于滚压加工时，滚轮前方区域表层金属沿加工表面被压缩，垂直于加工表面被拉长，这种“塑性凸出”效应会使表层金属发生塑性变形，体积减小，滚压结束后表层金属受到内部金属弹性恢复作用，产生残余拉应力，且随进给速度 f 增加，“塑性凸出”效应增强，残余拉应力增大。

根据式(9)和式(10)得到表面残余应力预测值，与测试值进行比较，如图 5 和图 6 所示。经计算，预测误差(|预测值－测试值|/测试值)的均值周向 5.82%、轴向 3.93%。

3.3 模型检验与残差分析

为确定所建立的多元线性回归方程是否具有统计学上的合理性，进行回归方程、回归系数方差分析与残差分析，如表 6、表 7 和图 7～9 所示。

方差分析中，P 值为显著性检验时达到的显著性水平，代表了认为分析对象有显著性影响时

犯错的概率，其值越小，可信度越高。在许多研究领域，0.05 的 P 值被认为是可以接受错误的边界水平。

表 6 中方差分析 P 值均小于 0.05，表 7 中方差分析(R-Sq)值均大于 70%，说明回归方程与回归系数是极具统计学意义的。表 7 中 lg$f$ 对应 P 值为 0，表明在预测模型中，进给速度是影响表面粗糙度的显著性因素。同样，表 7 中各自变量 P 值的大小，表明了在预测模型中，进给速度与滚压道次是影响周向残余应力的显著性因素，而进给速度与滚压深度是影响轴向残余应力的显著性因素。这与方差分析一致，预测模型能较好的反映试验情况。

