

基于有限元模拟的螺栓退刀槽滚压轮优化及试验研究

牛延昭¹ 刘宏伟¹ 宋亚丽² 朱祥龙^{1*} 黄佳美² 康仁科¹

1.大连理工大学机械工程学院,大连,116024

2.航空工业昌河飞机工业(集团)有限责任公司,景德镇,333000

摘要:螺栓退刀槽表面易受应力集中而发生疲劳破坏,为提高螺栓退刀槽表面疲劳抗力,设计了一种螺栓退刀槽滚压工具。利用滚压轮与螺栓退刀槽有限元模拟结果指导滚压轮结构优化,采用确定优化参数的滚压工具进行滚压试验,通过滚压表面质量、断口形貌、疲劳寿命验证滚压轮参数优化的有效性。研究表明:当滚压轮材料为YG8、直径60 mm、型面夹角45°时退刀槽滚压表面残余应力结果最优;滚压轮圆弧半径为0.9 mm时残余压应力层最深,1.1 mm时次表层残余压应力值最大,1.2 mm时表面压应力最大。采用三种不同圆弧半径的滚压工具进行试验分析,圆弧半径为0.9 mm的滚压轮滚压后的螺栓疲劳寿命最高,确定了最优滚压工具结构。

关键词:有限元仿真;螺栓退刀槽;滚压轮;疲劳寿命;残余应力

中图分类号: TG729; TG668

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optimization and Experimental Study of Bolt Retreat Groove Rolling Wheels Based on Finite Element Simulation

NIU Yanzhao¹ LIU Hongwei¹ SONG Yali² ZHU Xianglong^{1*} HUANG Jiamei² KANG Renke¹

1.School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning, 116024

2.AVIC Changhe Aircraft Industry(Group) Corporation Ltd., Jingdezhen, Jiangxi, 333000

Abstract: The bolt retreat groove surfaces were susceptible to stress concentration and prone to fatigue failure. To bolster the fatigue resistance of bolt's retreat groove surfaces, a specialized rolling tool for the retreat grooves was engineered. The structure of the rolling wheels was optimized based on finite element simulation outcomes of the interaction between the rolling wheel and the bolt's retreat grooves. The optimized parameters were utilized to create the rolling tools, and a rolling experiments were carried out. The effectiveness of the rolling wheel parameter optimization was validated by assessing the rolled surface quality, fracture morphology, and fatigue life. The findings indicate that the most favorable residual stress results on the retreat groove surfaces are obtained with a YG8 material rolling wheel with diameter of 60 mm and face angle of 45°. A rolling wheel fillet radius of 0.9 mm produces the deepest residual compressive stress layers, a radius of 1.1 mm yields the highest subsurface residual compressive stress value, and a radius of 1.2 mm generates the maximum surface compressive stress. Trials were conducted with rolling tools featuring three distinct fillet radii, and the extended fatigue life of the bolts is ascertained with a 0.9 mm fillet radius rolling wheels, thereby confirming the optimal configuration of the rolling tools.

Key words: finite element simulation; bolt retreat groove; rolling wheel; fatigue life; residual stress

0 引言

超高强度钢具有高强度和良好塑性等优点,被广泛应用于航空航天关键承力部件的制造^[1]。采用300M钢材料制造的超高强度螺栓被广泛用于各种飞机结构件的装配,如直升机桨毂中央件与支臂的连接螺栓、战斗机发动机与机翼的紧固

螺栓等。随着航空飞机在极端环境中的应用日益增多,对关键承力螺栓的疲劳性能要求也越来越高,因此提高高强度钢螺栓的疲劳性能对飞机安全飞行尤为重要^[2]。

在飞机服役过程中,螺栓主要承受交变载荷和振动冲击^[3],螺栓的根部圆角、退刀槽和螺纹根部是应力集中部位,容易发生疲劳破坏^[4-5]。为提高螺栓抗疲劳性能,一般采用表面滚压强化技术对螺栓表面进行处理。表面滚压强化技术通过滚

压轮的作用载荷超出材料屈服极限来使材料表面发生局部塑性变形,从而改善表面形貌,引入加工硬化,增强表面疲劳抗力^[6]。现阶段,国内外学者对螺栓表面滚压进行了很多研究。在滚压加工参数方面:王栋等^[7]通过单因素试验探究了不同滚压深度、滚压速度和滚压次数对螺纹根部表面完整性的影响,结果表明,滚压强化技术可以显著提高螺纹根部的表面完整性,滚压深度影响最为显著;曹凤梅^[8]探究了不同滚压力和滚压圈数对滚压后螺栓抗拉强度的影响,结果表明,螺栓抗拉强度及硬度值随着滚压力的增大而不断增大;刘婧颖等^[9]对 TC4 钛合金螺栓根部圆角进行仿真,研究了不同滚压转速、时间和滚压力等对螺栓根部圆角滚压表面残余应力的影响规律,结果表明,滚压时间、滚压力和滚压转速对钛合金螺栓根部圆角残余应力的影响程度逐渐减小。在滚压工具结构参数方面:袁武华等^[10]研究了滚轮圆角半径对滚压后螺栓疲劳性能的影响,结果表明,最佳滚轮圆角半径为螺栓圆角半径的 90%~95%,尺寸过大或过小均会导致疲劳寿命显著缩短;程明龙等^[11]研究了滚轮型面夹角、直径和圆弧半径对滚压表面残余应力的影响规律,结果表明,滚轮型面夹角越小,滚压后引入的残余压应力层越深,较小的滚轮直径有利于引入较大的残余压应力和残余应力层深,较大的圆弧半径可获得较高的表面残余压应力和最大残余压应力。

