

航空 Inconel 718 高强紧固件螺纹温滚压成形技术

Research on Warm Rolling Process of Thread of Inconel 718 High Strength Fastener

中航工业北京航空制造工程研究所 刘风雷 黄宏
中国人民解放军驻沈阳飞机工业(集团)有限公司军事代表室 李 察

[摘要] 高性能航空紧固件都要求在热处理后进行螺纹滚压,以保证螺纹具有对疲劳寿命有利的压应力状态。高强紧固件螺纹在冷滚压成形过程中易产生裂纹、折迭等缺陷。此外,工具寿命较低。主要论述了高强紧固件螺纹成形的技术难点,提出了采用温滚压成形工艺技术方法。通过温滚压温度参数试验、试验件的金相和性能试验,并与冷滚件进行了对比,温滚压成形在提高工件质量和滚压工具寿命方面具有无比的优越性。

关键词: 高强紧固件 螺纹 温滚压

[ABSTRACT] The thread of high strength aerospace fasteners should be rolled after the heat treatment, this process keeps the thread having the press stress state benefiting to fatigue life. The high strength fasteners with cold rolling are easy to produce defects such as cracks and en-folds. In addition, toll's life is low. The thread forming difficulties of the high strength fasteners are discussed, warm rolling technology method is put forward. Through warm rolling temperature parameters, metallurgical testing of test pieces and performance tests, and compared with cold rolling pieces, warm rolling in improving the quality of pieces and life of the toll has incomparable superiority.

Keywords: High strength fastener Thread Warm rolling

随着飞机整体性能的提升,先进飞机对减重、寿命、可靠性等均提出了较高的指标要求,在主承力结构的连接中需要采用高强度、高比强紧固件。用于制造航空高强紧固件的材料有强度等级为 1100MPa 以上的钛合金和高温合金,高温合金使用较多的材料为 Inconel718 材料,该合金属于镍基高温合金,国产牌号为 GH4169,在 600℃ 高温环境下具有良好的机械性能,经时效热处理后强度等级可达到 1500MPa 以上,其强度等级要高于钛合金,用该种材料制造的螺栓可用于飞机关键连接头的连接需要。

为满足飞机连接结构强度需要和发挥紧固件材料的性能,高强航空紧固件均采用强化热处理实现强度目

标,进而对紧固件提出了较高的疲劳寿命要求,为满足紧固件的疲劳寿命要求,紧固件的螺纹成形均需在热处理后进行。热处理后的紧固件毛坯,其强度高、硬度高、塑性差,对于 Inconel718 材料的紧固件,热处理后其强度超过 1500MPa,硬度达到 HRC43~48,延伸率仅有 8%~14%。而由于该材料在加工中存在强烈的加工硬化现象,使得加工存在以下问题:一是滚丝轮寿命较短,滚压数件或数十件紧固件螺纹滚丝轮产生崩牙;二是滚压件很容易产生裂纹、折迭超标等问题。本文从螺纹滚压的原理分析入手,分析 Inconel718 高强度螺栓螺纹成形中产生缺陷的原因,提出了采用温滚压方法,以期解决该种材料在滚压成形螺纹时滚丝轮产生崩牙、紧固件螺纹产生裂纹、折迭超标的问题,通过对比冷滚压螺纹螺栓和温滚压螺纹螺栓的金相组织和流线,以及疲劳强度等,获得温滚压螺纹能够提高工件质量的效果。

1 紧固件螺纹成形过程分析

紧固件的螺纹滚压成形是从毛坯的滚压开始的,滚丝轮的牙顶压入毛坯中,如图 1 所示,受到挤压的材料向滚丝轮螺纹牙顶两侧流动,随着滚丝轮压入深度的增加,工件螺纹外径增加,滚丝轮牙顶两侧的金属流动速度最快,牙谷中间的流动速度最慢^[1],当滚压到一定程度,两

