

Inconel 718 合金螺栓滚压螺纹流线的检测方法

张 俊, 刘卫东, 龚晓宁

(中国航发成都发动机有限公司 计量理化检测中心, 成都 610500)

摘 要: Inconel 718 合金螺栓为航空发动机中常用的高强度螺栓, 通常采用滚压螺纹成型工艺。螺栓及螺纹的流线直接影响螺栓的质量和服役寿命, 所以流线检测尤为重要。通过试验, 发现将 Inconel 718 合金螺栓进行二次固溶+时效处理可使其晶粒长大和析出 δ 相 (Ni_3Nb), 然后在 $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ 的溶液中浸蚀 1 h, 可以清晰显示出 Inconel 718 合金螺栓和螺纹的流线。

关键词: Inconel 718 合金; 螺栓; 滚压螺纹; 流线检测

中图分类号: TG115.9

文献标志码: A

文章编号: 1001-4012(2019)09-0626-04

A Detection Method of Rolled Thread Streamline of Inconel 718 Alloy Bolts

ZHANG Jun, LIU Weidong, GONG Xiaoning

(Metrology and Phys&Chem Testing Center, AECC Chengdu Engine Co., Ltd., Chengdu 610500, China)

Abstract: Inconel 718 alloy bolts are a high strength bolts commonly used in the aeroengine, and they usually adopt rolled thread technology. The streamline of bolts and threads directly affects the quality and service life of the bolts, so streamline detection is particularly important. Through test, it is found that grain growth and δ phase (Ni_3Nb) precipitation can be achieved by secondary solution and aging treatment of Inconel 718 alloy bolts. And then the streamline of Inconel 718 alloy bolts and threads can be clearly displayed by etching in $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ solution for 1 h.

Keywords: Inconel 718 alloy; bolt; rolled thread; streamline detection

Inconel 718 合金是含铌、钼元素的沉淀硬化型镍铬铁高温合金, 其具有优良的力学性能、耐腐蚀性能以及焊接性能等优点, 广泛应用于航空航天等领域^[1-3]。用 Inconel 718 合金制造的螺栓是航空发动机、压力容器以及核岛产品中常用的高强度紧固件^[4-6]。加工螺纹的工艺主要有金属切削法(如车削、铣削、磨削等)和塑性成型法(如滚压、挤压等), 而滚压螺纹为 Inconel 718 合金锻造螺栓在成型过程中的关键加工技术之一^[7-8]。螺纹滚压是用成型滚压模具通过塑性变形而获得螺纹的加工方法, 此方法使材料组织发生转移, 但并未破坏金属的纤维结构, 同时细化了材料晶粒, 提高了螺纹的硬度和强度。

在航空发动机领域中, 对螺栓的可靠性及寿命提出了更高要求, 其中检验螺栓合格与否的方法之一就是检测螺栓及螺纹的流线。流线是金属在成形过程

中杂质、化合物、偏析、晶界等沿着主伸长方向形成的一种组织形貌^[9]。在工程应用中, 锻件的流线分布不合理, 如流线出现切断、涡流、穿流以及流线露头时, 将导致构件的力学性能下降, 缩短构件服役寿命; 当锻件的流线分布合理时, 可提高锻件的强度和抗疲劳性能^[10-12], 所以检测锻件的流线是否正常就尤为重要。Inconel 718 合金的合金化程度高, 有别于其他合金结构钢, 采用传统的流线检测方法不能清晰地显示其流线。笔者通过试验摸索, 找到了一种适合检测 Inconel 718 合金锻造螺栓流线的方法。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

取同批次 Inconel 718 合金螺栓成品 9 件随机等分为 3 组, 并编号为 A、B、C 组, 将螺栓纵向剖开。螺栓成品的热处理工艺为固溶+时效(固溶: 954~982 °C 保温 1 h, 水冷; 时效: 718 °C 保温 8 h, 炉冷至 621 °C 保温 8 h, 空冷)。

1.2 试验方法

对 3 组纵向剖开的螺栓试样分别采用以下 3 种

收稿日期: 2018-09-14

作者简介: 张 俊(1991—), 男, 硕士, 主要从事理化检验和材料研究工作, 13568828354@163.com

不同的方案进行流线显示:

(1) 方案一:采用常见的高温合金低倍组织酸浸溶液(150 g 硫酸铜+35 mL 硫酸+500 mL 盐酸),将 A 组试样浸于溶液中进行浸蚀,试样的试验面朝上,浸蚀 20~60 min 后用清水冲洗干净,再使用吹风机吹干。

