

GH4169高温合金拉杆螺栓 喷砂强化试验研究

程 正, 易泰勋, 冯 伟, 张登才, 聂家超, 李润峰

(东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000)

摘 要: 选择丸料规格、喷枪移动速度、喷枪与工件距离、丸料供给压力、丸料流量5个参数作为初始研究变量, 设计了五因素三水平正交试验, 进行了高温合金材质试板喷砂试验。采用综合平衡法对表面粗糙度、硬度、残余应力3个指标进行了综合评价, 通过极差分析确定了5个参数的最优组合。进行了同规格燃气轮机拉杆螺栓试件喷砂试验验证, 基于最优参数组合设置了试验组与空白对照组, 分析了喷砂前后螺纹尺寸和牙型表面形貌变化, 综合分析得到了合格的产品拉杆喷砂工艺参数。

关键词: 高温合金; 螺栓; 正交试验; 喷砂; 表面强化; 燃气轮机

中图分类号: TG668 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620(2026)01-0085-07

DOI: 10.3724/j.GTER.20250067

Sandblasting strengthening of GH4169 superalloy rod bolts

CHENG Zheng, YI Taixun, FENG Wei, ZHANG Dengcai, NIE Jiachao, LI Runfeng

(Dongfang Turbine Co., Ltd., Dongfang Electric Corporation, Deyang 618000, China)

Abstract: Five parameters, including the specifications of the shot type, the movement speed of the spray gun, the distance between the spray gun and the workpiece, the supply pressure, and the shot flow, were selected as initial research variables. A five-factor three-level orthogonal experiment was designed to conduct sandblasting tests on superalloy material test plates. The comprehensive balance method was used to evaluate the three indicators of surface roughness, hardness, and residual stress. The optimal combination of the five parameters was determined through range analysis. The sandblasting test of the same specification gas turbine rod bolt specimens were carried out. Based on the optimal parameter combination, the experimental group and a blank control group were set up. The changes in thread size and tooth surface morphology before and after sandblasting were analyzed, and the qualified product rod sandblasting process parameters were obtained.

Key words: superalloy; bolt; orthogonal experiment; sandblasting; surface strengthening; gas turbine

0 引言

拉杆组合式转子结构凭借大刚度质量比、冷却通道易布置、装配检修方便等诸多优势, 被广泛应用于重型燃气轮机和航空发动机设计^[1]。但是, 在长期运行过程中, 拉杆组合式转子承受着复杂的交变

循环载荷, 这可能引发拉杆螺栓松动, 导致预紧力下降, 轮盘接触性能退化甚至失效, 影响机组安全稳定运行。螺纹防松问题一直是工程领域的研究热点^[2-3]。研究表明, 螺栓松动的本质是内外牙发生相对滑动^[4]、螺纹副微动磨损^[5]。通过优化螺纹

收稿日期: 2025-04-12

基金项目: 工信部“两机”专项(Y2019-VII-0018-0160)

作者简介: 程 正(1994-), 男, 湖北天门人, 工程师, 硕士, 研究方向为燃气轮机制造工艺技术研发与智能制造。

引用格式: 程 正, 易泰勋, 冯 伟, 等. GH4169高温合金拉杆螺栓喷砂强化试验研究[J]. 燃气轮机试验与研究, 2026, 39(1): 85-91. CHENG Zheng, YI Taixun, FENG Wei, et al. Sandblasting strengthening of GH4169 superalloy rod bolts[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2026, 39(1): 85-91.

结构^[6]、增加防松装置^[7]、实施螺纹表面处理^[8-11]等措施,可以有效提升螺纹抗松性能。但在实际应用中,受安装结构和工作环境影响,前两种措施的应用局限性较大。喷丸/喷砂作为一种简单、高效、低成本的表面处理工艺,被广泛应用于汽车、航空航天、轨道交通、能源动力等领域零部件的表面强化^[12-15]。

