

不同试样形状与尺寸对 DZ406 合金持久性能的影响

张丽¹, 张仕朝¹, 郭婧²

- 中国航发北京航空材料研究院, 航空材料检测与评价北京市重点实验室, 中国航空发动机集团材料检测与评价重点实验室, 北京 100095
- 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002

摘要 随着航空发动机涡轮工作温度不断升高, 涡轮叶片内腔结构日趋复杂, 空心内腔气冷薄壁结构要求涡轮叶片的壁非常薄。针对薄壁试样性能与标准试样相比性能可能有所改变的情况, 采用圆柱形标准试样和3种不同厚度的薄壁试样研究了900℃和1030℃条件下第二代定向凝固合金 DZ406 的持久性能。结果表明: DZ406 合金具有明显的薄壁效应, 且相同温度应力条件下, 试样壁厚越小, 持久寿命下降越严重; 断口分析表明, 合金的持久失效机理由“表面氧化产生的裂纹扩展”和“内部蠕变损伤”2种方式共同作用; 持久性能的有效应力与试样表面氧化层厚度的关系表明, 表面氧化层厚度对薄壁试样的持久性能具有显著影响。

关键词 薄壁效应; 持久性能; 失效机制; 定向凝固合金

定向凝固高温合金是一类兼具优良力学性能与工艺性能的高温结构材料, 被广泛应用于航空发动机涡轮叶片。为满足航空发动机涡轮叶片对第二代定向合金的需求, 综合平衡高温强度及铸造性能, 中国研制了含 Re 的镍基定向凝固高温合金 DZ406, 该合金具有良好的高温抗氧化性能, 高温强度达到国外第二代定向凝固高温合金水平, 已被应用于制作某型航空发动机涡轮叶片^[1-3]。随着涡轮

工作温度的不断提高, 叶片内腔结构日趋复杂, 并尽可能采用薄尾缘以减少气动损失。这种空心内腔气冷薄壁结构要求涡轮叶片的壁极薄, 材料性能和圆柱形标准试样相比有所变化, 由此产生薄壁效应^[4-6], 使得直接应用圆柱形标准试样获得的性能数据设计薄壁结构带来较危险的结果。为准确评价薄壁零部件的使用性能和叶片的优化设计, 必须充分理解材料的薄壁性能及其失效机制。

收稿日期: 2022-11-29; 修回日期: 2023-03-07

作者简介: 张丽, 工程师, 研究方向为航空发动机用金属材料的力学行为, 电子信箱: zli335@163.com

引用格式: 张丽, 张仕朝, 郭婧. 不同试样形状与尺寸对 DZ406 合金持久性能的影响[J]. 科技导报, 2024, 42(16): 108-113;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2022.11.01856

对于铸造高温合金的薄壁性能已有一些研究^[7-9], Seetharaman 等^[10]研究了 PWA1484 单晶合金两种壁厚试样的蠕变性能, 结果表明试样壁厚从 3.18 mm 降低到 0.38 mm, 蠕变寿命降低 60%。Doner 等^[11]的研究表明, 当施加应力低于 275 MPa 时, 未加涂层的 CMSX-3 合金试样受厚度影响显著。刘维维等^[12]研究了 [011] 取向 DD6 合金不同温度下薄壁试样的持久性能发现, 与标准试样持久寿命相当。张丽等^[13]对 [001] 取向 DD6 合金的研究结果发现, 合金的薄壁效应非常明显, 且随着试样壁厚的减小, 持久寿命降低越严重。余昌奎等^[14]对 DD499 单晶合金 0.8 mm 和 1.2 mm 两种壁厚试样持久性能的研究也得到类似结论, 即薄壁试样的持久寿命明显低于标准试样, 随着壁厚减少持久性能下降, 对持久断口的观察中发现存在一定厚度的氧化层, 使其有效截面显著减少, 但认为氧化层厚度占试样总厚度的比例相对较小, 对持久寿命的影响较小。刘世忠等^[7]对 DD6 合金薄壁性能研究发现, 薄壁效应受温度影响较大, 760℃ 下薄壁试样持久性能高于标准试样, 980℃ 下薄壁试样先高后低, 1070℃ 下薄壁试样略低于标准试样。张强等^[15]研究了一种定向凝固高温合金的管状薄壁试样的持久性能发现, 与标准试样相比没有明显下降。

