

短收尾螺栓的折叠缺陷工艺实验及疲劳特性

张振峰^{2,3} 许学石¹ 林忠亮^{2,3} 唐伟^{2,3} 李浩楠¹ 单垄垄^{2,3} 白清顺^{1*}

1.哈尔滨工业大学机电工程学院,哈尔滨,150001

2.天津市紧固连接技术企业重点实验室,天津,300300

3.航天精工股份有限公司,天津,300300

摘要:为揭示滚丝参数与收尾构型对折叠缺陷的影响规律,开展了螺纹收尾滚丝成形工艺与疲劳实验,分析了不同加工参数下的折叠情况。结果表明:对于收尾区折叠,滚丝转速取较大值、进给量取较小值可有效减少折叠的形成;对于牙底折叠,随着滚丝转速、进给量取值的增大,折叠数量先减小后增大;对于疲劳特性,当滚丝转速增大、进给量减小时,由折叠缺陷发展成的疲劳裂纹逐渐减小。因此合理的滚丝工艺参数与收尾槽构型可有效减少螺栓收尾区折叠缺陷数量。

关键词:短收尾螺纹;折叠;滚丝参数;收尾构型;疲劳特性

中图分类号:TG131.3;TG376.3

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.01.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Processing Experiments of Folding Defects and Fatigue Property in Short End Bolts

ZHANG Zhenfeng^{2,3} XU Xueshi¹ LIN Zhongliang^{2,3} TANG Wei^{2,3} LI Haonan¹
SHAN Longlong^{2,3} BAI Qingshun^{1*}

1.School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001

2.Tianjin Key Laboratory of Fastening Technology, Tianjin, 300300

3.Aerospace Precision Products Co., Ltd., Tianjin, 300300

Abstract: To elucidate the effects of thread rolling parameters and end configurations on the formation of folding defects, an experimental investigation was conducted on the thread end rolling processes and fatigue behavior, and the folds with different processing parameters were analyzed. The results show that for the folding in the end region, higher thread rolling speed and lower feed rate significantly mitigate the occurrence of folds. For the tooth base folding, increases in thread rolling speed and feed rate will initially reduce the number of folds. In terms of fatigue characteristics, increases in thread rolling speed and decreases in feed rate leads to a gradual reduction in fatigue cracks originating from folding defects. Consequently, the optimization of thread rolling process parameters and end groove configurations is essential for reducing the incidence of folding defects in short end bolts.

Key words: short end bolt; fold; thread rolling parameter; end groove configuration; fatigue property

0 引言

随着航空航天产业的发展,相关制造领域对螺栓紧固件的使用性能提出更高的要求。广泛用于航空航天制造领域的短收尾螺纹螺栓具有特殊的螺纹-螺杆过渡结构和专门的螺纹收尾加工技术,有效减小了螺纹的总长度,大大降低了螺栓连接紧固件的总质量^[1]。

经过滚丝加工的螺栓在螺纹收尾区域与牙底易出现折叠,这对螺栓的疲劳寿命将产生直接影响,不仅影响整机性能,还可能导致重大事故^[2-4],

因此,针对短收尾螺纹螺栓折叠产生的机理开展理论分析和应用研究具有重要的理论意义和实用价值。目前,针对螺栓折叠的研究主要集中于滚丝参数、应力分布、收尾结构和疲劳性能等方面^[5-6]。螺栓使用过程中,收尾的应力分布状态较为复杂,且同时存在拉应力和压应力。尽管螺纹收尾与螺栓光杆处可实现光滑过渡,但依然存在应力集中的问题。研究发现加工参数是影响加工质量的主要原因^[7-9],滚压速度与滚压次数对螺栓组织与性能都有着不同的影响程度^[10-11]。ABDUL JAWWAD等^[12]采用螺栓试件进行疲劳试验,观测了疲劳断口形貌,发现螺纹收尾的轴向相对位置影响螺栓的疲劳性能。疲劳失效是影响早

收稿日期:2023-10-31

基金项目:天津市紧固连接技术企业重点实验室开放课题(TKLF2022-01-B-03)

期断裂的主要原因,表面处理与滚压工艺可提高螺栓的疲劳寿命^[13],经过滚压的螺栓牙底粗糙度与硬度均有提升,疲劳寿命超过未强化工件疲劳寿命的 5 倍^[14]。对于一般应用场景下的螺栓收尾,要使载荷合理分布在各螺纹牙上,收尾的长度应为 3 倍螺距,而国产航空航天螺栓的螺纹收尾长度应在 1.5 倍螺距内。

目前,针对螺纹短收尾加工中出现的收尾过渡区折叠缺陷机理和收尾成形工艺参数的研究较少,且螺纹滚丝工艺对收尾的疲劳寿命影响尚不清晰。本文以短收尾钛合金螺栓为研究对象,开展螺纹收尾滚丝成形工艺实验与螺纹滚丝成形仿真,研究滚丝工艺参数和收尾构型对折叠的影响规律,并通过螺栓疲劳试验确定使螺栓疲劳寿命达到规定要求的最优工艺参数,为短收尾螺纹螺栓的设计与制造提供理论支撑。

1 滚丝工艺参数对螺纹短收尾折叠缺陷的影响

1.1 螺纹及其短收尾加工实验

短收尾螺栓试件的主要制备工序为:车削螺栓杆、车削螺纹、滚压螺纹的收尾圆弧、磨削螺栓坯件光杆、滚丝螺纹等。收尾圆弧的滚压工艺主要起强化作用,对折叠产生的影响并不大。为避免滚压引入的收尾区域原始构型差异,不再进行收尾圆弧滚压。滚丝前,对螺栓坯件光杆进行磨削以提高表面质量和材料塑性。