从图 7～9 可以看出，残差成正态分布且残差是具有恒定方差的，说明回归方程具有统计学上的的合理性，即预测模型有效。

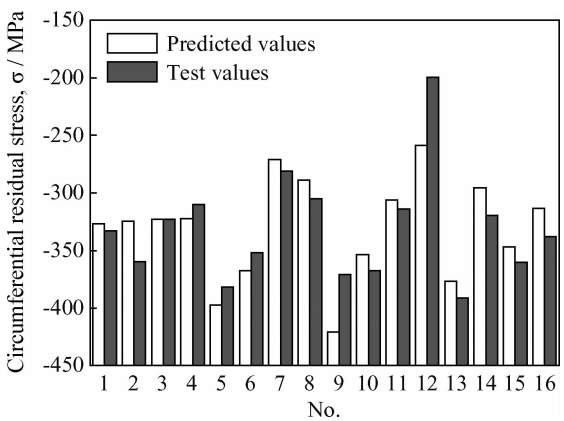


图 5　周向残余应力预测值与测试值

Fig. 5　Predicted and test values of the circumferential residual stress

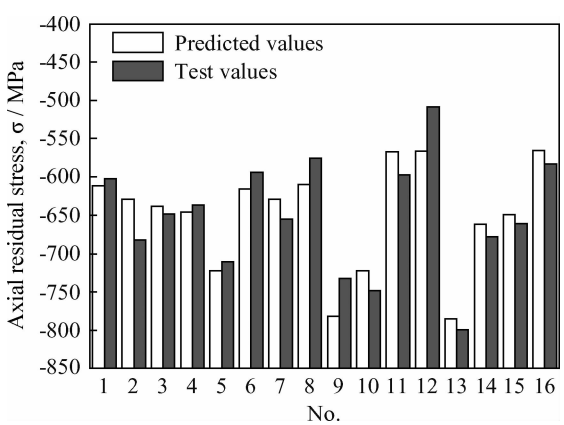


图 6　轴向残余应力预测值与测试值

Fig. 6　Predicted and test values of the axial residual stress

表 6　回归方程方差分析

Table 6　Variance analysis of the regression equation

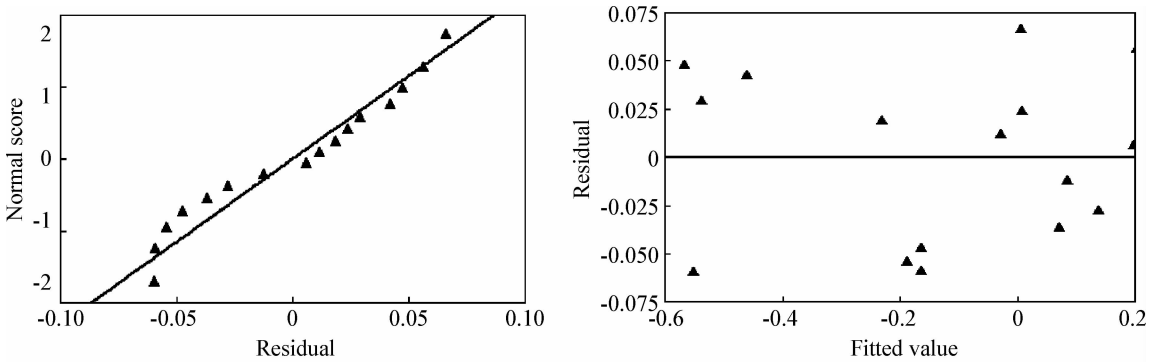
Index	Source	DOF	Sum of squares	Mean squared error	F	P
1#	Regression equation	4	1.082	0.271	106.12	0
	Residual errors	11	0.028	0.003		
	Total	15	1.110			
2#	Regression equation	4	0.040	0.010	8.73	0.002
	Residual errors	11	0.013	0.001		
	Total	15	0.053			
3#	Regression equation	4	0.030	0.008	12.40	0
	Residual errors	11	0.007	0.001		
	Total	15	0.037			

表 7　回归系数方差分析

Table 7　Variance analysis of the regression coefficient

Index	Variable	Coefficient	Standard errors	T	P
1#	lg$K$	0.610	0.299	2.04	0.066
	lg$v$	0.088	0.139	0.63	0.540
	lg$f$	1.137	0.056	20.37	0
	lg$h$	−0.142	0.056	−2.54	0.027
	lg$n$	−0.090	0.056	−1.61	0.136
	S=0.050 5，R-Sq=97.5%，R-Sq(adjustment)=96.6%				
2#	lg$K$	2.187	0.200	10.9	0
	lg$v$	0.060	0.094	0.65	0.532
	lg$f$	−0.164	0.038	−4.37	0.001
	lg$h$	−0.001	0.038	−0.03	0.973
	lg$n$	−0.090	0.038	3.92	0.002
	S=0.033 9，R-Sq=76.0%，R-Sq(adjustment)=67.3%				
3#	lg$K$	2.650	0.146	18.11	0
	lg$v$	0.082	0.068	1.20	0.256
	lg$f$	−0.138	0.027	−5.03	0
	lg$h$	0.116	0.027	4.25	0.001
	lg$n$	0.060	0.027	2.20	0.050
	S=0.024 8，R-Sq=81.8%，R-Sq(adjustment)=75.2%				

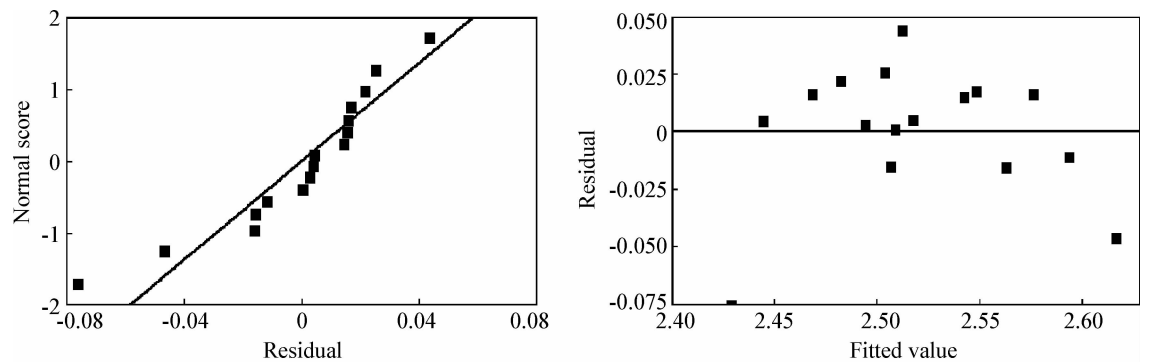
Note of Table 6 and Table 7: (a) "1#", "2#" and "3#" represent surface roughness, circumferential residual stress and axial residual stress, respectively. (b) F is an index used to judge whether the object is significant in F-test, if $F>F_{0.05}(4,11)=3.36$, the object has significant influence. (c) T is equal to the ratio of coefficient and standard errors represents an index used to judge whether the object is significant in T-test.