相较于喷丸,喷砂在引入表面硬化层的同时还会显著提升工件表面粗糙度,增大摩擦阻力,利于紧固件螺纹抗松。某重型燃气轮机拉杆螺栓制造技术规范中明确要求,需要对其螺纹部分进行喷砂强化处理,并提出了相应检测标准。为获得合格的产品拉杆喷砂工艺参数,本文通过试验系统研究了丸料规格、喷枪移动速度、喷枪与工件距离、丸料供给压力、丸料流量等参数对螺纹表面强化效果的影响,综合分析了喷砂后螺纹表面粗糙度、硬度、残余应力、牙型尺寸及表面形貌变化,研究成果可为相关工艺技术人员提供参考。

1 试验设备和试验方案

喷砂试验于拉杆自动喷砂设备(KXS-3000C)上进行,其喷枪运动机构为一套X轴机械臂,采用西门子伺服电机驱动,重复定位精度在 ± 0.10 mm以内。试块理化检测设备与方法包括:使用HOMMEL TESTER T1000粗糙度检测仪,在0.80 mm基准长度下测量各试块牙面的表面粗糙度 $R_{\max}$;在0.5 N试验力度条件下,使用BUEHLER维氏硬度测量仪,从距

螺纹表层0.04 mm深度位置开始,以0.30 mm间距依次选取8个测量点测量硬度,取8个测量点平均值作为最终值;采用Proto-LXRD型X射线应力分析仪测量残余应力,Mn靶 $K\alpha$ 辐射,(311)衍射晶面,检测试件完整啮合第1齿的受压面,取 0° 和 $\pm 15^\circ$ 方向上3处测量点的平均值作为最终值;采用FORMTRACER Avant C4000轮廓测量仪测量螺纹牙型轮廓。试验所用的试件及部分检测设备如图1所示。

影响喷丸/喷砂强化效果的工艺参数很多,包括丸料规格、丸料供给压力、丸料流量、喷丸时间、喷枪与工件距离、喷射角度、喷嘴直径等。其中,表面覆盖率主要与喷丸时间有关,残余应力、硬度、粗糙度等指标受各参数综合影响^[16-18]。表1中列出了某重型燃气轮机拉杆螺栓喷砂强化表面理化性能的指标要求。为兼顾各项要求,需要合理设置各类工艺参数。由于开展理化性能检验需要对试件进行破坏性解剖处理,研究全部参数变量下的影响规律耗时耗力,而正交试验能通过少量的试验次数寻找到最优工艺参数组合^[18],故开展正交试验以确定各参数的最优组合。

表1 燃气轮机拉杆螺栓喷砂检查指标

Table 1 Gas turbine rod bolt sandblasting inspection index

检查项目	性能指标
螺纹齿面表面粗糙度	$\leq 15 \mu\text{m}$
螺纹齿面硬度HV	≥ 460
螺纹齿面残余应力	$\geq 400 \text{ MPa}$
螺纹尺寸	喷砂前后尺寸差 $\leq 0.05 \text{ mm}$
螺纹表面喷砂覆盖率	目视检查100%