坯件磨削使用大光长荣机械 FCL-14 数控无心磨床,磨削砂轮转速设为 1680 r/min,导轮转速设为 10 r/min,进给量设为 4 mm/r。螺纹滚丝使用德国 Profiroll 公司的 PR25 CNC/AC 数控滚丝机,滚丝转速和进给量根据对应的工艺参数组合设定。

实验中,利用工业数码成像显微镜观察螺栓表面,通过金相显微镜观察短收尾剖面,判断折叠情况。为得到收尾剖面,沿螺栓轴线进行电火花线切割。由于螺栓头部不便夹持观察,故制备金相观察样件并对样件使用上海科迈 KMR-1000Z 自动金相镶嵌机进行镶嵌。制备金相观察样件时,将螺栓样件截面朝下放置在设备升降平台上,加入金相热镶嵌树脂,加热、保温并冷却约 15 min。使用 PRESI 公司 MECATECH 250SPC 研磨抛光机对试样表面进行磨抛处理,获得表面光洁的螺栓试件,如图 1 所示。

为研究滚丝工艺参数对螺纹短收尾折叠形成的影响,保证螺栓坯件的车削和磨削工艺相同,改

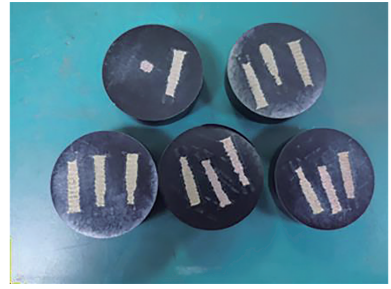


图 1 镶嵌后得到的试样

Fig.1 Sample obtained after embedding

变滚丝工艺参数,设计两因子四水平全因子实验,分析加工后收尾的折叠形态。滚丝转速和进给量设定参数组合如表 1 所示。

表 1 滚丝的转速和进给量

Tab.1 Rotation speed and feed rate for thread rolling

组号	滚丝转速 / ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	进给量 / ($\text{mm} \cdot r^{-1}$)	组号	滚丝转速 / ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	进给量 / ($\text{mm} \cdot r^{-1}$)
1	15	0.08	9	25	0.08
2	15	0.10	10	25	0.10
3	15	0.12	11	25	0.12
4	15	0.14	12	25	0.14
5	20	0.08	13	30	0.08
6	20	0.10	14	30	0.10
7	20	0.12	15	30	0.12
8	20	0.14	16	30	0.14

1.2 滚丝工艺参数对螺纹短收尾折叠的影响分析

1.2.1 滚压转速的影响

利用工业数码成像显微镜观察螺纹短收尾表面的折叠情况,表面折叠最长微缝的相对长度 L 按实际长度与螺栓周长之比计量。如图 2 所示,进给量 f_a 为 0.08 mm/r 时,仅在滚丝转速 20 r/min 下观察到折叠,该情况出现折叠的可能原因是进给量过小、不易引起折叠。进给量为 0.10 mm/r 时, L 从 15 r/min 时的 0.12 增大到 20 r/min 的 0.18;转速增大到 25 r/min 时,折叠微缝消失;转速增大到 30 r/min 时, L 达 0.06。进给量为 0.12 mm/r 时,随着转速的增大, L 从 0.12

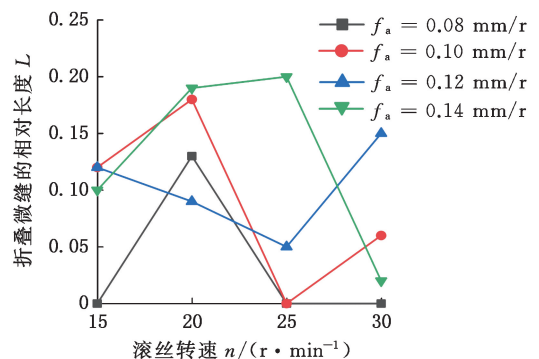


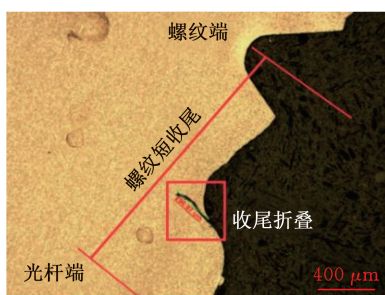
图 2 折叠微缝长度随滚丝转速变化曲线

Fig.2 Curve of folding slit length changing with thread rotation speed

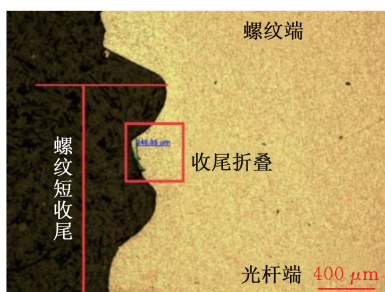
持续减小到0.05;转速 30 r/min 时 L 突然上升到 0.15 的原因可能是螺纹收尾区域存在的表面缺陷诱导折叠产生。进给量为 0.14 mm/r 的折叠明显高于其他组,转速为 15~25 r/min 时, L 缓慢增大到 0.2, 但增长速率逐渐减小;转速 30 r/min 时, L 减小至 0.02。不同进给量下,随着滚丝转速的增大, L 刚开始的变化趋势略有不同,但后期均减小。

