

滚压加工 AISI 4340 钢螺纹根部疲劳性能的提高

刘宏伟¹ 康仁科¹ 朱祥龙^{1*} 慕昊天¹ 何方舟² 陈莫²

1.大连理工大学机械工程学院,大连,116024
2.上海飞机制造有限责任公司,上海,200436

摘要:采用滚压加工提高 AISI 4340 钢螺栓螺纹疲劳性能,以螺栓疲劳寿命为评价指标,通过正交试验优选滚压参数,并分析未滚压、欠滚压、优滚压和过滚压时螺纹的表面完整性与疲劳寿命,以阐明螺纹疲劳机制。结果表明,滚压参数对 AISI 4340 钢螺纹疲劳寿命有显著影响,显著性顺序为:滚压深度、主轴转速、滚压次数;优选参数为:滚压深度 0.09 mm,主轴转速 40 r/min,滚压次数 3;欠滚压样件表面完整性改善效果低,过滚压样件加工硬化程度最大但损伤螺纹根部表面,优滚压螺纹表面粗糙度 S_a 和 S_q 分别降至 0.124 μm 和 0.165 μm ,残余压应力增至 -247.1 MPa,且显微硬度提高并形成较深梯度变形层,同时避免了过渡硬化;优滚压螺纹根部表面粗糙度、显微硬度和残余应力得到协同改善,比未滚压螺栓的疲劳极限提高了 50%。研究结果表明,合理参数的滚压工艺实现了高质强化目的,可有效解决螺栓高周疲劳断裂问题。

关键词: AISI 4340 钢;螺栓螺纹;滚压加工;疲劳性能

中图分类号: TG668

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.10.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Improvement of Fatigue Performances of AISI 4340 Steel Thread Root by Rolling Processes

LIU Hongwei¹ KANG Renke¹ ZHU Xianglong^{1*} MU Haotian¹ HE Fangzhou² CHEN Mo²

1.School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning, 116024
2.Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai, 200436

Abstract: The rolling process was adopted to improve the fatigue performances of AISI 4340 steel bolt threads, and the optimal rolling parameters were determined by orthogonal testing with the bolt fatigue life as the evaluation index. The surface integrity and fatigue life of unrolled, under-rolled, optimally rolled, and over-rolled thread were analyzed to elucidate the thread fatigue mechanism. The results show that the rolling parameters have a significant effect on the fatigue life of AISI 4340 steel threads, with the order of significance as follows: rolling depth, spindle speed, rolling times. The optimal parameters are as: rolling depth 0.09 mm, spindle speed 40 r/min, and 3 rolling times. The surface integrity improvement of under-rolled samples is low, and the over-rolled samples have the largest degree of work-hardening but damaged the thread root surface. The surface roughness S_a and S_q of thread root with the optimally rolled are reduced to 0.124 μm and 0.165 μm respectively, and the residual compressive stress is increased to -247.1 MPa. In addition, transition hardening is avoided with an increase in micro-hardness and the formation of a deeper deformation layer. Due to the synergistic improvement of surface roughness, micro-hardness and residual stress of the threaded root with the optimal rolling parameters, the fatigue strength was increased by 50% compared to unrolled bolts. The results indicate that the rolling process with reasonable parameters achieves the purpose of high-quality strengthening and may effectively solve the problems of high-fatigue fracture of bolts.

Key words: AISI 4340 steel; bolt thread; rolling process; fatigue performance

0 引言

在航空航天大型机械高端装备中,螺栓连接是机械装备结构装配的主要形式^[1]。以某型号飞机为例,其机身连接、机翼紧固、发动机吊挂以及

起落架固定所需的螺栓高达数万件,螺栓紧固件连接着整个飞机的“筋骨”。螺栓虽小,但发挥着不可替代的作用,具有重要的战略意义和经济效益^[2]。

随着航空工业的快速发展,大飞机等高端装备对螺栓紧固件的性能要求越来越高。在飞机服役过程中,螺栓主要承受交变载荷和振动冲击,由

收稿日期:2024-09-26

基金项目:国家自然科学基金(52475431)

于螺栓头下圆角、退刀槽及螺纹的特殊形状,易在表面形成应力集中诱导裂纹萌生,故其失效形式主要为高周疲劳破坏^[3]。据统计,损坏的螺栓中60%~80%是由疲劳断裂引起的,其中又有65%以上的疲劳断裂发生在螺纹根部^[4]。美国波音747货机与空军KC135加油机都曾因螺纹疲劳失效使引擎脱落发生飞行事故。由此可见,螺栓可靠性对整个装备或结构的安全可靠性能至关重要^[5]。

为提高螺栓紧固件抗疲劳性能,航空航天螺栓通常选用高强度钢材,但材料强度的提高不能彻底解决疲劳失效问题^[6],且使螺栓螺纹的制造变得更加困难。挤压成形法需非常大的变形压力,螺纹成形质量差;切削法加工的螺纹根部则存在表面缺陷。现阶段高强度钢螺纹的加工流程主要为:锻造成形—热处理—车削—表面强化,表面强化作为螺栓螺纹加工的最后一道工序,直接影响螺纹根部表面质量^[7]。目前,滚压加工是螺纹根部表面强化的主要方法,通过与螺纹根部结构相似的滚压轮对螺纹根部表面进行滚压处理,改善表面几何状态,引入加工硬化效应与残余压应力,提高螺纹表面疲劳抗力^[8]。

