

Inconel 718 十二角头螺栓制造工艺技术研究

Study on Manufacturing Technology for Inconel 718 Twelve-Point Bolt

中航工业北京航空制造工程研究所 王玉凤 刘风雷 庄宝潼

[摘要] 介绍了 Inconel 718 十二角头螺栓的材料和结构特点,分析了关键制造加工技术,如热镦锻、热处理、滚压螺纹等,确定了合理的工艺参数,并对研制件的尺寸和性能进行了评估,结果表明工艺技术设计合理。

关键词: Inconel 718 十二角头螺栓 热镦锻 热处理 温滚螺纹

[ABSTRACT] The material and structure features of Inconel 718 twelve-point bolt are introduced, and key manufacturing technologies, such as hot heading, heat treatment, warm rolling, etc. are analyzed, and optimal technological parameters are obtained. Dimensional inspection and qualification tests are carried out. The results show that technology designing is rational.

Keywords: Inconel 718 Twelve-point bolt Hot heading Heat treatment Warm rolling

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.10.079

高温合金是航空、航天和核工业中重要的结构材料,因其优异的高温力学性能,被广泛用于制作航空发动机的各类部件^[1]。随着航空发动机技术的不断进步,高温合金得到了迅速发展。镍基高温合金 Inconel 718 是一种镍铁基变形高温合金,具有很高的强度、韧性、耐疲劳性能及良好的综合性能,尤其是在 650℃ 以下,其力学性能具有很好的稳定性^[2-3]。Inconel 718 合金是目前航空发动机上应用最为广泛的高温合金,主要应用于发动机的转动部件、机匣、紧固件和其他零件。Inconel

718 十二角头螺栓是发动机上应用较为普遍的紧固件,也是高温高强紧固件的代表性产品。

国外对航空、航天领域有关的高温合金材料,尤其是 Inconel 718 合金的工艺和应用进行了严格的保密,因此其材料特性和制造工艺需要自行研究。强度等级为 1515 MPa 的 Inconel 718 合金在原材料制备时经过特殊处理,加工难度最大。Inconel 718 合金的合金化程度较高,导致其热加工性能恶化,热变形区域缩小,因此加大了热成形难度。同时,由于材料的强度高、塑性低,热处理后 Inconel 718 材料抗拉强度可达 1515MPa 以上,硬度为 HRC43~48,使得后续的制造加工困难。本文针对 Inconel 718 十二角头螺栓的材料特性和结构特点,讨论螺栓的关键加工技术和制造工艺,确定最优工艺参数,以实现该产品的批量加工。

1 产品特点

1.1 螺栓结构及性能要求

十二角头螺栓的结构如图 1 所示,其中头部采用热镦锻的方式加工,杆部采用磨削的方式加工,螺纹部位采用滚压的方式加工。螺栓头部形状复杂,具有十二角扳拧结构,在扳拧的时候受力充分且扳手不易滑脱;在十二角头底部带有法兰台,作为安装后的承力部位。本文要研究的螺栓加工精度要求较高,以 -4 规格产品为例来阐述螺栓的制造技术,其杆部直径为 $\phi 6.34\text{mm}$,性能要求如表 1 所示。

