基于螺栓断裂探讨Laves相对GH4169 高温合金疲劳断裂的影响

姜涛^{1,2,3} 董鑫焱^{1,2,3,4} 刘春江^{1,2,3} 赵文侠^{1,2,3} 刘昕宇^{1,2,3}

(1 中国航发北京航空材料研究院,北京 100095)

(2 中国航空发动机集团公司航空材料测试与评价重点实验室,北京 100095)

(3 航空材料测试与评价北京市重点实验室,北京 100095)

(4 佳木斯大学材料科学与工程学院,佳木斯 154007)

文 摘 针对高压油滤在进行高温压力冲击至第6.12×10⁴次时,出口单向阀与上壳体连接螺栓 (GH4169)断裂问题,通过对断裂螺栓的外观观察、断口宏微观形貌观察以及螺栓微观组织、硬度测试等,分析 了GH4169螺栓异常断裂的原因。结果表明:螺栓的断裂性质为疲劳断裂,由于螺栓晶界上存在连续析出的链 状Laves相,使材料塑性降低并诱发缺口敏感性异常增大,单向阀与上壳体连接螺栓发生疲劳开裂;另外螺纹 牙底圆角较小导致螺纹牙底应力集中以及装配受力可能不均加剧其疲劳开裂。通过GH4169合金螺栓疲劳断 裂这一工程失效实例,直接证明了晶界链状 Laves 相对疲劳失效过程的不利影响,有助于提升研究工作者和 工程技术人员对Laves 相危害性的认知。

关键词 GH4169高温合金,疲劳断裂,Laves相,应力集中,高温压力冲击 中图分类号:V252.2;V250.3 DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2025.03.010

The Influence of Laves Phase on the Fatigue Fracture of GH4169 High-temperature Alloy Based on Bolt Fracture

JIANG Tao^{1,2,3} DONG Xinyan^{1,2,3,4} LIU Chunjiang^{1,2,3} ZHAO Wenxia^{1,2,3} LIU Xinyu^{1,2,3} (1 Beijing Research Institute of Aeronautical Materials, China Aero Engine Corporation, Beijing 100095)

(2 Key Laboratory of Testing and Evaluation of Aeronautical Materials, China National Aero Engine Corporation, Beijing 100095)

(3 Beijing Key Laboratory of Testing and Evaluation of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

(4 School of Materials Science and Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007)

Abstract Through visual inspection, macro/microscopic fracture morphology examination, microstructural characterization, and hardness testing of fractured bolts from a high-pressure oil filter subjected to 61 200 cycles of high-temperature pressure shock, this study investigated the abnormal fracture mechanism of GH4169 bolts connecting the outlet check valve and upper housing. The results indicate that the bolt fracture is fatigue-induced. Continuous chain-like Laves phases precipitated along grain boundaries significantly reduces material plasticity and abnormally increases notch sensitivity, ultimately triggering fatigue crack initiation. Additionally, stress concentration causes by small root radii at thread grooves and potential uneven assembly loads exacerbate fatigue crack propagation. This engineering failure case directly demonstrates the detrimental effects of grain boundary chain-like Laves phases on fatigue failure processes, providing critical insights to enhance researchers' and engineers' awareness of Laves phase-related hazards.

Key words GH4169 alloy, Fatigue fracture, Laves phase, Stress concentration, High-temperature pressure shock

0 引言

螺栓被誉为"工业的关键",广泛用于飞机、卫 星、火箭和其他航空航天器中薄壁结构部件的连接。 螺栓连接通常用于各种载荷的复杂环境,例如拉伸-弯曲、拉伸-弯曲-剪切和扭矩-拉力载荷。紧固件连 接中的单个螺栓主要承受拉力,以及由于不可避免

收稿日期:2024-09-14

第一作者简介:姜涛,1980年出生,硕士,高级工程师,主要从事航空材料损伤与失效分析工作。E-mail:13810461605@139.com

的载荷偏心率而产生的弯曲应力,当这些载荷不断 变化时,紧固件常常发生疲劳断裂引发结构失效。

传统紧固件以低合金钢、不锈钢、高强钢等为主 要材料[1-2],随着航空、航天等产品服役环境要求越 来越苛刻,高温合金、钛合金紧固件使用量逐年提 升^[3-5]。GH4169作为目前发动机用量最大的镍基高 温合金,其疲劳性能一直是研究人员关注的焦点。 当前对GH4169紧固件、叶片以及转子等部件的疲劳 失效问题和寿命预测研究较多^[6-7]。FAN等人^[8]针对 不同温度研究了初始过载对GH4169低周疲劳寿命 的影响,并通过综合实验结果和有限元模型分析,提 出了通过初始过载提高GH4169疲劳寿命的建议。 LIU 等人^[9]研究了晶粒尺寸对 GH4169 低周疲劳 (LCF)寿命的影响,发现通过诱导晶粒细化强化理 论,晶粒尺寸与LCF寿命之间存在负相关关系。SUI 等人^[10]通过对 Inconel 718 的高周疲劳实验发现 Laves 相的存在对于在较低应力幅值下阻止裂纹扩 展至关重要。然而,在高应力幅值下,Laves相的存 在是微观孔洞或裂纹形成的主要形核点。