国内外学者对螺纹表面滚压进行了较多研究。在疲劳寿命方面,王伟等^[9]对300M钢螺纹牙底进行滚压强化,滚压后的螺纹牙底表面呈现光亮滚压带,表面形貌更光滑,螺纹小径发生0.01 mm左右的塑性形变量,螺栓疲劳寿命得到显著提高。CHENG等^[10]利用超声螺纹根部滚压技术处理高强度钢螺纹,滚压后螺纹根部表面粗糙度显著降低,梯度塑性结构使螺纹根部表面硬度和残余压应力增大,螺栓疲劳寿命提高。在滚压参数方面,KNIGHT等^[11]对AISI 4145钢螺纹进行了未滚压、低滚压力多次数、高滚压力多次数、高滚压力单次数的疲劳性能研究,结果表明高滚压力多次数具有最优疲劳寿命。王栋等^[12]探索了45钢螺纹根部滚压加工参数对表面完整性的影响。总结上述文献可知,滚压加工可有效提高螺纹表面完整性与疲劳性能,但改善效果取决于滚压参数组合与水平的选择。

AISI 4340钢是低合金高强度钢的典型代表,AISI 4340钢制螺栓具有良好的强度和韧性,被广泛用于商用飞机机翼、起落架、平尾铰链等关键部位的连接^[13]。据报道,在商用民机维修检查中,曾发现机翼与发动机挂架连接的螺栓出现疲劳破坏,追溯原因是螺栓经数百次飞行中的反复应力

和振动导致裂纹产生,这些裂纹慢慢扩展使螺栓发生高周疲劳断裂。现今,已进行的螺纹表面滚压研究只专注于滚压前后的疲劳寿命对比,没有进行工艺优化与滚压提高螺纹疲劳性能机制的影响分析,且关于AISI 4340钢螺栓螺纹的滚压强化应用未见公开报道。基于此,开展AISI 4340钢螺纹表面滚压强化研究对进一步提高螺栓疲劳性能与明确滚压参数影响具有重要意义。

综上,本文以AISI 4340钢螺栓为研究对象,首先以疲劳寿命为评价指标,通过正交试验优选工艺参数,然后表征螺纹表面完整性与断口形貌,分析表面完整性对疲劳性能的影响,最后讨论滚压加工提高AISI 4340钢螺纹疲劳性能机制。

1 螺纹滚压试验条件

1.1 螺栓样件

本文螺栓材料为AISI 4340低合金高强度钢,化学成分(质量分数)如表1所示。热处理后材料抗拉强度为1120 MPa,屈服强度为1040 MPa,热处理过程包括850 °C加热90 min,油淬火,540 °C回火240 min。螺栓样件结构尺寸与实物如图1所示,螺纹规格为M10×1.5,螺栓样件由车削工艺制备,然后用丙酮处理样品表面污渍。

表1 AISI 4340钢的化学成分(质量分数)

Tab.1 Chemical composition of AISI 4340 steel

(mass fraction)

%

$w(C)$	$w(Mn)$	$w(Si)$	$w(Cr)$	$w(Ni)$
0.420	0.670	0.300	0.800	1.720
$w(Mo)$	$w(S)$	$w(P)$	$w(Fe)$	
0.250	0.004	0.010	余量	

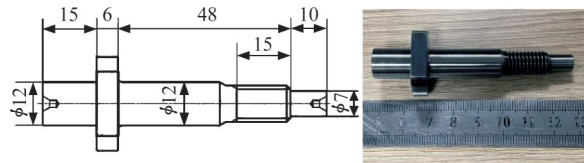


图1 AISI 4340钢螺栓样件

Fig.1 AISI 4340 steel bolt sample

1.2 试验方法

本试验使用大连理工大学自研螺栓滚压设备与滚压工具,如图2所示。滚压工具由刀柄、滚压轮等附件组成,滚轮材料为YG8,刀尖圆弧半径为0.13 mm。螺栓样品由三爪卡盘固定,并随机床主轴旋转,滚压工具安装在机床刀塔上并沿螺栓轴向移动,进给量 f_z 等于螺距 P ,滚压深度由机床刀塔的前后移动控制。在螺纹滚压工艺中,影响滚压效果的参数因素主要有滚压深度 d 、主轴转速 n 与滚压次数 m 。为获得更好的强化效果,