1.2 材料特性及成形难点

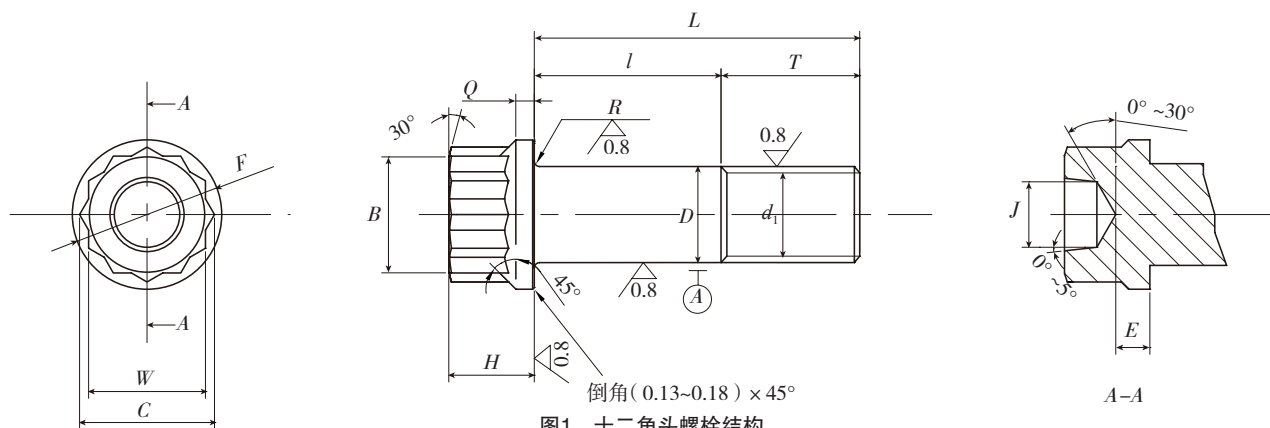


图1 十二角头螺栓结构

Fig.1 Structure of twelve-point bolt

表1 Inconel 718十二角头螺栓性能要求

产品规格	抗拉力 /kN	双剪力 /kN	疲劳性能	高温拉伸力 /kN	应力破坏
-4	39.54~45.83	≥ 53.96	单件疲劳循环次数不低于 65000 次, 超过 130000 次按 130000 次计算	≥ 31.64	在 22.14kN 应力下, 保持 23h 不断裂

Inconel 718 高温合金具有以下不同于一般金属材料成形特点^[4]。

(1) 塑性低。较高的合金化程度导致高温合金的工艺塑性较低, 其工艺性对变形速度和应力状态很敏感。

(2) 变形抗力大。Inconel 718 高温合金的成分复杂, 在变形温度下具有较高的变形抗力和硬化倾向。

(3) 热加工温度范围窄。Inconel 718 高温合金为面心立方结构, 层错能较低, 动态再结晶是热加工过程中的重要软化机制, 也是细化晶粒的主要途径之一。为了得到均匀的晶粒组织, 合金的热加工应在再结晶温度以上进行, Inconel 718 高温合金再结晶温度较高, 约为 969℃。而较多的合金元素的加入使合金的熔点偏低, 约为 1219℃。十二角螺栓头部成形时变形量较大, 需要有足够的塑性, 因此, 合金可进行的热加工温度范围比较小。由于热加工范围窄, 温度控制较难, 温度过高会产生过热或过烧等缺陷。

2 加工工艺

Inconel 718 十二角头螺栓采用棒材加工, 材料满足 AMS5662 标准的要求。主要制造工艺路线为: 下料→热锻→热处理→磨削→车加工→滚压螺纹→圆角强化→标记→表面处理→包装, 其中热锻、热处理、滚压螺纹是关键工艺过程, 下面将针对这几个工艺进行探讨。

2.1 热锻

十二角头螺栓具有头部形状复杂、变形量大、难以成形等特点。螺栓头部的十二角扳拧部位下部为法兰面, 金属在锻成形时趋向于向阻力最小的位置流动, 因此在成形时不易积聚在型腔内部, 而是向法兰面外的飞边处堆积, 使得十二个棱边填充困难, 因此锻时的体积分配和模具型腔的设计很重要。Inconel 718 合金是典型的工艺敏感型合金, 锻造温度区间狭窄, 其热加工工艺, 尤其是锻造温度的控制, 对锻件质量起着至关重要的作用^[5]。加热温度过低, 金属流动性不够, 十二个棱边填充不满; 加热温度过高, 金属容易产生过热、过烧现象, 螺栓头部会产生热裂纹, 因此关键是解决模具设计和温度控制问题。