滚丝过程中,滚丝轮与螺纹收尾的接触作用区域存在变形,说明滚丝轮对螺栓材料的滚压作用并不是瞬间产生和消失的,且作用时间与滚丝转速相关。滚丝转速较小时,滚丝轮与螺纹收尾作用时间延长,材料滚压时间延长,变形加剧,材料的硬化效果加强。此时,材料变形能力下降,收尾区域内的材料流动性能减弱,局部材料难以向其他位置流动,更易产生折叠。滚丝转速较大时,滚丝轮与螺纹收尾作用时间缩短,部分材料只发生较小变形,不再受滚丝轮作用,变形速度下降,材料加工硬化效果减弱,变形能力提升;螺纹收尾区域内的材料流动性能增强,分布更均匀,减少了折叠。此外,随滚丝转速的增大,螺栓表面的温度上升,有利于材料塑性的提升,成形性能增强,减少折叠的产生。

利用金相显微镜观察螺纹短收尾的剖面,其中的 2 组螺纹收尾区域存在明显折叠特征,如图 3 所示。出现缺陷的原因是收尾圆弧处堆积的材料受圆弧与完整螺纹过渡部分的挤压和滚丝轮的作用,发生了闭合。收尾折叠形态图中的螺纹收



(a) 滚压转速 30 r/min, 进给量 0.1 mm/r



(b) 滚压转速 20 r/min, 进给量 0.1 mm/r

图 3 螺纹短收尾剖面上的折叠形态

Fig.3 Fold shape on the short end profile of the thread

尾圆弧末端常存在一段不连续的轮廓,尾圆弧末端不连续处的轮廓夹角为 α ,如图 4 所示。 α 越小意味着螺栓在滚丝加工中越有可能处于产生折叠的临界状态,因此 α 可作为收尾折叠程度的度量,将折叠特征螺纹收尾剖面的不连续轮廓夹角测量结果用于表征折叠的影响。

进给量不变的情况下,螺纹短收尾剖面内不连续轮廓的夹角随滚丝转速的变化与螺纹收尾表面观察到的折叠微缝形成规律基本一致:转速较低时, α 一般较小,产生较多的折叠;转速增大后,不连续轮廓夹角较大。滚丝转速 30 r/min、进给量 0.10 mm/r 时,剖面内可观察到明显的收尾折叠,此时的轮廓夹角为 0° ,与研究折叠微缝长度时观察到的现象基本相符。

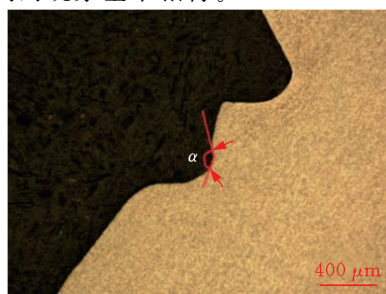


图 4 螺纹收尾剖面

Fig.4 Thread ending profile

1.2.2 进给量的影响

滚丝转速不变时,螺纹收尾表面折叠的最长微缝相对长度随进给量的变化如图 5 所示。滚丝转速为 15 r/min 时,当进给量增至 0.1 mm/r,折叠微缝长度 L 增至 0.12,此后在 0.12 上下波动;转速为 20 r/min 时,除进给量 0.12 mm/r 的折叠微缝长度减小外,其余情况的折叠微缝长度 L 随进给量增大由 0.13 增至 0.19;滚丝转速为 25 r/min 时,折叠微缝长度随进给量增大而增加的规律最为显著,微缝长度逐渐增大到最大值 0.20;滚丝转速 30 r/min 时,折叠微缝长度随进给量的增大从 0 单调递增至 0.15,但进给量 0.14 mm/r 时的折叠微缝长度减小为 0.02,这是由于滚丝转速和进给量都处于最高水平,滚丝过程中的摩擦加剧,热量剧烈增大,滚丝区域温度上升,螺纹收尾区域内的材料在高温作用下被软化,流动性增强^[9,15],不易产生折叠。由此可见,折叠微缝长度随进给量的增大而增大。滚丝进给量不大时,滚丝轮对螺纹收尾区域的作用较弱,材料的应变速率小,硬化不明显。此时螺纹收尾的材料流动性好,在滚丝轮的作用下逐渐变形,因此不易折叠。进给量增大,材料剧烈变形,出现显著的加工硬化,材料流动性能下降^[16],使得收尾圆弧边缘在

受挤压后,材料无法及时向其他位置流动,最终在滚丝轮的持续作用下形成折叠缺陷。

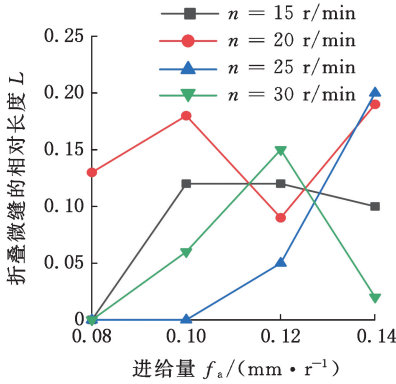


图 5 折叠微缝长度随进给量变化曲线

Fig.5 Curve of folding slit length changing with feed rate

2 螺纹短收尾几何构型对螺纹短收尾折叠缺陷的影响

2.1 螺纹短收尾几何构型的主要结构参数

对螺纹短收尾几何构型结构参数的分析有助于确定影响折叠的螺纹短收尾几何构型结构参数。图 6 为螺纹短收尾几何构型示意图,收尾轮廓的几何要素主要包括不同半径的圆弧和线段。收尾折叠主要发生在圆弧 R 、 r 之间的部分。由于收尾折叠一般更接近螺纹端,因此可认为光杆过渡圆弧末端的夹角 α_1 几乎不影响折叠的形成。增大收尾圆弧 R 靠近螺纹端的夹角 α_2 会造成车削加工困难或加工表面质量较低;减小 α_2 , 收尾圆弧至螺杆螺纹部分的过渡过长,不满足滚丝坯件表面形位公差的要求,因此夹角 α_2 的取值不变。收尾圆弧 R 底部距离螺栓轴线的距离 D 由圆弧 R 和 r 确定。因此,最终的结构参数为圆弧 R 和圆弧 r 。参考实际加工生产与相关研究^[17], $\alpha_1 = 30^\circ \pm 1^\circ$, $\alpha_2 = 29^\circ \pm 1^\circ$, 如图 7 所示。本实验中取 $\alpha_1 = 30^\circ$, $\alpha_2 = 30^\circ$ 。参数设置如表 2 所示^[9]。

