

磨削工艺对列车车轴表面粗糙度及加工应力的影响

孙国艳¹, 贾兴民², 程妍²

1. 济南职业学院 山东济南 250000
2. 费斯托气动有限公司 山东济南 250000

摘要: 以EA4T车轴的磨削加工为例, 通过工艺试验, 论证了砂轮特性、磨削工艺参数对车轴表面粗糙度和加工应力的影响, 得出磨削工艺参数影响的主次顺序及影响规律, 并分析了各种因素影响的显著程度, 对生产实践具有一定的指导意义。

关键词: 磨削工艺; EA4T车轴; 表面粗糙度; 加工应力; 影响规律

1 序言

EA4T车轴钢作为欧标规定的高速列车车轴钢材, 具有优异的物理性能, 被广泛应用在高速列车及地铁列车中。国内学者除了对其材质、性能进行研究^[1]外, 还对其加工工艺进行了一定的研究^[2]。于鑫^[3]对EA4T车轴的车削、滚压工艺做了深入研究。目前对车轴磨削工艺的研究较少。

本文以表面粗糙度、表面加工应力为评价指标, 通过试验, 研究磨削过程中砂轮特性和磨削工艺参数对表面粗糙度、加工应力的影响。

2 砂轮特性

砂轮特性主要包括磨料、粒度、硬度、组织及结合剂等。其中磨料担负着切削工作, 应具备高的硬度、良好的耐热性、一定的韧性和自锐性等; 粒度是磨料颗粒的大小, 对磨削质量具有直接影响。本文主要针对磨料和粒度进行研究。

2.1 砂轮磨料对比

选取常用的WA (白刚玉) 砂轮、SA (单晶刚玉) 砂轮以及SG砂轮, 在相同的磨削参数下进行磨削试验, 对比磨削表面粗糙度及磨削表面加工应力, 进而选取更适合EA4T车轴磨削的磨料。

采用横切方式 (基于效率考虑), 使用恒速磨床, 砂轮线速度 $v_s=35\text{m/s}$, 磨削工艺参数见表1。

表1 磨料对比试验磨削参数

序号	工件加工线速度 $v_w/(m/min)$	进给量 $f/(\mu m/r)$
1	19.19	0.571
2	19.19	0.857
3	19.19	1.143
4	36.51	0.286
5	36.51	0.857
6	36.51	1.143

不同磨料砂轮加工表面粗糙度对比结果如图1所示。SA砂轮磨削表面质量最好, SG砂轮次之, WA砂轮最差。

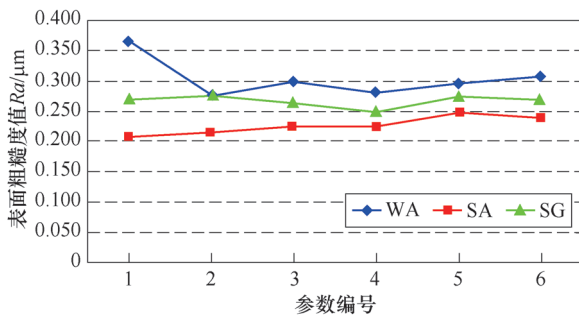


图1 不同磨料砂轮加工表面粗糙度对比

表面应力测试采用XStress3000表面应力测试仪, 不同磨料砂轮加工应力对比结果如图2所示。3种砂轮磨削表面2个方向的加工应力均为压应力,

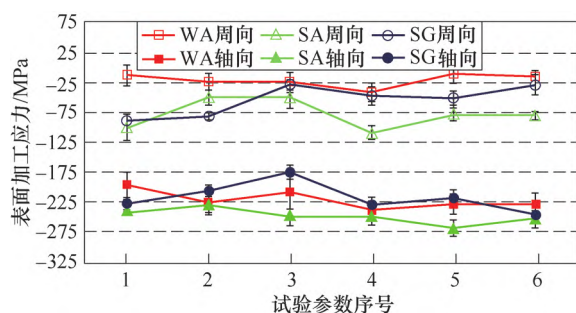


图2 不同磨料砂轮加工应力对比

轴向加工应力大于周向加工应力。整体对比而言，SA砂轮效果略好，WA效果居中，SG砂轮略次。

2.2 砂轮粒度对比

选用SA磨料46[#]、60[#]、70[#]和80[#]粒度的4种砂轮，在相同的磨削参数下进行对比试验。磨削工艺参数见表2。

表2 粒度对比试验磨削参数

序号	工件加工线速度 v_w / (m/min)	进给量 f / ($\mu\text{m/r}$)
1	19.19	0.732
2	19.19	1.220
3	19.19	1.672
4	36.51	0.385
5	36.51	0.699
6	36.51	1.231

