DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2020.03.002

高温合金 IC10 的疲劳行为研究

畅一鹏,张宏建,卢孔汉,温卫东,崔海涛 (南京航空航天大学能源与动力学院,江苏南京 210016)

 摘 要:IC10 是一种新型定向凝固高温合金,为了研究其在高温环境不同载荷下的疲劳行为, 开展了 600 ℃下的拉-压疲劳试验,获得 IC10 合金高温疲劳下不同应变幅循环响应曲线;对试 样断口组织和微观结构形貌进行观测分析,判断不同应变水平下的循环断裂机理。
 关键词:IC10 合金;疲劳力学行为;断口分析
 中图分类号:TB35;V250.3 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2020)03-0008-03

Research on Fatigue Behavior of IC10 Alloy

CHANG Yipeng, ZHANG Hongjian, LU Konghan, WEN Weidong, CUI Haitao

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China) Abstract: IC10 is a new directional solidification superalloy. To investigate its fatigue behavior under the high temperature and different loading conditions, low cycle fatigue tests are given for the material at a constant temperature of 600° C, thus obtaining the different strain amplitude cyclic response curves of IC10. And then, the fracture mechanism of the alloy under the different loads is judged by analyzing the fracture structure and microstructure of the test piece.

Keywords: IC10 alloy; fatigue behavior; fracture analysis

0 引言

IC10 合金是我国研制的新一代 Ni3Al 基定向凝固高 温合金,具有密度低,比强度高,熔点高,抗高温氧化性好 的特点。目前已被应用到航空发动机上的涡轮导向叶片 和其他高温结构件^[1]。由于高温低周疲劳是热端部件在 恶劣工作环境中主要的承载形式之一,热端部件在长时间 的高温环境服役时,疲劳损伤引起的失效问题占零部件总 失效问题的六成左右^[2]。因此,开展 IC10 在高温环境下 疲劳行为研究有助于完善材料结构强度的设计分析以及 提高材料的工程应用价值。

镍基高温合金在进行高温低周疲劳试验时,由于温 度、循环载荷以及其他环境因素的作用,材料往往表现出 异于常温状态下的力学行为^[3]。近些年来国内许多学者 对高温合金的疲劳行为以及本构关系开展了大量研究,张 仕朝^[4]在进行 GH3030 合金循环实验中发现,不同的应变 比下循环应力-应变曲线产生一定程度上的平移,但是曲 线形状不会改变。安金岚^[5]研究发现 GH4169 合金在高 温低周疲劳试验中发生循环软化现象。肖磊^[6]等发现, 高温合金 WZ4 在 980 ℃下均表现循环稳定特征,其中循 环软化与循环硬化二者达到了动态均衡效果。

本文开展了 IC10 合金在 600 ℃下应变水平为0.75%、 0.85%以及 1.00%的拉-压循环试验研究,并对其断口进 行了微观观测分析,判断其失效机理。

1 试验方案设计

本文研究对象为 IC10 合金,属于定向凝固高温合金, 该类合金的相主要是分为基体相 γ 相和强化相 γ' 相,此 外还有葵花状的共晶相 $\gamma+\gamma'$,骨架状的碳化物 MC(1)和 在共晶附近块状的 MC(2)。IC10 合金的质量分数如表 1 所示。

	表1	IC10 合金质量分数		单位:%
Al	С	Cr	Со	W
6.2	0.1	6.8	1.5	5.1
Mo	Та	Hf	В	Ni
1.5	7.1	1.5	1.5×10^{-2}	余量

试样设计参照《金属材料高温拉伸试验方法 GB/ T4338-2006》和《金属材料疲劳试验轴向应变控制方法》, 并结合疲劳试验机 MTS-370,试样总长为 102 mm,标距段 长为 14 mm,标距段直径为 5.5 mm,试样夹持端和夹具采 用螺纹连接。具体尺寸及形位公差如图 1 所示。

IC10 合金 600℃的恒温疲劳试验的热环境通过高温 环境箱实现。在加热到指定温度后保温 30 min,使试样温 度均匀分布以防止疲劳试验过程中产生较大的热梯度。

基金项目:国家自然科学基金项目(91860111);航空动力基金项目(6141B090317)

第一作者简介:畅一鹏(1995—),男,山西应县人,硕士研究生,研究方向为高温合金疲劳行为与本构关系。



2 疲劳循环应力应变曲线

IC10 合金 600 ℃恒温低周疲劳试验,采用轴向应变控制,加载应变速率为 6.0×10⁻³ s⁻¹,应变比 R=-1,加载波形为三角波,应变水平分别为 $\Delta \varepsilon_i / 2$ 等于 0.75%、0.85% 和 1.00%,试验终止条件为试样断裂或最大应力下降 30%。试验结果如图 2、图 3 所示。