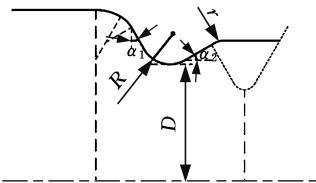


图 6 螺纹短收尾几何构型的轮廓

Fig.6 Profile of geometric configuration of short end of thread

2.2 螺纹短收尾几何构型结构参数对折叠的影响

过渡圆弧 r 一定时,将收尾圆弧 R 的取值从 0.3 mm 减小为 0.1 mm,利用金相显微镜观察收尾剖面,测量收尾圆弧处不连续轮廓的夹角,发现

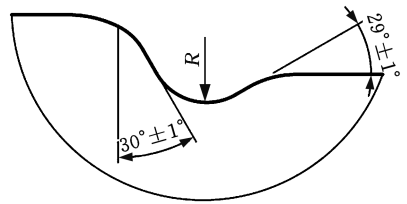


图 7 螺纹短收尾几何构型参数图

Fig.7 Geometric configuration parameter for short end of thread

表 2 螺纹短收尾几何构型的结构参数

Tab.2 Geometric configuration and structural parameters for short end of thread

组号	R/mm	r/mm	组号	R/mm	r/mm
1	0.30	0.15	6	0.30	0.13
2	0.25	0.15	7	0.30	0.11
3	0.20	0.15	8	0.30	0.09
4	0.15	0.15	9	0.30	0.07
5	0.10	0.15			

夹角从 156.98° 递减至 129.76° 。收尾圆弧半径为 0.1 mm 的收尾剖面如图 8 所示。收尾圆弧 R 取 0.1 mm 时,表面出现明显折叠微缝,收尾剖面测得的不连续轮廓夹角小于 130° ,收尾折叠特征较为显著。圆弧 R 取值越小,收尾处折叠缺陷越严重。 R 减小意味着收尾圆弧曲率增大,滚丝过程中的材料在大曲率位置的变形受阻,进而在曲率发生变化的交界位置堆积,促使折叠缺陷的形成。因此,为减少螺纹收尾折叠的出现,应在允许范围内取较大的收尾圆弧半径。收尾圆弧 R 取值一定时,随着过渡圆弧 r 的减小,不连续轮廓夹角在 $148^\circ \pm 0.5^\circ$ 范围内波动直到 $r = 0.07$ mm,此时在收尾剖面上观察到明显的折叠特征,如图 9 所示。

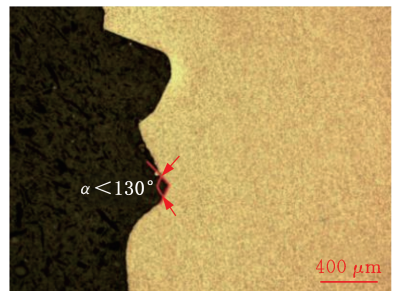


图 8 收尾剖面图像

Fig.8 Closing profile image

圆弧 R 取较大值可有效减小收尾折叠缺陷的产生,但取值不可过大,否则收尾区域将不满足短收尾要求。可将较小的圆弧 r 看作“尖角”,其半径不足以影响滚丝轮最后一个完整螺纹牙在螺栓坯件上的滚压位置,基本不会影响折叠产生,但半径取值过小时,车削螺纹收尾表面质量差,会诱导折叠缺陷的出现。因此,可认为圆弧 r 在几何构型上对收尾折叠并无影响。

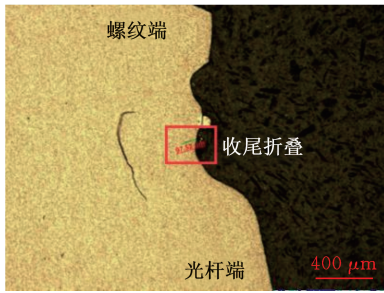


图9 螺纹短收尾剖面上的折叠

Fig.9 Fold on the short end profile of the thread

3 基于螺纹收尾折叠控制的滚丝工艺参数优选

3.1 滚丝过程中完整螺纹折叠缺陷产生的仿真分析

滚丝工艺参数对折叠形成和螺栓疲劳寿命的影响显著。螺栓螺纹折叠包含牙顶折叠和牙底折叠。牙顶折叠主要影响螺栓啮合性能,但螺纹连接多圈啮合的特性可保证个别螺纹牙顶在破坏失效的情况下仍能保持有效连接。螺纹牙底折叠直接影响螺栓整体的疲劳寿命,螺纹牙根部作为最容易发生疲劳断裂的位置之一,该位置的折叠缺陷会使螺栓的疲劳性能大幅下降。因此,从提高螺栓疲劳寿命的角度出发,需研究滚丝工艺参数对牙底折叠的影响。

为缩短计算时间,提高计算收敛概率,将螺栓有限元分析模型简化为圆柱体。基于响应曲面设计,设置3个滚丝工艺参数,其因素水平如表3所示。基于响应曲面设计方法确定工艺参数组合,如表4所示。