不同粒度砂轮加工表面粗糙度对比结果如图3所示。通过对比可知，SA磨料70[#]粒度砂轮加工表面质量最好。

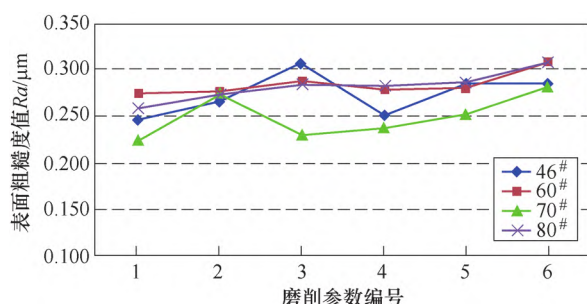


图3 不同粒度砂轮加工表面粗糙度对比

4种粒度SA砂轮所磨削的工件表面加工应力如图4所示。应力均为压应力，各自轴向加工应力大于周向加工应力，相比较而言，70[#]粒度砂轮磨削工件压应力值更大，更有利于提高工件的疲劳强度。

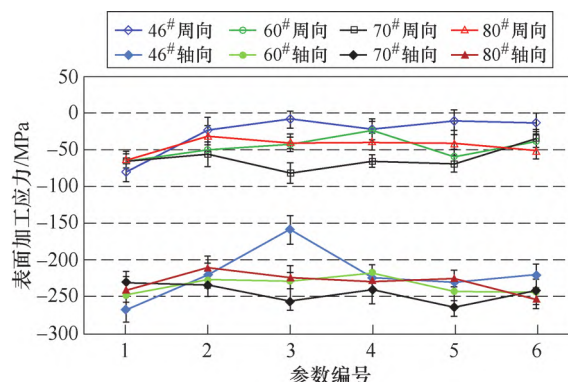


图4 不同粒度砂轮加工应力对比

3 磨削工艺参数正交试验

研究磨削工艺参数对表面粗糙度及加工应力的影响，有利于实际生产中磨削工艺参数的优选，进而提高工件的疲劳寿命。采用70[#]粒度SA砂轮，设计二因素四水平正交试验共16组，其中还考虑添加了误差水平列。工艺参数见表3。

表3 正交试验工艺参数

水平	工件加工线速度 v_w / (m/min)	进给量 f / ($\mu\text{m/r}$)	误差水平
1	19.19	0.40	1
2	36.51	0.90	2
3	70.21	1.40	3
4	136.68	1.90	4

3.1 表面粗糙度正交试验结果分析

首先对16组表面粗糙度试验结果进行极差分析（见表4），依据极差大小，可以判断因素对结果影响的主次顺序，也可以绘制试验结果随水平值变化的趋势图。

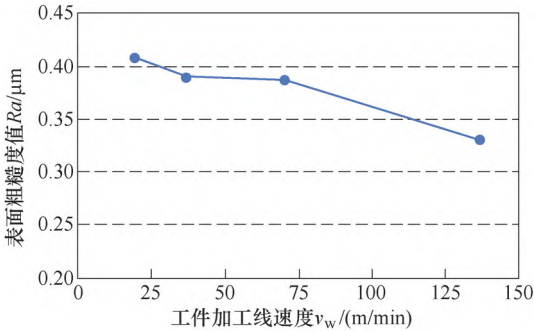
对磨削表面粗糙度影响最大的因素为工件加工线速度，进给量次之。根据分析结果可以绘制出磨削表面粗糙度趋势图（见图5）。

对于70[#]粒度SA砂轮，磨削表面粗糙度值随工件加工线速度的增大而减小，随进给量的增大而增大。极差分析可以反映各因素的影响顺序，却不能较准确地反映各因素的影响显著性，为此补充方差分析见表5。

