

圆角滚压对螺栓残余应力分布及疲劳寿命的影响

袁武华¹, 邓建伟¹, 申庆援², 孙凯², 皇万字²

(1. 湖南大学材料科学与工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 东方蓝天钛金科技有限公司制造部, 山东烟台 264670)

摘要: 利用 ABAQUS 结合 Fe-safe 建立了 TC4 钛合金高锁螺栓的圆角滚压和拉拉疲劳有限元模型, 并进行了试验验证。分析了滚压深度、滚轮圆角半径对螺栓残余应力分布和疲劳寿命的影响规律。滚压后, 螺栓的疲劳寿命由 3 万次提高至 20 万次以上; 随着滚压深度的增加, 螺栓圆角的最大压应力和压应力深度也随之增加并趋向于稳定, 疲劳寿命出现先增后减的趋势; 随着滚轮圆角半径的增加, 滚压后螺栓的压应力区域增大, 表面最大压应力减小, 并在滚轮圆角半径为螺栓圆角半径的 90% 时趋于稳定, 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降低。结果表明, 在滚压深度为 0.02 mm、滚轮圆角半径为 0.47 mm 时, 螺栓圆角的疲劳寿命达到最大值。

关键词: 螺栓; 圆角滚压; 残余应力; 疲劳寿命; 滚压深度; 滚轮圆角半径

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.015

中图分类号: TG379 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 01-0108-07

Influence of fillet rolling on residual stress distribution and fatigue life for bolts

Yuan Wuhua¹, Deng Jianwei¹, Shen Qingyuan², Sun Kai², Huang Wanyu²

(1. School of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Manufacturing Department, Dongfang Lantian Titanium Technology Co., Ltd., Yantai 264670, China)

Abstract: By using ABAQUS combined with Fe-safe, a finite element model of fillet rolling and tensile fatigue for TC4 titanium alloy high-lock bolts was established, and the experimental verification was carried out. Then, the influences of rolling depth and roller fillet radius on residual stress distribution and fatigue life of bolts were analyzed. And after rolling, the fatigue life of bolt increased from 30000 times to more than 200000 times. Furthermore, with the increasing of rolling depth, the maximum compressive stress and compressive stress depth of bolt fillet also increased and tended to be stable, and the fatigue life first increased and then tended to decrease. With the increasing of roller fillet radius, the compressive stress area of bolt after rolling increased, and the maximum compressive stress on the surface decreased and tended to be stable when the roller fillet radius was 90% of the bolt fillet radius. Thus, the optimal roller fillet radius was 90%–95% of the bolt fillet radius, excessive size or too small size significantly reduced the fatigue life. The results show that the fatigue life of bolt fillet reaches the maximum when the rolling depth is 0.02 mm and the roller fillet radius is 0.47 mm.

Key words: bolt; fillet rolling; residual stress; fatigue life; rolling depth; roller fillet radius

紧固件被广泛应用于各行各业, 是装备制造业的关键基础零件, 承担着连接和调整甚至传动的任务, 其产品质量影响着设备的总成质量及使用寿命^[1]。螺栓是应用最广泛的紧固件, 其失效绝大部分是由疲劳破坏引起的, 疲劳断裂的主要部位是螺栓副第一扣螺纹位置、光杆与螺纹交接处、螺栓圆角^[2-3]。TC4 钛合金具有比强度和屈强比高、抗腐蚀和高温性能优异等特点, 同时, 其电极电位与碳纤维复合材料相匹配, 能有效地抑制电偶腐蚀, 因此, 成为复合材料结构连接的首选材料, 被广泛应

用于航空航天领域^[4-6]。头下圆角滚压能够降低圆角粗糙度, 减少表面缺陷, 产生加工硬化并形成残余压应力层, 抑制裂纹的形成与扩展, 从而大幅提升螺栓的疲劳寿命^[7-9]。圆角滚压工艺参数对于螺栓的强化作用复杂, 目前该研究主要以试验为主^[10-12]。由于试验周期长、成本高、工作量大、影响因素复杂, 难以得到普遍性规律。此外, 螺栓的圆角滚压是一个复杂的几何非线性、材料非线性、边界非线性问题, 系统中的接触、运动与变形情况复杂, 建立有限元分析模型的难度较大。

本文利用 ABAQUS 结合 Fe-safe 建立了 TC4 钛合金高锁螺栓圆角滚压和拉拉疲劳的有限元模型, 并通过试验验证了模型的可靠性, 得到了不同滚压

收稿日期: 2022-03-25; 修订日期: 2022-07-01

作者简介: 袁武华 (1973-), 男, 博士, 教授

E-mail: yuan46302@163.com

工艺条件下的残余应力场以及疲劳寿命。利用有限元将工艺-残余应力-疲劳性能有机地联系起来,分析滚压工艺对螺栓圆角残余应力(本文分析的残余应力均为周向应力)及疲劳寿命的影响规律。