(1) 模具及锻锻方式。

由于十二角头螺栓强度较高, 使用的 Inconel 718 棒

材是高强度拉拔材料, 因此只能采用单个加热锻锻方式。根据锻锻比, 对锻锻模具进行两次变形的体积分配, 确定初冲和二冲模具型腔的形状。坯料在加热后, 在初冲型腔里初步成形,

在二冲型腔里得到最终的形状。在高温状态下, Inconel 718 高温合金材料的粘性很大, 容易粘在模具上, 影响锻锻件的脱模, 并且在成型的头部表面留下划痕, 影响表面质量, 因此在锻锻前要对坯料进行润滑处理, 使用的润滑剂在高温状态下应不挥发。

(2) 锻锻温度。

Inconel 718 高温合金的强度、塑性与温度关系如图 2 所示。可以看出, 900℃时材料塑性才有较明显的上升, 直到 1100℃时材料仍有较好的塑性。结合 1.2 节中所述的温度范围, 以 50℃为区间, 将加热温度划为 A、B、C、D 4 个温度带, 分别进行锻锻工艺试验, 根据试验结果来确定最优的锻锻温度。试验结果如表 2 所示。

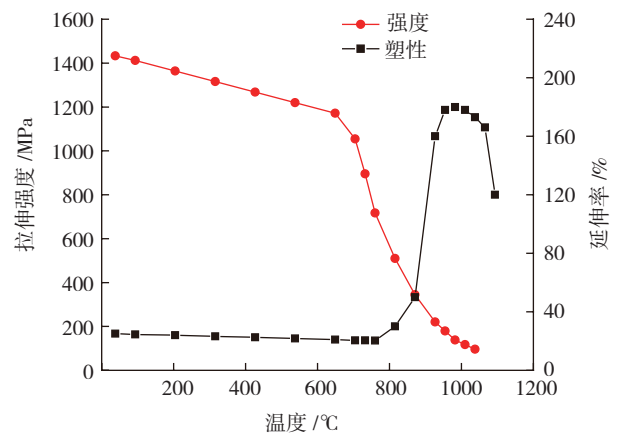


图2 Inconel 718材料强度、塑性随温度的变化图

Fig.2 Variations of inconel 718 strength and plasticity with temperature

由以上各温度带的锻制件可以看出: 螺栓在 C 温度带锻锻时, 头部成形充分, 产生的少量飞边没有造成材料过多浪费, 可以确定为最优锻锻温度范围。同时根据锻锻试验结果, 可以看到螺栓头部材料先是在法兰面飞边处堆积成形, 其次再填充十二角棱边, 这与前面的理论分析是相吻合的。

2.2 热处理

十二角头螺栓采用的是 Inconel 718 高温合金棒材, 材料的原始状态为固溶退火状态, 并进行了加工硬化。产品要达到最终性能, 需要对锻锻件进行热处理, 使制件得到时效强化, 达到沉淀硬化状态, 以获得高强度及良好的塑性等综合能力。为了获得最佳热处理制度, 采

表2 不同温度带的锻制件

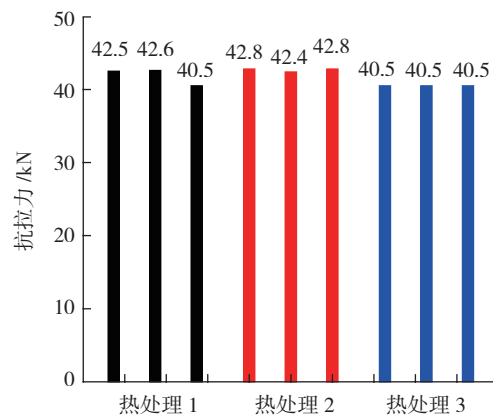
温度带	产品锻锻图	成型质量分析
A		头部的变形很不充分,12个棱边和下锥面基本上没有成形
B		十二角棱边初步成形,下锥面充分成形
C		十二角头棱边和下锥面充分成形,有少量飞边
D		头部充分成形,但由于温度过高,产生热裂

