

粉末高温合金 FGH96 惯性摩擦焊接头 室温 CTOD 测试与分析

CTOD Measurement and Analysis of P/M Superalloy FGH96 Inertia Friction Welding Joint

中航工业北京航空制造工程研究所 何胜春 廖云建
北京航空航天大学 杨美 吴素君

[摘要] FGH96 是采用损伤容限设计思想研制的新型粉末高温合金,是满足高推比、高燃效发动机使用要求的涡轮盘、环形件和其他热端部件的理想材料。FGH96 惯性摩擦焊接头的 CTOD 值小于母材,其断口的韧窝小于母材。母材和接头断裂路径均为穿晶断裂。

关键词: 粉末高温合金 惯性摩擦焊 CTOD

[ABSTRACT] P/M superalloy FGH96 is the late-model superalloy designed by the method of damage of tolerance limit. FGH96 is the most perfect material for turbine disk, loop-forming element and other components assembly of hot end to meet the challenge of high thrust-weight ratio and high efficiency aircraft engine. The value of CTOD of inertia friction welding joint is less than that of the matrix. The dimple of the joint is also less than that of the matrix. The fracture paths of joint and matrix are transcrystalline cracking.

Keywords: P/M superalloy Inertia Friction Welding CTOD

粉末高温合金具有晶粒细小、屈服强度高及疲劳性能好等优点,被认为是制造高推重比新型发动机涡轮盘的最佳材料。FGH96 为第二代损伤容限型粉末高温合金,与第一代 FGH95 相比,适当地减少了强化相 γ' 的含量,调整了晶粒尺寸,使得其强度有所降低,但是其高温抗裂性能有了较大提高,它是当前 750℃ 工作条件下,满足高推比、高燃效发动机使用要求的涡轮盘、环形件和其他热端部件的关键材料^[1]。

国外一些先进的航空发动机制造公司已将摩擦焊接作为焊接高性能航空发动机整体转子部件的主导和典型的工艺方法,普遍认为摩擦焊是最为可靠、再现性最好的焊接技术。通过对 FGH96 惯性摩擦焊接头 CTOD 测试,为粉末高温合金惯性摩擦焊整体转子损伤容限分析提供技术和数据支持。

1 试验材料

本试验采用三点弯曲试样,接头和母材试样规格均为 80mm × 21mm × 6mm,用半径不超过 0.15mm 钼丝线切割起始缺口,切口根部半径不超过 0.2mm。燕尾槽内置刀口,便于引伸计放置测量裂纹嘴张开位移(V)。对于接头试样,缺口开在接头中心,以获得接头的裂纹扩展速率曲线,对于母材试样,缺口开在试样中心。图 1 为接头加工缺口的图纸。

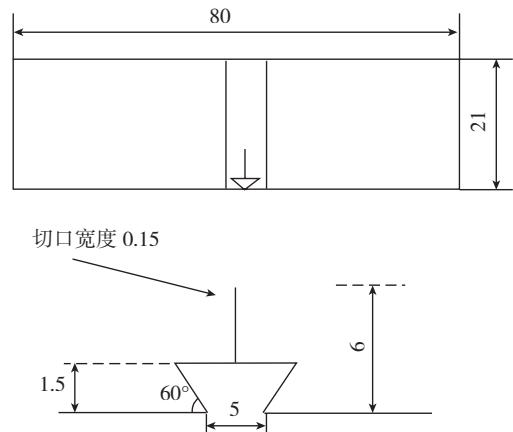


图1 接头缺口加工图

Fig.1 Processing diagram of joint notch

2 试验过程及结果

疲劳裂纹预制实验在 Istron8801 上完成,每个试样约经 20000~35000 次循环引发出裂纹,在试验过程中,试样未发生挠曲变形。预置疲劳裂纹时,首先使用恒力增 K 法,诱发初始裂纹,当裂纹扩展至距试样中心 1.5mm 时,采用恒 K 减力法,使裂纹扩展至试样中心位置。CTOD 的载荷-张开位移测量工作在预制疲劳裂纹之后完成,本实验中使用了线性工作范围在 2.5mm 以内的引伸计,整个实验在 Istron8801 上完成。以恒定速率使压头下压,记录刀口位移 V 及加载力 F 曲线,当施加

应力过最高点,曲线出现明显下降时停止试验^[2]。测试计算结果如表1所示。

表1 FGH96母材及焊缝CTOD值

| 编号 | 弹性分量 δ_e /mm | 塑性分量 δ_p /mm | CTOD δ_c /mm |
|-----|------------------------|------------------------|------------------------|
| M-1 | 0.0463 | 0.0614 | 0.1077 |
| M-2 | 0.0428 | 0.0535 | 0.0963 |
| M-3 | 0.0431 | 0.0505 | 0.0935 |
| W-1 | 0.0219 | 0.0133 | 0.0352 |
| W-2 | 0.0228 | 0.0206 | 0.0435 |
| W-3 | 0.0216 | 0.0202 | 0.0418 |