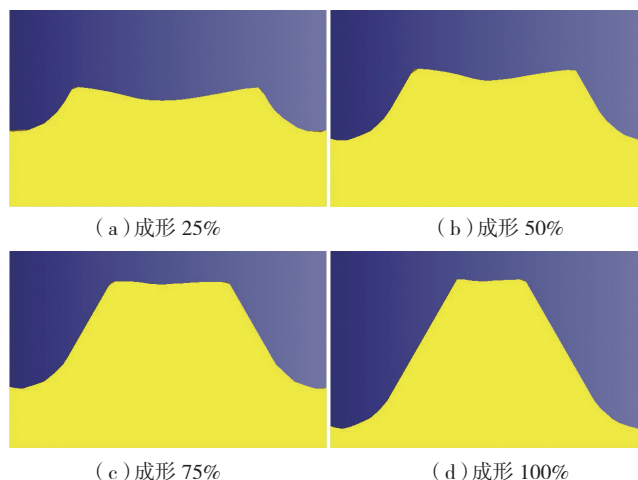


图1 螺纹滚压形成过程

Fig.1 Process of thread rolling

侧的金属将滚丝轮牙底整个充满,紧固件形成外螺纹。

在滚压过程中,金属材料流速不一致的原因是材料向受力最小路径最短的方向流动,在滚压材料的流动中,滚丝轮牙顶两侧的金属受阻最小,因而流动速度最快,而随着滚压的进行,两侧的抬升阻力增大,材料开始从中间部位向上提升,但总体上由于中间部位路径最长,材料变形必须克服较大的阻力,因此中间部位的金属抬升阻力最大、速度最慢,如果材料塑性很好,中间部位的材料跟进变形相对较容易,故形成满螺纹后,其顶部的折迭较小,可满足标准要求。对于热处理后的 Inconel718 材料,由于其强度较高、塑性较差,再加上在滚压中存在较大的加工硬化,导致中部的抬升速度较低,当螺距变大时,这种现象尤为明显,金属更难从中间向外抬升,致使过多的金属从两侧抬升,最终产生倒流形成超过标准的折迭,另外较强的加工硬化程度还会使螺纹在牙底和端面螺纹的表面产生过度滚压,当表面应力超过材料抗拉强度极限时就会产生裂纹。Inconel718 螺栓冷滚压螺纹会使滚丝轮产生崩牙(图2),导致滚轮寿命很低。



图2 滚丝轮崩牙
Fig.2 Rolling wheel crack

2 螺纹滚压问题的解决方法

高强度材料的紧固件在冷滚螺纹过程中,由于其材料强度高、塑性差、加工硬化现象严重等原因,易产生裂纹和折迭超标等缺陷,使采用冷滚压螺纹的方法制造加工稳定的螺纹变得很困难。要解决这个问题,就要使毛坯具有良好的加工塑性,即提高材料的塑性、降低变形抗力,而采用加热成型的方法,即通过加热使金属软化,从而实现提高其塑性的效果。对于加热成型而言,温度是一个关键,应该将温度提高,从而使塑性提高、强度和硬度下降,但过高的温度会影响固溶时效强化效果,因此加热温度必须控制在热处理时效温度以下范围内的某一个温度。应根据材料的热力学曲线和热处理制度要求选择并通过试验确定加热温度, Inconel718 材料的热力学曲线^[2]见图3。

由图3中可看出, Inconel718 螺栓温滚压螺纹的温

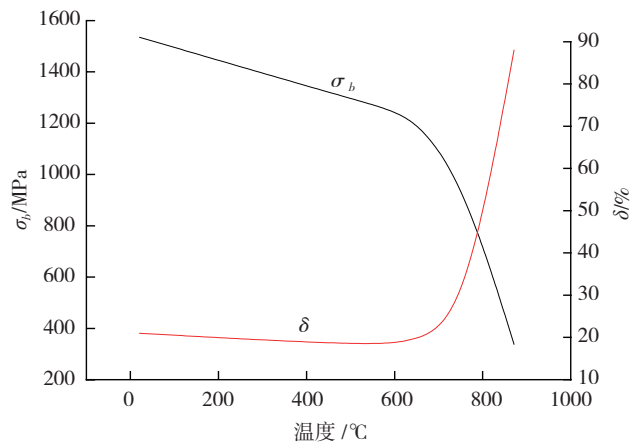


图3 Inconel718材料在不同温度下的机械性能
Fig.3 Mechanical properties of Inconel718 material with different temperatures