上述研究表明,滚压强化是提高螺栓疲劳抗力的有效方法,滚压加工参数与滚压轮结构参数对滚压表面质量及疲劳性能都有重要影响作用,但上述研究集中于螺栓螺纹与根部圆角的滚压应用。笔者所在团队对螺栓退刀槽部位进行了滚压加工工艺参数研究^[12],确定了较优的滚压加工参数,因此,本文探索滚压轮结构参数对滚压表面质量影响,确定较优滚压轮结构参数,这对设计螺栓退刀槽滚压工具,进一步延长螺栓退刀槽疲劳寿命有着重要意义。

本文首先介绍了一种适用于螺栓退刀槽的滚压工具结构,其次利用滚压仿真指导滚压轮结构优化,然后利用设计的滚压工具进行试验探索,最后以螺栓样件进行滚压应用与效果验证。

1 螺栓退刀槽滚压工具结构

螺栓退刀槽部位由斜线-圆弧-直线-圆弧-斜线组成,其轮廓如图 1 所示。根据退刀槽结构设计的滚压工具如图 2 所示,主要由滚压轮、压板、轴承、芯轴、叉架、销轴、刀柄和拉紧螺钉组成。其中滚压轮的结构特征如图 3 所示,主要包括滚压

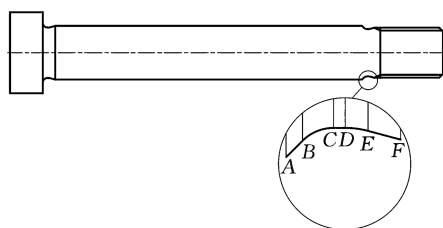


图 1 螺栓退刀槽处轮廓特征

Fig.1 Contour features at the bolt retraction groove

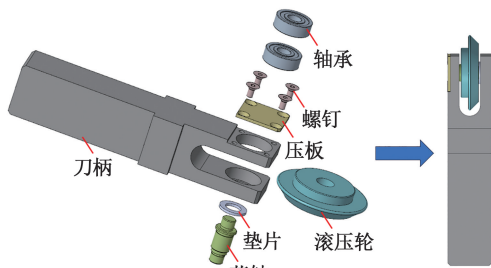


图 2 螺栓退刀槽滚压工具

Fig.2 Bolt groove rolling tool

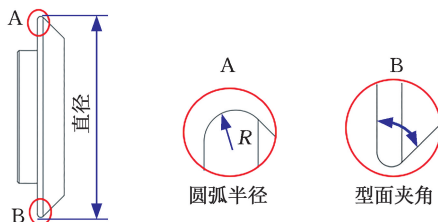


图 3 滚压轮结构特征

Fig.3 Structural features of rolling wheels

轮直径、型面夹角和圆弧半径。

2 螺栓退刀槽滚压有限元模拟

2.1 模型建立

考虑仿真效率,选取螺栓退刀槽直线段 CD 部位为建模对象,建立滚压轮与螺栓退刀槽模型,如图 4 所示。螺栓材料力学性能通过电液伺服动静万能试验机按照《GB/T228.1—2021》进行拉伸试验获取,得到 300M 钢材料的屈服强度为 1632.9 MPa,抗拉强度为 1914.86 MPa,弹性模量为 206.71 GPa,泊松比为 0.3。滚压过程设置 3 个分析步:第 1 分析步为滚压轮径向进给至接触螺栓退刀

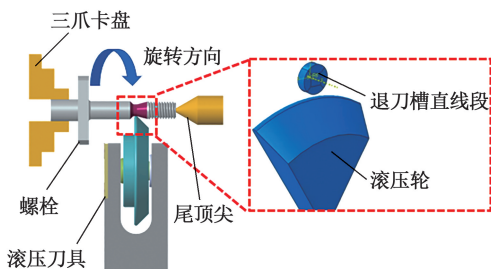


图 4 滚压强化原理与模型建立

Fig.4 Principle and model establishment of rolling reinforcement

槽;第 2 分析步为轴向滚压;第 3 分析步为滚压轮退刀。滚压过程中设置主轴转速 600 r/min、进给量 0.02 mm/r、滚压深度 0.11 mm。滚压轮设置为刚体,网格类型为 C3D10M;螺栓采用耦合约束,网格类型为 C3D8R。

2.2 模型验证

在有限元模拟结果中一般用等效塑性应变层表征硬化层^[11],螺栓在深度方向上的等效塑性应变分布如图 5a 所示,在层深 404 μm 位置等效塑性应变减小为 0,表明最大硬化层深为 404 μm。在单点全自动显微维氏硬度计上采用正四棱锥金刚石压头,加载质量 500 g,保荷 10 s,对螺栓进行维氏硬度检测。螺栓在深度方向上的硬度分布如图 5b 所示,距退刀槽表面 390 μm 处硬度达到基体硬度,表明滚压后螺栓退刀槽硬化层为 390 μm。