表3 滚丝工艺参数及水平取值

Tab.3 Rolling process parameters and horizontal values

水平	影响因子		
	滚丝转速/($r \cdot \min^{-1}$)	进给量/($\text{mm} \cdot r^{-1}$)	摩擦因数
-1	15.00	0.080	0.200
$-\alpha$	18.04	0.096	0.241
0	22.50	0.120	0.300
α	26.96	0.144	0.359
1	30.00	0.160	0.400

3.2 螺纹牙底折叠的数量及滚丝工艺参数优选

统计各组仿真结果中牙底折叠的数量,建立滚丝工艺参数-螺纹牙底折叠数量的数学模型:

$$N = 28 - 2.532n - 208f_a + 107.1\mu + 0.0763n^2 + 1434f_a^2 + 29.5\mu^2 + 0.001nf_a - 2.83n\mu - 530f_a\mu \quad (1)$$

式中: N 为螺纹牙底折叠数量; n 为滚丝转速, r/min ; f_a 为进给量, mm/r ; μ 为摩擦因数。

模型的决定系数为89.42%,方差分析得到 P 值为0.001,拟合效果尚可,但依然有提升的空间。对此,删除模型中方差分析 F 值偏小的一次项、二

表4 响应曲面设计滚丝工艺参数组合

Tab.4 Response surface design rolling process parameter combination

组号	滚丝转速/($r \cdot \min^{-1}$)	进给量/($\text{mm} \cdot r^{-1}$)	摩擦因数
1	22.50	0.080	0.300
2	18.04	0.144	0.359
3	22.50	0.120	0.300
4	22.50	0.120	0.200
5	30.00	0.120	0.300
6	18.04	0.096	0.241
7	18.04	0.144	0.241
8	22.50	0.120	0.300
9	22.50	0.120	0.300
10	22.50	0.120	0.300
11	15.00	0.120	0.300
12	22.50	0.120	0.300
13	26.96	0.144	0.241
14	26.96	0.096	0.359
15	18.04	0.096	0.359
16	26.96	0.144	0.359
17	22.50	0.120	0.300
18	22.50	0.120	0.400
19	22.50	0.160	0.300
20	26.96	0.096	0.241

次项和交互项,重新拟合得到

$$N = 2.123 - 0.907f_a + 4.265n^2 + 2.265f_a^2 - 2.121n\mu - 2.121f_a\mu \quad (2)$$

修改后模型的决定系数为87.3%,略有减小,但 P 值为0,表明该数学模型有效。模型的方差分析结果如表5所示,残差分布如图10所示。根据方差分析结果及删去的 F -方差检验值,各因素一次项对螺纹牙底折叠产生影响的显著性排序(由大到小)为进给量 f_a 、滚丝转速 n 和摩擦因数 μ 。 n 、 μ 、 μ^2 的影响均不显著。 n^2 是模型中 F 值最大的项,对螺纹牙底折叠数量的影响最为显著。由模型残差分布概率图可知,数据点较均匀地分布在回归直线的两侧,表明残差满足正态分布,数学模型中自变量和螺纹牙底折叠数量的关系可靠。对模型的联合假设检验与残差分布概率图分析可得本文建立的数学关系回归模型效果理想。

表5 牙底折叠数量模型方差分析表

Tab.5 Analysis of variance for the number of dental base folds model

来源	自由度	Adj SS	Adj MS	F 值	P 值
模型	5	52.552	10.510	19.240	0
f_a	1	3.970	3.970	7.268	0.017
n^2	1	33.099	33.099	60.590	0
f_a^2	1	9.336	9.336	17.090	0.001
$n\mu$	1	4.500	4.500	8.238	0.012
$f_a\mu$	1	4.500	4.500	8.238	0.012
失拟	9	7.648	0.850		
纯误差	5	0	0		

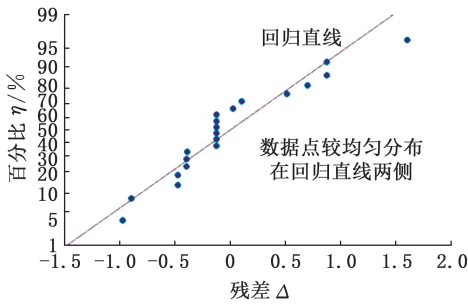


图 10 模型残差分布概率图

Fig.10 Probability plot of model residual distribution

滚丝转速和进给量对牙底折叠数量的主效应如图 11 所示。随着滚丝转速增大,牙底折叠的数量先减小后增大,牙底折叠数量在滚丝转速 20~25 r/min 内取得极小值。滚丝转速较小时,滚丝轮对螺栓坯件的作用时间长,螺栓表面发生明显变形,材料应变的变化速率高,材料硬化效应显著,螺纹牙底材料不易流动,形成折叠。随着滚丝转速的增大,材料硬化降低,螺纹牙底材料流动性提高,不易折叠。滚丝转速继续增大时,螺栓表面在进入滚丝轮作用范围后,螺栓表面与滚丝轮之间的相对滑动更大,“打滑”现象的加剧将造成螺纹牙底折叠大量形成。进给量增大时,螺纹牙底折叠的数量呈现先减小后增大的趋势,进给量为 0.12~0.14 mm/r 时,牙底折叠数量取得极小值。进给量较小时,进给量增大意味着滚压力增大,滚丝轮与螺栓表面的摩擦力增大,减少了螺栓表面进入滚丝轮作用区域后的相对滑动,有效抑制了牙底折叠。随着进给量取值的继续增大,抑制“打滑”的效果进一步增强,但材料应变的变化速率急剧上升,材料硬化显著加强。滚丝轮螺纹牙顶始终与螺栓螺纹牙底保持接触,螺栓螺纹牙底材料因硬化难以向非滚丝轮接触区域变形,大量堆积在滚丝轮接触的边缘区域,在下次滚压后形成螺纹牙底折叠。因此,滚丝转速和进给量对螺纹牙底折叠数量的影响规律都是不同因素交互作