图 2 IC10 合金 600 ℃下的循环应力-应变曲线

由图 2 中可知:LCF(低周疲劳)试验单个循环内,应 力与应变保持着良好单调变化关系,应力值始终随着应变 加载而增大,随着应变卸载而减小。随着应变水平的增 加,材料循环的迟滞特征愈发明显,随着循环周次的增加, 材料的应力逐渐增大,表现出明显的循环硬化特征,并且 循环应力-应变曲线表现出拉-压不对称。

由图 3 可知:在 3 种载荷水平下,IC10 合金循环应力响 应特征基本相同,均表现为初始循环硬化,随后保持循环稳 定并在最终断裂前出现应力突降。造成这种破坏的主要原 因是:IC10 合金的微观结构中除了 γ'相外还存在相当数量 的 γ 相。材料在承受低周疲劳载荷作用时,位错在 γ 相上 大量出现,随着变形的不断重复,在胞壁上位错的增值以及 位错与强化相之间的交互作用对位错运动产生阻碍,应力 也随之逐步增大,增大了材料的变形抗性,在宏观上表现为 所需外加载荷随循环数增加而增大。于慧臣^[7]指出镍基定 向凝固合金在 760 ℃以下表现为宏观硬化主要与基体相中 的位错缠结有关,杨功显^[8]等则认为,镍基合金在不同温度 下的循环硬化现象主要与位错切割机制相关。



3 断裂特性分析

图 4 为各个应变水平下试样的宏观断口示意图,对其 进行目测分析,可以得到:在 0.75%应变水平下,断口表面 较为光滑且平整,有金属光泽,呈现为 V 型试样断口;而 在 0.85%、1.00%应变水平下,断口表面不平整且粗糙,呈 现为斜断口,并带有不同程度的花纹状,这表明疲劳应力 越大,单次造成的破坏越大,表面越粗糙。



图 4 不同应变水平下的宏观断口图

为进一步研究 IC10 疲劳的断裂机理,本文对各个应变 水平下试件断口进行 SEM 观测,图 5 为样品的断口形貌图。 图 5(a)-图 5(c)为应变水平为 0.75%的不同放大倍数的断口形貌图,其中低、中倍下可以明显观察到断口存在大量滑移线,主要为拉压循环中断面之间相互摩擦导致;同时也可以明显观测到断面分布较多的裂纹与空洞的微观形貌。放大倍数则可以明显看到在微孔旁边产生大量的裂纹,这表明合金在未形成裂纹前随着循环次数的增加,不断产生滑移,当循环到一定程度时由于滑移挤压导致心部产生了裂纹和微孔从而断裂。

图 5(d)-图 5(i) 为应变水平为 0.85%及 1.00%的断 口形貌图,其中在低倍下存在大量的台阶形貌,并且台阶 的高度差较大,同时伴随着部分舌状花样;在中、高倍下可 以看到裂纹沿晶粒内部穿过,为明显的穿晶断裂,断口存 在部分韧窝,随着应变水平的增加,韧窝数量增加,较为紧 密。这表明断裂主要以穿晶断裂为主,同时伴随着少量的 韧窝聚集型断裂。

以上分析表明:IC10 合金在低应变水平循环实验时, 主要以疲劳断裂为主,在周期性载荷下发生局部滑移现 象,并且滑移面取向呈现 45°夹角,晶粒断面沿平面延伸, 同时由于内部挤压产生显微空穴以及裂纹,并且裂纹逐渐 扩展直至断裂。随着应变水平的提高,材料的滑移水平不 断提升,晶粒内部位错急剧增加,导致晶粒强度下降,裂纹 从晶粒内部萌生,从而导致穿晶断裂,同时在基体与晶粒 之间大量的位错塞积、聚合产生如图 5(f)和图 5(h)中明 显可见的微孔洞,随着循环的增加,孔洞逐渐生长聚集造 成部分韧窝的产生。因此 IC10 合金主要表现为宏观上延 性穿晶断裂,微观上,在低应变水平下主要以滑移条带为 主,随着应变水平的增加,逐渐表现为微孔聚合型断裂。



1338.



图 4 优化后层合板形变量云图

5 结语

本文在复合材料力学经典层合板理论的基础上,借助 ANSYS 实现了复合材料的分析;以经典遗传算法为基础, 提出了一种自适应遗传算法,通过 MATLAB 建立自适应 遗传算法程序。两者相结合建立了复合材料铺层设计优 化平台,并得到以下结论:

1) 以层合板最大形变量为优化目标,利用提出的自适应遗传算法,依据适应度值调整个体的交叉概率和变异概率,相比于经典遗传算法的优化方案提高了算法的收敛速度。

2)以单向载荷下层合板铺层优化设计为例进行了验证,结果显示优化后的层合板最大形变量显著减小,并对优化结果进行有限元仿真,仿真结果表明,理论上优化后的最大形变量与实际层合板在该铺层角度下形变量相一致,验证了该优化平台的可靠性与有效性。

参考文献:

 薛忠民.中国玻璃钢/复合材料发展回顾与展望[J].玻璃钢/ 复合材料,2015(1):5-12.