1 有限元模型的建立以及试验方案

1.1 螺栓圆角滚压及疲劳试验方案

螺栓样品为固溶时效后的 TC4 钛合金抗拉型平头高锁螺栓,型号为 CFBL1003-8-K,试样分为两组,每组工艺样品数量为 5 个。其中,一组不滚压,对圆角尺寸测量后进行疲劳试验;另一组测量原始圆角尺寸后处进行滚压处理,滚压工艺参数为:滚压力为 800 N、滚压速度为 $500 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 、滚压时间为 2 s,滚压后测量圆角尺寸,之后再继续进行疲劳试验。拉拉疲劳试验按 NASM 1312-11-1997^[13] 标准在

疲劳试验机上进行,疲劳的最大载荷约为 8676 N,最小载荷为最大载荷的 10%,加载频率为 140 Hz。

1.2 螺栓圆角滚压有限元模型

螺栓尺寸和滚轮尺寸如图 1a 所示,滚轮的圆角半径为 0.45 mm,螺栓的圆角半径为 0.50 mm。实际滚压过程中的装配模型如图 1b 所示,其中滚轮材料为高强钢,假设滚轮不发生变形,设为刚体,设滚轮与螺栓的摩擦因数为 0.05,系统简化为滚轮沿径向挤压卸载的轴对称模型。螺栓圆角处的网格划分如图 1c 所示,分析滚压后螺栓沿深度路径 1-2 和表面路径 3-4 的残余应力分布。TC4 钛合金螺栓的材料泊松比为 0.33,弹性模量为 110 GPa,密度为 $5.71 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。通过标准拉伸试样进行试验获得的真应力-真应变数据如表 1 所示。滚压深度、滚轮圆角半径等工艺参数如表 2 所示。原始工艺参数为:滚压深度为 0.020 mm、滚轮圆角半径为 0.45 mm、滚压角度为 45° 。

