

[001]取向 DD6 单晶合金的薄壁试样持久性能与断裂行为

张丽^{1,2,3,4}, 于慧臣^{1,2,3,4}, 郭广平^{1,2,3,4}, 赵杰⁵, 赵澎涛^{1,2,3,4}

(1. 中国航空发动机集团有限公司 北京航空材料研究院, 北京 100095;

2. 中国航空发动机集团有限公司 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, 北京 100095;

3. 中国航空发动机集团有限公司 北京航空材料研究院
材料检测与评价航空科技重点实验室, 北京 100095;

4. 中国航空发动机集团有限公司 北京航空材料研究院
材料检测与评价重点实验室, 北京 100095;

5. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116085)

摘 要: 采用薄壁试样研究了温度为 980℃、应力为 250 MPa 条件下[001]取向 DD6 单晶合金的薄壁持久失效行为,结果表明:薄壁试样的持久寿命低于标准圆棒试样,表现出显著的薄壁效应。薄壁试样的厚度和持久寿命之间存在函数关系。薄壁试样持久断口边缘区域氧化严重,内部区域为微孔聚集型断裂,持久断裂模式为“表面氧化-裂纹萌生-扩展”和“内部蠕变损伤”共同作用,且试样越薄,表面氧化程度越大,持久寿命越短。

关 键 词: 单晶合金; 薄壁效应; 持久性能; 断裂机制; 微孔聚集型

中图分类号: V252.2

文献标志码: A

Stress rupture properties and fracture behavior of thin wall specimens of DD6 single crystal superalloy with [001] direction

ZHANG Li^{1,2,3,4}, YU Huichen^{1,2,3,4}, GUO Guangping^{1,2,3,4},
ZHAO Jie⁵, ZHAO Pengtao^{1,2,3,4}

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials,

Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China;

2. Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation,
Beijing Institute of Aeronautical Materials,

Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China;

3. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Material Testing and Evaluation,
Beijing Institute of Aeronautical Materials,

Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China;

4. Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing Institute of
Aeronautical Materials, Aero Engine Corporation of China, Beijing 100095, China;

5. School of Materials Science and Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116085, China)

收稿日期: 2018-08-21

作者简介: 张丽(1982—),女,工程师,博士,主要从事航空发动机材料的力学行为及断裂机理研究。

引用格式: 张丽,于慧臣,郭广平,等.[001]取向 DD6 单晶合金的薄壁试样持久性能与断裂行为[J].航空动力学报,2019,34(3):627-634. ZHANG Li, YU Huichen, GUO Guangping, et al. Stress rupture properties and fracture behavior of thin wall specimens of DD6 single crystal superalloy with [001] direction[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(3): 627-634.

Abstract: The stress rupture properties and the fracture character of thin wall specimens of DD6 single crystal superalloy with [001] direction were investigated at 980 °C and 250 MPa. Result showed that stress rupture life of the thin wall specimens was less than that of the standard sample, which exhibited thin wall effect obviously. There was a function relationship between thickness and stress rupture life. The edge zone of the fracture surface of thin wall specimens was oxidized seriously, while the inside zone was affected by microvoid coalescence fracture. The fracture of thin wall specimen was indicated by coalescence of the “surface oxidation-crack initiating-crack growth” and “inside creep damage”. The extent of surface oxidation was more serious, while the stress rupture life was shorter.

Key words: single crystal superalloy; thin wall effect; stress rupture property; fracture mechanism; microvoid coalescence fracture

镍基单晶高温合金具有优良的高温性能,是目前制造先进航空发动机燃气涡轮叶片的主要材料。随着航空发动机涡轮工作温度的不断提高,涡轮叶片内腔结构日趋复杂,这种空心内腔气冷薄壁结构要求涡轮叶片的壁非常薄,其力学性能通常不同于标准试样的力学性能。而这些部件的薄壁区又通常是使用性能的薄弱环节,其力学性能直接决定着该整体机件的使用性能和寿命^[1]。为了准确评价薄壁零部件的使用性能和寿命,明确薄壁对材料力学性能的影响是非常有必要的。