表1中可见,母材的CTOD弹性部分值大于0.04mm,而接头的CTOD弹性部分值仅大于0.02mm;母材的CTOD塑性部分值在0.06mm附近,而接头的CTOD塑性部分值仅在0.02mm附近。母材的CTOD弹性部分和塑性部分均明显优于接头部分,这就导致CTOD母材的最终裂纹张开位移值大于CTOD接头的。这说明母材的断裂韧性优于接头。

3 断口分析

图2为母材试样断口侧面裂纹走向金相组织形貌,上部为疲劳扩展区,下部为裂纹扩展区。可见裂纹为穿晶断裂。

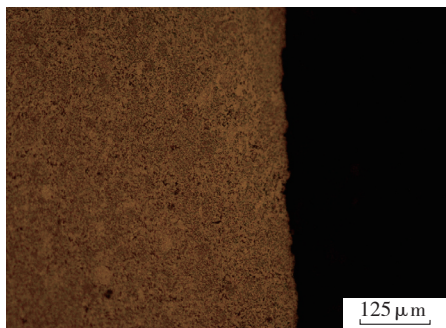


图2 FGH96母材试样裂纹走向
Fig.2 Crack strike of FGH96 matrix

图3为接头试样断口侧面裂纹走向金相组织形貌,上部为瞬断区,可见裂纹为穿晶断裂。

FGH96母材断口宏观形貌如图4所示。从右到左依次为机械加工缺口、预制疲劳裂纹区、疲劳裂纹前沿和CTOD试验裂纹扩展区。断口预制疲劳裂纹区平整,可以看到清晰的疲劳裂纹前沿。CTOD裂纹扩展区有较明显的变形。

FGH96接头宏观断口形貌如图5所示。从右到左依次为机械加工缺口、预制疲劳裂纹区、疲劳裂纹前沿

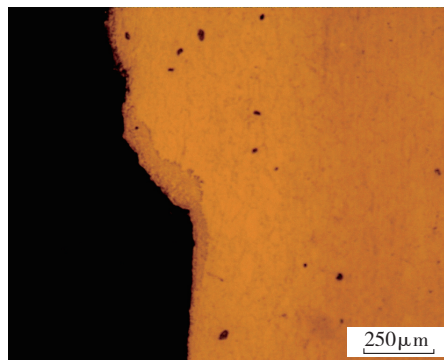


图3 FGH96接头试样裂纹走向
Fig.3 Crack strike of FGH96 joint

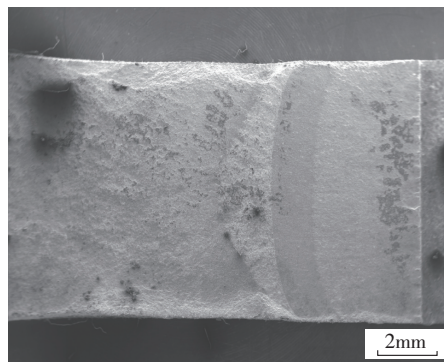


图4 FGH96母材断裂韧性试样宏观断口形貌
Fig.4 Macro-morphology of FGH96 matrix fracture toughness sample

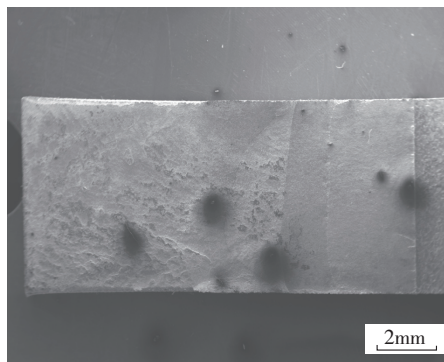


图5 FGH96接头断裂韧性试样宏观断口形貌
Fig.5 Macro-morphology of FGH96 joint fracture toughness sample

和CTOD试验裂纹扩展区。断口预制疲劳裂纹区平整,形貌与母材断裂韧性试样相同,可以看到清晰的疲劳裂纹前沿。裂纹扩展区较母材平整,并伴有层状撕裂的特征,变形不明显,表现为塑性下降,这与断裂韧性值低于母材相对应。

图6为FGH96母材断裂韧性试样裂纹扩展区断口形貌,具有典型的韧性断裂特征,断口表面分布深浅和大小不一的韧窝。韧窝的形成机理为在拉伸载荷下,材料中心的组织发生空洞聚集,及显微空洞成核、长大、积聚