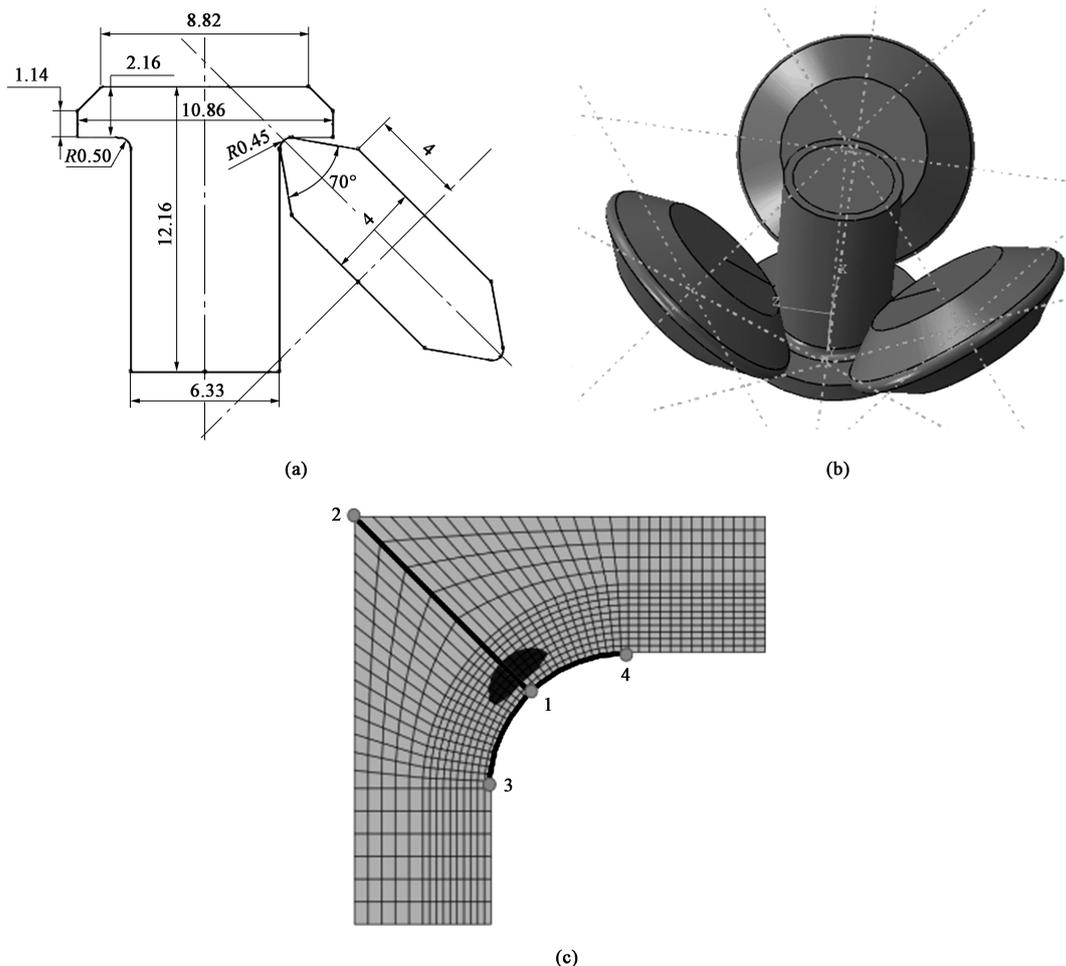


图1 滚压尺寸与有限元模型

(a) 螺栓和滚轮尺寸示意图 (b) 滚压装配模型 (c) 圆角处网格划分及残余应力分析路径

Fig. 1 Rolling sizes and finite element model

(a) Schematic diagram of bolt and roller sizes (b) Rolling assembly model

(c) Mesh generation and residual stress analysis path at fillet

表 1 TC4 钛合金准静态拉伸塑性阶段的真应力-真应变数据

Table 1 True stress-true strain data in quasi-static tensile-plastic stage of TC4 titanium alloy

真应变	0.000	0.025	0.050	0.075	0.100
真应力/MPa	1120	1205	1270	1320	1354

表 2 圆角滚压工艺参数 (mm)

Table 2 Process parameters of fillet rolling (mm)

参数	滚压深度	滚轮圆角半径
数值	0.000, 0.005, 0.010, 0.015, 0.020, 0.025, 0.030, 0.035, 0.040, 0.045	0.10, 0.20, 0.30, 0.40, 0.41, 0.43, 0.45, 0.47, 0.49

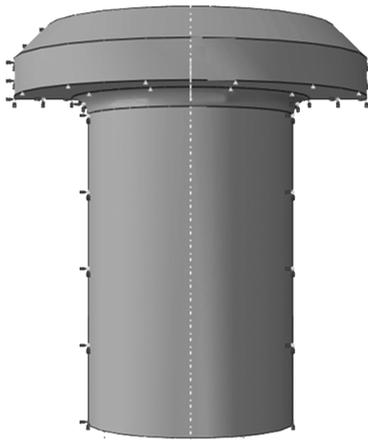


图 2 疲劳有限元模型

Fig. 2 Finite element model of fatigue

力作为疲劳仿真的初始应力场, 设置分析步的初始

1.3 螺栓疲劳仿真模型

根据疲劳试验建立的疲劳仿真模型如图 2 所示, 螺栓头部下端面添加固定约束。本文的研究部位为螺栓圆角部位, 因此忽略螺纹结构, 拉拉载荷根据实际要求加载在螺纹位置。将螺栓滚压后的残余应

步长和增量均为 0.1, 得到螺栓一个疲劳周期内的应力变化的有限元结果。将有限元结果 Odb 文件作为初始载荷条件导入 Fe-safe, 采用 Brown-Miller-Morrow 准则求解疲劳寿命。

2 试验结果及有限元验证

图 3a 为疲劳试验现场, 图 3b 为断裂后的部分试样, 疲劳试验结果如表 3 所示。未滚压的螺栓试样的疲劳寿命平均值为 3.0 万次, 疲劳断裂位置均在螺栓头下圆角处, 其断裂形式如图 3b 所示。滚压后的螺栓去除异常数据后, 其疲劳寿命平均值为 20.8 万次, 断裂位置均在螺纹处, 其断裂形式如图 3b 所示。由此可以判断, 滚压后螺栓疲劳断裂的最薄弱位置从螺栓头下圆角转移至螺纹处。



(a)



(b)

图 3 疲劳试验过程 (a) 及断裂后的试样 (b)

Fig. 3 Fatigue test process (a) and specimens after fracture (b)

未滚压的螺栓试样的疲劳有限元模拟结果如图

4a 所示, 疲劳断裂位置同样在圆角位置, 最小疲劳

表 3 螺栓试样的疲劳试验结果 ($\times 10^3$ 次)

Table 3 Fatigue test results of bolt specimens ($\times 10^3$ times)