多年来,人们对铸造高温合金的薄壁效应进行了大量的研究。Seetharaman 等^[2]研究了 PWA1484 单晶合金薄壁试样厚度从 3.18 mm 降低到 0.38 mm,在温度为 760 °C、应力为 758 MPa 条件下(记为 760 °C/758 MPa,后文同)蠕变寿命降低 60%,但是机加后薄壁试样厚度对 871 °C 和 982 °C 持久寿命影响相对有限。Doner 等^[3]发现,当施加应力低于 275 MPa,未加涂层的 CMSX-3 合金试样受厚度影响显著。刘维维等^[4]对比了 [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。张强等^[5]对一种定向凝固高温合金的管状薄壁试样(壁厚 $\delta=1.0\sim1.4$ mm)持久性能研究发现,与标准试样相比没有明显下降。余昌奎等^[6]对 DD499 单晶合金两种壁厚试样(0.8 mm 和 1.2 mm)持久性能的研究中发现,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 °C 下薄壁试样持久性能高于标准试样,980 °C 下薄壁试样先高后低,

1070 °C 下薄壁试样略低于标准试样。尽管单晶合金薄壁持久性能及其合金断裂机制的研究已有诸多报道^[2-17],但数据的局限性使得部分结论还需进一步考证。本文采用不同厚度的薄壁试样对第二代单晶高温合金 DD6 的持久性能进行了研究,与标准试样(直径为 5 mm)的持久寿命进行对比,重点分析了壁厚对持久寿命及断裂机制的影响规律。

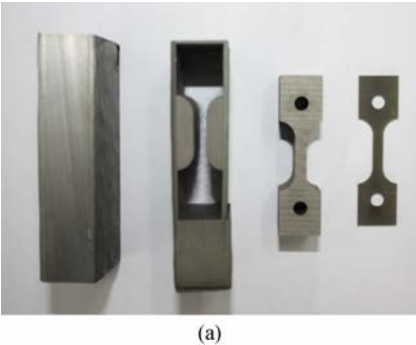
1 材料与试验

1.1 试验材料

本试验所用的 DD6 镍基单晶合金试块采用真空感应炉熔炼母合金,真空感应定向凝固炉重熔,熔模精铸和定向凝固法铸造。合金热处理制度为:1290 °C 保温 1 h 后,升温至 1300 °C 保温 2 h,再升温至 1315 °C 保温 4 h,然后空冷至 1120 °C 保温 4 h,然后再空冷至 870 °C 保温 32 h,最后空冷至室温。从 DD6 试块中采用线切割方法切取薄壁试样,具体形状和尺寸如图 1 所示,壁厚范围为 0.64~1.15 mm(该尺寸为试样制备完成后的精确测量尺寸)。

1.2 试验条件与装置

根据叶片工作状态的 actual 服役温度,以及该



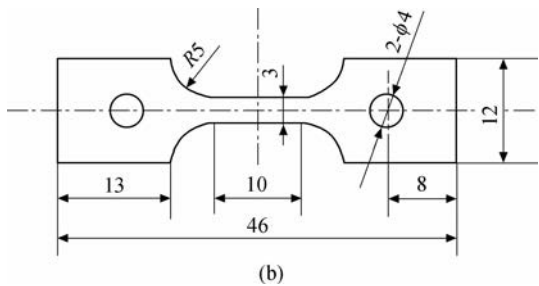


图 1 DD6 合金板状薄壁持久试样(单位:mm)
Fig. 1 Thin wall stress rupture specimens of DD6 single crystal superalloy (unit:mm)

合金的验收技术条件,确定持久试验温度为 980℃,加载应力为 250 MPa,持久试验在国产 RD-100 型高温微控电子式蠕变持久试验机上进行。用 Zeiss Supra 55 型扫描电子显微镜观察试样断口形貌。