尽管有关铸造高温合金薄壁持久蠕变性能的

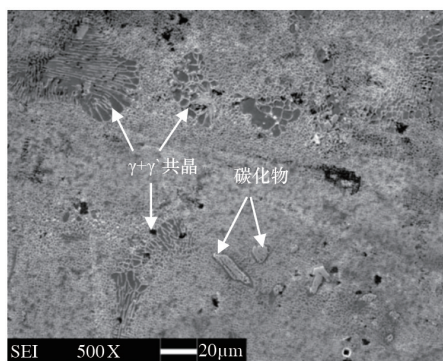
研究已有报道, 但数据的局限性使得部分结论还需进一步考证。本研究针对中国自主研发的第二代定向凝固高温合金 DZ406, 分析其在 900℃ 和 1030℃ 高温条件下标准圆柱形试样和 3 种壁厚薄壁试样的持久性能, 对比不同形式试样的持久性能和断裂机理。

1 实验及方法

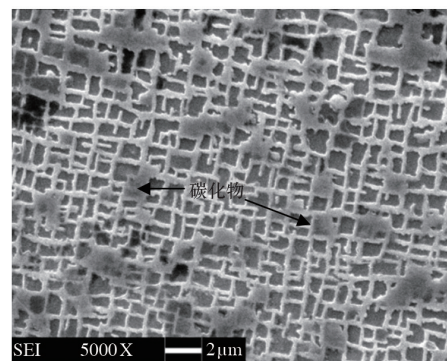
试验所用 DZ406 高温合金采用真空感应熔炼炉熔炼浇注成具有定向柱晶组织的试棒, 试棒经热处理后, 机加工成标准圆柱形试样和薄壁片状试样。试样的化学成分见表 1。经固溶+时效处理后, 合金的微观形貌见图 1。低倍形貌可以看出, 合金组织不均匀, 除弥散分布于基体的细小 γ 析出相外, 在枝晶间还存在着较多的 $(\gamma+\gamma')$ 共晶和碳化物。 $(\gamma+\gamma')$ 共晶呈葵花状, 最大宽度约为 50 μm 。合金组织的均匀性取决于其成分均匀性, Hf 是一种严重的正偏析元素, 尤其 Hf 为强烈的 γ 形成元素, 主要在枝晶间富集, 即使通过相关的均匀化热处理, 偏析也难以完全消除, 因而, 枝晶间仍存在较多的 $(\gamma+\gamma')$ 共晶。碳化物尺寸较大 (>10 μm), 主要呈块状和条状分布 (图 1(a))。高倍形貌可以看出, 合金中的 γ 呈规则立方状, 碳化物为弥散分布

表 1 DZ406 高温合金的化学成分

元素	C	Cr	Co	Al	W	Mo	Ta	Re	Hf	B	Ni
质量分数/%	0.1	6.7	11.8	6.1	5.9	1.5	6.5	2.9	1.5	0.015	余



(a) 低倍形貌

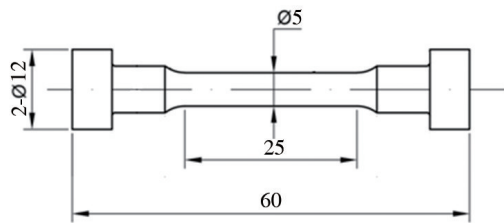


(b) 高倍形貌

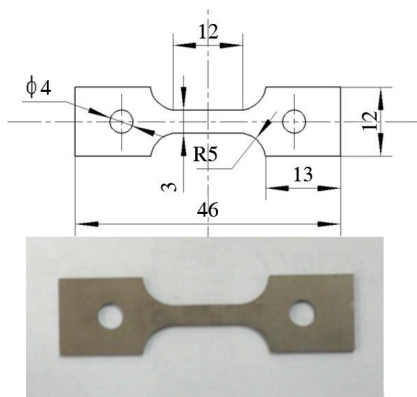
图 1 DZ406 合金显微组织形貌

的块状(图1(b)),由于Hf及C、B晶界强化元素的加入,合金中 γ 不能完全固溶,即使在1280℃固溶后,合金仍有残留的 $(\gamma+\gamma')$ 共晶相,晶界由 γ 和析出的碳化物组成。