试验	1	2	3	4	5
未滚压	22.5	38.2	25.7	35.0	27.2
滚压后	183.2	209.6	527.3	345.1	232.6

寿命为 3.0 万次，模拟计算结果与试验值接近，说明疲劳仿真模型的可靠性较好。螺栓滚压后的仿真计算疲劳寿命为 49.4 万次 (图 4b)，由于模型中未考虑螺纹的影响，模拟计算值为圆角处的疲劳寿命。螺栓圆角处的模拟计算值大于试验值，而螺栓圆角

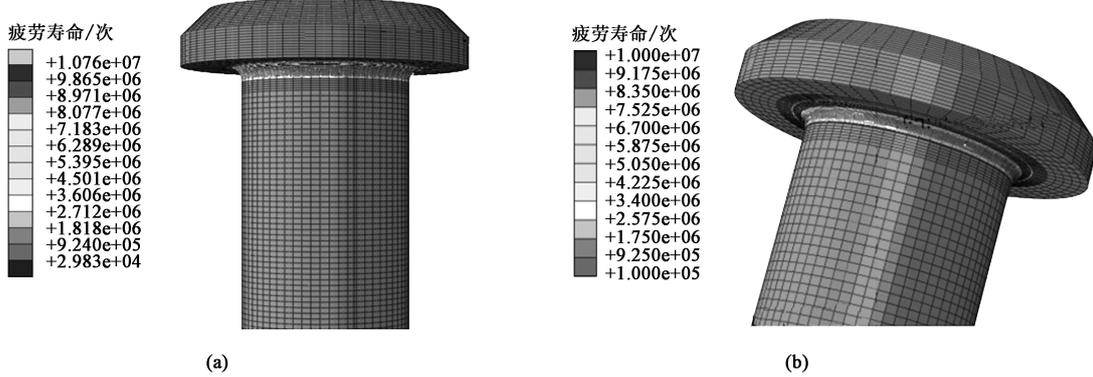


图 4 疲劳有限元分析结果

(a) 未滚压 (b) 滚压后

Fig. 4 Finite element analysis results of fatigue

(a) Without rolling (b) After rolling

的实际寿命也大于试验值，因此，采用该模型对圆角滚压工艺与疲劳寿命的关系进行分析是可靠的。

3 分析讨论

3.1 滚压深度对螺栓残余应力分布及疲劳寿命的影响

不同滚压深度下螺栓圆角位置处沿深度和表面路径的残余应力分布如图 5 所示，螺栓的压应力深度和最大压应力随着滚压深度的变化如图 6 所示。

从图 5 可以看出：圆角滚压位置的残余应力为压应力；随着滚压深度的增加，压应力逐渐减小并向拉应力转变。滚压深度小于 0.010 mm 时，圆角表面最大压应力出现在圆弧表面中心位置，在沿着螺栓头和螺栓杆的两端方向上，残余压应力迅速变小至一定值 (< 200 MPa)，并保持稳定或小范围地波动。但滚压深度较大时，表面最大压应力出现的位置由圆弧表面中心逐渐向螺栓头端移动，沿着螺栓头和螺栓杆的两端方向上，残余压应力迅速变小。

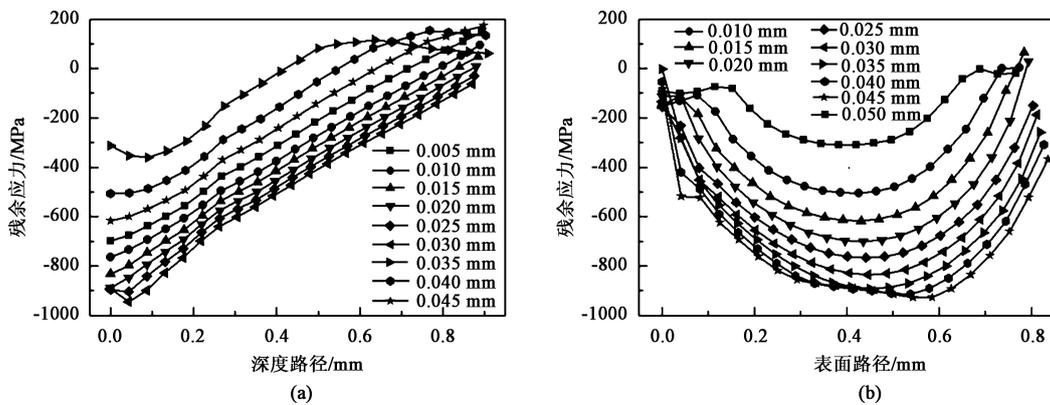


图 5 不同滚压深度下螺栓圆角的残余应力分布

(a) 深度路径 (b) 表面路径

Fig. 5 Residual stress distributions of bolt fillet under different rolling depths