用以下3种热处理方案:(1)690℃等温退火;(2)718℃等温退火;(3)788℃水淬。通过对比3种热处理方案下试验件的性能,得出最优的热处理制度(图3)。

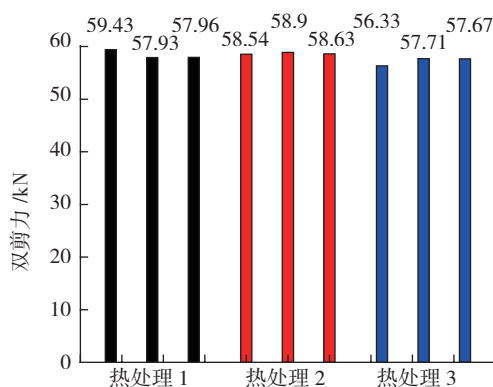
通过以上试验对比可以看出,对于抗拉性能来说,热处理制度2的螺栓为3种热处理状态中抗拉值最大的,且波动性较小,一致性也是最好的;对于双剪性能来说,热处理制度2的螺栓双剪数值不是最大的,但是也远高于要求值,且波动控制在0.36kN的范围内,一致性最好;此外3种热处理制度的螺栓疲劳寿命一致,在规定载荷状态下都达到了130000次。综上所述,热处理制度2的螺栓3种力学性能最优,为该拉拔应力状态下的最优热处理制度。

2.3 滚压螺纹

Inconel 718 高温合金的强度要求达到1515MPa以上,其硬度较高,可达到HRC43~48,塑性较差,材料产生的加工硬化严重。如果进行冷滚压加工,使得加工存在以下问题:一是滚丝轮寿命较短,滚压件或数十件螺纹毛坯后滚丝轮产生崩齿的问题(见图4);二是滚压件很容易产生裂纹、折叠超标等缺陷(如图5所示),不适合批量生产,同时也不能满足产品的质量要求。针对以上问题,决定采用温滚压的方式加工螺纹。材料在加热以后强度降低,加工硬化现象缓解,流动性增强,易于滚压成形,可以有效解决滚丝轮崩齿和螺纹质量问题。



(a) 抗拉力对比



(b) 双剪力对比

图3 热处理试验对比

Fig.3 Comparisons of heat treatment tests



图4 滚丝轮崩齿

Fig.4 Damage of thread rolling wheel

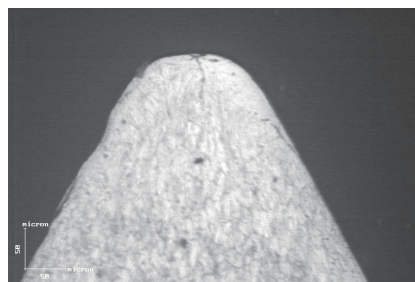


图5 螺纹裂纹

Fig.5 Cracking on thread

表3 试验结果 (平均值)

产品规格	抗拉力 /kN		双剪力 /kN		疲劳性能		高温拉伸力 /kN		应力破坏	
	要求值	实测值	要求值	实测值	要求值	实测值	要求值	实测值	要求值	实测值
-4	39.54~45.83	42.67	≥ 53.96	58.69	≥ 6.5 万次	13 万次	≥ 31.64	34.92	在 22.14kN 应力下,保持 23h 不断裂	23h

温滚螺纹工艺中,滚压温度、滚压力、滚压时间等滚压参数以及螺纹毛坯尺寸是制造过程控制的关键,需要通过工艺试验来确定。

螺栓在温滚压后,通过千分尺、轮廓测量仪和螺纹通止规来检验螺纹尺寸,通过金相分析确认螺纹流线是否合格。螺纹在温滚压冷却后,通常会产生 0.02~0.04mm 的回弹,这是不同于冷滚需要额外控制的地方,因此在温滚压的时候要进行尺寸补偿。