尽管已有研究在 GH4169 合金的疲劳性能方面 取得了诸多成果,但仍存在一定的局限性。以往的 研究大多聚焦于 GH4169 紧固件、叶片及转子等部件 在常规疲劳载荷条件下的失效分析与寿命预测,重 点关注高温性能及损伤行为,对于室温等特殊工况 下的研究少见报道。例如液压机构连接螺栓服役温 度接近室温,经历反复压力冲击的复杂工况,此时材 料的损伤失效行为与高温时可能存在差异,当伴随 材质等其他因素影响时更容易发生疲劳破坏。本文 针对一起出口单向阀与上壳体 GH4169 连接螺栓断 裂失效案例,通过断口观察、组织观察、热模拟试验 等分析工作,探讨 Laves 相对 GH4169 高温合金室温 疲劳断裂行为的影响。

1 样品状态与分析方法

1.1 样品状态

某型高压油滤进行高温压力冲击,累计至6.12× 10⁴次时,出口单向阀与上壳体连接螺栓断裂。试验 要求经10万次压力冲击后,压差指示器应无误动作, 产品应无结构性破坏及渗漏油现象。螺栓材料为 GH4169(37.5~47 HRC),安装力矩(5.9±0.6)N·m。

1.2 分析方法

(1)采用徕卡体视显微镜(LEICA DMS 1000)对 螺栓外观以及断口宏观形貌进行初步观察。

(2)采用国义量子(SEM 3100)对螺栓断口微观 形貌和螺纹表面的微观形貌进行观察。

(3)利用线切割技术,对螺栓纵向切割,取部分 试样并进行镶嵌、磨抛、腐蚀(腐蚀剂配比:100 宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2025年 第3期 mLC₂H₅OH+100 mL HCl+5 g CuCl₂),使用奥林巴斯 金相显微镜(Olympus GX51)对螺栓显微组织进行观 察,并借助电镜所带的能谱仪对螺栓晶界析出物的 元素进行定量分析。

(4)采用洛氏硬度计(Qness,Q150R)测量螺栓 硬度。

2 理化检测

2.1 外观

出口单向阀与上壳体连接螺栓、垫圈外观见图1。 4个螺栓均从第一螺纹处断裂,螺栓表面未见异常机械 损伤和塑性变形,为了便于描述和分析,将螺栓分别编 号(表1)。与螺栓配合的垫圈整体完整,表面装配痕迹 略有差异。采用游标卡尺测量4个螺栓头的内六方孔 深,测量结果见表1,4个螺栓的孔深相当,基本符合图 纸要求。



Fig. 1 Appearance of failed bolts submitted for inspection

表1 各螺栓沉孔深度测量结果

 Tab. 1
 Measurement results of counterbore

 depth of each bolt

岬协护旦	沉孔深度/mm				
场性 编 与	测量值	图纸要求			
1#	5.98				
2#	5.98	(.0.10			
3#	5.99	6±0.10			
4#	5.99				

在体视镜下放大观察各螺栓表面损伤情况,观察结果如图2所示。可以看出1*螺栓从第一螺纹根部横向断裂,断面无锈蚀等异常现象,断面大部分平坦光滑,剩余部分略倾斜、相对粗糙,可见螺纹断裂形成的台阶,断口附近螺纹形态正常,未见异常损伤,螺栓头的下端面无明显的挤压装配痕迹,螺栓头根部圆角加工良好。2*、3*螺栓表面形态与1*基本一致,仅断面平坦区域的面积略有不同。4*螺栓也是从第一螺纹根部横向断裂,整个断面颜色、形态均匀, 未见明显光滑区,未开裂区域的螺纹良好,未见加工