(a) Depth path (b) Surface path

综合图 5 和图 6 可以看出，随着滚压深度的增加，螺栓的最大压应力和压应力深度也迅速增大，但

随着滚压深度的进一步增大，最大压应力和压应力深度逐渐趋于平稳，残余压应力最大不超过 1000 MPa，

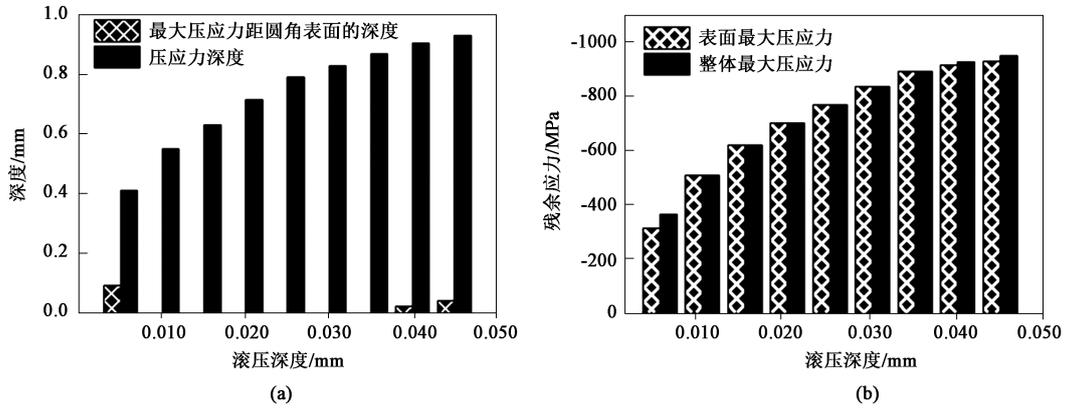


图 6 螺栓的压应力深度和最大压应力与滚压深度的关系

(a) 压应力深度-滚压深度 (b) 最大压应力-滚压深度

Fig. 6 Relationships between depth of compressive stress for bolt and maximum compressive stress with rolling depth

(a) Depth of compressive stress-rolling depth (b) Maximum compressive stress-rolling depth

压应力深度 < 1 mm。滚压深度较小时，随着滚压深度的增加，螺栓的最大压应力所在位置从螺栓距离表面 0.1 mm 左右位置向表面移动；随滚压深度增大，最大压应力位置转移并出现在圆角表面；随滚压深度的进一步增大，最大压应力位置出现