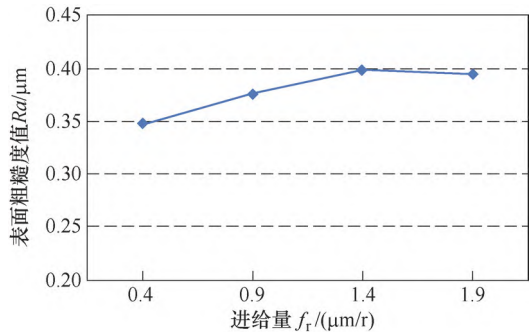
进行 F 显著性校验可知，工件加工线速度 v_w 对磨削表面粗糙度的影响非常显著，其他因素影响不显著。

表4 表面粗糙度试验结果极差分析

参数序号	工件加工线速度 v_w /(m/min)	进给量 f_r /($\mu\text{m/r}$)	误差水平	表面粗糙度值 $Ra/\mu\text{m}$
1	19.19	0.40	1	0.342
2	19.19	0.90	2	0.401
3	19.19	1.40	3	0.425
4	19.19	1.90	4	0.468
5	36.51	0.40	2	0.365
6	36.51	0.90	1	0.376
7	36.51	1.40	4	0.412
8	36.51	1.90	3	0.407
9	70.21	0.40	3	0.365
10	70.21	0.90	4	0.395
11	70.21	1.40	1	0.424
12	70.21	1.90	2	0.367
13	136.68	0.40	4	0.319
14	136.68	0.90	3	0.331
15	136.68	1.40	2	0.336
16	136.68	1.90	1	0.337
k_1	0.409	0.348	0.370	—
k_2	0.390	0.376	0.367	—
k_3	0.388	0.399	0.382	—
k_4	0.331	0.395	0.399	—
R	0.078	0.051	0.032	—
主次顺序	v_w 、 f_r 、误差水平			



a) 工件加工线速度对表面粗糙度的影响



b) 进给量对表面粗糙度的影响

图5 磨削表面粗糙度趋势

表5 表面粗糙度试验结果方差分析

方差来源	工件加工线速度 v_w	进给量 f_r	误差
偏平方和	0.014	0.007	0.01
自由度	3	3	9
F 值	7	3.5	1
临界值 $F_{0.05}$	3.86	3.86	3.86
临界值 $F_{0.01}$	6.99	6.99	6.99
显著性校验	**		

注：**—非常显著。

3.2 表面加工应力正交试验结果分析

表面加工应力试验结果的极差分析见表6。

通过极差分析可知，对周向加工应力影响的主次顺序： f_r 、 v_w 、误差水平；对轴向加工应力影响的主次顺序： v_w 、 f_r 、误差水平。根据分析结果可以绘制出磨削表面加工应力趋势图（见图6）。

磨削表面加工应力均为压应力，周向与轴向加工应力变化趋势一致；表面加工应力随工件加工

表6 表面加工应力试验结果极差分析

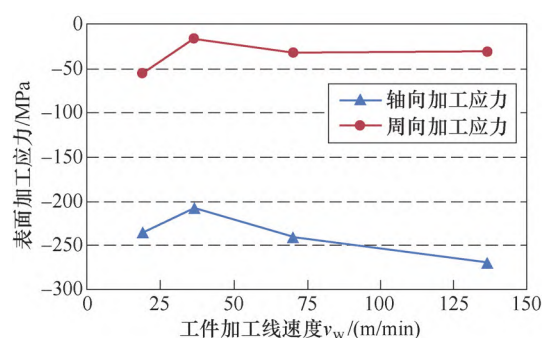
参数	工件加工线速度 v_w /(m/min)	进给量 f_r /($\mu\text{m/r}$)	误差水平	周向应力/MPa	轴向应力/MPa
1	19.19	0.40	1	-101.57	-281.07
2	19.19	0.90	2	-49.73	-234.40
3	19.19	1.40	3	-44.13	-216.43
4	19.19	1.90	4	-19.90	-210.00
5	36.51	0.40	2	-31.15	-212.10
6	36.51	0.90	1	-17.53	-204.53
7	36.51	1.40	4	-25.47	-216.33
8	36.51	1.90	3	11.33	-195.47
9	70.21	0.40	3	-57.20	-276.70
10	70.21	0.90	4	-47.80	-260.63
11	70.21	1.40	1	-25.97	-218.43
12	70.21	1.90	2	4.53	-204.43
13	136.68	0.40	4	-39.33	-255.03
14	136.68	0.90	3	-35.48	-244.65
15	136.68	1.40	2	-21.78	-234.25
16	136.68	1.90	1	-24.60	-239.40