标准试样采用工程上常用的直径为5 mm、标距为25 mm的圆柱形试样,形状和尺寸见图2(a),薄壁试样形状和尺寸见图2(b),试样宽度为3 mm,试样厚度分别为1.0 mm、0.8 mm和0.4 mm。



(a) 标准圆柱形试样



(b) 薄壁试样

图2 试样形状和尺寸(单位:mm)

根据叶片工作状态的服役温度范围,选取试验温度为900℃和1030℃,试验在国产机械式蠕变持久试验机上进行,按照标准《HB5150—1996金属高温拉伸持久试验方法》进行测试。用场发射扫描电子显微镜(LSM-5600LV)对试样断口形貌进行观察,分析合金的持久断裂机制。

2 结果与分析

2.1 合金的持久性能

图3给出DZ406合金标准试样及薄壁试样在

900℃和1030℃条件下的试验数据,其中星形为标准试样的持久试验数据,其他为薄壁试样的持久试验数据,图中的曲线为采用Larson-Miller方程拟合的中值曲线。由图可见,试验温度为900℃时,DZ406合金4种试样的持久试验数据相近,薄壁效应不明显,从中值拟合曲线来看,在持久寿命高于100 h的区域内,标准试样略高于薄壁试样,且试样越薄,曲线下降程度越大,薄壁效应越明显;持久寿命为1000 h时,厚度为1.0 mm、0.8 mm和0.4 mm的薄壁试样的中值持久强度相比于标准试样分别下降了3%、10%和17%;在1030℃条件下,薄壁试样的持久寿命明显低于标准试样,表现出非常显著的薄壁效应,厚度为1.0 mm、0.8 mm和0.4 mm的薄壁试样的中值持久强度相比于标准试样分别下降了14%、11%和20%。

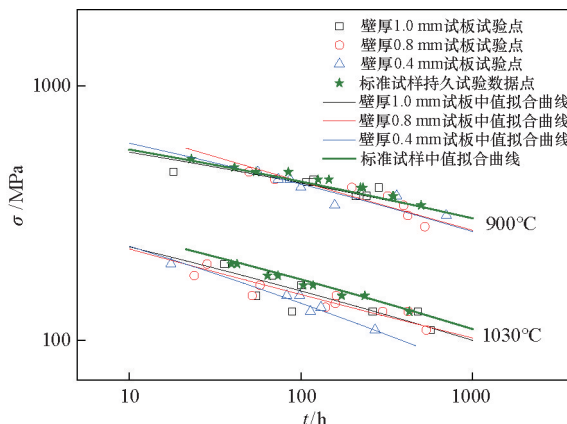
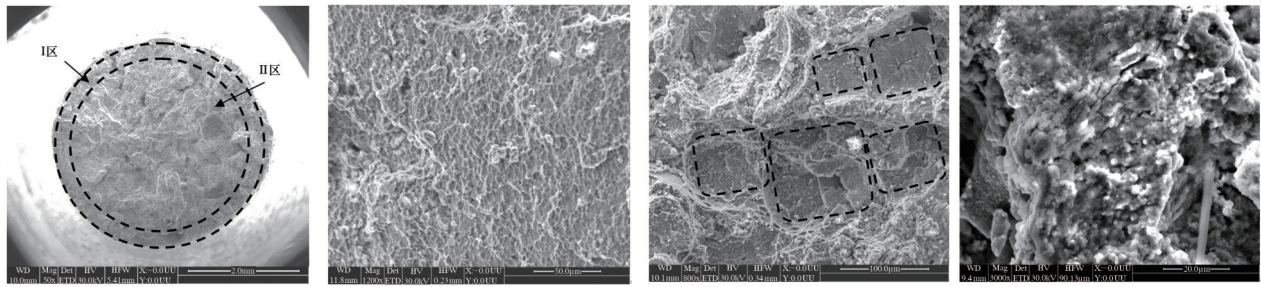


图3 DZ406合金持久应力-寿命曲线

2.2 合金的断裂特征

图4给出了DZ406合金在1030℃、150 MPa条件下(持久寿命为235.6 h)标准试样的持久断口形貌。试样断口形貌呈杯锥状(图4(a)),可分为I区和II区2个区域,I区为氧化层区,边缘可见大量浅韧窝形貌(图4(b)),II区为蠕变扩展区,可观察到大量方形的小平面(图4(c)),小平面的中心有一个小圆孔,这样的小圆孔可能为合金中预先存在的微孔,也可能是位错滑移形成的蠕变孔洞,小平面之间通过二次裂纹连接(图4(d))。