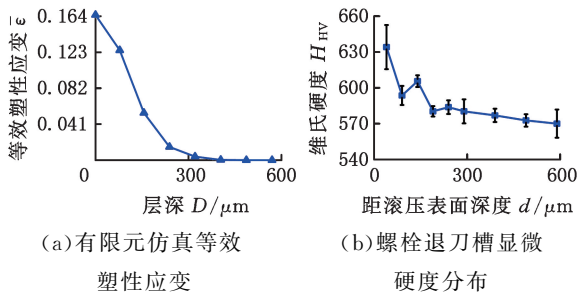


图 5 螺栓等效塑性应变与显微硬度值对比

Fig.5 Comparison of microhardness values and equivalent plastic strain of samples

对比仿真值图 5a 与硬度检测值图 5b 发现,两者最大误差为 3.5%,证实了有限元模型的准确性。

2.3 不同滚压轮参数模拟结果与分析

2.3.1 研究方案

为研究不同滚压轮材料、直径、型面夹角和圆弧半径对螺栓滚压后表面应力、应力层深和最大残余应力的影响,本文采用表 1 所示的研究方案。

表 1 单因素方案

Tab.1 Single factor scheme

序号	材料	直径/mm	型面夹角/(°)	圆弧半径/mm
1	YG8, YG10, YG15, YT15, M2 高速钢	60	45	0.9
2	YG8	45, 50, 55, 60, 65	45	0.9
3	YG8	60	35, 40, 45, 50, 55	0.9
4	YG8	60	45	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2

2.3.2 滚压轮材料对残余应力分布的影响

为研究滚压轮材料对残余应力的影响,对滚压轮进行不同材料属性设置,具体如表 2 所示。图 6 所示为残余应力分布结果,可知,不同材料的

滚压轮对螺栓滚压表面残余应力的影响具有明显差异,但仍能明显区分出当滚压轮材料为 YT15 和 M2 高速钢时,残余应力分布都处于劣势,因此对这两种材料不予考虑。

表 2 不同滚压轮材料具体参数

Tab.2 Specific parameters of different rolling wheel materials

名称	密度 ρ / (kg · m ⁻³)	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	屈服强度 σ _s /MPa
YG8	14 500	600	0.21	2320
YG10	14 400	600	0.22	2200
YG15	13 950	420	0.21	3200
YT15	11 100	650	0.23	1600
M2 高速钢	7800	218	0.28	1250

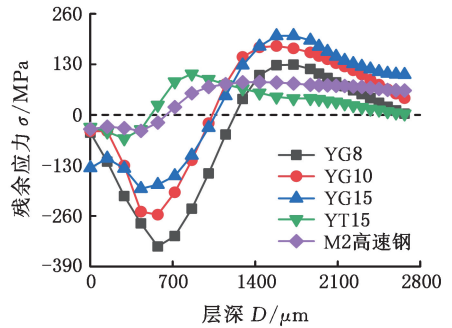


图 6 滚压轮材料对残余应力分布的影响

Fig.6 The influence of rolling wheel material on residual stress distribution

当滚压轮材料为 YG8 时,滚压后螺栓表面残余压应力值为 45.84 MPa;当滚压轮材料为 YG10 时,滚压后螺栓表面残余压应力值为 41.79 MPa,两者数值比较接近;当滚压轮材料为 YG15 时,滚压后螺栓表面残余压应力值最大,为 136.14 MPa。对比最大残余压应力和应力层深发现,滚压轮材料为 YG8 时退刀槽表面次表层残余压应力值最大,且压应力层最深,与材料 YG10 和 YG15 相比,最大残余应力值分别大 31.83% 和 78.33%,层深分别大 18.69% 和 15.61%。综合以上分析可知,滚压轮材料为 YG8 时,退刀槽滚压表面残余应力综合作用最优,因此,本文滚压轮材料选择 YG8。

2.3.3 滚压轮直径对残余应力分布的影响

滚压轮不同直径对螺栓滚压后残余应力的影响如图 7 所示,可知,滚压轮直径在 45~65 mm 范围内,随着直径的增大,螺栓表面残余应力先增大后减小再逐渐增大,但其增幅范围很小。对比不同直径的最大残余压应力和压应力层深可知,滚压轮直径为 60 mm 时,最大残余压应力最大,为 338.28 MPa,且压应力层最深,为 1219.9 μm。综合考虑螺栓滚压后表面残余应力、应力层深及最大残余应力的数值,选择滚压轮直径为 60 mm。

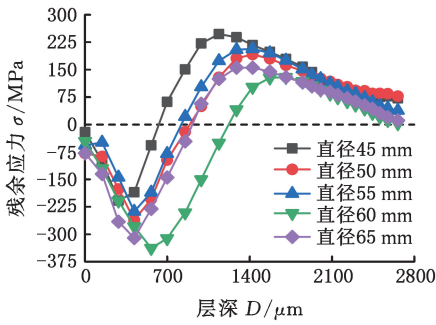


图7 滚压轮直径对残余应力分布的影响

Fig.7 The influence of rolling wheel diameter on residual stress distribution

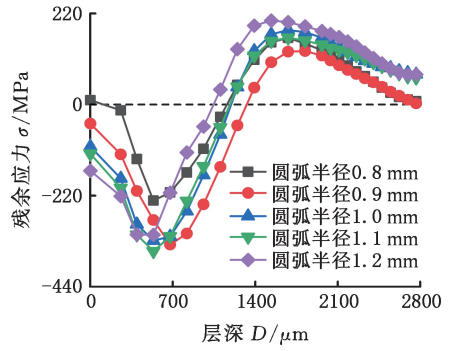


图9 滚压轮圆弧半径对残余应力分布的影响

Fig.9 The influence of rolling wheel fillet radius on residual stress distribution