在表层以下位置。

图 7 为不同滚压深度时，圆角位置残余压应力为 200 MPa 以上的区域分布云图。从图 7 可以看出，随滚压深度增加，形成的压应力区域更大。

图 8 为不同滚压深度下的螺栓疲劳寿命预测结

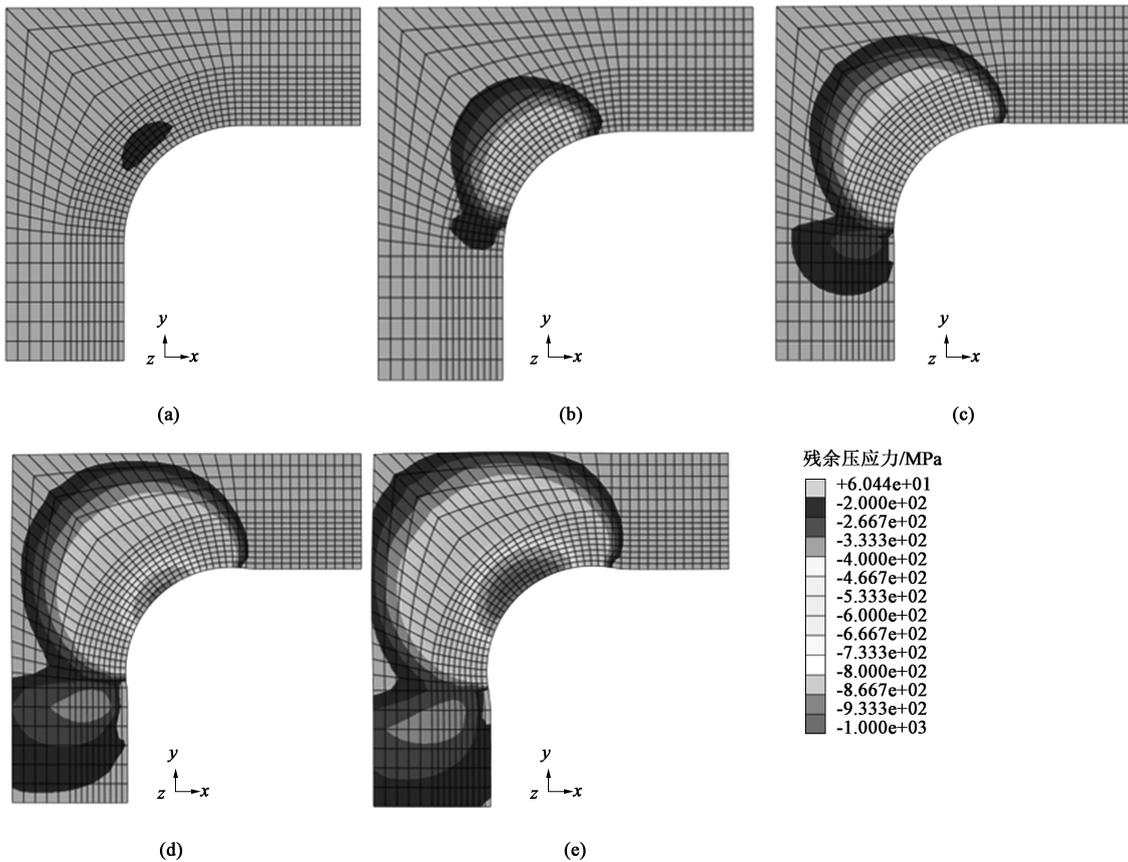


图 7 不同滚压深度下圆角位置的残余压应力分布云图

(a) 0.010 mm (b) 0.020 mm (c) 0.030 mm (d) 0.040 mm (e) 0.050 mm

Fig. 7 Cloud maps of residual compressive stress distribution at fillet position under different rolling depths

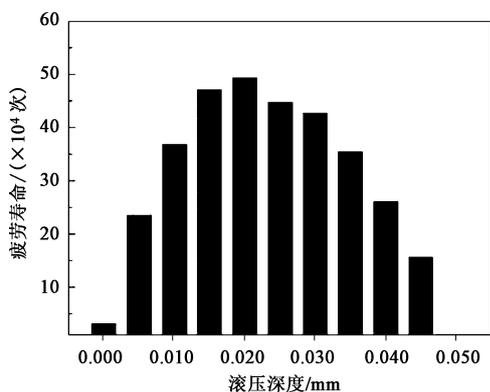
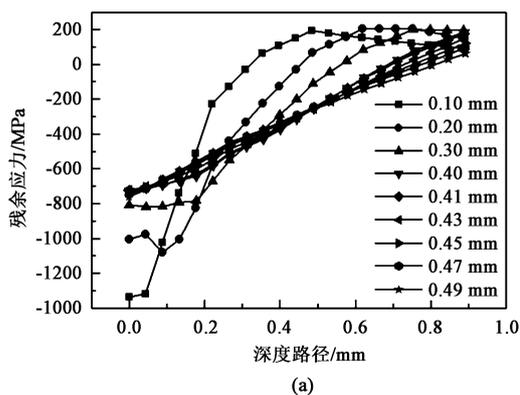


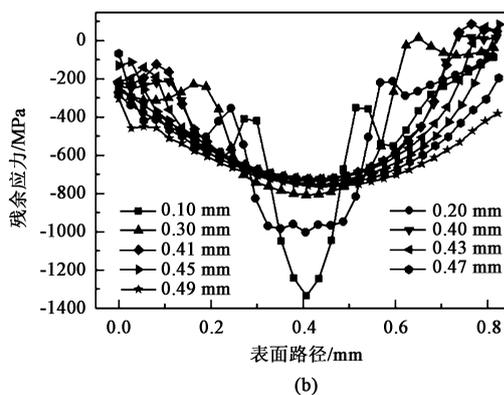
图 8 不同滚压深度下螺栓的疲劳寿命

Fig. 8 Fatigue life of bolts under different rolling depths

果。从图 8 可以看出，随着滚压深度的增加，螺栓的疲劳寿命迅速上升，在滚压深度约为 0.020 mm 时达到最大值，约为 49.4 万次，螺栓的疲劳寿命较滚压前提升近 17 倍，疲劳破坏的位置为螺栓圆角处。但随着滚压深度的进一步增加，螺栓疲劳寿命迅速下降。结合图 5 和图 6 的残余应力分布规律可知：随着滚压深度的增加，螺栓圆角表面形成的残



(a)



(b)