图5给出了壁厚为0.8 mm的薄壁试样在1030℃、150 MPa条件下(持久寿命为160.3 h)的断

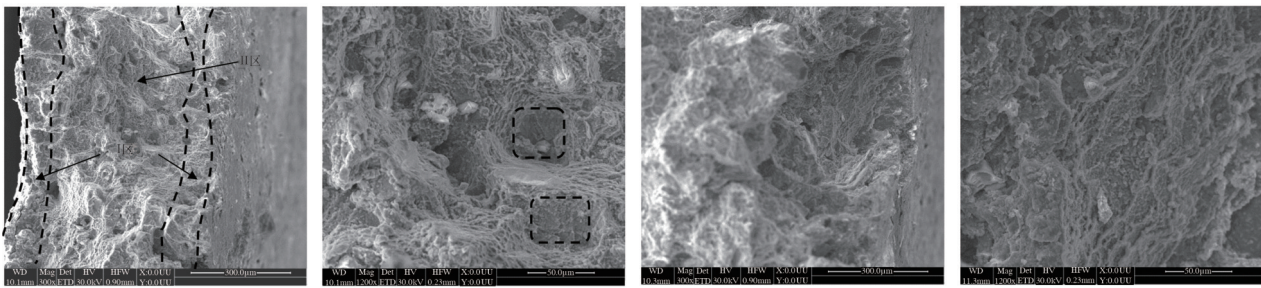


(a) 整体形貌 (b) I区域形貌 (c) II区方形小平面形貌 (d) 方形小平面间的二次裂纹

图4 标准试样断口形貌(持久寿命为235.6 h)

口形貌,其宏观断口相比于标准试样更粗糙,两个区域的界限不明显(图5(a))。II区断口中部区域可见大量的方形小平面及孔洞,相对于标准试样,薄壁试样的方形小平面较为分散,且相互之间有一

定的高度差,小平面之间由浅韧窝和二次裂纹相连接(图5(b))。I区氧化层区非常粗糙,可见大量浅韧窝形貌(图5(c)和图5(d))。

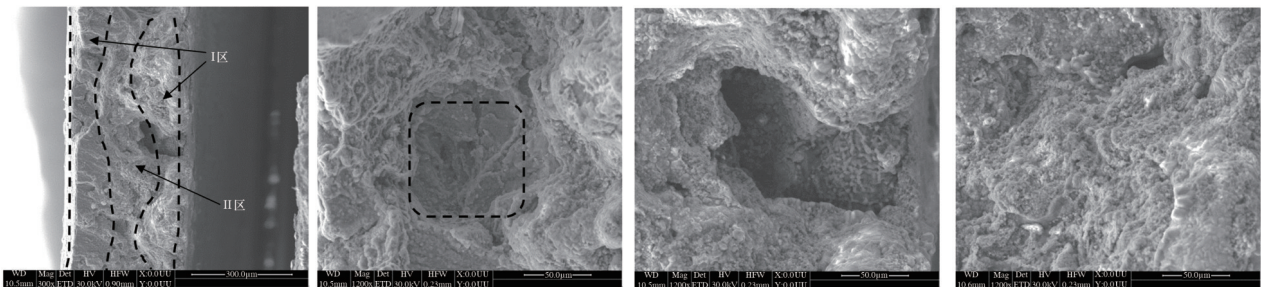


(a) 整体形貌 (b) II区域形貌 (c) I区形貌 (d) I区剪切唇形貌

图5 壁厚0.8 mm试样持久断口形貌(持久寿命为160.3 h)

图6给出了壁厚为0.4 mm的薄壁试样在1030℃、150 MPa条件下(持久寿命为98.4 h)的断口形貌。断口表面粗糙,分区明显(图6(a)),I区氧化区域占据了很大的面积,左侧I区的形貌较为平

缓,可见裂纹扩展的棱线,右侧I区的形貌较为粗糙,多为浅韧窝形貌(图6(d)),还有最终断裂时裂纹相连接导致的缺口(图6(c))。II区蠕变扩展区较小,含孔洞的方形小平面数量也较少(图6(b))。



(a) 整体形貌 (b) II区方形小平面形貌 (c) I区形貌 (d) I区氧化层形貌

图6 壁厚0.4 mm试样持久断口形貌(持久寿命为98.4 h)