(2) 方案二:先后采用不同体积分数(30%~100%)的王水对 B 组试样进行浸蚀,浸蚀 20~60 min 后用清水冲洗干净,再使用吹风机吹干。

(3) 方案三:针对 Inconel 718 合金的特点,其流线主要是由合金的晶界和 δ 相(Ni_3Nb)构成,所以使晶粒粗化并增加 δ 相(Ni_3Nb)和基体的反差,即可使流线更易显示。根据这一理论,将 C 组试样进行二次固溶+时效处理(1 050 °C 保温 1 h,空冷;900 °C 保温 1 h,空冷),使晶粒长大和 δ 相析出。热处理后将 C 组试样磨光,并用吹风机吹干,浸入 HNO_3+HF 溶液约 1 h,待抛光面颜色变成暗黑色取出,重新清洗干净,在抛光布上轻微抛光并去除表面黑色膜,再次清洗并吹干。

在 Leica DM6000M 型光学显微镜下观察 Inconel 718 合金螺栓及滚压螺纹的流线。

2 试验结果与讨论

2.1 试验结果

采用方案一所获得的螺栓纵剖面试样经观察发现只有螺栓头部有流线显示,如图 1a)所示,而螺纹

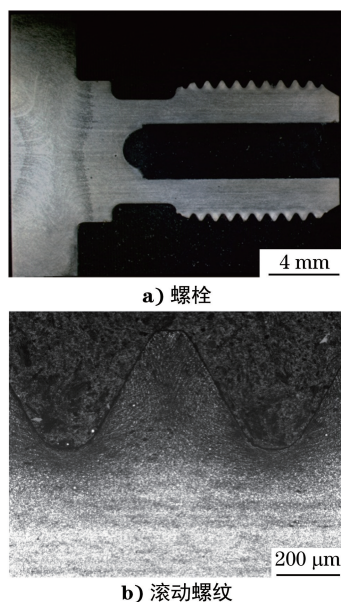


图 1 A 组试样流线形貌(方案一)

Fig.1 Morphology of streamline of group A specimen (scheme 1):
a) the bolt; b) the rolled threads

部位并没有流线显示,如图 1b)所示;采用方案二所获得的螺栓及其螺纹流线的纵剖面试样经观察只发现一片坑坑洼洼的过腐蚀形貌,没有任何组织显示,如图 2 所示;采用方案三所获得的螺栓及其螺纹流线的纵剖面试样经观察发现效果良好,螺栓头部及螺纹的流线细节都能清晰显示,且都沿着螺栓轮廓分布,均为正常的流线,如图 3 所示。

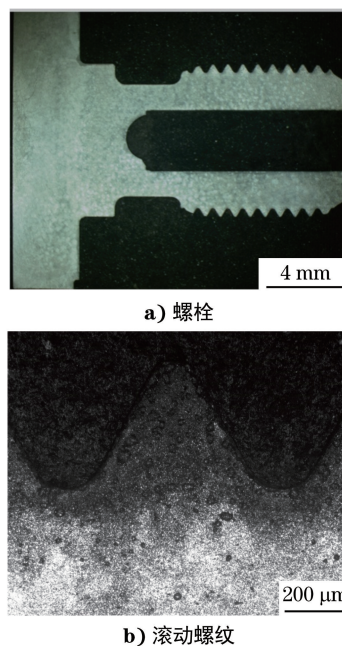


图 2 B 组试样流线形貌(方案二)

Fig.2 Morphology of streamline of group B specimen (scheme 2):
a) the bolt; b) the rolled threads

2.2 重复试验

为了验证方案三是可行的方法,将 B 组试样按照方案三的方法进行重复性试验,结果显示 B 组试样的流线依然能清晰显示,如图 4 所示。在随后螺栓及滚压螺纹流线的多次检测过程中,都证明了方案三具有可操作性强、稳定性好、重复性高等优点。

2.3 讨论

Inconel 718 合金晶粒粗化温度为 1 010~1 065 °C,保温 1 h 后水冷,晶界和晶粒内均不存在 δ 相。 δ 相属于正交结构,析出温度为 700~1 000 °C。合金在 700~800 °C 短时时效后, δ 相在晶界上呈颗粒状析出,随着时效温度的升高和时间的延长, δ 相呈片状大量析出^[13]。根据这一理论,对 Inconel 718 合金锻造螺栓进行二次固溶+时效处理。经过二次固溶+时效处理之后的晶粒与处理之前相比明显变大了,热处理之前晶粒度级别按 ASTM E112-2013 Standard Test Methods for Determining Average