2.3.4 滚压轮型面夹角对残余应力分布的影响

滚压轮型面夹角对残余应力的影响如图8所示,可知,当型面夹角由35°增大到45°时,最大残余压应力和应力层深逐渐减小;当型面夹角由45°增大到55°时,最大残余压应力和应力层深都减小。型面夹角45°是滚压后螺栓最大残余压应力和应力层深的拐点,综合考虑螺栓滚压后表面残余压应力、应力层深和最大残余压应力的数值,选择滚压轮型面夹角为45°。

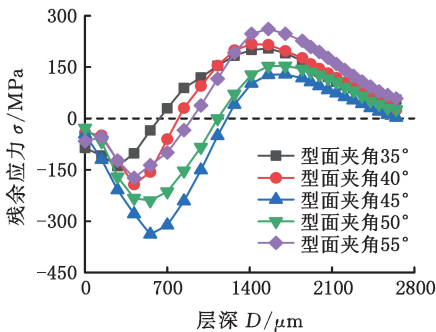


图8 滚压轮型面夹角对残余应力分布的影响

Fig.8 The influence of the angle between the rolling wheel profile and the distribution of residual stress

2.3.5 滚压轮圆弧半径对残余应力分布的影响

不同滚压轮圆弧半径对残余应力的影响如图9所示,可知,当圆弧半径为0.8 mm时,表面残余应力为拉应力,其最大残余压应力也较小,故该参数不予考虑;圆弧半径由0.9 mm增大至1.2 mm时,表面残余压应力不断增大,但应力层深逐渐减小,圆弧半径为0.9 mm时的层深最大,圆弧半径为1.2 mm时的表面压应力最大,两者各具独特优势。对比圆弧半径为1 mm与1.1 mm的残余应力分布可发现,两者应力层深相近,但圆弧半径为1.1 mm时的最大残余压应力和表面压应力更优,因此认为圆弧半径为1.1 mm的滚压轮优于1 mm的滚压轮。

通过对滚压轮材料、直径、型面夹角和圆弧半径的仿真分析可知,滚压轮材料、直径和型面夹角有确定的优化目标,然而当圆弧半径为0.9、1.1

和1.2 mm时各具有不同的优势,因此对圆弧半径参数的优化存在多项选择。为确定较优滚压工具结构,根据模拟结果,确定滚压轮材料为YG8、直径为60 mm和型面夹角为45°,对不同圆弧半径的滚压工具进行设计研制与试验研究。

3 滚压工具性能验证

3.1 滚压工具与样件

基于有限元模拟结果,选择滚压轮材料为YG8、直径为60 mm和型面夹角为45°,设计3种不同圆弧半径的滚压工具,如图10所示。

R = 0.9 mm R = 1.1 mm R = 1.2 mm

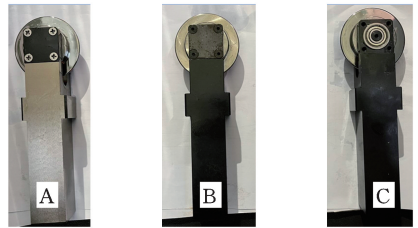


图10 优化后滚压工具

Fig.10 Optimized rolling tool

采用与有限元模拟中相同的滚压方案,在大连理工大学自主研发的滚压强化工装上对300M钢样件进行滚压(图11),滚压现场如图12所示。

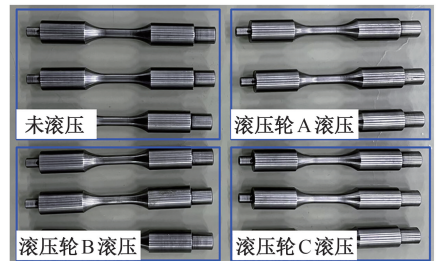


图11 300M钢样件

Fig.11 300M steel sample

3.2 检测结果与分析

3.2.1 表面粗糙度检测

利用ZYGO 3D表面轮廓仪检测300M钢滚压样件表面粗糙度Sa,结果如图13所示。

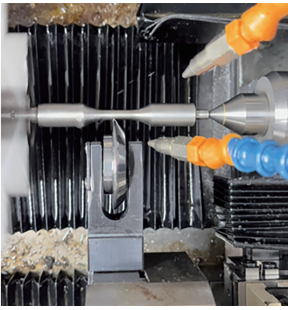
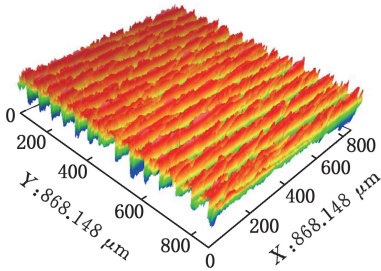
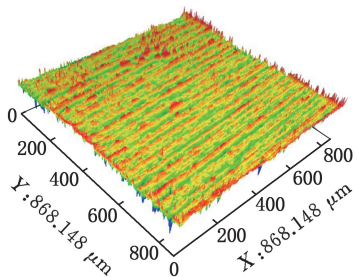