周向加工应力极差分析

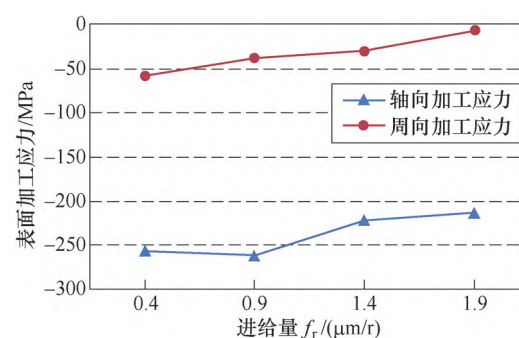
k_1	-53.83	-57.31	-42.4	主次顺序: f_r 、 v_w 、误差水平
k_2	-15.70	-37.64	-24.5	
k_3	-31.61	-29.34	-31.4	
k_4	-30.30	-7.16	-33.1	
R	38.13	50.15	17.9	

轴向加工应力极差分析

k_1	-235.475	-256.225	-235.9	主次顺序: v_w 、 f_r 、误差水平
k_2	-207.108	-261.053	-221.3	
k_3	-240.048	-221.360	-258.3	
k_4	-268.332	-212.325	-235.5	
R	61.224	48.728	37.02	



a) 工件加工线速度对表面加工应力的影响



b) 进给量对表面加工应力的影响

图6 磨削表面加工应力趋势

线速度的增大先增大后减小，随进给量的增大而增大。方差分析见表7。

由分析结果可以得出，进给量 f_r 对周向加工应力的影响非常显著，工件加工线速度 v_w 对其的影响显著，误差影响很小。工件加工线速度 v_w 对轴向加工应力的影响显著，在实际加工中可重点关注。

表7 表面加工应力试验结果方差分析

项目	周向加工应力方差分析			轴向加工应力方差分析		
方差来源	工件加工线速度 v_w	进给量 f_r	误差	工件加工线速度 v_w	进给量 f_r	误差
偏平方和	2969.4	5174.9	1902.9	7538.8	7197.6	7649.2
自由度	3	3	9	3	3	9
F值	4.68	8.16	1.00	4.10	3.50	1.00
临界值 $F_{0.05}$	3.86	3.86	3.86	3.86	3.86	3.86
临界值 $F_{0.01}$	6.99	6.99	6.99	6.99	6.99	6.99
显著性检验	*	**		*		

注：*——显著；**——非常显著。

4 结束语

试验研究了砂轮磨料、粒度以及磨削工艺参数对表面粗糙度及加工应力的影响，得出以下结论。

1) 对于EA4T材质车轴，采用SA磨料70#粒度的砂轮磨削可以获得更好的表面质量和更大的加工应力。

2) 工件加工线速度 v_w 对磨削表面粗糙度的影响非常显著。进给量 f_r 对周向加工应力的影响非常显著，工件加工线速度 v_w 对其的影响显著，误差影响很小。工件加工线速度 v_w 对轴向加工应力的影响显著。

综合以上结论，总结出工艺参数影响的主次顺序及影响规律，并分析了各种因素影响的显著程度，对于实际加工具有一定的指导意义。

参考文献：

[1] 刘庚武. EA4T材料的锻造与热处理工艺研究[J]. 锻压技术, 2010 (1) : 162-164.

[2] 贾广跃, 蔡育冰, 张峰, 等. 空心车轴精加工工艺改进及加工自动化的研究应用[J]. 机械工程师, 2013 (5) : 181-182.

[3] 于鑫. 高速列车车轴加工残余应力与疲劳寿命关系研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.

专家点评



文章以EA4T车轴磨削为例，论证了砂轮特性、磨削工艺参数对表面粗糙度和加工应力的影响，在试验中选择合适的砂轮，并得出磨削工艺参数影响的主次顺序及影响规律，具有一定的实践指导作用。

文章内容严谨，条理清晰，数据充分，论证有力。亮点是磨削加工的正交试验和对比研究，用试验结果说话，量化分析各种因素的影响规律和影响的显著程度，具有很强的说服力。

MW 20240315