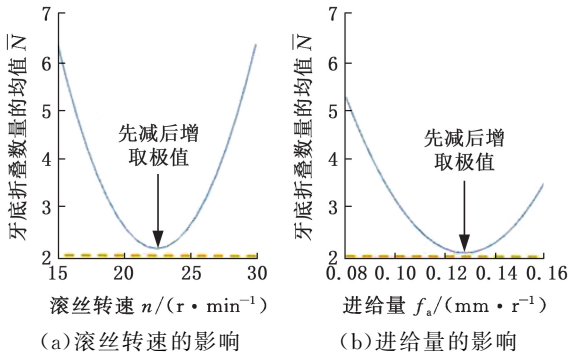


图 11 滚丝工艺参数对牙底折叠数量的主效应图
Fig.11 The main effect diagram of rolling process parameters on the number of tooth base folds

用、相互对抗产生的结果。

摩擦因数与滚丝转速、摩擦因数与进给量的交互作用如图 12 所示。由于模型中的摩擦因数不存在一次项与二次项,而只存在与其他参数的交互项,需要保持交互项参数不变,研究摩擦因数对螺纹牙底折叠数量的影响。滚丝转速一定时,在较低的滚丝转速下,随着摩擦因数增大,牙底折叠的数量增大,因为较低滚丝转速下,滚丝轮与螺栓之间的相对滑动较小,摩擦因数的增大对减少“打滑”没有明显效果,反而会引入较大的摩擦力,

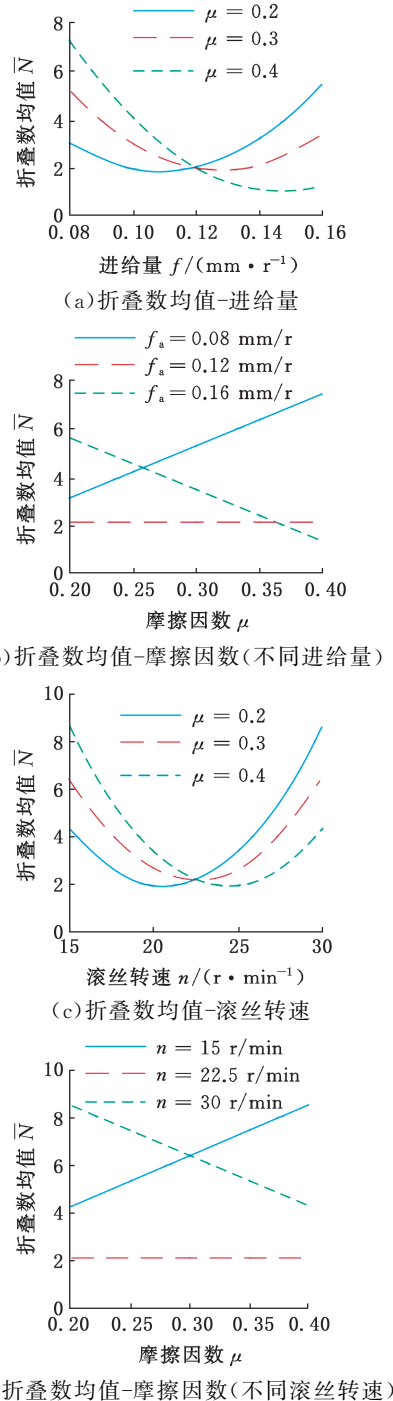


图 12 模型交互项的交互作用图
Fig.12 Interaction diagram of model interaction items

材料塑性下降,易形成牙底折叠;较高的滚丝转速下,随着摩擦因数的增大,摩擦力增大,降低了螺栓表面与滚丝轮之间的相对滑动,减少了牙底折叠的产生。进给量一定时,较低的进给量下,牙底折叠数量随着摩擦因数的增大而增大,原因在于此时的滚压力较低,摩擦因数的增大并不能显著改变螺栓表面与滚丝轮之间的摩擦力,还会导致切向作用力的增大,使材料硬化,诱导牙底折叠产生;较大进给量下,摩擦因数的增大能够有效增大摩擦力,降低螺栓表面与滚丝轮之间的相对滑动,可避免折叠产生。

滚丝转速取较大值可抑制收尾折叠的产生,也能减少螺纹牙底折叠,对减少螺栓整体折叠缺陷的出现有积极的效果。减少收尾折叠需要较小的进给量(约 0.08 mm/r),减少螺纹牙底折叠需要取较大的进给量(约 0.12~0.14 mm/r)。对于这一情况,考虑到完整螺纹牙底根部为更易发生疲劳失效,进给量应适当取较大值。

4 螺纹短收尾滚丝工艺的疲劳试实验

4.1 疲劳试实验参数设置

为研究不同螺纹滚丝工艺对螺纹短收尾处疲劳寿命的影响,对滚丝加工后的螺栓进行疲劳试实验。控制螺栓受到的疲劳载荷循环周次一定,同时使疲劳载荷达到较高的水平,方便观察收尾处的疲劳裂纹或其他疲劳载荷引起的表面破坏特征。为此,设定疲劳载荷循环 1.4×10^5 周次(略大于标准要求的疲劳寿命),将标准实验动载荷提高 70%,得到新的动载荷 3.70 kN,对应的静载荷为 4.52 kN。