图 12 滚压试验

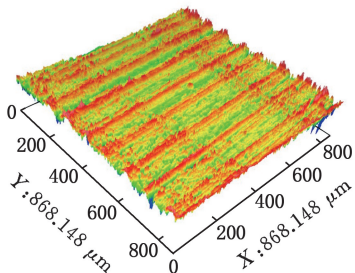
Fig.12 Rolling test



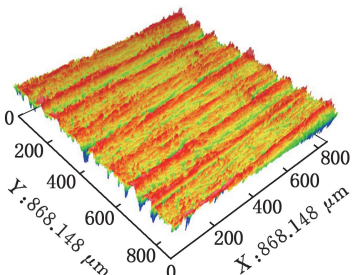
(a) 未滚压样品表面粗糙度



(b) 滚压轮 A 滚压后样品表面粗糙度



(c) 滚压轮 B 滚压后样品表面粗糙度



(d) 滚压轮 C 滚压后样品表面粗糙度

图 13 滚压前后样品表面粗糙度

Fig.13 Surface roughness of samples before and after rolling

由图 13 可以看出,未滚压的样品表面有明显的周向加工刀痕^[13],表面粗糙度高达 $0.371 \mu\text{m}$,

样品滚压后表面粗糙度值明显减小,但不同滚压轮滚压后的表面粗糙度有明显差异。样品经滚压轮 A、B 和 C 滚压后表面粗糙度分别为 $0.068 \mu\text{m}$ 、 $0.119 \mu\text{m}$ 和 $0.126 \mu\text{m}$ 。与滚压轮 C 滚压后的样品表面相比,滚压轮 A 和 B 滚压后表面粗糙度值更优,这可能是由于圆弧半径越小,退刀槽表面受到滚压轮的载荷越大,导致的塑性变形程度越大^[14],因此滚压轮 A 圆弧半径最小,表面粗糙度最优,而滚压轮 C 圆弧半径最大,塑性变形相对不均匀,表面粗糙度最差。

3.2.2 残余应力检测

利用 X 射线应力测定仪对 300M 钢滚压样品进行残余应力检测,结果如图 14 所示。由图 14 可知,滚压后样品表面残余压应力比未滚压前大,其中样品经滚压轮 A 滚压后表面残余压应力增加 227.5 MPa ;经滚压轮 B 滚压后表面残余压应力增加 277.66 MPa ;经滚压轮 C 滚压后表面残余压应力增加 403.37 MPa ,该增大趋势与仿真结果相同,再次验证了模型的准确性。

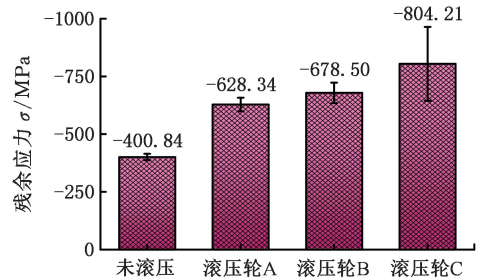


图 14 不同滚压轮滚压后的表面残余应力

Fig.14 Surface residual stress after rolling with different rolling wheels

3.2.3 微观组织的 SEM 表征

滚压前后样品的表层微观组织如图 15 所示。由图 15 可以看出,300M 钢样品表层微观组织主要为回火马氏体^[15],未滚压样品表层组织均匀分布,没有明显的梯度结构层^[16];滚压后的样品表层微观组织均出现了明显的塑性变形层。经滚压轮 A、B、C 滚压的样品塑性变形层厚度分别为 $155.6 \mu\text{m}$ 、 $141.6 \mu\text{m}$ 、 $101.0 \mu\text{m}$ 。结果表明,随着滚压轮圆弧半径的减小,塑性变形层厚度变大,这是因为圆弧半径越小,使样品表面受到的载荷越大,因此经滚压轮 A 滚压的样品塑性变形程度最严重^[17]。