2 试验结果与讨论

2.1 合金的持久性能

图 2 为 DD6 单晶合金持久试样在测试条件 980℃/250 MPa 下的试验数据,图中横线为该试验条件下标准试样的持久寿命为 316 h^[18]。由图可见,薄壁试样的持久寿命均低于标准试样,表现出显著的薄壁效应。薄壁试样的持久寿命随着壁厚的增加还呈现出一定的函数关系,采用线性、指数、对数和幂函数 4 种参数方程对试验数据进行拟合,得到式(1)~式(4)四个拟合方程,其相关系数分别为 0.752、0.775、0.765 和 0.792,差别不大,图中所示为线性拟合曲线。在壁厚为 0.67~1.12 mm 范围内的薄壁试样厚度越小,其持久寿命越低。

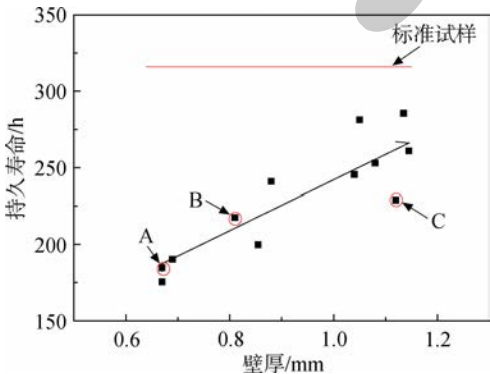


图 2 DD6 合金薄壁试样在 980℃/250 MPa 下的持久寿命
Fig. 2 Stress rupture lives of thin wall specimens of DD6 alloy at 980℃/250 MPa

线性曲线参数

$$\sigma = 165.7 \times t + 76.4 \tag{1}$$

指数曲线参数

$$\sigma = 114.0 \times \exp(0.743 \times t) \tag{2}$$

对数曲线参数

$$\sigma = 147.3 \times \ln t + 244.4 \tag{3}$$

幂函数曲线参数

$$\sigma = 242.4 \times t^{0.662} \tag{4}$$

2.2 持久试样断裂特征

为研究试样壁厚对持久断裂特征的影响,选取了 3 个厚度试样(图 2 中圆圈所示的 A、B、C)的持久断口进行观察分析,断口形貌如图 3~图 5 所示。980℃下,3 个试样的断口表面均发生较为严重的氧化(图 3(a)、图 4(a)和图 5(a)),且试样边缘区域可见大量的氧化物晶粒(图 3(b)、图 4(b)和图 5(b)),内部区域分布着许多近似正方形的小平面,小平面的主要通过撕裂棱相连,方形小平面的中心有一小圆孔(图 3(c)、图 4(c)和图 5(c))。这些小圆孔可能是合金中预存的微孔,持久断裂为微孔聚集型断裂,气孔和疏松为主要的裂纹源^[9-10]。对比 3 种厚度的断口宏观形貌可以发现,随着试样厚度的增加,边缘氧化区域减小,方形小平面的数量增多,其所占面积增大。这表明,试样厚度的变化对该合金的持久断裂模式产生了一定的影响。

图 6 给出了试样断口侧面形貌的照片,可见试样侧表面有明显的氧化现象及大量的微裂纹存在,且距离断口越近,微裂纹的数量越多。对比图 6(a)、图 6(c)和图 6(e)可见,试样越薄,侧表面的裂纹数量越多。

2.3 薄壁效应分析

从上述 DD6 合金薄壁试样持久性能断口分析可知,试样越薄,表面氧化程度越大,持久寿命越短,因此该合金薄壁试样的高温持久断裂过程与表面氧化层的产生有密切关系。氧化层的形成会使试样的有效承载面积减少,即持久试验过程中有效应力增加。假设持久试样横截面的氧化层厚度均匀,有效应力计算公式如下:

$$\sigma' = (\sigma_0 \cdot S)/S' \tag{5}$$

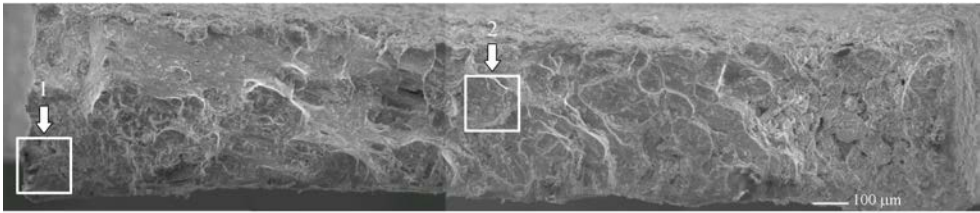
其中 σ' 为有效应力, σ_0 为名义加载应力, S 为名义横截面积, S' 为有效横截面积。