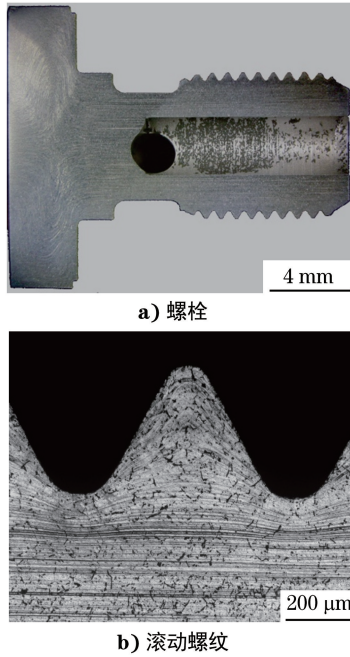


图3 C组试样流线形貌(方案三)

Fig.3 Morphology of streamline of group C specimen (scheme 3):

a) the bolt; b) the rolled threads

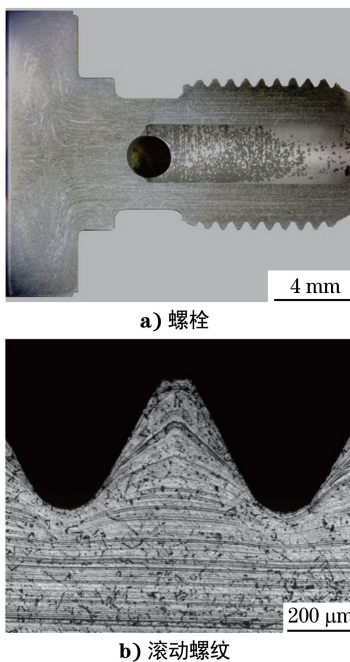


图4 B组试样流线形貌(方案三)

Fig.4 Morphology of streamline of group B specimen (scheme 3):

a) the bolt; b) the rolled threads

Grain Size 评定为 10 级,热处理之后晶粒度级别评定为 6 级,如图 5 所示。与二次固溶+时效处理前相比,二次固溶+时效处理之后螺栓组织中析出了大量的 δ 相,如图 6 所示,从图 6b)也可以看出, δ 相具有一定的方向性,即微观上验证了方案三具有一定的科学性。

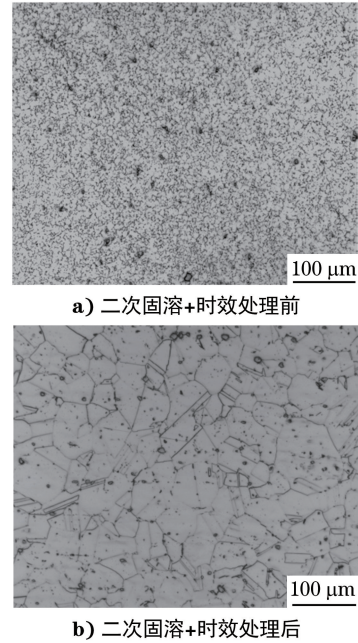


图5 二次固溶+时效处理前后显微组织形貌

Fig.5 Microstructure morphology a) before and

b) after secondary solid solution+aging treatment

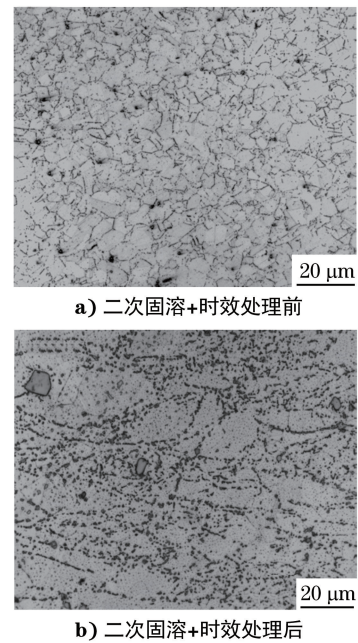


图6 二次固溶+时效处理前后 δ 相形貌

Fig.6 Morphology of δ phase a) before and

b) after secondary solid solution+aging treatment

3 结论

Inconel 718 合金螺栓经二次固溶+时效处理后,晶粒长大且析出了大量的 δ 相,流线处的 δ 相具有一定的方向性。因此,将 Inconel 718 合金螺栓进行二次固溶+时效处理使晶粒长大和 δ 相析出,然