4 螺栓滚压应用

为了使螺栓能够在退刀槽部位断裂,设计图 16 所示的螺栓样品,利用三种不同圆弧半径的滚压工具对螺栓样品进行滚压,滚压参数依然与有限元模拟中一致。

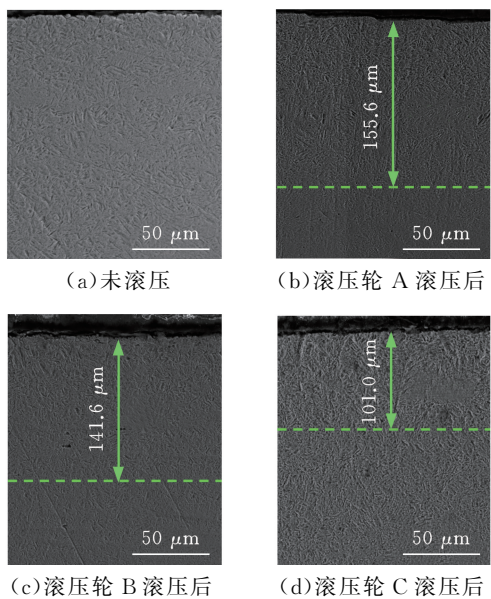


图 15 滚压前后样件表层微观组织

Fig.15 Surface microstructure of samples before and after rolling

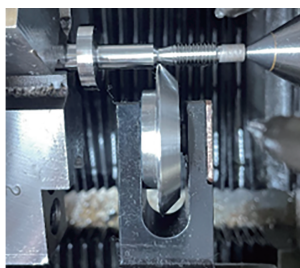


图 16 螺栓滚压试验

Fig.16 Bolt rolling test

4.1 疲劳试验

疲劳寿命测试方法为多级载荷加载^[18], 载荷等级水平见表 3, 每级测试 30 万次后提高一个等级, 直至螺栓断裂。加载频率为 10 Hz, 应力比 $r=0.1$, 疲劳测试结果如图 17 所示。

表 3 载荷等级

Tab.3 Stress level kN

	第一级载荷 q	第二级载荷 q	第三级载荷 q	第四级载荷 q
均值	4.378	7.3	10.23	13.145
幅值	3.582	6	8.37	10.755

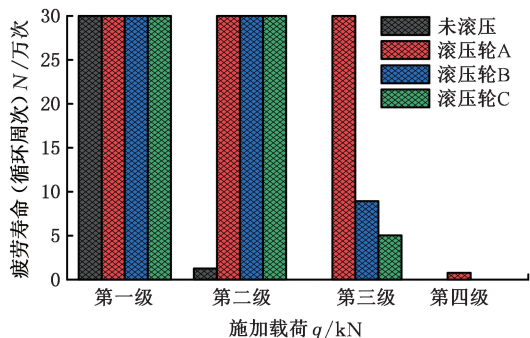


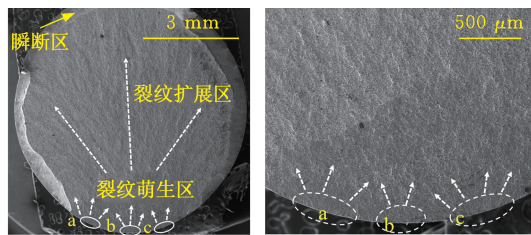
图 17 疲劳试验值

Fig.17 Fatigue test value

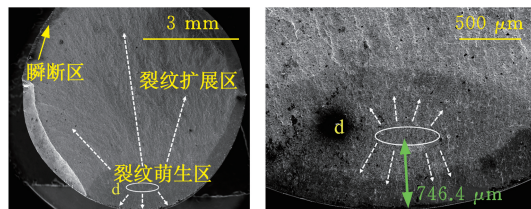
由图 17 可知, 未滚压螺栓疲劳寿命为 31.26 万次, 不同圆弧半径的滚压轮滚压后的螺栓疲劳寿命有不同程度的延长, 滚压轮 A、B、C 滚压后的螺栓疲劳寿命分别达 90.77 万次、68.93 万次、65.04 万次。滚压轮 A 滚压后的螺栓疲劳寿命较未滚压的延长了 190.34%, 较滚压轮 B 滚压后延长了 31.68%, 较滚压轮 C 滚压后延长了 39.56%。

4.2 断口检测

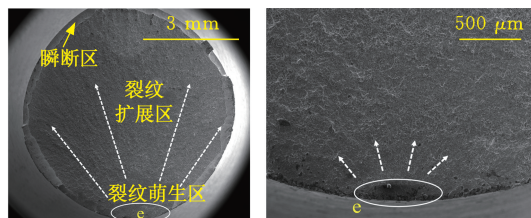
在 FEI Q45 扫描电镜上对滚压前后螺栓的断口形貌进行检测, 断口形貌如图 18 所示。



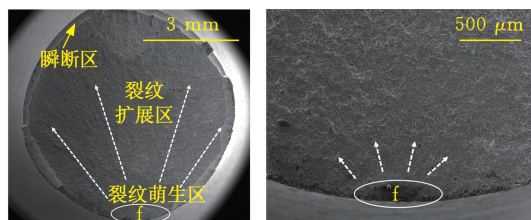
(a) 未滚压螺栓断口形貌



(b) 螺栓经滚压轮 A 滚压后的断口形貌



(c) 螺栓经滚压轮 B 滚压后的断口形貌



(d) 螺栓经滚压轮 C 滚压后的断口形貌

图 18 滚压前后螺栓断口形貌

Fig.18 Fracture morphology of bolts before and after rolling

从图 18 中可以看出, 滚压与未滚压的螺栓断口区域都依次出现裂纹萌生区、裂纹扩展区和瞬断区^[19]。其中未滚压的螺栓断口区域出现三个裂纹萌生区, 且三个区域均出现在表层; 滚压轮 A 滚压后的螺栓断口区域出现一个裂纹萌生区, 此裂纹萌生区出现在距离表层 746.4 μm 的次表层区域; 滚压轮 B 滚压后的螺栓断口区域也出现一个裂纹萌生区, 裂纹萌生区出现在表层; 滚压轮 C