计算该合金不同厚度持久试样有效应力,并将计算结果作图得图 7 所示的有效应力 σ' 与试样氧化层厚度之间的关系,对比了 0.64、0.81、1.15

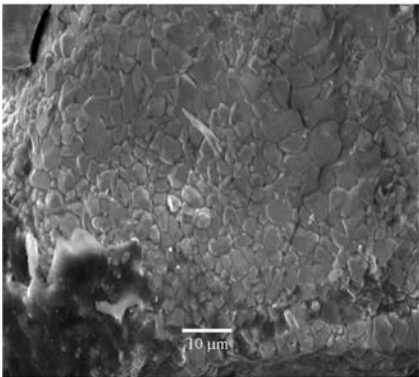
mm 三种试样厚度的有效应力变化情况。由图可见,在相同氧化层厚度下,试样越薄,有效应力增加的幅度越大。

基于上述结果可以推测,随着氧化层厚度的

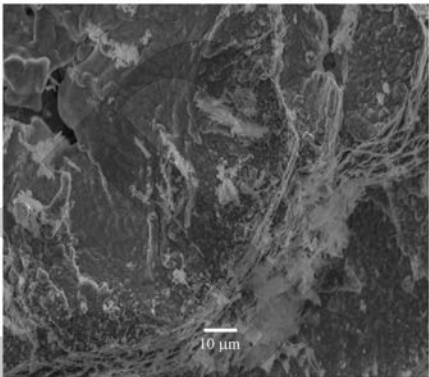
增加,薄试样有效应力变化程度相比于厚试样要大,即高温持久试验过程中的氧化对薄壁试样寿命的影响要大于对厚试样的影响。当试样尺寸达到一定尺度后,氧化所产生的影响可能会很小。



(a) 断口宏观形貌



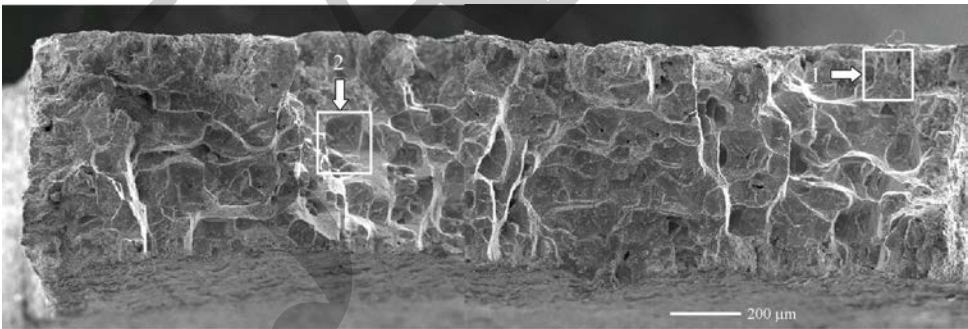
(b) 断口边缘区域形貌(图3(a)中1所示)



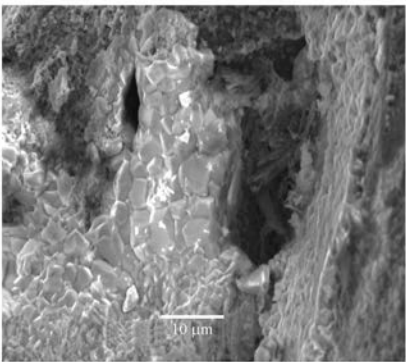
(c) 断口内部区域形貌(图3(a)中2所示)