[3] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报,2007, 24(1):1-12.
 [4] 修英姝,崔德刚. 复合材料层合板稳定性的铺层优化设计

[J]. 工程力学,2005,22(6): 212-216.
[5] 鲁大伟,李书. 应用免疫遗传算法优化设计层合板铺层顺序
[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(2):247-250.

[2] 邢丽英,包建文,礼嵩明,等. 先进树脂基复合材料发展现

状和面临的挑战[J]. 复合材料学报, 2016, 33(7): 1327-

- [6] TUAN L M, JAEHONG L. Stacking sequense optimization for maximum strengths of laminated composite plates using genetic algorithm and isogeometric analysis [J]. Composite Structures, 2014,116:357-363.
- [7] 金达锋,刘哲,范志瑞. 基于遗传算法的复合材料层合板削层 结构铺层优化[J]. 复合材料学报,2015,32(1):236-242.
- [8] 史旭东,陈亮,张碧辉,等. 基于遗传算法的大展弦比复合材料机翼结构优化设计[J]. 航空工程进展,2015,6(1):110-115.
- [9] 李磊. 基于遗传算法的复合材料层合结构优化设计[D]. 长沙: 国防科学技术大学,2005:29-47.
- [10] 冯消冰,黄海,王伟. 大型风机复合材料叶片铺层优化设计 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(3):3-7.
- [11] 丁玲,孙辉,贾宏光,等.应用遗传算法优化设计机翼复合材 料蜂窝夹层结构蒙皮[J].光学精密工程,2014,22(12): 3272-3279.
- [12] 武佳男, 倪爱清, 杨斌, 等. 复合材料声呐导流罩铺层的遗传算法优化设计[J]. 玻璃钢/复合材料, 2017(11):80-85.
- [13] 史旭东,陈亮,张碧辉,等. 基于遗传算法的大展弦比复合材 料机翼结构优化设计[J]. 航空工程进展,2015,6(1):110-115.

收稿日期:2019-01-15

(上接第10页)

4 结语

本文针对 IC10 合金开展了 600 ℃高温环境下的低周 疲劳试验研究,分析了材料的力学行为与断裂机制,

 IC10 高温合金在单个载荷内应力与应变保持单 调变化关系,循环响应迟滞回线关于原点不对称。在整体 寿命周期内,循环应力响应特征主要表现为初始循环硬化 后进入循环稳定阶段,并在最终断裂前出现应力下降情 况。IC10 合金在承受低周疲劳载荷作用时,大量位错集 中于基体γ相,随着循环的进行,胞壁位错密度增大,在宏 观上表现为所需的外载荷随着循环次数的增加而增大。

2) IC10 合金呈现出多种疲劳裂纹特征。在低应变水 平下,材料断口表面光滑平整,且具有大量的滑移线;而在 高应变水平下,材料表面粗糙且凹凸,微观上存在韧窝以 及二次裂纹等,这主要与晶粒内部位错的增加以及晶界处 微孔的产生有关。

参考文献:

- [1] 张鹏,朱强,秦鹤勇,等. 航空发动机用耐高温材料的研究进 展[J]. 材料导报,2014(11): 27-31.
- [2] 寇海军. 民航发动机高压压气机叶片多工况振动特性及疲劳 研究[D]. 天津:天津大学,2017.
- [3] 聂聪,苏宏华,胡浩. 铸造高温合金 K423A 内圆车削工艺优化 研究[J]. 机械制造与自动化,2018,47(4):17-20.
- [4] 张仕朝,于慧臣,李影.不同应变比下 GH3030 合金的高温低
 周疲劳行为[J].机械工程材料,2014(1):56-59.
- [5] 安金岚, 王磊, 刘杨, 等. 长期时效对 GH4169 合金组织演化及 低周疲劳行为的影响[J]. 金属学报, 2015(7): 835-843.
- [6] 肖磊,冯赣江.新型单晶高温合金 WZ4 的高温低周疲劳行为 [J]. 热加工工艺,2019(2):50-54.
- [7]于慧臣,李影,张国栋,等.一种定向凝固镍基高温合金的高 温低周疲劳行为[J].失效分析与预防,2008(1):1-6.
- [8] 杨功显,徐永锋,江雷,等.一种镍基高温合金的低周疲劳性 能[J]. 材料热处理学报,2012(8):45-52.

收稿日期:2019-02-26