滚压后的螺栓断口区域也仅出现一个裂纹萌生区,但此裂纹萌生区明显是由螺栓表面缺陷引起的,因为螺栓经滚压轮 C 滚压后表面粗糙度较大导致缺陷的产生。

通过以上分析可得滚压轮的最优参数为:材料 YG8、直径 60 mm、型面夹角 45° 、圆弧半径 0.9 mm,此时的参数对滚压后螺栓的表面质量及疲劳性能的提高程度最为显著。

5 结论

1)建立的螺栓退刀槽滚压仿真模型有效,可依据残余应力模拟结果指导滚压轮参数优化。

2)当滚压轮材料为 YG8、直径 60 mm 和型面夹角 45° 时滚压表面残余应力综合最优;滚压轮圆弧半径为 0.9 mm 时,螺栓滚压后的应力层深最大,1.1 mm 时最大残余压应力最大,1.2 mm 时表面残余压应力最大。

3)与滚压轮 B、滚压轮 C 相比,滚压轮 A 滚压后的样件表面压应力最小,但表面粗糙度最好,塑性变形层厚度最深、疲劳寿命最优。

4)最优滚压轮参数为:材料 YG8、直径 60 mm、型面夹角 45° 和圆弧半径 0.9 mm。

参考文献:

- [1] 应俊龙,巢昂轩,蒋克全,等. 超高强度钢的发展及展望[J]. 新技术新工艺, 2018(12):1-4.
YING Junlong, CHAO Yangxuan, JIANG Kequan, et al. Development and Prospects of Ultra High Strength Steel [J]. New Technologies and Processes, 2018(12):1-4.
- [2] 高振铭. 浆毂螺栓滚压装备结构设计与性能分析[D]. 大连:大连理工大学, 2022.
GAO Zhenming. Structural Design and Performance Analysis of Hub Bolt Rolling Equipment [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2022.
- [3] 杨斌. 振动冲击环境下紧固件松动机理与试验研究[D]. 大连:大连理工大学, 2021.
YANG Bin. Mechanism and Experimental Study of Fastener Loosening under Vibration Shock Environment[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2021.
- [4] ZHOU T, XIONG Y, CHEN Z, et al. Effect of Surface Nano-crystallization Induced by Supersonic Fine Particles Bombarding on Microstructure and Mechanical Properties of 300M Steel [J]. Surface and Coatings Technology, 2021,421:127381.
- [5] VALLES GONZÁLEZ P, PASTOR MURO A, GARCÍA-MARTÍNEZ M. Failure Analysis Study on a Fractured Bolt[J]. Engineering Failure Analysis, 2020,109:104355.
- [6] 王燕礼,朱有利,杨嘉勤. 滚压强化技术及在航空

领域研究应用进展[J]. 航空制造技术, 2018, 61(5):75-83.

WANG Yanli, ZHU Youli, YANG Jiaqin. Rolling Strengthening Technology and Its Research and Application Progress in the Aviation Field[J]. Aviation Manufacturing Technology, 2018, 61(5):75-83.

- [7] 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]. Mechanical Strength, 2022, 44(5):1075-1081.
- [8] 曹凤梅. 对接螺栓根部强化工艺研究[J]. 硅谷, 2014,7(10):36-37.
CAO Fengmei. Research on Strengthening Process of Docking Bolt Root [J]. Silicon Valley, 2014, 7(10):36-37.
- [9] 刘婧颖,李浩楠,梁新福,等. 钛合金螺栓根部圆角滚压强化的工艺参数仿真研究[J]. 机械工程师, 2023(10):150-153.
LIU Jingying, LI Haonan, LIANG Xinfu, et al. Simulation Study on Process Parameters of Rolling Strengthening of Titanium Alloy Bolt Root Fillet [J]. Mechanical Engineer, 2023(10):150-153.
- [10] 袁武华,邓建伟,申庆援,等. 圆角滚压对螺栓残余应力分布及疲劳寿命的影响[J]. 锻压技术, 2023,48(1):108-114.
YUAN Wuhua, DENG Jianwei, SHEN Qingyuan, et al. The Influence of Fillet Rolling on Residual Stress Distribution and Fatigue Life of Bolts [J]. Forging Technology, 2023, 48(1):108-114.
- [11] 程明龙,贾延奎,张德远. 高强螺纹滚压工艺的有限元模拟及试验研究[J]. 工具技术, 2017,51(5):18-22.
CHENG Minglong, JIA Yankui, ZHANG Deyuan. Finite Element Simulation and Experimental Study on High Strength Thread Rolling Process [J]. Tool Technology, 2017, 51(5):18-22.
- [12] 岳美茹,郭晓光,康仁科,等. 滚压量对 300M 钢螺栓退刀槽表面完整性的影响[J]. 中国表面工程, 2024,37(3):195-203.
YUE Meiru, GUO Xiaoguang, KANG Renke, et al. The Influence of Rolling Amount on the Surface Integrity of 300M Steel Bolt Groove [J]. China Surface Engineering, 2024, 37(3):195-203.
- [13] 张帅. 车削大螺距螺纹加工表面形貌的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2019.
ZHANG Shuai. Research on Surface Morphology of Large Pitch Thread Machining by Turning [D]. Harbin:Harbin University of Science and Technology, 2019.
- [14] DANG J, ZHANG H, AN Q, et al. Surface In-