后再在 $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ 溶液中浸蚀 1 h 后可得到清晰的螺纹流线,该检测方法为 Inconel 718 合金螺栓滚压螺纹流线的理想检测方法。

参考文献:

- [1] THOMAS A, EL-WAHABI M, CABRERA J M, *et al.* High temperature deformation of Inconel 718[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177(3):469-472.
- [2] RAHMAN M, SEAH W K, TEO T T. The machinability of Inconel 718[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 63(1):199-204.
- [3] 齐欢. INCONEL 718(GH4169)高温合金的发展与工艺[J]. 材料工程, 2012(8):92-100.
- [4] 《中国航空材料手册》委员会. 中国航空材料手册(第 2 卷)[M]. 北京:中国标准出版社, 2002.
- [5] 王玉凤, 刘风雷, 庄宝潼. Inconel 718 十二角头螺栓制造工艺技术研究[J]. 航空制造技术, 2015, 479(10):79-82.
- [6] 张腾, 李鹏远, 许丹, 等. ITER 718 合金螺栓断裂原因分析及工艺改进[J]. 核聚变与等离子体物理, 2015(2):120-124.
- [7] 奚爱军. 螺纹滚压加工工艺研究[J]. 现代车用动力, 2015(2):48-52.
- [8] 史艳霞. 一种高强度螺栓零件加工工艺研究[D]. 大连:大连理工大学, 2016.
- [9] 张玉勋, 易幼平, 李云, 等. 铝合金机轮轮毂锻造流线仿真与实验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(7):1967-1972.
- [10] CLEGG R. Case studies in engineering failure analysis [J]. Case Studies in Engineering Failure Analysis, 2013, 1(1):4-5.
- [11] 姜涛, 刘含洋, 刘杰, 等. 30CrMnSiA 钢制吊耳断裂原因分析[J]. 金属热处理, 2011(增刊 1):49-53.
- [12] 权仁泽, 鹿云, 潘艳春. 增压柴油发动机排气门盘部断裂分析[J]. 金属热处理, 2002, 27(2):46-47.
- [13] 《高温合金金相图谱》编写组. 高温合金金相图谱 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1979.

关于举办“2019 年全国残余应力测试技术培训班”的通知

为了提高我国装备制造业各企业及高校和科研院所残余应力测试专业技术人员的技术能力和测试水平,应广大残余应力测试技术人员的要求,在 2017 年和 2018 年成功举办了全国残余应力测试技术培训班的基础上,中国机械工程学会材料分会、《理化检验-物理分册》编辑部、《机械工程材料》编辑部和上海市工程材料应用与评价重点实验室仍将联合举办“2019 年全国残余应力测试技术培训班”,本次培训班拟定于 2019 年 10 月 29 日—11 月 1 日在上海材料研究所举行,我们将依靠学会拥有的残余应力方面权威专家,希望通过培训(以 X 射线衍射法为主),可以提高相关专业技术人员的业务水平及解决实际问题的能力,对提高企业的产品质量、提高科研水平起到一定的推动作用。现热忱邀请全国涉及残余应力测试的各单位(高等院校、研究院所和企事业单位)的相关人员踊跃报名参加,经交流培训并考试合格者,将颁发学会培训证书。

1 培训对象

凡从事或即将从事残余应力测试工作,并掌握一定材料学基础理论知识的管理人员及专业技术人员等。

2 培训内容

(1) 残余应力基础理论知识(概念、产生、作用

和各种测试方法简介);

(2) X 射线衍射法残余应力测定原理和方法(原理、方法、标准、参数的选择、对试样的要求和试样的处理、程序、测定结果评估等);

(3) 残余应力测试与计算;

(4) 重要装备制造加工中的残余应力及关键零部件使用服役中的残余应力;

(5) 残余应力与零部件失效分析;

(6) 国内外残余应力测试新技术及设备介绍。

3 培训师资

特邀国内残余应力测试领域何家文教授、吕克茂教授级高工、姜传海教授等权威专家。

4 时间和地点

报到时间:2019 年 10 月 29 日下午 1:00~17:00

报到地点:上海市虹口区邯郸路 99 号上海材料研究所 1 号楼 607 室

培训时间:2019 年 10 月 30 日—11 月 1 日(11 月 1 日上午 12:00 培训结束)