以疲劳寿命为评价指标获得最优滚压参数,试验设计采用表 2 所示三因素三水平正交表 $L_9(3^4)$ 。

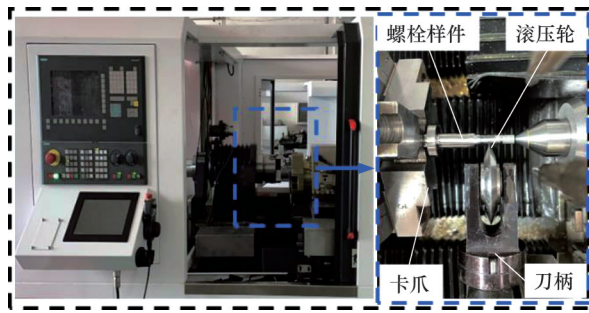


图 2 螺纹根部滚压试验系统

Fig.2 Thread root rolling experiment system

表 2 正交试验因素水平表

Tab.2 Orthogonal test factors and levels

水平	因素		
	滚压深度/mm	主轴转速/(r·min ⁻¹)	滚压次数
1	0.05	20	1
2	0.09	40	2
3	0.13	60	3

1.3 表征与疲劳性能测试

螺纹滚压后,采用电液伺服疲劳试验机进行拉-拉疲劳寿命测试,试验频率 10 Hz,应力比 $R=0.1$,疲劳应力根据前期工作设置为 $S_{max}=375$ MPa,每组参数进行 3 次重复性测试。断口形貌通过场发射扫描电镜(SEM,型号 SU5000)获取。螺纹根部表面粗糙度与表面形貌由表面光学轮廓仪(ZYGO Nex-View)测量,沿螺纹周向测量 4 次取平均值。螺纹根部表面残余应力采用 PROTO-LXRD 微区应力仪检测,靶材为 Cr 靶,沿周向测量 3 个点取平均值。由于螺纹根部空间狭小,故选取直径 100 μm 准直管。同时为避免螺牙两侧遮挡 X 射线,采用小进给、湿磨方式去除螺纹齿。采用 MVS-1000Z 显微硬度仪检测螺纹表层硬度,加载载荷 0.98 N,保持时间 10 s,重复测量 3 次;硬度测试前,沿轴向对螺纹进行线切割,并对样品截面进行磨抛处理。微观组织图像由 SEM 获取,用碳化硅砂纸和 1 μm 金刚石悬浮液机械抛光,并用 2%(体积分数)硝酸溶液腐蚀。为进行 EBSD(背散射电子衍射技术)表征,需进行氩离子抛光,然后利用高分辨扫描电镜(SUPPA 55)进行电子背散射衍射分析。

2 正交试验结果与最优参数确定

正交试验组与车削对照组螺栓疲劳寿命如表 3 所示。由表 3 可知,滚压后螺栓样品疲劳寿命明显延长,但不同参数组合对疲劳寿命的提高效果

有较大差异。样品 1 的疲劳寿命提高最小,循环次数为 114 976;样品 5 的疲劳寿命提高最大,循环次数为 1 015 503。两者差了一个数量级,这说明滚压后螺纹疲劳性能的提高依赖于参数组合。为分析各因素对疲劳寿命影响,对表 3 结果进行极差分析,极差分析结果如表 4 所示,其中 k_i 为水平号为 $i(i=1,2,3)$ 所对应的试验结果之和的均值。极差 $R_j=\max(k_i)-\min(k_i)$, R_j 反映了第 j 列因素的水平变动时试验指标的变动幅度, R_j 越大,说明该因素对试验指标的影响越大。

表 3 试验方案与测试结果

Tab.3 Experimental scheme and test results

样品	滚压深度/mm	主轴转速/(r·min ⁻¹)	滚压次数	疲劳寿命 (cycle)
1	0.05	20	1	114 976
2	0.05	40	2	145 709
3	0.05	60	3	200 104
4	0.09	20	2	884 302
5	0.09	40	3	1 015 503
6	0.09	60	1	642 603
7	0.13	20	3	290 578
8	0.13	40	1	483 178
9	0.13	60	2	383 164
10	车削对照组			76 322

表 4 疲劳寿命极差分析

Tab.4 Fatigue life range analysis

指标		滚压深度	主轴转速	滚压次数
疲劳寿命 (cycle)	k_1	153 596	429 952	413 585
	k_2	847 469	548 130	471 058
	k_3	385 640	408 623	502 061
	R_j	693 873	139 566	88 476

由表 4 可知,滚压加工参数影响螺栓疲劳寿命的显著性顺序为:滚压深度、主轴转速、滚压次数。根据 k_i 和 R_j 分析的不同因素对疲劳寿命的影响,三个因素中滚压深度对疲劳寿命的贡献率最大,高达 75.1%;主轴转速和滚压次数的贡献率较小,分别为 15.3% 和 9.6%。图 3 所示为各因素水平对疲劳寿命的影响,螺栓疲劳寿命随着滚压深度和主轴转速的增大先增大后减小,随滚压次数的增加一直缓慢增大。根据各因素水平对螺栓疲劳寿命影响,优选参数为:滚压深度 0.09 mm,主轴转速 40 r/min,滚压次数 3,对应正交方案样品 5 的滚压参数。

3 表面滚压强化效果分析

根据正交试验结果,疲劳性能的提高依赖于滚压参数组合。滚压样品 1 由于滚压深度和滚压

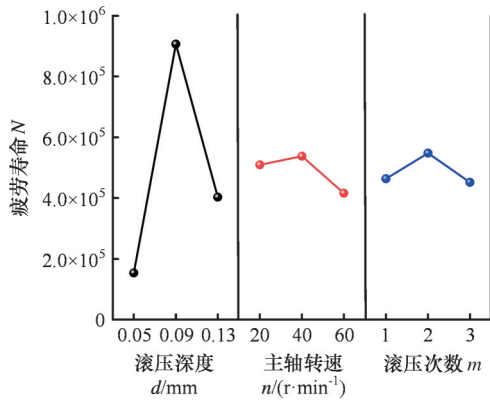


图3 滚压参数对疲劳寿命的影响

Fig.3 Analysis of rolling parameters on fatigue life

次数最小,因此处于欠滚压状态,疲劳寿命提高最小。滚压样件7的滚压深度与滚压次数最大,且慢主轴转速意味着同一区域滚压时间更长,螺纹表面可发生充分塑性变形,但疲劳寿命提高仍很小,仅为优选参数疲劳寿命的28.6%。接下来,对未滚压、欠滚压(样件1)、优滚压(样件5)和过滚压(样件7)的螺纹根部表面完整性进行表征,以分析不同表面完整性对疲劳性能的影响。