- egrity and Wear Behavior of 300M Steel Subjected to Ultrasonic Surface Rolling Process[J]. Surface and Coatings Technology, 2021, 421:127380.
- [15] ZHAO W, LIU D, CHIANG R, et al. Effects of Ultrasonic Nanocrystal Surface Modification on the Surface Integrity, Microstructure, and Wear Resistance of 300M Martensitic Ultra-high Strength Steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 285:116767.
- [16] 许全军, 刘秀国, 龚宝明, 等. USRP 处理 45 钢微观梯度力学性能演变及残余应力分布[J]. 中国表面工程, 2021, 34(6):151-159.
- XU Qianjun, LIU Xiuguo, GONG Baoming, et al. Evolution of Microscopic Gradient Mechanical Properties and Residual Stress Distribution of 45 Steel Processed by USRP[J]. Chinese Journal of Surface Engineering, 2021, 34(6):151-159.
- [17] ZHANG H, SHANG J, MA H, et al. The Evolution of Strain Gradient and Surface Microstructure of Aluminum Alloy during Multiple Laser Shock Peening Cycles[J]. Applied Surface Science, 2025, 698:163067.
- [18] 刘红彬. 外物损伤 TC17 钛合金叶片高周疲劳特性及预测方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2023.
- LIU Hongbin. Research on High Cycle Fatigue Characteristics and Prediction Methods of TC17 Titanium Alloy Blades Damaged by External Objects[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023.
- [19] 王源晨, 宋竹满, 李瑞, 等. 8.8 级螺栓用 ML40Cr 钢的疲劳性能和裂纹扩展行为[J]. 材料研究学报, 2019, 33(10):771-775.
- WANG Yuanchen, SONG Zhuman, LI Rui, et al. Fatigue Performance and Crack Propagation Behavior of ML40Cr Steel for 8.8 Grade Bolts[J]. Journal of Materials Research, 2019, 33(10):771-775.
- (编辑 袁兴玲)
-
- 作者简介:**牛延昭,男,1999 年生,硕士研究生。研究方向为高强度钢螺栓滚压工具结构优化设计。E-mail:nyz19106395664@163.com。朱祥龙*(通信作者),男,1981 年生,教授、博士研究生导师。研究方向为复杂型腔精密加工测量技术与智能化装备设计。E-mail:zhuxianglong@163.com。
- 本文引用格式:**
牛延昭,刘宏伟,宋亚丽,等.基于有限元模拟的螺栓退刀槽滚压轮优化及试验研究[J].中国机械工程,2025,36(6):1214-1221.
- NIU Yanzhao, LIU Hongwei, SONG Yali, et al. Optimization and Experimental Study of Bolt Retreat Groove Rolling Wheels Based on Finite Element Simulation[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1214-1221.
-
- (上接第 1187 页)
- [19] 孙亮波,洪熙熙,刘小翠,等.运动链基本环路集新的定义及其生成方法[J].中国机械工程,2023,34(9):1061-1066.
- SUN Liangbo, HONG Xixi, LIU Xiaocui, et al. New Definition of Basic Loop Set of Kinematic Chain and Its Generation Method[J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(9):1061-1066.
- [20] 周杨,畅博彦,金国光,等.面向变胞机构动力学建模的变拓扑构型数学描述方法[J].机械工程学报, 2022, 58(9):49-61.
- ZHOU Yang, CHANG Boyan, JIN Guoguang, et al. Mathematic Description Method of Variable Topology Configuration for Dynamic Modeling of Metamorphic Mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(9):49-61.
- [21] LUCHUAN Y, HONGBIN W, SHUNQING Z. Graph Isomorphism Identification Based on Link-assortment Adjacency Matrix[J]. Sādhanā, 2022, 47(3):151-165.
- [22] KECSKEMÉTHY A, DING Huafeng, YANG Wenjian, et al. Automatic Structural Synthesis of Planar Multiple Joint Kinematic Chains[J]. Journal of Mechanical Design, 2013, 135(9):1-12.
- [23] HWANG W M, HWANG Y W. Computer-aided Structural Synthesis of Planar Kinematic Chains with Simple Joints[J]. Mechanism and Machine Theory, 1992, 27(2):189-199.
- [24] CUI Rongjiang, YE Zhizheng, SUN Liang, et al. Topological Invariant and Definition Method for Detecting Isomorphism in Planar Kinematic Chains [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2021, 235(15):2715-2724.
- [25] DING Huafeng, HUANG Zhen. A Unique Representation of the Kinematic Chain and the Atlas Database[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 42(6):637-651.
- (编辑 袁兴玲)
-
- 作者简介:**张广帅,男,1995 年生,硕士研究生。研究方向为机构的型综合。E-mail:zsg6869@139.com。孙亮波*(通信作者),男,1979 年生,博士、教授。研究方向为机构学、机械创新设计。E-mail:sunlb1979@163.com。
- 本文引用格式:**
张广帅,孙亮波,刘小翠,等.基于全息下三角矩阵变换对比的运动链同构判定方法[J].中国机械工程,2025,36(6):1178-1187.
- ZHANG Guangshuai, SUN Liangbo, LIU Xiaocui, et al. Isomorphism Identification Method for Kinematic Chain Based on Exchange and Comparison of Lower Triangular Matrix with Whole Information[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1178-1187.