培训地点:上海市虹口区辉河路 100 号 3 号楼 5 层会议室

5 报名方式

在“材料与测试网”(www.mat-test.com)下载

(下转第 656 页)



加工工艺,通过降低表面粗糙度等方式增强螺栓的抗疲劳性能;再次应优化水轮机的运行工况,避免频繁出现转轮出口回流现象,进而导致螺栓断裂失效。

参考文献:

- [1] 王钧. 万家寨水电站采用尾水管修型法提高水轮机效率[J]. 内蒙古电力技术, 2001, 19(3): 46-47.
- [2] 钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 243-252.
- [3] 赵强, 柴建峰, 马传宝, 等. 某抽水蓄能电站顶盖螺栓断裂原因分析[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(1): 134-138.
- [4] 孟文华, 曾伟传, 顾静青, 等. 10.9 级螺栓早期疲劳断裂失效分析[J]. 理化检验(物理分册), 2017, 53(5): 365-367.
- [5] LEE H G, IM H B, KIM Y G. Effects of decarburization and normalizing heat treatment in boron-silicon iron alloys[J]. Metallurgical Transactions A, 1986, 17(8): 1353-1359.
- [6] ZHANG C L, LIU Y Z, ZHOU L Y, *et al.* Forming condition and control strategy of ferrite decarburization in 60Si2MnA spring steel wires for automotive suspensions[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2012, 19(2): 116-121.
- [7] 李家宝, 覃明, 刘凤智, 等. 弹簧钢 60Si2Mn 脱碳层软化的表征与研究[J]. 金属学报, 2000, 36(3): 287-290.
- [8] 韩克甲, 赵晓辉, 李洪伟. 35CrMo 钢高强螺栓断裂失效分析[J]. 理化检验(物理分册), 2017, 53(6): 434-436.
- [9] 王丽萍, 柳洋波, 张玮, 等. 60Si2Mn 弹簧钢全脱碳的影响因素[J]. 金属热处理, 2014, 39(3): 7-12.
- [10] GILDER M J. Relationship between decarburization and fatigue strength of through-hardened and carburizing steel[J]. Materials Science and Technology, 1991, 7(4): 307-310.
- [11] 张涛, 陈浩, 田峰, 等. 超临界电站锅炉磨煤机加载架高强螺栓断裂分析[J]. 热加工工艺, 2018, 47(22): 250-252.
- [12] 周凌九, 王正伟, 黄源芳. 转轮出口流态对尾水管内压力脉动的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(12): 1670-1673.
- [13] 戴玉同, 陈洪, 钱喜根. 42CrMo 钢大环锻件的热处理工艺改进[J]. 金属热处理, 2014, 39(1): 120-123.

(上接第 629 页)

“2019 年全国残余应力测试技术培训班报名表”, 将填好的报名表, 经所在单位盖章, 传真(021-65527634)或 E-mail(huiyi@mat-test.com)至中国机械工程学会材料分会秘书处, 即日起接受报名。

6 相关费用

交流培训费用: 2 500 元/人(含交流费、资料费、培训费、考试费)。食宿自理, 交流培训期间提供免费午餐。报名费不包括住宿费, 参加培训人员自行安排住宿, 附近住宿酒店可咨询主办单位联系人。(优惠政策: 10 月 18 日前完成报名并付款, 或同一单位参会 3 人及以上, 会务交流费优惠到 2 200 元/人。)

每个参会单位可免费获得一套残余应力标样。

7 付款方式

(1) 银行转账:

户名: 上海材料研究所

帐号: 1001232009014409183

开户行: 工行大柏树支行

请在汇款时注明“残余应力培训”及学员姓名, 并将汇款凭证发送至 E-mail: huiyi@mat-test.com。

(2) 现场交费温馨提示: 付款同时将正确、完整的单位开票信息(含单位名称、税号、开户行、账号、地址、电话等)发送至 E-mail(huiyi@mat-test.com), 并注明学员姓名和发票类型(增值税专用发票或普通发票)。

注: 个人银行转账、汇款只能开增值税普通发票, 发票一经开出将不再做换票处理, 谢谢配合。

8 联系方式

地址: 上海材料研究所期刊展览事业部, 上海市邯郸路 99 号; 邮政编码: 200437。

电话: 021-65527634(直线)、021-65556775-311(分机); E-mail: huiyi@mat-test.com; 传真: 021-65527634; 联系人: 师延龄。

中国机械工程学会材料分会
《理化检验-物理分册》编辑部
《机械工程材料》编辑部