为分析滚丝工艺参数对疲劳寿命的影响,参照实际工艺参数,研究滚丝转速和进给量的影响。每个工艺参数取 4 个水平进行实验,共进行 7 组滚压工艺参数组合的实验,具体工艺参数设置如表 6 所示。

表 6 疲劳试实验滚丝工艺参数设置

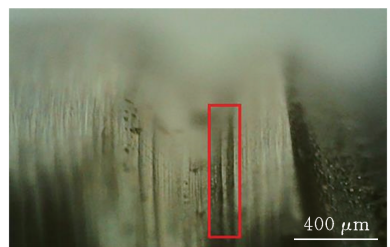
Tab.6 Rolling process parameters of fatigue test

组号	滚丝转速/($r \cdot \min^{-1}$)	进给量/($\text{mm} \cdot r^{-1}$)
1	15	0.10
2	20	0.10
3	25	0.10
4	30	0.10
5	20	0.08
6	20	0.12
7	20	0.14

4.2 滚丝工艺参数对螺纹短收尾疲劳特征的影响

不同滚丝转速下的螺栓螺纹短收尾区域表面显微形貌如图 13 所示,原收尾折叠微缝处形成了

与折叠微缝存在明显差异且有一定深度的较宽裂纹。折叠缺陷本身有较浅的闭合微缝,疲劳试验后,闭合微缝变为较宽较深的裂纹。这是因为折叠处是螺纹收尾区域的应力集中位置,疲劳载荷使得疲劳裂纹在折叠处萌生并发展。滚丝转速为 15 r/min 时,疲劳裂纹几乎分布于整个螺纹收尾的圆周上,裂纹较宽且较深,部分位置还出现了图 13a 所示的两道平行疲劳裂纹,这是不同位置的折叠缺陷各自发展为疲劳裂纹造成的结果。滚丝转速为 20 r/min 时,疲劳裂纹依然在收尾圆周上广泛分布,大多较宽较深,收尾的其他位置还存在少量的微小裂纹。滚丝转速为 25 r/min 时,疲劳裂纹长度、深度均减小。滚丝转速为 30 r/min 时,疲劳裂纹明显变窄,部分疲劳裂纹附近出现点



(a) 滚丝转速 15 r/min



(b) 滚丝转速 20 r/min



(c) 滚丝转速 25 r/min



(d) 滚丝转速 30 r/min

图 13 不同滚丝转速的螺纹短收尾区域表面形貌
Fig.13 Surface morphology of the short end region of thread with different thread rotation speed

状的微小凹坑,呈现螺纹收尾将发生疲劳破坏的特征。

由此可知,随着滚丝转速增大,螺纹短收尾处的疲劳寿命增加。结合滚丝工艺参数对折叠的影响分析发现,滚丝转速取较大值时,收尾折叠往往更难形成,疲劳试验结果验证了这一结论。同时,螺纹收尾折叠缺陷对其疲劳寿命有较大的影响,折叠越多、尺寸越大,收尾的疲劳寿命将越短。

不同进给量下的螺纹短收尾区域表面形貌如图14所示。随着进给量的变化,疲劳裂纹呈现出不同的分布和形态特征。进给量为0.08 mm/r时,螺纹收尾折叠微缝没有明显的形态变化,但收尾圆弧与光杆部分的过渡处出现较为明显的疲劳裂纹。进给量为0.10 mm/r时,折叠微缝处出现具有一定深度和宽度且较长的疲劳裂纹。进给量



(a)进给量 0.08 mm/r



(b)进给量 0.10mm/r



(c)进给量 0.12 mm/r



(d)进给量 0.14 mm/r

图14 不同进给量的螺纹短收尾区域表面形貌

Fig.14 Surface morphology of the short end region of threads with different feed rates

为0.12 mm/r时,疲劳裂纹不由折叠微缝直接扩展形成,而是由折叠微缝向横向扩展形成,形成的裂纹较短、较深。进给量为0.14 mm/r时,在折叠微缝的下方可观察到较长且极窄的疲劳裂纹。进给量较小时,收尾的其他区域出现疲劳裂纹,这表明收尾可能存在折叠的区域疲劳强度足够高或收尾完全没有形成折叠,避免了折叠缺陷造成的螺纹短收尾疲劳寿命降低。随着进给量增大,疲劳裂纹的形态变得更加复杂。滚丝进给量过大将增多收尾折叠缺陷,疲劳试验结果呼应了该结论。

5 结论

1)滚丝工艺参数对螺纹收尾折叠的形成有直接影响。滚丝转速取较大值时,材料塑性增强,可有效减少折叠的形成;进给量取较小值时,可有效减少折叠的形成。对于螺纹短收尾在滚丝前的几何构型,收尾圆弧的半径减小促进折叠缺陷的形成;过渡圆弧半径较小,其变化对收尾折叠的出现没有显著的影响。

2)建立了滚丝工艺参数-牙底折叠数量数学模型,分析了滚丝转速和进给量对牙底折叠数量的影响规律。为控制折叠形成,进行了滚丝参数优选,选择较大的滚丝转速与进给量能得到最优的加工效果。

3)螺纹收尾折叠缺陷对收尾的疲劳特性有较大影响,折叠越多、尺寸越大,收尾处的疲劳寿命越短。随着滚丝转速的增大,螺纹短收尾处的疲劳寿命逐渐增加;随着进给量增大,折叠缺陷增多,螺纹短收尾处的疲劳寿命降低。

参考文献:

- [1] 李蒙, 凤伟中, 关蕾, 等. 航空航天紧固件用钛合金材料综述[J]. 有色金属材料与工程, 2018, 39(4): 49-53.
LI Meng, FENG Weizhong, GUAN Lei, et al. Summary of Titanium Alloy for Fastener in Aerospace[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2018, 39(4):49-53.
- [2] 王肇宇. 国际航空航天紧固件发展现状及趋势研究[J]. 宇航总体技术, 2018, 2(4):1-7.
WANG Zhaoyu. The Study of International Aerospace Fastener Status and Development Trend[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2018, 2(4):1-7.
- [3] LEE B, KARKKAINEN R L, HWANG Y H. Failure Investigation of Counterweight Separation from Aircraft Propeller[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2018, 1(3)8:568-579.