3.1 表面粗糙度、表面硬度与残余应力

图4和图5显示了不同状态螺纹根部的表面形貌与表面粗糙度。未滚压螺纹根部表面呈现规则的高低起伏沟槽,峰谷高度差值很大,同时伴有毛刺、凸起等缺陷,这是车削加工表面的典型特征,表面粗糙度 S_a 和 S_q 分别高达 $0.321 \mu m$ 和 $0.395 \mu m$ 。滚压加工后,滚压轮的碾压作用使表面发生塑性形变,欠滚压样件1表面仍可观察到车削加工痕迹,但密集排列的沟槽变得稀疏,表面粗糙度 S_a 和 S_q 分别降至 $0.206 \mu m$ 和 $0.257 \mu m$; 对于优滚压样件,表面形貌更加平坦,滚压轮引入的大程度塑性形变使沟槽被完全去除,形成了光

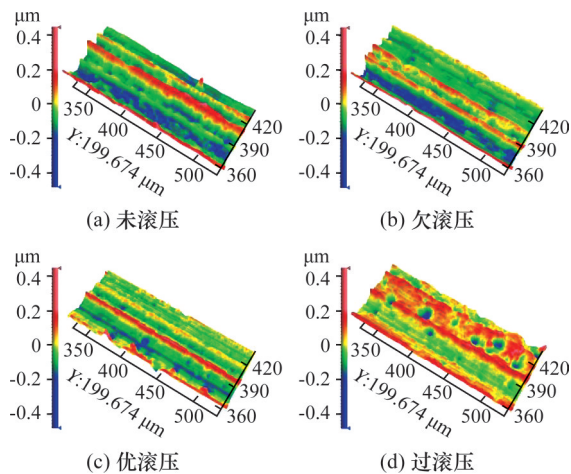


图4 AISI 4340钢螺纹根部表面形貌

Fig.4 Surface morphology of the AISI 4340 steel thread roots

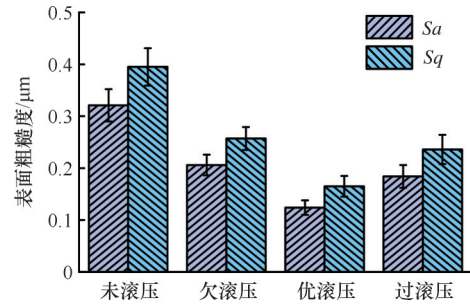
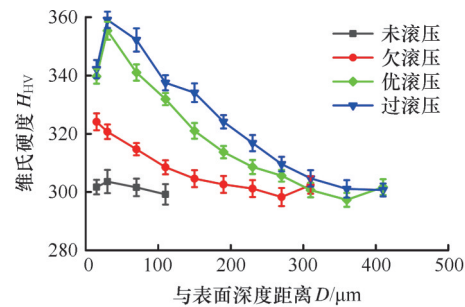


图5 AISI 4340钢螺纹根部表面粗糙度

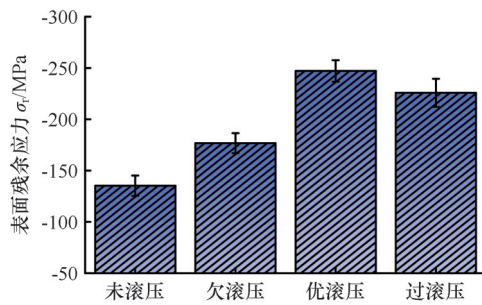
Fig.5 Surface roughness of the AISI 4340 steel thread roots

滑表面,表面粗糙度 S_a 和 S_q 分别为 $0.124 \mu m$ 和 $0.165 \mu m$;随着滚压深度与滚压次数增加,过滚压样件7表面形貌出现了大小不均的点坑与耕犁,这些特征为严重加工硬化的产物,表面粗糙度 S_a 和 S_q 分别增至 $0.184 \mu m$ 和 $0.236 \mu m$ 。在循环载荷加载过程中,表面沟槽与点坑等缺陷是形成应力集中诱发微裂纹的危险部位,表面粗糙度越小,表面抵抗微裂纹形成的能力越强。

螺纹根部表面显微硬度与残余应力测量结果如图6所示。由图6a可知,未滚压样件表面显微硬度稳定在 $303.6HV \sim 298.2HV$ 之间,且深度分布上变化不大。经滚压加工后样件表面显微硬度提高,欠滚压螺栓样件1表面显微硬度达 $324.1HV$,与未滚压样件表面硬度相比增幅达 8.68% ,硬化层深度约 $210 \mu m$; 优滚压和过滚压样件由于更大滚压深度和更多滚压次数,表层显



(a) 显微硬度分布



(b) 表面残余应力

图6 螺纹根部表面硬度与残余应力

Fig.6 Surface hardness and residual stress of threaded roots

微硬度值分别增至 339.7HV 和 342.2HV, 硬化层深度分别为 320 μm 和 370 μm 。观察硬度分布曲线变化, 深度增加, 显微硬度不断减小, 这主要是由于次表层材料接收的滚压轮动能不断减小, 加工硬化作用减小。但需注意的是, 优滚压与过滚压样品的最大显微硬度出现在次表层, 这可能是由于材料表层发生大程度塑性变形, 表面材料发生弹性回复, 加工硬化效应在次表层达到最大。图 6b 所示为不同状态样品的表面残余应力, 未滚压样品表面残余应力为 -135.2MPa , 这是由机械车削过程引起的。与未滚压样品相比, 欠滚压、优滚压和过滚压样品表面残余应力分别提高至 -176.7MPa 、 -247.1MPa 、 -225.8MPa , 增幅为 30.7%、82.8%、67.1%。在循环疲劳加载过程中, 残余应力幅值的提高在疲劳裂纹成核和扩展过程中起着关键作用, 可减小最大疲劳应力与应力比, 有利于延缓表面裂纹的成核与扩展。