图 3 试样 A(厚为 0.64 mm,持久寿命为 184.75 h)的断口形貌

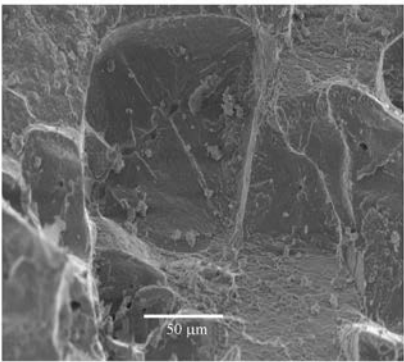
Fig. 3 Fractograph of the specimen A (thickness of 0.64 mm, stress rupture life of 184.75 h)



(a) 断口宏观形貌



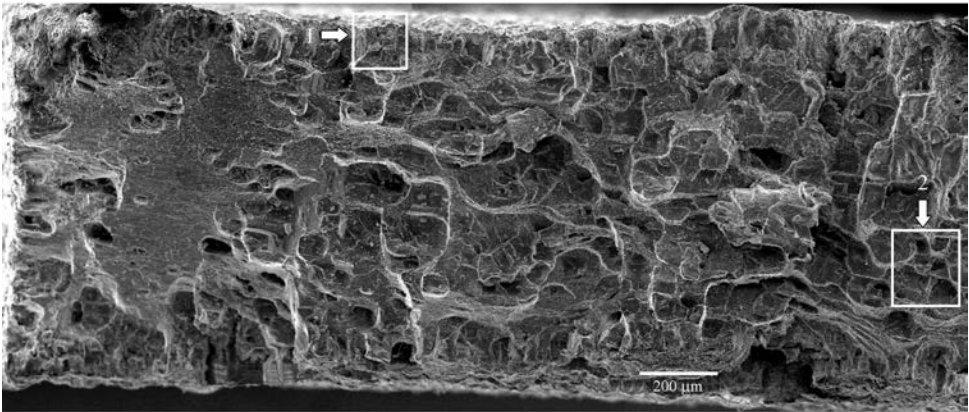
(b) 断口边缘区域形貌(图4(a)中1所示)



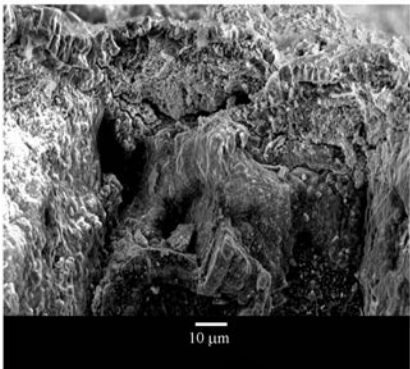
(c) 断口内部区域形貌(图4(a)中2所示)

图 4 试样 B(厚为 0.81 mm,持久寿命为 217.5 h)的断口形貌

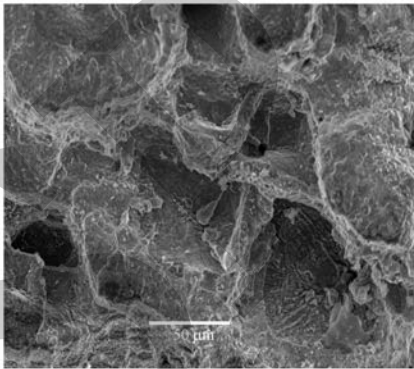
Fig. 4 Fractograph of the specimen B (thickness of 0.81 mm, stress rupture life of 217.5 h)



(a) 断口宏观形貌

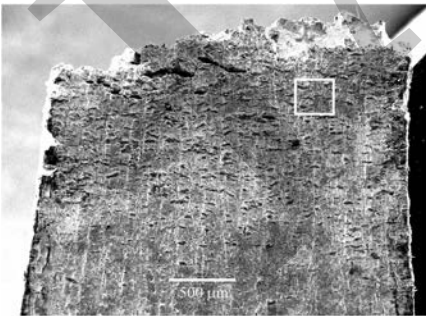


(b) 断口边缘区域形貌(图5(a)中1所示)