度应选在塑性—温度曲线和强度—温度曲线的拐点附近,在 400℃时材料强度明显下降,塑性提高,而且温滚螺纹的温度应在时效温度以下, Inconel718 螺栓的时效温度为 600℃,此时其延伸率和断缩率都略有提高,因此对于 Inconel718 螺栓的温滚压螺纹温度范围应选在 400~600℃之间。加热后可使螺纹成形过程中产生的加工硬化程度变小,使螺纹中部材料的抬升速度加快,可有效减小折迭的深度,同时减小了裂纹产生的可能。加工硬化程度减小了,也使滚压工具受力减小,从而可提高滚压工具的使用寿命。

3 温滚试验件性能试验

高强度紧固件温滚压螺纹要经历加热过程,要确定其能否实现既满足产品性能、质量要求,又使滚压工具有较高的使用寿命,除应进行加工参数研究外,还需进行性能的比较研究,以确定最佳参数及工艺。选取 MJ8 × 1 规格 Inconel718 螺栓进行抗拉性能、金相、高倍显微组织、疲劳性能、双剪力对比试验。

抗拉性能试验依据 GJB715.23 的要求进行,对不同温度下的滚压成形的螺纹进行抗拉性能检测,其对比结

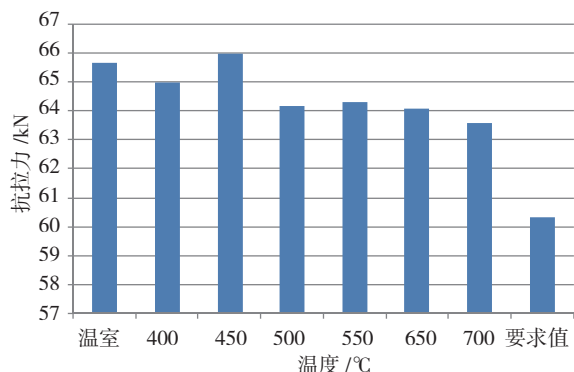


图4 不同温度下滚压成形螺纹的抗拉力
Fig.4 Tensile strength of thread rolling with different temperatures

果见图4。由图可见,随着加热温度的升高,螺纹的抗拉力呈现先增大后减小的趋势,在450℃左右进行螺纹滚压时,所得的螺纹的抗拉力最高。

采用与冷滚压对比的方法,检验温滚压螺纹的效果。本试验采用冷滚压与温滚压螺纹进行金相对比检查和高倍显微组织对比检查,通过检查发现,部分冷滚压螺纹紧固件存在裂纹、折迭深,而温滚压螺纹紧固件均无裂纹,折迭深度小,有的甚至无折迭,金相见图5所示。通过高倍显微组织检查可以看出,温滚压与冷滚压螺纹均有完整的流线,而温滚压的紧固件螺纹显微组织具有更密实的组织形态,如图6所示。

由图4可知,在450℃温滚压具有较高的抗拉强度,因此采用450℃进行温滚压螺纹,依据GJB715.30的要求进行疲劳试验,通过疲劳试验数据可知温滚压螺纹的紧固件具有更高的抗疲劳强度,图7为温滚压与冷滚压螺纹疲劳寿命对比图。依据GJB715.26的要求进行双剪力试验,MJ8×1 Inconel718螺栓的双剪力要求值为85.5kN,试验值为92kN以上,均大于要求值,温滚压螺纹后双剪力符合标准要求,说明温滚压螺纹工艺没有影响螺栓杆部剪切强度。通过滚压工具寿命统计,温滚压螺纹可比冷滚压螺纹使滚压工具寿命提高50~100倍,且螺栓质量均满足要求。

温滚螺纹可解决冷滚螺纹产生的问题,并提高滚压螺纹质量的原因主要有以下3条:一是温滚螺纹可使材料的塑性提高,增加了材料流动填充能力;二是由于加热使冷作硬化得到减缓,间接地增加了材料流动能力;三是冷滚压时,加工硬化主要在表面比较强,与芯部有较大差别,产生的应力集中严重,而通过加热进行滚压螺纹,在硬化与软化的共同作用下,使硬化层更深、更合理,从而提高了抗载能力。