3.2 表层微观组织

螺纹根部横截面的微观组织如图 7 所示, 可知, AISI 4340 钢螺纹根部的微观组织主要由回火马氏体组成, 但不同参数的表层微观组织有一定差异。未滚压样品回火马氏体组织均匀分布, 表层与基体组织未见明显细化晶粒层; 观察滚压后样品横截面微观组织, 欠滚压样品 1 横截面在深度 3 μm 内的马氏体组织已变得模糊; 优滚压样品 5 在深度约 23 μm 内形成了塑性变形层; 过滚压样品 7 在深度约 28 μm 内形成了塑性变形层。由于 AISI 4340 钢经热处理后马氏体晶粒尺寸很小, 且具有高强度特点, SEM 只能观察到宏观的组织形态差异, 为了更清楚观察样品表层微观结构演变, 用 EBSD 对未滚压、优滚压和过滚压样品进行了晶

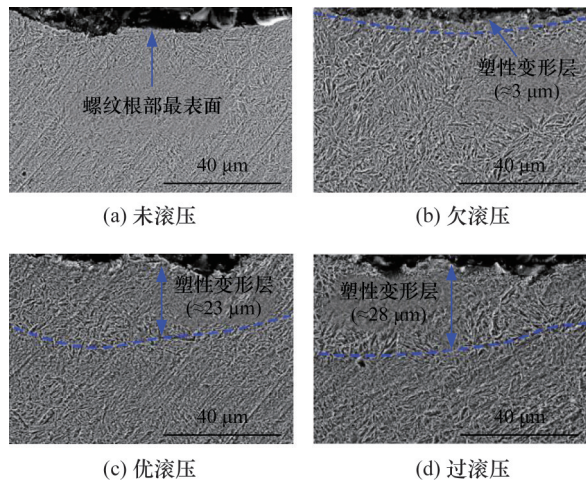


图 7 AISI 4340 钢螺纹根部横截面微观组织

Fig.7 Microstructure of cross-section of AISI 4340 steel thread roots

粒取向和局部取向差(local average misorientation, LAM)分布的表征, 结果如图 8 和图 9 所示。

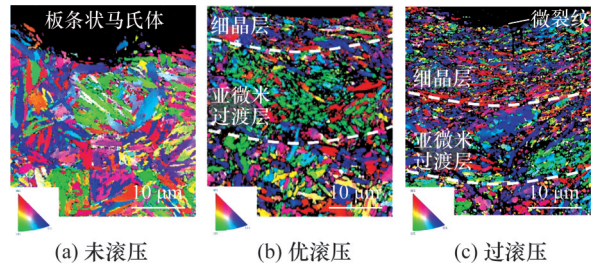


图 8 螺纹根部横截面晶粒分布

Fig.8 Grain distribution in the cross-section of the thread root

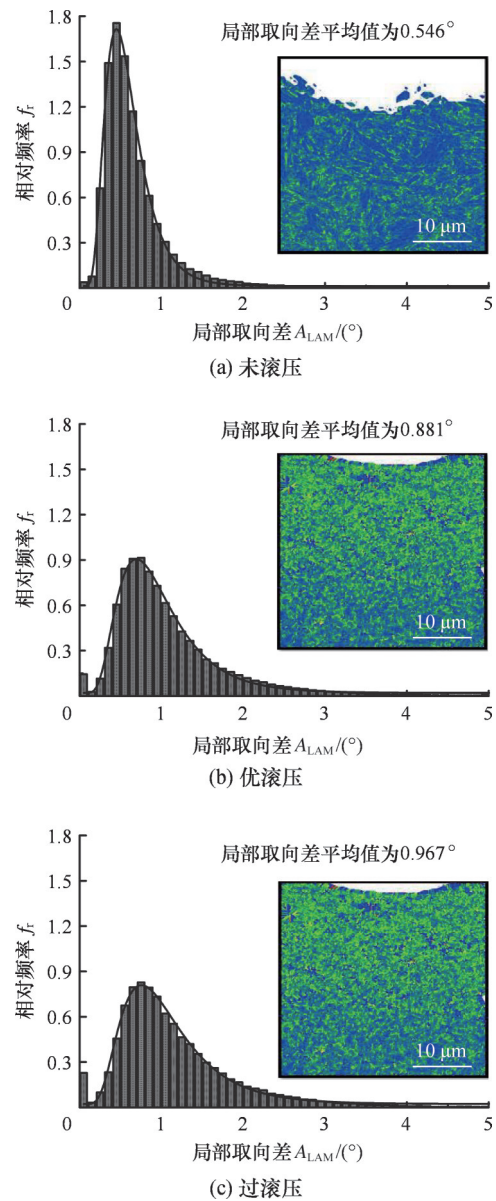


图 9 螺纹根部局部取向差分布

Fig.9 Distribution of the local misorientation average angle of threaded root

由图 8 可知, 未滚压样品表面均匀分布着微米级晶粒, 板条状马氏体取向随机均匀。对于优

滚压和过滚压样品,顶部区域晶粒在塑性变形作用下被细化成纳米晶,次表面晶粒细化为亚晶,然后沿深度方向逐渐演变为基体晶粒。结果表明优滚压与过滚压样品表面形成了梯度显微结构,其层深与SEM结果相近。图9为局部取向差分布图,图中绿色点表示高塑性变形或高位错密度,蓝色点表示低变形或低位错密度。未滚压样品表面以蓝色点为主,这说明没有发生塑性形变,其局部取向差为 0.546° 。经滚压后,优滚压与过滚压样品中绿色点在表层分布更密集,沿深度方向减少,这表明螺纹根部发生了严重塑性变形,与未滚压样品相比,优滚压和过滚压局部取向差分别增至 0.881° 和 0.967° ,位错密度显著增大。同时需要注意的是,过滚压样品表面由于过渡硬化形成了微裂纹缺陷,如图8c所示。在疲劳循环过程中,这些表面微裂纹会加剧裂纹形核,因此降低了更大塑性变形的强化效果。此外,过渡硬化会降低材料塑性,裂纹形成后会加速裂纹扩展^[14-15]。