直至断裂。首先是材料内部分离形成空洞,在滑移的作用下空洞逐渐长大并和其他空洞连接形成韧窝断口^[3]。

图7为接头韧性断裂断口形貌,韧窝较母材小,说明其塑性低于母材。韧窝底部普遍存在着第二相粒子,其受到正应力时首先开裂,形成微孔,随后周围塑性较好的基体发生开裂。

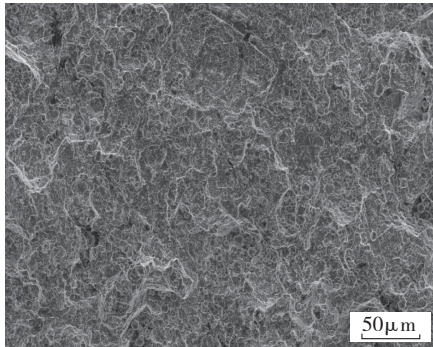


图6 FG96母材韧窝形貌

Fig.6 Dimple pattern of FG96 matrix

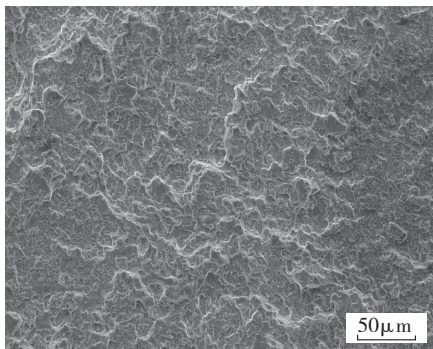


图7 FG96接头韧窝形貌

Fig.7 Dimple pattern of FG96 joint

4 结论

(1)粉末高温合金焊接接头 CTOD 值测试结果表明,由于其晶粒尺寸小于母材,其 CTOD 值小于母材。

(2)从宏观断裂形貌可见,母材和接头断口的预制疲劳裂纹区均平整,并且具有清晰的疲劳裂纹前沿。从微观形貌来看,母材和接头在预制裂纹区的微观形貌均出现疲劳条带,在裂纹扩展区均出现韧窝,为典型的韧性断裂,且母材断口韧窝深而多,说明母材的韧性优于接头。

参考文献

- [1] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册. 粉末冶金材料、精密合金与功能材料. 2版. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [2] 束德林. 金属力学性能. 北京: 机械工业出版社, 1987: 113-117.
- [3] 崔约贤, 王长利. 金属断口分析. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998: 34-40.

(责编 可岚)

(上接第 83 页)

金相分析结果显示,电阻焊修复焊缝晶粒变化不明显,而氩弧焊修复后焊缝晶粒趋大,分析原因为氩弧焊电弧热量较大且不集中引起。

但通过对壳体内侧修复后晶粒度进行评测,氩弧焊修复后晶粒较电阻焊后晶粒涨大趋势不明显。

3.3 试验分析

从以上试验可以看出,2种修复方案均能满足设计要求,但各有优缺点。

(1)电阻焊修复不能添加材料,对于因内部飞溅而引起的裂纹无法修复;另电阻焊参数选择需根据核内缩孔状态进行调试,修复成功率较低(试验中为80%),可操作性较差。

(2)电阻焊修复时,压痕难以避免,因此压痕深度超过0.15max的焊点不能采用电阻焊修复(零件最终要求压痕深度0.2max)。

(3)氩弧焊修复由于其热量较大且分散,修复后晶粒粗大且热影响区扩大,而电阻焊修复则晶粒变化不明显。

综合这2种修复方案的优缺点,氩弧焊修复虽然修复后焊缝区域晶粒趋大,但通过控制钻孔深度和焊接规范选择等手段能使修复焊接对壳体内侧影响较小,满足设计指标要求。因此,建议电阻焊裂纹采用氩弧焊修复。

4 结论

电阻焊修复为通过二次点焊,对裂纹重熔的方法消除裂纹。由于电阻焊热量集中修复后焊缝显微组织无涨大趋势且操作过程较为简便。但电阻焊修复后单点抗剪力不稳定且合格率较低,不适合壳体焊点裂纹修复。

氩弧焊修复为用硬质合金R3球头钻剔除裂纹缺陷,选用小规范参数氩弧焊重熔的方法消除裂纹。氩弧焊修复后焊点单点抗剪力较高、稳定且合格率较高,质量稳定可靠。虽然由于氩弧焊本身热源较分散,修复后显微组织趋大,但通过控制钻孔深度、增加内撑热平衡装置和焊接规范的选取能保证壳体内侧无热影响,达到技术指标。

因此在壳体修复方案的选取上,推荐优先选用氩弧焊修复方法。

参考文献

- [1] 李亚江. 高硬度材料的焊接. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [2] 孟庆森. 金属焊接性基础. 北京: 化学工业出版社, 2010.

(责编 亦非)