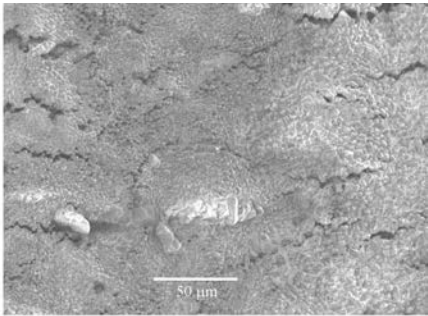


(c) 断口内部区域形貌(图5(a)中2所示)

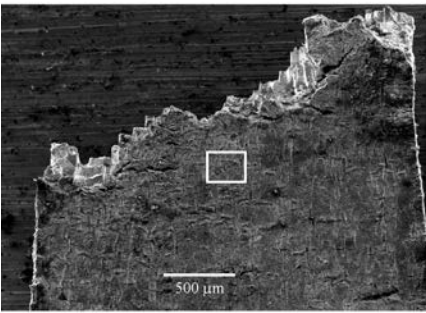
图 5 试样 C(厚为 1.15 mm,持久寿命为 229 h)的断口形貌
Fig. 5 Fractograph of the specimen C (thickness of 1.15 mm, stress rupture life of 229 h)



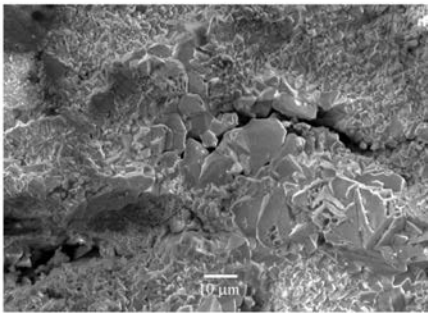
(a) 试样A



(b) 图6(a)中方框所示区域



(c) 试样B



(d) 图6(c)中方框所示区域

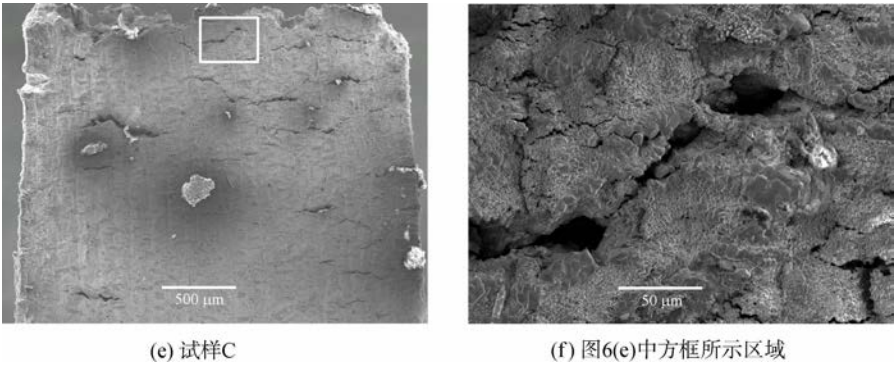


图 6 试样侧面形貌

Fig. 6 Graph of the profile of specimens

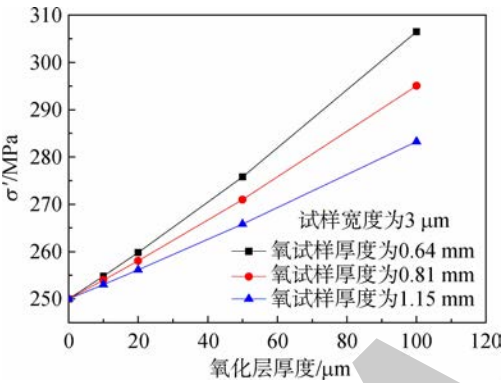


图 7 DD6 合金有效应力与氧化层厚度关系图

Fig. 7 Relationship between effective stress and oxidation thickness of DD6 alloy

2.4 薄壁试样持久断裂模式分析

综合上述因素,可以推断 DD6 合金薄壁试样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”两者综合作用结果,损伤过程示意图如图 8 所示,图中 LD(load direction)表示为持久加载方向在高温持久加载过程中,首先在表面形成氧化层,内部形成大量的蠕变空穴;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,或者通过撕裂棱而相互联结起来;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,使得未破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。在“表面氧化-裂纹萌生-扩展”和“内部蠕变损伤”两者关系中,试样蠕变程度越大,在寿命过程中所占的比例越大,则薄壁效应相对较小;相应的,如