3 讨论

3.1 薄壁效应分析

由DZ406合金持久性能结果及断口分析可知,薄壁试样的持久性能明显低于标准试样,且薄壁试样的壁厚越小,表面氧化程度越大,持久寿命越短,因此,合金薄壁试样的高温持久断裂过程与表面氧化层有密切关系。氧化层的形成使试样的有效承载面积减少,造成试样所承受的有效应力增加。计算标准试样和不同厚度薄壁试样随表面氧化层变化的有效应力,对比标准试样与壁厚1.0 mm、0.8 mm和0.4 mm薄壁试样的有效应力变化,如图7所示。可见,在相同氧化层厚度下,试样越薄,有效应力增加的幅度越大,试样实际受载应力越大,从而持久寿命越短。

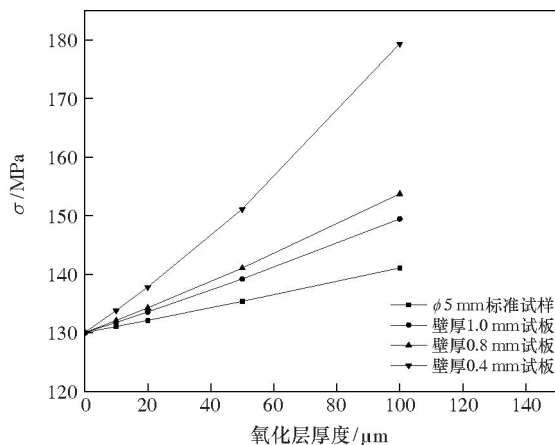


图7 DZ406合金有效应力与氧化层厚度关系

3.2 持久断裂模型分析

综合上述分析,可以推断DZ406合金持久断裂过程是“表面氧化—裂纹萌生—扩展”和“内部蠕变损伤”两者综合作用的结果,与文献[13]、[16、17]中DD6合金薄壁试样的断裂模式类似。在高温持久加载过程中,首先在表面形成氧化层,同时内部出现蠕变空穴;然后表面氧化层进一步氧化,产生裂纹,而内部的蠕变空穴在温度和应力的联合作用下长大形成断口上可见的韧窝;随着持久过程的进行,表面氧化层形成的部分微裂纹扩展,而内部的

韧窝或者相遇形成二次裂纹,或者通过撕裂棱面而互相联结起来;随着变形过程的加剧,表面裂纹扩展至内部,与内部产生的大量韧窝和二次裂纹相遇,由于表面氧化层和内部韧窝的存在,使得未被断部分所承受的应力越来越大,从而导致最后的大应力破断。这样的断裂过程在壁厚较薄的试样中体现得尤其明显,表面氧化损伤的影响表现得更为明显,持久寿命较短。对于标准试样和壁厚较大的试样,内部蠕变损伤占据主导,因此,持久寿命较长。另外,由于薄壁试样的横截面积较小,相同表面氧化层相比于标准试样所占的比例较大,从而造成合金的有效应力比标准试样高,且壁厚越小,有效应力越大,因此,造成随着壁厚减小,持久寿命相应地降低。

这也解释了900℃条件下寿命较短(<100 h)的区域内薄壁效应不明显的现象。在温度较低、寿命较短的情况下,表面氧化层较薄,则有效应力与名义加载应力相差不大,即图3所示的左侧部分;此外,持久试验时间较短,氧化形成的裂纹来不及扩展,表面氧化损伤不凸显,因此,薄壁效应不明显。然而,在高温和长寿命区,表面裂纹扩展较为充分,因此,薄壁效应明显。

4 结论

从持久寿命、断口形貌、氧化层和有效应力等方面,研究了定向凝固高温合金DZ406的薄壁效应,得出以下结论:

1) 900℃长寿命区域及1030℃条件下,材料存在较为明显的薄壁效应,并且试样壁厚越小,薄壁效应越显著;

2) 材料的高温持久断裂过程是“表面氧化—裂纹萌生—扩展”和“内部蠕变损伤”综合作用的结果,内部蠕变损伤占主导时,持久寿命较长,表面氧化损伤占主导,持久寿命较短;

3) 持久性能的薄壁效应表现为在相同氧化层厚度下,试样越薄,有效应力增加越明显,持久寿命越短。

参考文献 (References)