3 研制试件评估

3.1 外观尺寸和冶金特性

最终加工完成的 Inconel 718 十二角头螺栓如图 6 所示。产品标准和规范中要求螺栓尺寸和表面粗糙度应符合图纸要求,表面不应有裂纹、毛刺、刮伤、凹痕和其他机械损伤;头部和螺纹晶粒流线连续,微观组织没有裂纹和夹杂,螺纹牙底和侧面无折叠及发纹等缺陷。经检测,研制件尺寸和表面质量合格,冶金特性也满足技术规范的要求。

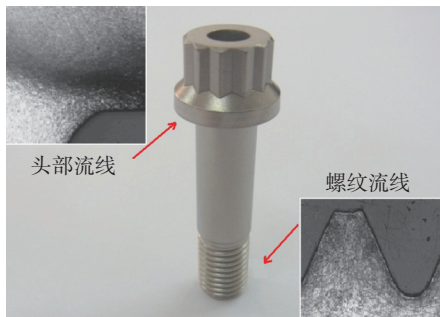


图6 研制件成品
Fig.6 Finished product

3.2 机械性能试验

根据产品规范的要求, Inconel 718 十二角头螺栓的试验内容包括:拉伸试验、双剪试验、疲劳试验、高温拉伸、应力破坏。试验方法依据 GJB 715,为试验机配备专用的试验夹具进行检测,试验数据见表 3。结果表明,螺栓的机械性能均符合规范的要求。

4 结论

本文介绍了 Inconel 718 十二角头螺栓的材料及结

构特点,针对热锻、热处理和滚压螺纹等工艺重点和难点进行了分析,通过工艺试验得到以下结论。

(1) 热锻的关键是模具设计和温度的控制,采用一模两冲的单个锻锻方式,温度控制在 C 温度段,可以锻出合格的头部形状,并且内部组织无裂纹、发纹等缺陷;

(2) 通过 3 种热处理方案对比,718℃ 等温退火热处理制度下的螺栓具有最优的综合性能,确定其为最优热处理制度;

(3) 采用温滚压的方式加工螺纹,解决了滚丝轮崩齿和螺纹裂纹的问题,通过工艺试验确定了合理的滚压工艺参数。

参考文献

[1] 王长瑞. GH4169 高温合金超塑成型 + 连接组合技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
 [2] 李森泉, 王小津, 苏少博, 等. GH4169 合金塑性变形行为及加工图. 中国机械工程, 2008, 19(15):1867-1870.
 [3] 齐欢. Inconel 718(GH4169) 高温合金的发展与工艺. 材料工程, 2012(8):92-100.
 [4] 隋凤利. GH4169 合金热连轧过程的数值模拟与工艺研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2009.
 [5] 吕旭东, 邓群, 杜金辉, 等. GH4169 合金盘件热模锻工艺优化. 钢铁研究学报, 2011, 23(2):158-161. (责编 谷雨)

(上接第 73 页)

[2] 陈建岭. 钛合金高速铣削加工机理及铣削参数优化研究 [D]. 济南: 山东大学, 2009.
 [3] Yuan Y F, Chen W Y, Gao L S. Study on tool rapid selection based on the initial wear. Chinese Journal of Aeronautics, 2010 23(3): 386-392.
 [4] Zhang H, Chen W Y. Rapid selection of milling tools based on the initial wear. Advanced Materials Research, 2010, 188:416-422.
 [5] 李勋. 难加工材料加工性评价及立轴端面磨削实验研究. 北京: 北京航空航天大学, 2010.
 [6] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. MATLAB 遗传算法工具箱及应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
 [7] Zain A M, Haron H, Sharif S. Application of GA to optimize cutting condition for minimizing surface roughness in end milling machining process. Expert Systems with Applications, 2010, 37(6):4650-4659.
 [8] 李树侠, 朴松花. 钛合金材料的机械加工工艺综述. 飞航导弹, 2007(7): 57-61. (责编 谷雨)