— 81 —



图 2 螺栓损伤情况 Fig. 2 Bolt damage

2.2 断裂螺栓微观形貌

对4根断裂螺栓的断口和螺纹表面进行微观形 貌观察,观察结果如图3-图5所示。





对比可以发现1*螺栓断裂纹起源于螺纹根部, 多处线状起源,源区轻微磨损,未见明显加工缺陷; 断面大部分区域为疲劳断裂区,该疲劳区与常见 GH4169疲劳断口明显不同,低倍呈现细小颗粒状可 见晶粒轮廓,高倍可见典型疲劳条带,其间零星分布 着沿晶断面,晶粒表面可见韧窝;疲劳区对侧(螺纹 - 82 - 断裂台阶侧)为瞬断区,断面为沿晶断裂,晶粒表面 也为韧窝特征;螺栓螺纹牙底加工圆滑,表面平整, 未见裂纹。2*和3*螺栓微观损伤形貌与1*基本一致, 但2*靠近断口的螺纹牙底可见细微横向裂纹。



从图4(a)可以看出4*螺栓原始断口各区域的形态基本一致,均为沿晶断裂,晶粒表面可见韧窝,该断口未见疲劳区;靠近断口的螺纹底部表面屈服变形,可见明显横向裂纹。从图4(b)可以看出,4*螺栓沿螺纹横向打断,断口表面整体为沿晶断裂,晶粒表面可见韧窝断裂特征,且4*靠近断口的螺纹牙底也可见细微横向裂纹。







Fig. 5 Microscopic morphology of the threaded surface

2.3 螺栓显微组织

取1*和4*螺栓的纵剖面制备金相试样,高倍观察 结果如图6所示,从图6中可以发现两个螺栓裂纹源 区未见加工缺陷,螺纹底部显微组织与其他部位一 致;螺纹底部加工圆滑,齿底圆角R0.05 mm 左右。 4*螺栓的螺纹根部可见裂纹,裂纹沿晶扩展。此外, 两个螺栓的显微组织均匀,且晶粒大小一致,晶粒度 在8~9级;显微组织可见块状碳化物,晶界可见连续 的链状析出相,晶内未见明显析出相。

1^{*}螺栓析出相SEM形貌如图7所示,从图7中可 以发现白色析出相呈链状分布于晶界,和图6金相观 察结果一致。利用扫描电镜自带的能谱仪对基体和 晶界析出物进行元素分析,分析结果如表2和表3所 示。能谱显示白色析出相中 Nb、Mo含量较高;基体 主合金元素含量符合GH4169合金标准成分含量。

在1[#]螺栓上随机取样并经1020℃,保温1h,水 冷处理后制备金相试样,金相观察结果见图8,可以 发现螺栓晶粒大小无明显变化,晶界析出物形态无 明显变化,由此判断晶界析出应为Laves相。

宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2025年 第3期



图6 1*和4*螺栓纵剖面金相显微组织 Fig. 6 Metallographic microstructure diagram of longitudinal section of 1[#] and 4[#] bolts



晶界析出情况 (b) 能谱分析位置 (a) 图 7 1[#]螺栓晶界析出相SEM形貌

Fig. 7 SEM morphology of the precipitation phase at the grain boundary of 1[#] bolt

表2 1[#]螺栓基体元素分析 1[#] Bolt Matrix Element Analysis %(质量分数)

Tah 2

С

0

	1 40.	- 1	Don	viati i	A LIC	incine 1	inary	515 /0 (が主	// 20 /
С	0	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Nb	Mo
4.3	1.0	0.7	0.9	17.6	0.6	22.1	1.1	45.5	3.6	2.5

表3 1[#]螺栓晶界析出相元素分析
 Tab. 3
 1[#] Element analysis of bolt grain boundary

precipitation phase						%(质量分数			
Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Nb	Mo	



2.4 断裂螺栓硬度

依据《紧固件试验方法硬度》规定,在1*、4*断裂 螺栓横截面上进行洛氏硬度测试,1*螺栓测试结果为 HRC40.3、HRC40.6、HRC40.7,4*螺栓测试结果为 HRC41.1、HRC41.5、HRC41.8,两个螺栓洛氏硬度 值相当且较为均匀,符合技术要求HRC37.5~47。

3 分析与讨论

3.1 分析

高压油滤上用于连接出口单向阀与上壳体的4 个螺栓全部断裂失效,各螺栓断裂位置一致,其中3 个螺栓断口低倍均存在明显平坦区,高倍下平坦区 内可见典型疲劳条带,说明三者均为疲劳断裂,仅疲 劳扩展区大小不同;另1个螺栓变形较明显、裂纹较 多,且断口为过载断裂特征,由此可见3个螺栓首先 出现了疲劳裂纹并相继断裂,导致最后承力的1个螺 栓发生过载断裂。