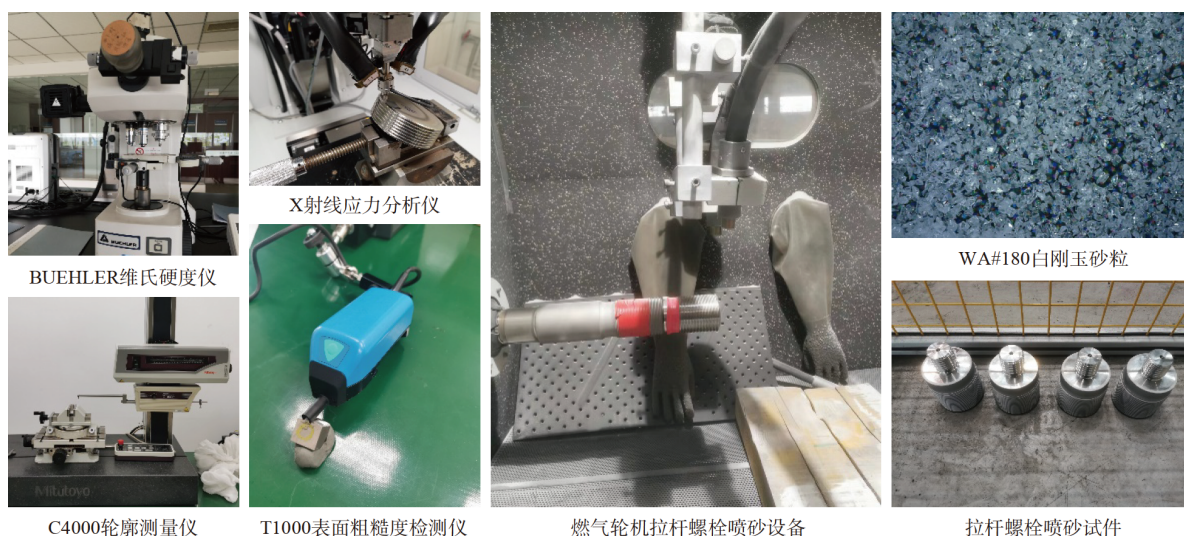


图1 喷砂试验所用试件及部分检测设备

Fig.1 Specimens and partial testing equipments for sandblasting experiments

2 同材质试板喷砂正交试验

2.1 正交试验水平选择

将1根拉杆毛坯料切割为若干个直径60 mm、厚10 mm的饼状试块,用于喷砂正交试验。根据经验数据确定了丸料规格 A 、喷枪移动速度 B 、喷枪与工件距离 C 、丸料供给压力 D 、丸料流量 E 5个关键因素的3个水平值,如表2所示,并按照 $L_{18}(3^5)$ 正交表设计试验。

表2 喷砂试验因素水平表
Table 2 Factor level of sandblasting

水平	A	$B/(mm/s)$	C/mm	D/MPa	$E/(kg/min)$
1	白刚玉WA#120	6	70	0.50	4
2	白刚玉WA#150	8	100	0.55	6
3	白刚玉WA#180	10	150	0.60	8

2.2 正交试验结果分析

18组试验的分组及检测结果如表3所示。表中, K 为每个指标水平下的取值之和(如 K_1 代表指标取水平1时的和); k 为 K 的平均值(相应的 K 除以水平数,本文为3水平); R 为 k 的极差(最大值减最小值)。可以看出,18组试验的残余应力最小值为597 MPa,满足指标要求,而绝大部分试验组的表面粗糙度和硬度均不合格。综合来看,只有第5、6、11、17组试验结果满足表1的指标要求。通过极差分析可以得出:对于表面粗糙度指标,5个因素影响的主次顺序为 $E>A>D>B>C$;对于硬度指标,5个因素影响的主次顺序为 $B>E>D>A>C$;对于残余应力指标,5个因素影响的主次顺序为 $A>D>E>C>B$ 。

由表3还可以看出, D 、 E 对表面粗糙度、硬度、残余应力3个指标的影响均较大, B 、 C 的影响相对较小, A 的影响适中。3个指标中, A 对表面粗糙度和残余应力的影响更为明显,这也与喷砂强化的一般规律^[13]相吻合。由于粗糙度的目标值是趋小,因此粗糙度的最优组合是 $E_2A_3D_2B_3C_2$;硬度和残余应力的目标值是趋大,其最优组合分别是 $B_3E_2D_1A_1C_2$ 、 $A_3D_2E_2C_2B_3$ 。

基于上述分析结果,针对3个指标采用综合平衡法得到的最优参数选择为 $A_3B_3C_2D_2E_2$,即丸料规格选择白刚玉WA#180,喷枪移动速度选择10 mm/s,喷枪与工件距离选择100 mm,丸料供给压力选择0.55 MPa,丸料流量选择6 kg/min。观察表3发现,

$A_3B_3C_2D_2E_2$ 组合在正交试验组中没有出现,为验证其实际喷砂效果,开展了最优参数组下的拉杆螺栓试件喷砂验证性试验。

3 拉杆螺栓试件喷砂试验

参考标准产品拉杆螺栓尺寸1:1制作了试件。由上文分析可知,丸料供给压力和丸料流量对表面粗糙度、硬度、残余应力3个指标的影响较大。为获得合格的工艺参数,本研究在最优组H1的基础上增加了3个试验组H2~H4和1个未喷砂的对照组H5。拉杆螺栓试件喷砂试验参数如表4所示。