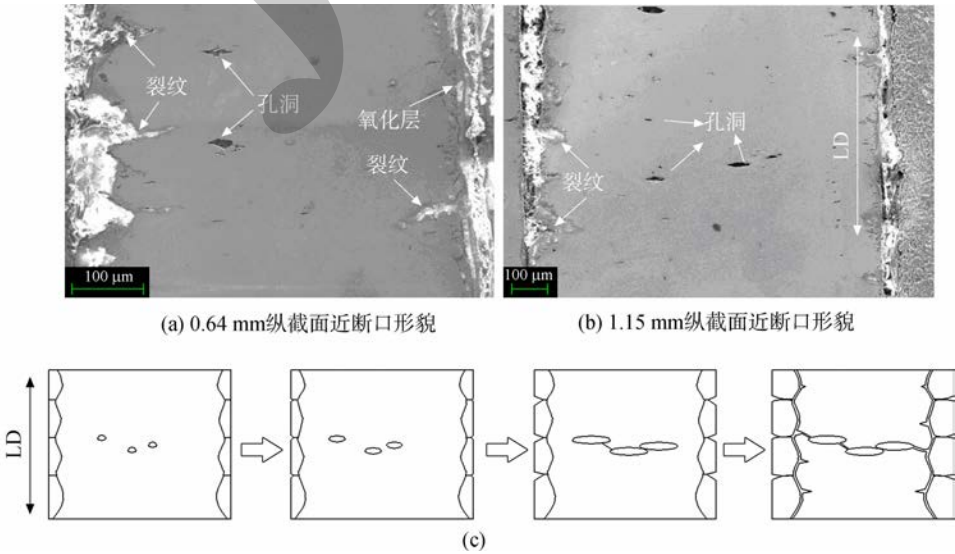


图 8 DD6 合金薄壁试样高温持久断裂过程示意图

Fig. 8 Schematic illustration of stress rupture fracture behavior at high temperature of thin wall specimen of DD6 alloy

果“表面氧化-裂纹萌生-扩展”的作用大,蠕变的比重小,则薄壁效应相对明显。图 8(a)和图 8(b)给出了试样 A 和 C 的纵截面形貌照片,0.64 mm 相对于 1.15 mm 试样边缘环境损伤区域明显增加,且大量的裂纹于边缘氧化层萌生并向基体内部扩展;而试样内部蠕变损伤数量及尺寸均减小,与断口呈现良好的吻合性。

3 结 论

对 DD6 合金在 980 °C/250 MPa 试验条件下的薄壁持久性能及断裂机制分析研究,可得以下结论:

1) 薄壁试样的持久寿命低于标准圆棒试样,表现出显著的薄壁效应,试样壁厚与持久寿命存在一定的函数关系。

2) 薄壁试样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”两者综合作用结果,且试样蠕变程度越小,在寿命过程中的比例越小,则薄壁效应越明显。

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:

- [1] 周杨,朱春雷.铸件薄壁尺寸效应的研究成果[J].大型铸锻件,2011(3):44-47.
ZHOU Yang,ZHU Chunlei. casting size effect research achievements[J]. Heavy Casting and Forging, 2011, 3: 44-47. (in Chinese)
- [2] SEETHARAMAN V, CETEL A D. Thickness debit in creep properties of PWA 1484[R]. Pennsylvania: the Minerals, Metals and Materials Society, 2004.
- [3] DONER M, HECKLER J A. Identification of mechanisms responsible for degradation for degradation in thin-wall stress-rupture properties[R]. Pennsylvania: the Minerals, Metals and Materials Society, 1988.
- [4] 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.
LIU Weiwei, LI Ying, LIU Shizhong, et al. Thin-wall stress rupture properties of single crystal superalloy DD6 with [011] orientation[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(8): 24-27. (in Chinese)
- [5] 张强,黄朝晖,全建民. 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.
ZHANG Qiang, HUANG Zhaohui, TONG Jianmin. Thin-wall effect of a directional solidification nickel-based superalloy[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2005, 25(5): 260-261. (in Chinese)
- [6] 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.