(a) Normal probability plot of the residuals (b) Residuals versus the fitted values

图 7 lg*Ra* 残差图

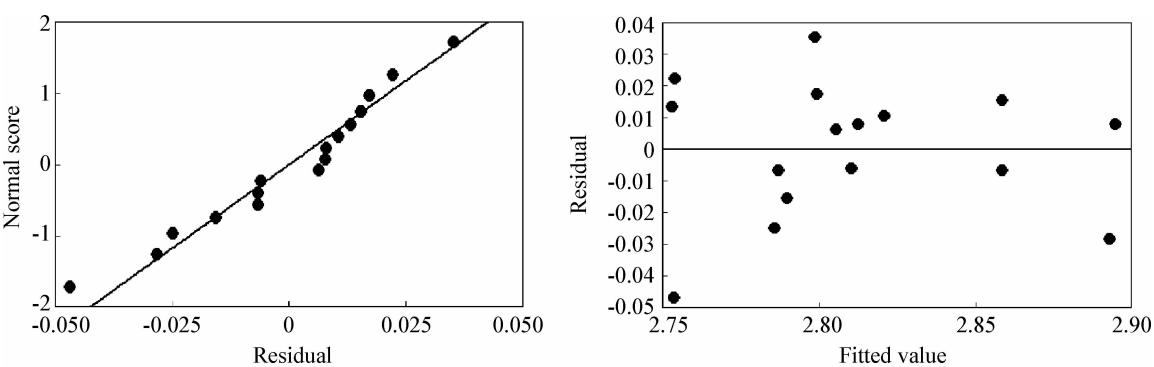
Fig. 7 Residual plots of the lg*Ra*



(a) Normal probability plot of the residuals (b) Residuals versus the fitted values

图 8 周向 lgσ 残差图

Fig. 8 Residual plots of the circumferential lgσ



(a) Normal probability plot of the residuals (b) Residuals versus the fitted values

图 9 轴向 lgσ 残差图

Fig. 9 Residual plots of the axial lgσ

4 结 论

(1) 滚压工艺参数对 EA4T 车轴表面质量完整性有重要影响。其中,进给速度对车轴表面粗糙度有显著性影响,贡献率为 91.70%。进给速度与滚压道次、进给速度与滚压深度分别对车轴表面周向与轴向残余应力影响显著,贡献率分别达到 48.95%、39.15%与 48.18%、33.19%。随着滚压速度增大,车轴表面硬度有一定程度的提高,最大硬化率达到 44.10%。

（2）通过正交试验，以减小表面粗糙度、增大表面残余压应力为指标，采用方差分析与“信噪比”的方法得到了 EA4T 车轴滚压工艺最优参数水平。

（3）建立了滚压工艺参数与 EA4T 车轴表面粗糙度、残余应力关系预测模型，并采用方差分析、残差分析方法验证模型在统计学上的有效性，且预测效果较好。

参考文献

[1] BS EN13261-2003，铁路应用-轮对和转向架-车轴-产品要求 [S].

[2] 刘军辉. EA4T 车轴热处理工艺研究 [J]. 机械管理开发，2012(4)：57-59.

[3] 覃作祥，李芷慧，周鹏. 25CrMo4 钢先共析铁素体转变及其对力学性能的影响 [J]. 大连交通大学学报，2011，32(5)：62-66.