试验后将每个试验件分割为3份,分别用于测量表面粗糙度、硬度和残余应力,并分别在每份试验件 0° 、 90° 、 180° 和 270° 位置切出4个试块,以4个试块检测值的平均值作为最终值。图2对比了表4中5组试验件的表面粗糙度、硬度、残余应力检测结果。可以看出:5组试验件中,H5的3个指标均处在较低水平,H1~H4的3个指标均有明显提高;H2、H3的3个指标均满足表1中的齿面检测要求。

为验证H2、H3试验组的螺纹尺寸变化和螺纹表面喷砂覆盖率指标,采用外径千分尺和螺纹千分尺测量并记录了喷砂前后螺纹外径、中径值,同时目视检查了覆盖率,结果如表5所示。可以看出,H2、H3试验组均满足表1中的螺纹尺寸和螺纹表面喷砂覆盖率指标要求。结合图2数据,相比之下,H2试验组的硬度值和残余应力值更高,虽然其表面粗糙度值也较高,但仍在要求范围内。综合考虑,本文最终选择H2试验组参数,即弹丸规格选择白刚玉WA#180,喷枪移动速度选择10 mm/s,工件与喷枪距离选择100 mm,丸料供给压力选择0.55 MPa,丸料流量选择4 kg/min,作为最终产品拉杆喷砂工艺参数。

此外,从表5还可以得出,在覆盖率超过100%的情况下,喷砂后的螺纹外径、中径尺寸较喷砂前平均减少了约0.03 mm,这主要是由于喷砂会剥离螺纹表层少量组织^[15]。为进一步观察喷砂前后螺纹牙型变化,使用工业电子放大镜观察螺纹表面形貌,如图3所示。喷砂前螺纹牙面清晰可见加工刀痕,喷砂后表面呈哑光色,刀痕消失,表面变得凹凸不平。采用轮廓测量仪对螺纹牙型轮廓进行检测,结果如图4所示,喷砂后螺纹牙型轮廓面整体内缩约0.015 mm。由此可见,喷砂处理在引起试件表面粗糙度上升的同时,还造成了轮廓尺寸变化。

表3 喷砂工艺正交试验分组及试验结果
Table 3 Orthogonal experiment grouping and results of sandblasting process

	编号	A	B	C	D	E	表面粗糙度/ μm	硬度(HV)	残余应力/MPa
	1	1	1	1	1	1	23.3	455	650
	2	1	2	2	2	2	13.6	458	872
	3	1	3	3	3	3	21.5	460	597
	4	2	1	2	3	1	16.2	462	782
	5	2	2	3	1	2	12.5	482	746
	6	2	3	1	2	3	13.3	485	881
	7	3	1	3	3	1	16.5	451	902
	8	3	2	2	1	2	10.7	444	882
	9	3	3	1	2	3	11.6	448	871
	10	1	2	1	1	1	21.3	486	663
	11	1	3	2	2	2	12.4	487	877
	12	1	1	3	3	3	17.3	440	836
	13	2	2	2	3	1	16.4	459	809
	14	2	3	3	1	2	12.1	458	792
	15	2	1	1	2	3	13.5	435	845
	16	3	2	3	3	1	14.1	447	825
	17	3	3	2	1	2	12.4	471	913
	18	3	1	1	2	3	10.5	449	862
表面粗糙度	K_1	109.4	97.3	93.5	92.3	107.8			
	K_2	84.0	88.6	81.7	74.9	73.7			
	K_3	75.8	83.3	94.0	102.0	87.7			
	k_1	36.47	32.43	31.17	30.77	35.93			
	k_2	28.00	29.53	27.23	24.97	24.57			
	k_3	25.27	27.77	31.33	34.00	29.23			
	R	11.20	4.67	4.10	9.03	11.37			
硬度	K_1	2 786	2 692	2 758	2 796	2 760			
	K_2	2 781	2 776	2 781	2 762	2 800			
	K_3	2 710	2 809	2 738	2 719	2 717			
	k_1	928.67	897.33	919.33	932.00	920.00			
	k_2	927.00	925.33	927.00	920.67	933.33			
	k_3	903.33	936.33	912.67	906.33	905.67			
	R	25.33	39.00	14.33	25.67	27.67			
残余应力	K_1	4 495	4 877	4 772	4 646	4 631			
	K_2	4 855	4 797	5 135	5 208	5 082			
	K_3	5 255	4 931	4 698	4 751	4 892			
	k_1	1 498.33	1 625.67	1 590.67	1 548.67	1 543.67			
	k_2	1 618.33	1 599.00	1 711.67	1 736.00	1 694.00			
	k_3	1 751.67	1 643.67	1 566.00	1 583.67	1 630.67			
	R	253.33	44.67	145.67	187.33	150.33			