同型号的产品曾出现过螺栓提前疲劳断裂失效 (图9),断裂位置在螺栓头根部圆角,与螺栓装配力 矩较大、螺栓头根部圆角应力集中严重、螺栓头槽底 厚度偏小有关。此次试验,大幅降低了螺栓安装力 矩,由(14±2)N·m降至(5.9±0.6)N·m,螺栓承受的 初始应力大幅降低;同时加大了螺栓头根部圆角尺 寸,增加了螺栓头沉孔底部厚度,改进后的螺栓头部 位得到了明显强化,该部位未再出现疲劳开裂,但是 未做更改的螺纹处却发生了疲劳断裂。



(a) 钉头断裂
 (b) 钉头槽底厚度
 图 9 同型号产品曾经出现的螺栓钉头断裂失效现象
 Fig. 9 The bolt head fracture and failure phenomenon that occurred in the same model of product

通过对断口宏观、微观形貌观察,此次螺栓断口 低倍可见晶粒形态,且其间零星分布着沿晶断面,晶 粒表面可见韧窝,早期钉头部位疲劳断裂的螺栓断 口无此特征;此外,此次失效件疲劳断口中的瞬断区 也均为沿晶和晶粒表面带韧窝的断裂特征,这与过 载断裂螺栓以及人为打断螺栓断口形貌一致,而早 期钉头断裂螺栓的打断断口则为典型韧窝形貌,见 图 10(a)。两次失效螺栓断裂行为的差异主要受到 微观组织形态的影响:此次断裂螺栓在晶界可见链 状析出相,而早期钉头断裂螺栓晶界则无此现象 - 84 - [图10(b)]。金相组织检查表明,此次断裂螺栓的晶 界存在连续析出的链状相,在1020℃下未完全回 熔,说明其是高熔点的Laves相,从表2中可以看出 Laves相的形成与钼、铌等大原子直径元素在凝固过 程中发生微偏析有关,这与文献[11-12]相符。硬而 脆的Laves相对GH4169的力学性能具有一定影 响^[13-14],这种脆性相连续分布会显著降低材料塑性 并诱发缺口敏感性异常增大。



(a) 人为打断断口



(b) 晶界析出相形貌

图 10 早期螺栓钉头断裂失效件打断断口及组织特点



综上所述,出口单向阀与上壳体4根连接螺栓中 的3根发生了疲劳开裂,1根发生过载断裂,断裂均 发生于靠螺栓头的第一螺纹牙底。各螺栓加工、材 质状态一致,且源区均未见加工缺陷。螺栓晶界存 在由 Nb/Mo显微偏析产生的链状Laves相,导致材料 塑性降低并可诱发缺口敏感性异常增大;螺纹牙底 圆角较小造成螺纹牙底应力集中,此外4根螺栓中有 3根螺栓发生疲劳断裂,1根螺栓发生过载断裂,这说 明装配受力可能不均匀,这是导致螺栓断裂的外因。

3.2 讨论

GH4169合金的蠕变行为和力学性能受到相的体积分数、晶粒形貌及错配数等因素的直接影响。现有研究结果在Laves相对性能的影响方面存在较大分歧。一方面有研究认为高体积分数的脆性Laves相可能导致合金的变形性能下降;另一方面研究认为Laves相对GH4169合金的性能可能具有促进作用^[15]。该研究指出,组织中残留的Laves相在一定程度上可以阻碍裂纹的扩展。本文通过GH4169合金螺栓疲劳断裂这一工程失效实例,直接证明了晶界链状 Laves 相对疲劳失效过程的不利影响,有助于

宇航材料工艺 http://www.yhclgy.com 2025年 第3期

研究者、工程技术人员对Laves相危害性的认知。

Laves 相在1100 ℃以上完全溶解,因此可通过适 当的热处理来调控 Laves 相。研究表明,Inconel 718经 过固溶处理和双重时效(1095 ℃固溶1h,然后在720 和620 ℃分别时效8h)后,晶界析出沉淀相,导致位错 密度降低,从而提高了疲劳寿命和强度^[16]。文献[17] 称,通过对GH4169合金进行热处理(1150 ℃固溶2h, 然后在720和620 ℃分别时效8h),可以诱导强化相的 沉淀,完全消除 Laves 相,并显著增强γ相和γ′相,使材 料的强度和硬度得到了显著提升。因此,在优化GH4169 螺栓的显微组织时,应严格控制晶界上 Laves 相的析出 并诱导强化相的沉淀,以实现材料强度与韧性的最佳 平衡。