3.3 断口形貌

未滚压、欠滚压、优滚压和过滚压螺栓疲劳断口形貌如图10所示。所有样品断口形貌都由裂纹萌生区、扩展区和最终断裂区组成,但断裂形貌特征差异很大。对于未滚压样品,表面沟槽与缺陷极易引起应力集中并在循环载荷下萌生裂纹。由图10a可知,多条裂纹源形核于螺纹根部表面,并形成粗大的放射棱沿径向和周向扩展,最终断裂区呈现出多个粗糙峰特征。图10e为区域A的放大图,可以看出断裂区分布着小韧窝与解理小平面,该疲劳断口为脆性断裂的准解理断口。对于欠滚压样品,表面裂纹源仍萌生于螺纹根部表面,但因为表面缺陷的减少以及表层硬化作用,裂纹源表现为细密纹理样,然后以扇形扩展在最终断裂区形成剪切唇。由于表面滚压效果,螺纹根部表面质量更好,承受更多疲劳循环,断裂区韧窝在循环载荷作用下变大,属于韧脆混合断裂。观察优滚压和过滚压样品断口形貌,优滚压样品为单裂纹源,过滚压样品为多源裂纹,这是因为优滚压样品表面粗糙度低且残余应力大,过滚压样品表面硬化作用更严重,但表面损伤加剧了表面应力集中。观察图10g和图10h,优滚压样品断裂区分布着大尺寸韧窝与细条撕裂脊,该疲劳断口类型为韧性断裂;而过滚压螺纹断裂区主要为粗条撕裂脊与大量微孔,属于脆性断裂。相比优滚压,断裂类型的转变是由于过硬化作用导致材料塑性下降,脆性增加。

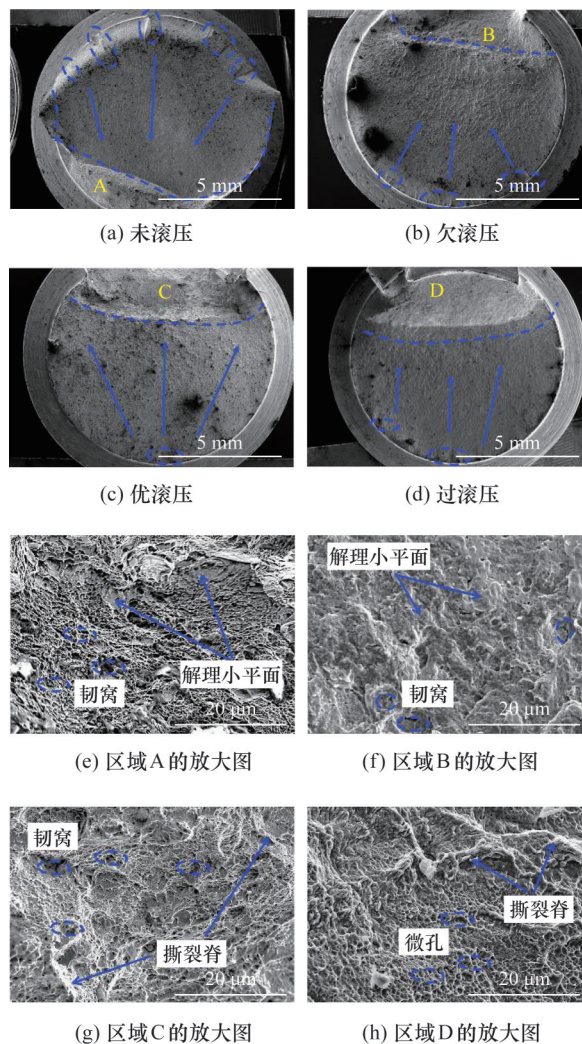


图10 AISI 4340钢螺纹断口形貌

Fig.10 Fracture morphology of AISI 4340 steel threads

4 讨论

以上结果表明,优选参数滚压的AISI 4340钢螺栓疲劳性能得到最佳改善,欠滚压和过滚压疲劳寿命提高效果较小。下面讨论表面完整性与疲劳结果,以阐明AISI 4340钢螺纹疲劳机制。

AISI 4340钢螺纹根部经滚压后材料表层发生塑性变形。从宏观角度分析,样品表面塑性变形促进了表面“削峰填谷”,形成平坦光滑的表面,粗糙度降低(图4)。根据断裂力学原理,表面粗糙度越大,即应力集中系数越大,缺口效应越显著,极易在表面形成微裂纹,降低疲劳抗力。这一效应可以用理论应力集中系数 K_t 来表示:

$$K_t = 1 + 2\sqrt{\gamma(h/\rho)} \quad (1)$$

式(1)中,加工表面被视为由许多微小缺口组成,表面粗糙度越大,缺口效应越大, h 为微观粗糙度的高度, ρ 为谷底曲率半径, γ 为表面突起间距与高度之比的系数。根据式(1),表面粗糙度越小,