- YU Changkui, YU Jinjiang, ZHANG Fengjiang, et al. Influence of thin wall on the stress rupture properties of DD499 single crystal superalloy [J]. Foundry, 2014, 63(5): 479-483. (in Chinese)
- [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.
LIU Shizhong, LI Jiarong, LI Cheng, et al. Stress-rupture property of thin-wall specimen for single crystal superalloy DD6[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2003, 15(7): 276-278. (in Chinese)
- [8] 艾兴,高行山,温志勋,等. DD6 镍基单晶合金气膜孔薄壁平板高温蠕变性能[J]. 航空动力学报, 2014, 29(5): 1197-1204.
AI Xing, GAO Xingshan, WEN Zhixun, et al. Creep behavior of thin-wall plate with cooling holes of nickel-based single crystal superalloy DD6 under high temperature [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(5): 1197-1204. (in Chinese)
- [9] 刘丽荣,金涛,赵乃仁,等. 一种 Ni 基单晶高温合金 [001] 方向的持久性能与断裂行为 [J]. 金属学报, 2004, 40(8): 858-862.
LIU Lirong, JIN Tao, ZHAO Nairen, et al. Stress rupture properties and fracture behavior of a Ni base single crystal superalloy along [001] direction [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(8): 858-862. (in Chinese)
- [10] ZHANG Bing, LU Xin, LIU Delin, 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.
- [11] 水利,金涛,胡壮麒. [011]取向镍基单晶合金蠕变特征 [J]. 金属学报, 2009, 45(11): 1349-1355.
SHUI Li, JIN Tao, HU Zhuangqi. Creep characteristics of a Ni base single crystal superalloy with [011] orientation [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(11): 1349-1355. (in Chinese)
- [12] 于莉丽,田素贵,于慧臣,等. [110]取向 DD3 镍基单晶合金的组织结构及蠕变行为 [J]. 材料工程, 2009(增刊 2): 40-51.
YU Lili, TIAN Sugui, YU Huichen, et al. Microstructure and creep behavior of DD3 single crystal nickel-base superalloy with [110] orientation [J]. Journal of Materials Engineering, 2009(Suppl. 2): 40-51. (in Chinese)
- [13] SUN Weikang, XU Yuanming, HU Chunyan, et al. Effect of film-hole configuration on creep rupture behavior of a second generation nickel-based single crystal superalloys [J]. Materials Characterization, 2017, 130: 298-310.
- [14] 邓瑛,孙瑞杰,谢建文,等. 定向凝固涡轮叶片不同部位材料持久强度差异 [J]. 航空动力学报, 2012, 27(1): 104-109.
DENG Ying, SUN Ruijie, XIE Jianwen, et al. Creep property variation at different regions on a directionally solidified turbine blade [J]. Journal of Aerospace Power, 2012,

27(1):104-109. (in Chinese)

[15] 岳珠峰,吕震宙,杨治国,等. 晶体取向的偏差和随机性对镍基单晶叶片强度与蠕变寿命的影响[J]. 航空动力学报, 2003,18(4):477-480.

YUE Zhufeng, LÜ Zhenzhou, YANG Zhiguo, et al. Influence of deviation and randomness of crystallographic orientations on the strength and life of nickel-base single crystal superalloy turbine blades[J]. Journal of Aerospace Power, 2003,18(4):477-480. (in Chinese)

[16] HU Yebing, ZHANG Li, CAO Tieshan, et al. The effect of thickness on the creep properties of a single-crystal nickel-based superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018,728:124-132.

[17] HU Yebing, CHENG Congqian, ZHANG Li, et al. Microstructural evolution of oxidation film on a single crystal nickel-based superalloy at 980 °C[J]. Oxidation of Metals, 2018,89:303-317.

[18] 《航空发动机设计用材料数据手册》编委会. 航空发动机设计用材料数据手册[M]. 北京, 航空工业出版社, 2010.

(编辑:王碧珺)