表4 拉杆螺栓试件喷砂试验参数
Table 4 Parameters of sandblasting test for the threaded rod specimens

组别	A	B/(mm/s)	C/mm	工件转速/(r/min)	喷砂次数	D/MPa	E/(kg/min)
H1	白刚玉WA#180	10	100	20	4	0.50	6
H2						0.55	4
H3						0.55	6
H4						0.55	8
H5	—	—	—	—	—	—	—

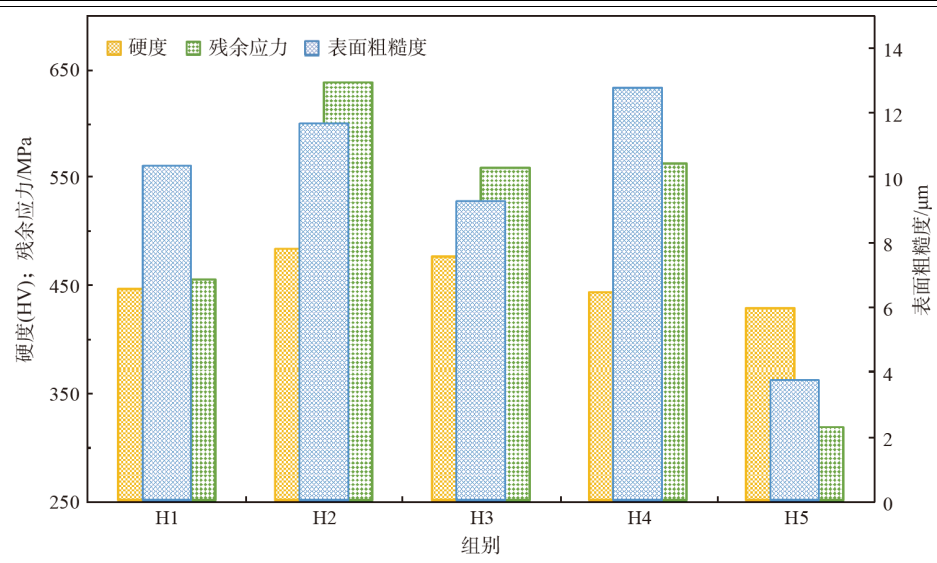


图2 拉杆螺纹试块检测结果
Fig.2 Detection results of the threaded rod specimens

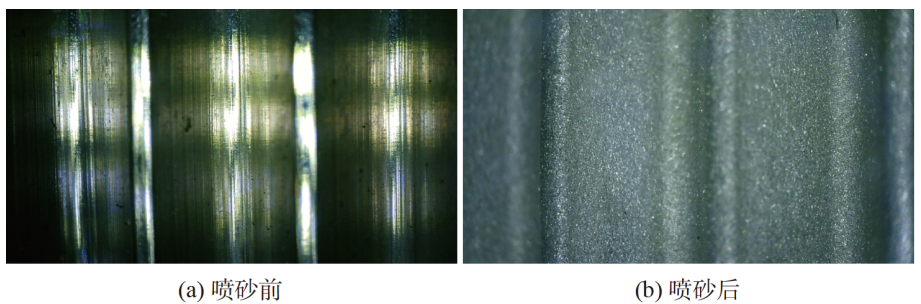


图3 喷砂前后螺纹表面形貌对比
Fig.3 Comparison of thread surface morphology before and after sandblasting