图 9 不同圆角半径的滚轮滚压后螺栓圆角处的残余应力分布

(a) 沿深度路径 (b) 沿表面路径

Fig. 9 Residual stress distributions at bolt fillet after rolling with different fillet radiuses of roller

(a) Along depth path (b) Along surface path

从表面残余应力分布来看，螺栓圆角表面的最大残余压应力出现在圆弧中间位置，且沿圆弧中心线呈一定的轴对称分布，但靠近头端的压应力略小于靠近杆部的压应力。随着滚轮圆角半径的增大，螺栓表面压应力的分布区域（长度）也越大，应力梯度也趋于平稳。

图 10 为不同圆角半径的滚轮滚压后螺栓的疲劳寿命预测。滚轮圆角半径小于 0.40 mm，滚压后螺栓的疲劳寿命小于 10 万次；当滚轮圆角半径大于 0.40 mm 时，随着滚轮圆角半径的增加，螺栓的疲劳寿命迅速上升，并在滚轮圆角半径为 0.47 mm 时

余压应力增大，最大压应力出现在滚压表面，残余压应力能够有效地抵消螺栓的外部载荷，使得疲劳寿命增大；但是滚压深度过大，压应力深度和大小趋于平稳，残余压应力对疲劳寿命的强化作用达到极限值，而滚压形成的凹槽形状与头杆两端过渡不平整，疲劳加载时易产生应力集中，从而导致疲劳寿命降低。

3.2 滚轮圆角半径对螺栓残余应力分布及疲劳寿命的影响

不同圆角半径的滚轮滚压下，螺栓圆角位置沿深度和表面路径的残余应力分布如图 9 所示。滚轮圆角半径较小时 (<0.20 mm)，表面最大残余压应力大于滚轮圆角半径较大时的最大残余压应力。滚轮圆角半径为 0.10 mm 时，最大压应力超过 1300 MPa，但此时压应力深度也较小，应力梯度较大，拉应力出现的位置靠近表面处 (<0.4 mm)；随着滚轮圆角半径增大至 0.30 mm 以上时，压应力深度增大，螺栓滚压后的残余应力减小，最大残余压应力稳定在 700~800 MPa，压应力最大深度为 0.8~1.0 mm 左右。

疲劳寿命达到最大值，约为 75.9 万次，螺栓的疲劳寿命较滚压前提升了近 25 倍。但随着滚轮圆角半径的进一步增大，螺栓的疲劳寿命又出现迅速下降，在滚轮圆角半径为 0.49 mm 时，此时螺栓的疲劳寿命小于 5 万次。滚轮圆角半径过大或过小，滚压后螺栓圆角的凹槽形状过渡不光滑，尤其是滚轮圆角半径过小时，小滚轮滚压形成的残余压应力区域较小，且形成的凹槽十分明显，滚压的强化作用不大，螺栓的疲劳寿命较低。而随着滚轮圆角半径的增加，滚压后螺栓圆角处过渡越来越平整，形成的残余压应力区域也越来越大并趋于平稳，但当螺栓圆角半

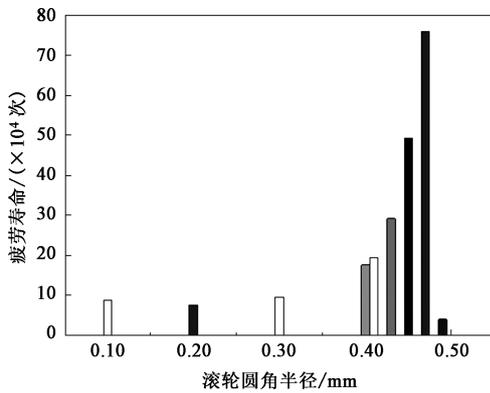


图 10 不同圆角半径的滚轮滚压后螺栓的疲劳寿命

Fig. 10 Fatigue life of bolts after rolling with different fillet radiuses of roller

径过大时, 滚压时螺栓头杆两端受到挤压变形而导致尺寸结构发生畸变, 最终导致螺栓的疲劳寿命出现骤降。

4 结论

(1) 滚压后螺栓的平均疲劳寿命由未滚压状态的 3 万次左右提升至 20 万次以上, 滚压工艺显著提升了螺栓的疲劳寿命。

(2) 随着滚压深度的增加, 螺栓圆角的压应力深度和最大压应力迅速增加并逐渐趋向于稳定, 螺栓的疲劳寿命随着滚压深度的增加先增后减, 并在滚压深度为 0.020 mm 左右时, 疲劳寿命达到最大值。