- [1] 张卫方, 高威, 赵爱国, 等. 定向凝固合金叶片的疲劳断裂分析[J]. 机械工程材料, 2003, 27(9): 48-51.
- [2] 宁礼奎, 郑志, 张达, 等. DZ406 合金及其渗铝涂层 1100℃氧化性能研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(5): 403-406.
- [3] 张卫方, 李运菊, 高威, 等. 定向凝固 DZ4 合金的低周疲劳与断裂行为研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(2): 217-220.
- [4] 张仕朝, 李莉, 侯学勤. 第二代定向柱晶高温合金低周疲劳行为研究[J]. 机械强度, 2017, 39(2): 311-345.
- [5] 刘峰, 张重远, 王景丽, 等. 表面再结晶对 DZ406 定向凝固镍基高温合金力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(16): 153-155.
- [6] 谭政, 刘峰, 佟健, 等. 再结晶对定向凝固镍基高温合金 DZ406 高温拉伸性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(6): 11-15.
- [7] 刘世忠, 李嘉荣, 李骋, 等. 第二代单晶高温合金 DD6 的薄壁持久性能[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(7): 276-278.
- [8] Zhang B, Lu X, Liu D L, et al. Influence of recrystallization on high-temperature stress rupture and fracture behavior of single crystal superalloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 551: 149-153.
- [9] 陈荣章. 我国航空发动机用铸造高温合金发展[J]. 材料工程, 1989(4): 2-6.
- [10] Seetharaman V, Cetel A D. Thickness debit in creep properties of PWA 1484[C]//Super alloys 2004. Pennsylvania: The Minerals, Metals & Materials Society(TMS), 2004: 207-214.
- [11] Doner M, Heckler J A. Identification of mechanisms responsible for degradation in thin-wall stress-rupture properties[C]//Super alloys 1988. Pennsylvania: The Minerals, Metals & Materials Society(TMS), 1988: 653-662.
- [12] 刘维维, 李影, 刘世忠, 等. [011]取向 DD6 单晶高温合金薄壁持久性能[J]. 材料工程, 2011, 8: 24-27.
- [13] 张丽, 于慧臣, 郭广平, 等. [001]取向 DD6 单晶合金的薄壁持久性能与断裂行为[J]. 航空动力学报, 2019, 34(3): 627-634.
- [14] 余昌奎, 于金江, 仇凤江, 等. DD499 单晶合金持久性能薄壁效应[J]. 铸造, 2014, 63(5): 479-483.
- [15] 张强, 黄朝晖, 仝建民. 一种定向凝固高温合金的薄壁效应研究[J]. 特种铸造及有色金属, 2005, 25(5): 260-261.
- [16] Hu Y B, Zhang L, Cao T S, et al. The effect of thickness on the creep properties of a single-crystal nickel based superalloy[J]. Materials Science & Engineering: A, 2018, 728: 124-132.
- [17] Hu Y B, Cheng C Q, Zhang L, et al. Microstructural evolution of oxidation film on a single crystal nickel-based superalloy at 980℃[J]. Oxidation of Metals, 2018, 89: 303-317.

Effects of different sample shapes and sizes on stress rupture property of DZ406 superalloy

ZHANG Li¹, ZHANG Shichao¹, GUO Jing²

1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation Aero Engine Corporation of China, Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Materials Testing and Evaluation, Beijing 100095, China
2. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China

Abstract As the working temperature of aero-engine turbine continues to rise, the inner cavity structure of turbine blades becomes more and more complex. Such hollow air-cooled thin-wall structure requires the very thin wall of turbine blades, while the performance of thin-wall sample may be different compared with standard sample. The stress rupture properties and the fracture character of the second generation directionally solidified alloy DZ406 at 900℃ and 1030℃ were studied by using the round bar specimen and three thin-walled specimens with different thicknesses. Results show that the thin-wall effect was very obvious, and under the same test condition, the smaller the wall of the specimen, the more serious the decline of the life. The fracture analysis indicate that the fracture mechanism of DZ406 superalloy by the coalescence of the 'surface oxidation-crack initiating-crack growth' and 'inside creep damage'. The relationship between effective stress and oxidation thickness indicates that the surface oxidation had great influence on the durability of the thin-wall specimens.

Keywords thin wall effect; stress rupture; fracture mechanism; directionally solidified superalloy ●



(责任编辑 王丽娜)