应力集中系数最小,则表面疲劳抗力越高。因此,相比未滚压、欠滚压和过滚压样件,优滚压样件表面粗糙度最小,最有利于提高疲劳性能。

从微观角度分析,样品表面的塑性变形是位错滑移运动。当滚压轮作用材料表层组织时,原始粗晶内位错相互作用并累积,使局部应变增大,形成高密度位错缺陷。位错密度与局部平均错向角成正相关关系^[16],由图9结果可知,未滚压、欠滚压、优滚压和过滚压的位错密度依次增大。之后大量位错积累、滑移、反应、重排和湮灭后,逐渐形成低角度晶界和亚晶界,促进原始粗晶细化,形成梯度组织层(图8)。根据 Hall-Petch 公式^[17]理论,显微硬度增加主要归因于晶粒细化,这一结果与本研究一致。表面显微硬度的提高有利于阻碍螺纹根部表面因疲劳应力而形成滑移带,因此滚压后螺栓疲劳寿命得到提高。

对于欠滚压样件,所有表面完整性因素的改善效果很小,其疲劳性能提高最小。对比优滚压与过滚压样件,过滚压样件表层加工硬化更严重,导致梯度形变层更深,显微硬度更高,但疲劳性能劣于优滚压样件,这说明疲劳性能的改善受表面完整性因素综合作用。一方面,过滚压参数由于过渡硬化导致表面损伤,形成图4所示的大量凹坑,同时注意图6b,过滚压样件表面残余压应力小于优滚压样件,这也是因为过渡硬化形成的表面缺陷松弛了残余压应力,LI等^[18]在钛合金超声滚压研究中也发现了类似趋势。另一方面,如图10f所示,过滚压的硬化效应会降低材料塑性,在疲劳加载过程中,表面微裂纹加速裂纹萌生,而过硬化效应会加速裂纹扩展。因此,过滚压参数获得了更高硬化作用,但随之引入的表面损伤等负面效应恶化了强化效果。而优滚压样件由于合适滚压参数,表面形貌和残余压应力得到极大提高,此外,在提高显微硬度与形成更深梯度变形层的同时避免了过渡硬化带来的负面影响,疲劳寿命提高最大。因此,不可一味追求高硬化强化效果,应考虑表面完整性的综合改善。综上所述,螺纹疲劳性能的提高归因于表面粗糙度、显微硬度、微观组织和残余应力的协同作用。

基于以上讨论,采用优选滚压参数与未滚压样件的 S-N 曲线如图11所示。对比未滚压螺栓,优选参数滚压螺栓的疲劳极限由 220 MPa 提高至 330 MPa,提高幅度达 50%。在高疲劳应力时,低周疲劳性能提高较小;在低疲劳应力时,滚压后螺栓高周疲劳性能提高显著。该研究表明,采用合理

参数滚压可高质量地提高螺栓螺纹疲劳性能,解决高周疲劳断裂问题。同时该研究结果为推动螺纹根部表面滚压强化应用提供了技术基础。

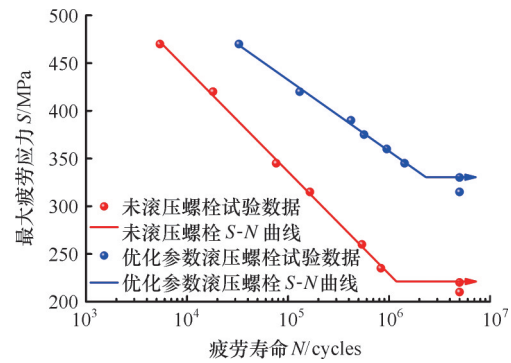


图11 未滚压和优化滚压参数下 AISI 4340 钢螺栓疲劳 S-N 曲线

Fig.11 Fatigue S-N curves of AISI 4340 steel bolts without rolling and with optimize rolling parameters

5 结论

1)滚压参数对 AISI 4340 钢螺纹疲劳寿命有显著影响,显著性顺序为:滚压深度、主轴转速、滚压次数。确定的优选参数为:滚压深度 0.09 mm, 主轴转速 40 r/min, 滚压次数 3。

2)与未滚压、欠滚压和过滚压参数相比,优滚压参数螺栓根部表面形貌和残余应力得到极大改善,表面粗糙度 Sa 和 Sq 分别降至 0.124 μm 和 0.165 μm,残余压应力为 -247.1 MPa。过滚压参数表面加工硬化效应最大,但会引入表面损伤等负面效应而降低强化效果。

3)AISI 4340 钢螺纹疲劳性能的改善归因于表面完整性因素的综合改善。优选参数滚压螺栓表面形貌、残余压应力和显微硬度得到协同提高的同时避免了过渡硬化。相比未滚压螺栓,优选参数螺栓的疲劳极限提高幅度为 50%。采用合理参数的滚压工艺可有效解决螺栓高周疲劳断裂问题。

参考文献:

[1] 郭凤明,徐倩,吴洁,等.一种运载火箭连接螺栓刚度设计方法及应用[J].机械设计与制造,2023(9):133-136.
GUO Fengming, XU Qian, WU Jie, et al. A Design Method of Bolts by Stiffness for Parts Connection of Launch Vehicle [J]. Machinery Design & Manufacture, 2023(9):133-136.
[2] 孙淑玲,王琦.航空航天螺纹紧固件失效模式及预防[J].航空标准化与质量,2022(1):39-43.
SUN Shuling, WANG Qi. Aerospace Threaded Fastener Failure Modes and Prevention[J]. Aeronau-

- tic Standardization & Quality, 2022(1):39-43.
- [3] BARBARA R, GIORGIO O. Experimental Investigation on the Effect of Shot Peening and Deep Rolling on the Fatigue Response of High Strength Metal, 2019, 9:1093.
- [4] 罗亚军. 螺纹连接疲劳寿命的关键要素分析与应用[J]. 机械管理开发, 2011(2):89-91.
LUO Yajun. Analysis of the Key Factor of Screw Thread Fatigue Lifetime and Its Application[J]. Mechanical Management and Development, 2011(2): 29-91.
- [5] WANG X M, XIONG X Y, HUANG K H, et al. Effects of Deep Rolling on the Microstructure Modification and Fatigue Life of 35Cr2Ni4MoA Bolt Threads[J]. Metals, 2022, 12:1224.
- [6] 胡阿林, 翟甲友, 白亚玲. MJ螺纹滚压与测量[J]. 装备制造技术, 2021(7):240-244.
HU Alin, ZHAI Jayou, BAI Yaling. Rolling and Measurement of MJ Thread[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2021(7):240-244.
- [7] 张素颖, 周智敏, 吴晓苏, 等. 大螺距异型螺纹牙根的微滚压强化技术[J]. 金属热处理, 2015, 40(4):135-138.
ZHANG Suyin, ZHOU Zhimin, WU Xiaosu, et al. Trace Rolling Strengthening Technology of Steep-pitch Nonstandard Thread[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(4):135-138.
- [8] 孙鑫, 张德远, 程明龙, 等. A100钢外螺纹椭圆超声滚压强化试验研究[J]. 航空制造技术, 2016(3): 77-80.
SUN Xin, ZHANG Deyuan, CHENG Minglong, et al. Study on Strengthening of External Threads in A100 Steel by Elliptical Ultrasonic Rolling[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2016(3):77-80.
- [9] 王伟, 李博, 姚志强. 超高强度钢MJ螺纹滚压强化工艺研究[J]. 新技术新工艺, 2015(12):63-66.
WANG Wei, LI Bo, YAO Zhiqiang. The Process Research for MJ Thread Rolling Strengthening of Ultrahigh-strength Steel[J]. New Technology & New Process, 2015(12):63-66.
- [10] CHENG M L, ZHANG D Y, CHEN H W, et al. Development of Ultrasonic Thread Root Rolling Technology for Prolonging the Fatigue Performance of High Strength Thread[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11):2395-2401.
- [11] KNIGHT M J, BRENNAN F P, DOVER W D. Fatigue Life Improvement of Threaded Connections by Cold Rolling[J]. Strain Analysis, 2004, 40(2): 83-93.
- [12] 王栋, 鲁新义, 赵静雯, 等. 滚压强化对45钢螺纹根部表面完整性的影响研究[J]. 机械强度, 2022, 44(5):1075-1081.
WANG Dong, LU Xinxi, ZHAO Jingwen, et al. Study on the Effect of Rolling Strengthening on the Surface Integrity of 45 Steel Thread Root[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(5):1075-1081.
- [13] RUSLAN K, YOUNG-SIK P, ERFAN M, et al. An Improvement in Fatigue Behavior of AISI 4340 Steel by Shot Peening and Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification[J]. Materials Science & Engineering A, 2020, 791:139752.
- [14] ZHOU C H, YAN X Y, LIU D, et al. Simultaneously Achieving Strength-ductility in Additive-manufactured Ti6Al4V Alloy via Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. Materials Science & Engineering A, 2025, 920, 147555.
- [15] YANG J, LIU D X, REN Z C, et al. Grain Growth and Fatigue Behaviors of GH4169 Superalloy Subjected to Excessive Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. Materials Science & Engineering A, 2022, 839: 142875.
- [16] QIN T, AO N, REN X, et al. Determination of Optimal Ultrasonic Surface Rolling Parameters to Enhance the Fatigue Strength of Railway Axle EA4T Steel[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 275:108831.
- [17] TONG Z, LIU H, JIAO J, et al. Microstructure, Microhardness and Residual Stress of Laser Additive Manufactured CoCrFeMnNi High-entropy Alloy Subjected to Laser Shock Peening[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 285: 116806.
- [18] LI F, ZHAO B, LAN S, et al. Experiment and Simulation of the effect of Ultrasonic Rolling on the Surface Properties of Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(5/6):1-8.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:刘宏伟,男,1994年生,博士研究生。研究方向为表面滚压强化技术与装备。E-mail:liuhw@mail.dlut.edu.cn。朱祥龙* (通信作者),男,1981年生,教授、博士研究生导师。研究方向为精密超精密加工技术与装备。E-mail:zhuxianglong@163.com。

本文引用格式:

刘宏伟,康仁科,朱祥龙,等. 滚压加工 AISI 4340 钢螺纹根部疲劳性能的提高[J]. 中国机械工程, 2025, 36(10):2241-2248.

LIU Hongwei, KANG Renke, ZHU Xianglong, et al. Improvement of Fatigue Performances of AISI 4340 Steel Thread Root by Rolling Processes[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(10): 2241-2248.