- [4] 乐晨, 徐卫秀, 杨帆, 等. 运载火箭大直径螺栓承受拉弯耦合载荷失效判据研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(1):18-23.
LE Chen, XU Weixiu, YANG Fan, et al. Research on the Failure Criterion of Large Diameter Bolt of Launch Vehicle Subjected to Tensile and Bending Coupled Loads [J]. Missiles and Space Vehicles, 2021(1):18-23.
- [5] 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. Failure Modes and Prevention of Aerospace Threaded Fasteners[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2022(1):39-43.
- [6] ZHANG Shuowen, FAN Shuqin, ZHAO Shengdun, et al. Performance Improvement and Parameter Influence of Thread Shaft by Axial Self-infeed Rolling Process[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 686(1):012004.
- [7] KEDZIORA S. Optimal Design of Cap Screw Thread Runout for Transversal and Axial Loads[J]. Journal of Applied Mechanical Engineering, 2017, 6(1):1000250.
- [8] ZHANG Yuheng, HU Zhiqing, GUO Liming. Study on a New Forming Method—Thread Rolling by Crystal Plasticity Finite Element Simulation[J]. Metals, 2021, 11(3):503.
- [9] 苑铁兵, 田文广, 黄鑫, 等. TC4 钛合金螺纹成型的有限元分析[J]. 机床与液压, 2021, 49(11):163-167.
YUAN Tiebing, TIAN Wenguang, HUANG Xin, et al. Finite Element Analysis of Thread Forming of TC4 Titanium Alloy[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(11):163-167.
- [10] AKTAS S, KISIOGLU Y. Effects of Thread Rolling Processing Parameters on Mechanical Properties and Microstructures of High-strength Bolts [J]. Materials Testing, 2020, 62(10):1017-1024.
- [11] GU Ji, GUO Lin, GAN Bin, et al. Microstructure and Mechanical Properties of an MP159 Alloy Processed by Torsional Deformation and Subsequent Annealing[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 802:140676.
- [12] ABDUL JAWWAD A K, ALSHABATAT N, MAHDI M. The Effects of Joint Design, Bolting Procedure and Load Eccentricity on Fatigue Failure Characteristics of High-strength Steel Bolts [J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 122:105279.
- [13] 朱有利, 侯帅, 杜晓坤, 等. 某无人机螺旋桨联接螺栓断裂失效的多学科分析与改进[J]. 中国表面工程, 2018, 31(4):55-63.
ZHU Youli, HOU Shuai, DU Xiaokun, et al. Multi-disciplinary Analysis and Improvement on Fracture Failure of Propeller's Connection Bolts of a Pilotless Aircraft[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(4):55-63.
- [14] 李瑞锋, 张德远, 程明龙. 高强度大直径内螺纹超声滚压强化技术[J]. 中国表面工程, 2014, 27(2):63-68.
LI Ruifeng, ZHANG Deyuan, CHENG Minglong. High-strength Steel Large-diameter Internal Thread Strengthening by Ultrasonic Burnishing Technology[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(2):63-68.
- [15] 王锴, 张晓斌, 肖琪, 等. PH13-8Mo 不锈钢冷滚压螺纹参数对金相折叠的影响[J]. 现代制造工程, 2022(4):9-14.
WANG Kai, ZHANG Xiaobin, XIAO Qi, et al. Effect of Cold Rolling Thread Parameters on Metallographic Folding of PH13-8Mo Stainless Steel [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(4):9-14.
- [16] 张鹏升, 杜宇波, 李亚东, 等. 内螺纹冷挤压成形过程中金属流动行为研究[J]. 铸造技术, 2016, 37(6):1216-1217.
ZHANG Pengsheng, DU Yubo, LI Yadong, et al. Study on Metal Flow Behavior in Cold Extrusion Forming of Internal Thread[J]. Foundry Technology, 2016, 37(6):1216-1217.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 管螺纹收尾、肩距、退刀槽和倒角:GB/T 32535—2016[S]. 北京:中国标准出版社, 2016:2. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Runouts, undercuts and Chamfers for Pipe Threads; GB/T 32535—2016[S]. Beijing:Standards Press of China, 2016:2.

(编辑 张洋)

作者简介:张振峰,男,1996年生,工程师。研究方向为紧固件设计与制造技术。白清顺*(通信作者),男,1974年生,教授、博士研究生导师。研究方向为超精密加工技术、精密机械装备设计,发表论文200余篇。E-mail:1989330846@qq.com。

本文引用格式:

张振峰,许学石,林忠亮,等.短收尾螺栓的折叠缺陷工艺实验及疲劳特性[J].中国机械工程,2025,36(1):29-37.

ZHANG Zhenfeng, XU Xueshi, LIN Zhongliang, et al. Processing Experiments of Folding Defects and Fatigue Property in Short End Bolts[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(1):29-37.