4 结论

温滚压螺纹的关键在于温度的选取,针对紧固件材料的塑性和强度关系,以及热处理制度,可以确定温滚压螺纹的温度范围,进一步通过力学性能试验来优化加热温度。通过对Inconel718材料高强紧固件螺纹冷滚压问题的分析,采用高强紧固件螺纹温滚压成形工艺技

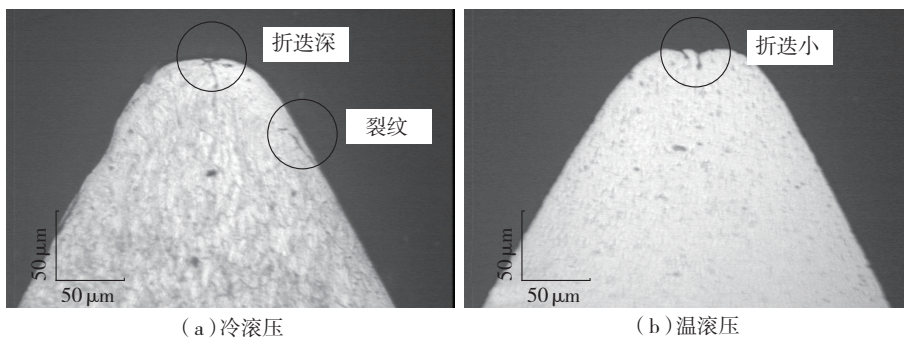


图5 冷滚压与温滚压螺纹金相对比

Fig.5 Comparison of metallographic of thread between cold rolling and warm rolling

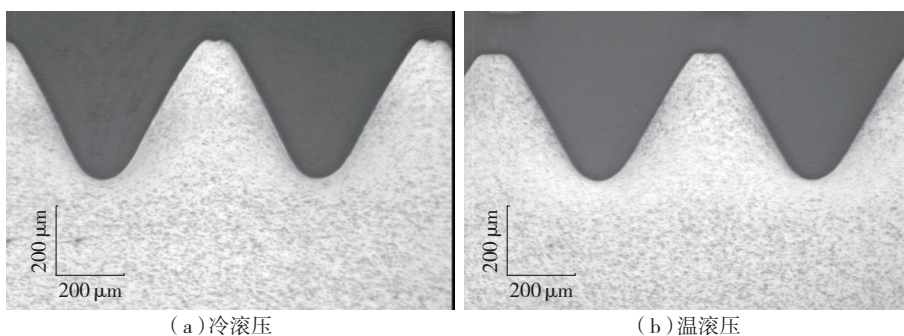


图6 冷滚压与温滚压螺纹显微组织对比

Fig.6 Comparison of micro structure of thread between cold rolling and warm rolling

术,对MJ8×1的十二角头螺栓的温滚压试验件与冷滚压试验件在金相组织和螺纹流线、显微组织上进行了对比研究。通过抗拉力、疲劳试验、双剪力试验验证了温滚压螺纹可保证产品的力学性能,解决了冷滚压加工中存在的滚丝轮崩牙和紧固件螺纹折迭超标的问题,同时滚丝轮使用寿命得到明显提高,为高强度螺纹紧固件批生产提供了技术和质量保证。

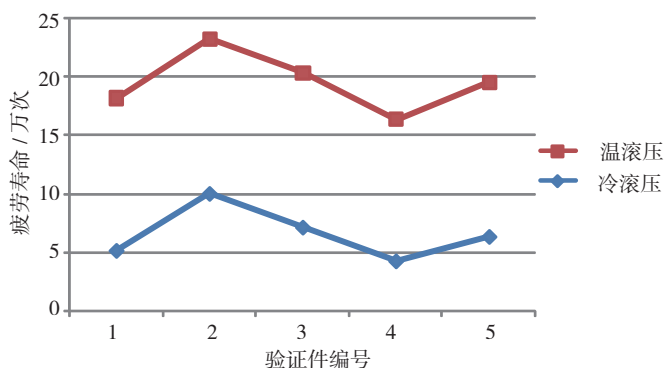


图7 疲劳寿命对比

Fig.7 Comparison of fatigue life

参考文献

- [1] 王秀伦. 螺纹滚压加工技术. 北京: 中国铁道出版社, 1990: 1-8.
- [2] 冶军. 美国镍基高温合金. 北京: 科学出版社, 1978.

(责编 亿霖)