4 结论

(1)出口单向阀与上壳体4个连接螺栓中的3个 首先发生了疲劳开裂,导致最后承力的1个螺栓发生 过载断裂,断裂均发生于靠螺栓头的第一螺纹牙底。

(2)螺栓晶界存在连续析出的链状 Laves 相,导 致材料塑性降低并诱发缺口敏感性异常增大,是导 致其疲劳断裂的内因,应严格控制晶界上 Laves 相的 析出并诱导强化相的沉淀,以实现材料强度与韧性 的最佳平衡。

(3)螺纹牙底圆角较小造成螺纹牙底应力集中, 此外4根螺栓中有3根螺栓发生疲劳断裂,1根螺栓 发生过载断裂,这说明装配受力可能不均匀,这是导 致螺栓断裂的外因。应采用滚压螺纹,并严格控制 安装力矩。

参考文献

[1] 徐春艳,张鹏,魏振伟,等.飞机锁闭机构连接螺栓失效 分析[J]. 失效分析与预防,2024,19(2):127-133.

XU C Y, ZHANG P, WEI Z W, et al. Analysis of bolt failure in aircraft locking mechanisms[J]. Failure Analysis and Prevention, 2024, 19(2):127–133.

[2] 苏倩,胡春燕. 汽车下摆臂与车架连接螺栓断裂分析[J]. 失效分析与预防,2019,14(6):425-428.

SU Q, HU C Y. Analysis of the fracture of the connecting bolts between the car's lower control arm and the frame [J]. Failure Analysis and Prevention, 2019, 14(6):425-428.

[3] FERRERO J G. Candidate materials for high-strength fastener applications in both the aerospace and automotive industries [J]. Journal of materials engineering and performance, 2005, 14(6): 691–696.

[4] VEIGA C, DAVIM J P, LOUREIRO A J R. Properties and applications of titanium alloys: A brief review[J]. Rev. Adv. Mater. Sci, 2012, 32(2):133–148.

[5] RAMAKRISHNAN P N. Composite materials, metals, and ceramics used in the boeing 787-materials overview [J]. Journal of

Research in Science and Engineering, 2024, 6(8):57-62.

[6] 谭学明,王瑞丰,郭小军,等. 高温合金 GH4169 的失效 特性及失效模型研究[J]. 应用数学和力学,2021,42(8):803-812.

TAN X M, WANG R F, GUO X J, et al. Study on failure characteristics and failure model of superalloy GH4169[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2021, 42(8):803-812.

[7] WANG R Z, CHEN H, ZHANG Y, et al. Creep-fatigue life prediction in nickel-based superalloy GH4169 based on microstructural damage quantification with the help of electron backscatter diffraction[J]. Materials & Design, 2020, 195:108939.

[8] FAN M L, QU M M, CHEN C Y, et al. Effect of initial overload on the low cycle fatigue life of GH4169 alloy at different temperatures [J]. International Journal of Fatigue, 2024, 186: 108424.

[9] LIU L L, HU D Y, LI D, et al. Effect of grain size on low cycle fatigue life in compressor disc superalloy GH4169 at 600 C[J]. Procedia Structural Integrity, 2017, 7:174–181.

[10] SUI S, CHEN J, FAN E X, et al. The influence of Laves phases on the high-cycle fatigue behavior of laser additive manufactured Inconel 718[J]. Materials Science and Engineering: A,2017,695:6–13.

[11] ZHANG Y C, LI Z G, NIE P L, et al. Effect of heat treatment on niobium segregation of laser-cladded IN718 alloy coating[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44: 708-716.

[12] ZHANG Y C, LI Z G, NIE P L, et al. Effect of ultrarapid cooling on microstructure of laser cladding IN718 coating [J]. Surface Engineering, 2013, 29(6):414-418.

[13] CHEN Y, LU F G, ZHANG K, et al. Investigation of dendritic growth and liquation cracking in laser melting deposited Inconel 718 at different laser input angles[J]. Materials & Design, 2016,105:133-141.

[14] XI N Y, TANG K X, FANG X W, et al. Enhanced comprehensive properties of directed energy deposited Inconel 718 by a novel integrated deposition strategy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 141:42–55.

[15] HAO Z H, HE Z, NIE Z H, et al. Effects of residual Laves phase on microstructural evolution and mechanical properties of wire arc additive manufactured GH4169 Ni-based superalloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2024: 147175.

[16] SOLBERG K, WAN D, BERTO F. Fatigue assessment of as - built and heat - treated Inconel 718 specimens produced by additive manufacturing including notch effects [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2020, 43(10):2326– 2336.

[17] FAN Q, LI J, ZHENG L, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 alloy[J]. Public Library of Science IONE, 2024, 19(9): e0309156.