[4] 梁益龙，王新，孟阳，等. 国产 EA4T 车轴钢的显微组织与强韧性研究 [J]. 热加工工艺，2008，37(16)：23-25.

[5] 王兴安，梁益龙. EA4T 车轴钢脉冲电流加热带状组织的消除 [J]. 热加工工艺，2010，39(18)：191-203.

[6] 王筑生，梁益龙，吴少斌，等. 大截面 EA4T 车轴钢回火工艺对组织和性能的影响 [J]. 材料热处理学报，2012，33(5)：48-52.

[7] 郑业方，杨军，苏立武，等. 热处理工艺对 EA4T 钢车轴组织与性能的影响 [J]. 金属热处理，2011，36(12)：38-40.

[8] 孟扬，梁益龙. 不同成分 EA4T 车轴钢的高周疲劳性能 [J]. 机械工程材料，2010，34(4)：55-57.

[9] 徐刚，李士琦，王乐，等. 高铁用 EA4T 车轴钢热变形行为及变形抗力模型的试验研究 [J]. 特殊钢，2013，34(3)：60-63.

[10] Ivo Černý，Václav Linhart. Effects of different microstructure on resistance of EA4T railway axle steel of equal strength to fatigue crack growth [J]. Key Engineering Materials，2014，592-593：631-634.

[11] Luke M，Varfolomeev I，Lütkepohl K，et al. Fatigue crack growth in railway axles：Assessment concept and validation tests [J]. Engineering Fracture Mechanics，2011，78(5)：714-730.

[12] 何嘉武，马世宁，巴德玛. 表面滚压强化技术研究与应用进展 [J]. 装甲兵工程学院学报，2013，27(3)：75-81.

[13] 赵婧，夏伟，李风雷，等. 滚压表面强化机理的研究现状与进展 [J]. 工具技术，2010，44(11)：3-8.

[14] 刘福超，雷丽萍，曾攀. 滚压有限元模型数值模拟 [J]. 塑性工程学报，2012，19(2)：17-21.

[15] Adeel Ikram，Nadeem Ahmad Mufti，Muhammad Qaiser Saleem，et al. Parametric optimization for surface roughness，kerf and MRR in wire electrical discharge machining (WEDM) using Taguchi design of experiment [J]. Journal of Mechanical Science and Technology，2013，27(7)：2133-41.

[16] 王素玉，艾兴，赵军，等. 高速铣削表面粗糙度建模与预报 [J]. 制造技术与机床，2006(8)：65-68.

作者地址：山东省济南市经十路 17923 号　250061

山东大学千佛山校区机械工程学院

Tel：(0531) 8839 4593

E-mail：552022472@qq.com

（责任编辑：黄艳斐）

• 本刊讯 •

《中国表面工程》编辑部邀请 Elsevier 公司指导交流工作

为更好地促进《中国表面工程》期刊的发展，提高期刊的办刊水平及国内外影响力，2014 年 10 月 15 日《中国表面工程》编辑部特邀请励德爱思唯尔(Elsevier)信息技术(北京)有限公司访问编辑部并进行指导和交流。爱思唯尔公司的解决方案营销经理杨卉等一行 3 人应邀来访，学院装备维修与再制造工程系主任、编辑部常务副主编张伟教授，编委会副主任委员马世宁教授，再制造技术重点实验室史佩京副主任以及编辑部全体人员参加了交流活动。

张伟教授介绍了《中国表面工程》期刊近几年的发展情况以及为提高期刊质量所做的工作。爱思唯尔公司的老师向编辑部介绍并演示了 Scopus 数据库，并就期刊的发展规划给予了具体指导，重点就申请加入 Scopus 数据库与 EI 数据库进行了深入的交流。

此次访问交流活动对于提高《中国表面工程》期刊的办刊水平，扩大其国内外学术影响具有重要意义，对加快期刊进入 Scopus 数据库和 EI 数据库具有重要的指导和推动作用。

（本刊编辑部 供稿）