(3) 随着滚轮圆角半径的增加, 滚压后螺栓的压应力区域和表面最大压应力也增大, 并在滚轮圆角半径为螺栓圆角半径 90% 时趋于稳定; 滚轮圆角半径的最佳尺寸应为螺栓圆角半径的 90% ~ 95%, 过大或过小的尺寸均会导致螺栓疲劳寿命的显著降低。

参考文献:

- [1] 周康年, 丁为联, 李壮云, 等. 中国机械设计大典 [M]. 北京: 中国机械工程学会, 2002.
Zhou K N, Ding W L, Li Z Y, et al. China Mechanical Design Ceremony [M]. Beijing: Chinese Mechanical Engineering Society, 2002.
- [2] 刘风雷. 滚压加工技术提高高强航空紧固件的疲劳强度 [J]. 航空制造技术, 2005, (6): 97-99.
Liu F L. Rolling processing technology to improve fatigue strength of high-strength aerospace fasteners [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2005, (6): 97-99.
- [3] 王慧, 刘海波, 朱先华, 等. 紧固件的典型失效形式 [J].

上海金属, 2020, 42 (6): 20-26.

Wang H, Liu H B, Zhu X H, et al. Typical failure modes of fasteners [J]. Shanghai Metal, 2020, 42 (6): 20-26.

- [4] 宗学文, 张健, 卢秉恒. Ti6Al4V 在不同成形工艺下的数值分析及组织性能 [J]. 稀有金属, 2021, 45 (7): 786-795.
Zong X W, Zhang J, Lu B H. Numerical analysis and microstructure and properties of Ti6Al4V under different forming processes [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45 (7): 786-795.
- [5] 李毅, 赵永庆, 曾卫东. 航空钛合金的应用及发展趋势 [J]. 材料导报, 2020, 34 (S1): 280-282.
Li Y, Zhao Y Q, Zeng W D. Application and development trend of aerospace titanium alloys [J]. Materials Review, 2020, 34 (S1): 280-282.
- [6] 师俊峰, 韩珍梅. 航空紧固件钛合金材料的应用现状 [J]. 机械管理开发, 2020, 35 (5): 258-259.
Shi J F, Han Z M. Application status of titanium alloy materials for aviation fasteners [J]. Mechanical Management Development, 2020, 35 (5): 258-259.
- [7] 蔡振, 张显程, 涂善东. 超声表面滚压加工对 Ti-6Al-4V 合金显微组织及表面完整性的影响 [J]. 机械工程材料, 2018, 42 (1): 7-10, 17.
Cai Z, Zhang X C, Tu S D. Effect of ultrasonic surface rolling on the microstructure and surface integrity of Ti-6Al-4V alloy [J]. Mechanical Engineering Materials, 2018, 42 (1): 7-10, 17.
- [8] 钟丽琼. 表面形变强化残余应力场对 Inconel 718 高温合金高周疲劳性能的影响规律研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
Zhong L Q. Study on the Influence of Surface Deformation Strengthening Residual Stress Field on High Cycle Fatigue Properties of Inconel 718 Superalloy [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [9] 赵庆云, 程思锐, 黄宏. 1240 MPa 级 Ti-38644 高锁螺栓的拉伸疲劳增寿机理 [J]. 材料研究学报, 2019, 33 (10): 735-741.
Zhao Q Y, Cheng S R, Huang H. Tensile fatigue life extension mechanism of 1240 MPa Ti-38644 high-lock bolts [J]. Journal of Materials Research, 2019, 33 (10): 735-741.
- [10] 吕永华, 王天宰. 滚压强化对高强螺栓用 35CrMoV 钢疲劳性能的影响 [J]. 机械工程材料, 1989, (3): 50-55.
Lyu Y H, Wang T Z. Effect of rolling strengthening on fatigue properties of 35CrMoV steel for high-strength bolts [J]. Mechanical Engineering Materials, 1989, (3): 50-55.
- [11] 王勉. TC16 螺栓头下圆角滚压工艺与疲劳强度研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.
Wang M. Research on the Rolling Process and Fatigue Strength of the Fillet under the TC16 Bolt Head [D]. Guiyang: Guizhou University, 2009.
- [12] 胡宁静, 胡蓉蓉, 胡道秋. 滚压工艺国内外的动向 [J]. 湘潭大学自然科学学报, 1994, (2): 98-103.
Hu N J, Hu R R, Hu D Q. The development trend of rolling technology at home and abroad [J]. Journal of Natural Science of Xiangtan University, 1994, (2): 98-103.
- [13] NASM 1312-11-1997, Fastener test methods-Method 11-Tension fatigue [S].