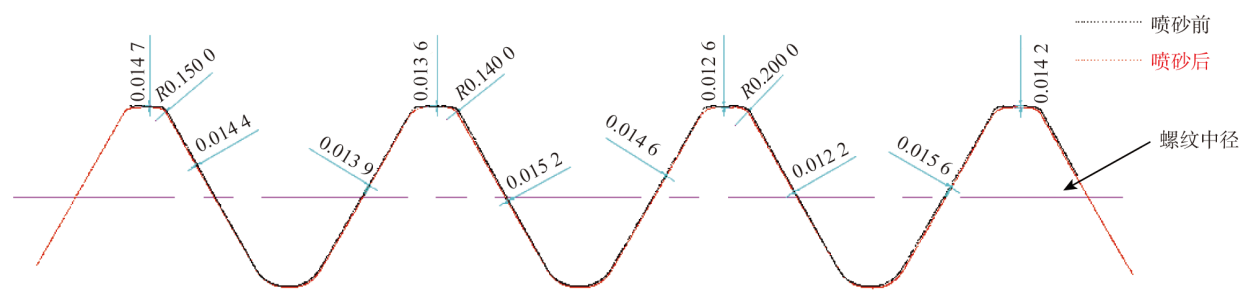


图4 喷砂前后螺纹牙型轮廓对比
Fig.4 Comparison of thread profile before and after sandblasting

4 结论

(1) 喷砂参数中,丸料供给压力和丸料流量对表面粗糙度、硬度、残余应力3个指标的影响均较大;喷枪移动速度、喷枪与工件距离对3个指标的影响相对较小;丸料规格对3个指标的影响适中,其中对表面粗糙度和残余应力的影响相对较大。

(2) 满足性能指标要求的产品拉杆喷砂工艺参

表5 喷砂前后螺纹尺寸对比
Table 5 Thread size comparison before and after sandblasting

试验组	覆盖率/%	外径/mm		中径/mm	
		喷砂前	喷砂后	喷砂前	喷砂后
H2	>100	88.718	88.692	86.680	86.650
H3	>100	88.704	88.676	86.675	86.640

数为:白刚玉WA#180弹丸,喷枪移动速度10 mm/s,喷枪与工件距离100 mm,丸料供给压力0.55 MPa,

丸料流量4 kg/min。

(3) 喷砂处理起到了表面强化作用,试验件表面硬度及残余应力均有明显提高,但同时带来了表面粗糙度上升和轮廓尺寸变化。在进行喷砂强化效果评价时,既要选择合适的量化指标,也要综合考虑各因素对指标的影响。

参考文献:

- [1] 李 浦,袁 奇. 拉杆转子接触界面参数识别和动力学研究进展[J]. 西安交通大学学报,2023,57(10):39-52.
LI Pu,YUAN Qi. Research progress on interface parameter identification and dynamics of tie-bolt rotors [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2023,57(10): 39-52. (in Chinese)
- [2] 侯世远,廖日东. 螺纹联接松动过程的研究现状与发展趋势[J]. 强度与环境,2014,41(2):39-52.
HOU Shiyuan,LIAO Ridong. Research progress on self-loosening of threaded fasteners[J]. Structure & Environment Engineering,2014,41(2):39-52. (in Chinese)
- [3] GONG Hao,DING Xiaoyu,LIU Jianhua,et al. Review of research on loosening of threaded fasteners[J]. Friction,2022,10(3):335-359.
- [4] PAI N G,HESS D P. Three-dimensional finite element analysis of threaded fastener loosening due to dynamic shear load[J]. Engineering Failure Analysis,2002,9 (4):383-402.
- [5] 于泽通,刘建华,张朝前,等. 轴向交变载荷作用下螺栓联接结构的松动试验研究[J]. 摩擦学学报,2015, 35(6):732-736.
YU Zetong,LIU Jianhua,ZHANG Chaoqian,et al. An experimental study on self-loosening of bolted joints under axial vibration[J]. Tribology,2015,35(6):732-736. (in Chinese)
- [6] 余沛垌,邓 喆,魏佳明,等. 燃气轮机转子分布式拉杆螺栓螺纹受载和松动特性[J]. 计算机辅助工程, 2024,33(3):13-17.
YU Peijiong,DENG Zhe,WEI Jiaming,et al. Load and loosening characteristics of distributed tension rod bolt thread in gas turbine rotor[J]. Computer Aided Engineering,2024,33(3):13-17. (in Chinese)
- [7] 莫易敏,王 赓,满健康,等. 弹簧垫圈在高强度螺栓连接中的防松性能分析[J]. 制造技术与机床,2014, (9):73-76.
MO Yimin,WANG Geng,MAN Jiankang,et al. The locking performance of spring washer in high strength bolt connection[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool,2014,(9):73-76. (in Chinese)
- [8] 秦留军,顾伯勤. 喷丸强化在改善螺栓抗疲劳性能中的应用[J]. 润滑与密封,2013,38(6):86-89.
QIN Liujun,GU Boqin. Application of shot-peening strength on improving anti-fatigue property of bolt[J]. Lubrication Engineering,2013,38(6):86-89. (in Chinese)
- [9] 薛海峰,张煜超,宗 艳,等. 基于微粒子喷丸处理的螺栓防松能力改善研究[J]. 表面技术,2018,47(2): 20-24.
XUE Haifeng,ZHANG Yuchao,ZONG Yan,et al. Improvement of anti-loosening performance of bolts treated by fine particle peening [J]. Surface Technology,2018,47(2):20-24. (in Chinese)
- [10] 宋树亮,梁海啸,张远彬,等. 微粒子喷丸对螺栓连接结构性能的改善研究[J]. 机械,2023,50(11):38-45.
SONG Shuliang,LIANG Haixiao,ZHANG Yuanbin,et al. Study on improving the performance of bolted joint by micro-shot peening[J]. Machinery,2023,50(11):38-45. (in Chinese)
- [11] 化俞新,李 丰,张德乾,等. 横向交变载荷作用下三种涂层螺栓的防松性能[J]. 润滑与密封,2023,48(7): 67-73.
HUA Yuxin,LI Feng,ZHANG Deqian,et al. Anti-loosening performance of three kind of coated bolts under cyclic transverse load[J]. Lubrication Engineering,2023,48(7):67-73. (in Chinese)
- [12] 崔 洋,石 海,谢宏志. 超高强度钢复杂薄壁零件喷丸变形控制工艺研究[J]. 工具技术,2021,55(9): 80-83.
CUI Yang,SHI Hai,XIE Hongzhi. Research on shot peening deformation control technology of complex thin-walled part of ultra-high strength steel[J]. Tool Engineering,2021,55(9):80-83. (in Chinese)
- [13] 张俊双,刘凤铃,唐 涛,等. 喷丸处理对不锈钢表面影响的研究[J]. 金属热处理,2022,47(6):232-239.
ZHANG Junshuang,LIU Fengling,TANG Tao,et al. Research of impact of shot peening on stainless steel surface[J]. Heat Treatment of Metals,2022,47(6): 232-239. (in Chinese)
- [14] LI Jian,LI Yibo,HUANG Minghui,et al. Improvement of aluminum lithium alloy adhesion performance based on sandblasting techniques[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives,2018,84:307-316.
- [15] 魏英华,袁晓光,安 敏,等. 喷砂处理对8Cr4Mo4V 钢表面状态的影响[J]. 航空制造技术,2019,62(21):

- 40–46.
- WEI Yinghua, YUAN Xiaoguang, AN Min, et al. Effect of sand blasting treatment on surface state of 8Cr₄Mo₄V steel[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2019, 62(21):40–46. (in Chinese)
- [16] GHASEMI A, HASSANI-GANGARAJ S M, MAHMOUDI A H, et al. Shot peening coverage effect on residual stress profile by FE random impact analysis[J]. Surface Engineering, 2016, 32(11):861–870.
- [17] 周兆锋, 洪 捐. 工艺参数对TC4钛合金喷丸强化影响的仿真分析[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(9): 1414–1419.
- ZHOU Zhaofeng, HONG Juan. Simulation and analysis of the effect of process parameters on shot peening strengthening of TC4 alloy [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2022, 41(9):1414–1419. (in Chinese)
- [18] 吴少杰, 刘怀举, 张仁华, 等. 基于正交实验和数据驱动的喷丸表面完整性参数预测[J]. 表面技术, 2021, 50(4):86–95.
- WU Shaojie, LIU Huaiju, ZHANG Renhua, et al. Prediction of surface integrity parameters of shot peening based on orthogonal experiment and data-driven[J]. Surface Technology, 2021, 50(4):86–95. (in Chinese)