

00Cr18Ni10N 奥氏体不锈钢 200 ~ 600 °C 高温疲劳性能的研究

柳木桐, 王 彧, 钟 平, 田 野, 赵振业

(中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘 要 试验用 00Cr18Ni10N 钢(/% :0.018C,0.41Si,1.68Mn,18.18Cr,10.38Ni,0.16N)经 1 t EAF-AOD-ESR 冶炼,锻成 $\Phi 30$ mm 材和 1 050 °C 固溶处理,进行了 00Cr18Ni10N 钢 200 ~ 600 °C 光滑($K_t = 1$)、缺口($K_t = 3$)的轴向高周疲劳性能研究,绘制了疲劳 S-N 曲线、计算了疲劳极限,并对疲劳试样的典型断口进行了 SEM 观察。结果表明,光滑试样的疲劳极限随试验温度升高而降低,缺口试样的疲劳极限对试验温度变化不敏感。当应力集中系数由 $K_t = 1$ 提高到 $K_t = 3$ 时,00Cr18Ni10N 钢的 200、400、600 °C 下 10^7 周次条件疲劳极限分别从 530、506、410 MPa,降低到 323、370、392 MPa。表明在高温下 00Cr18Ni10N 钢存在疲劳极限对应力集中敏感,且应力集中敏感性随着试验温度的升高而降低。疲劳试样的断口形貌由疲劳源区、疲劳裂纹扩展区和瞬断区组成,疲劳起源于表面加工刀痕的不连续位置,呈韧性断裂特征。

关键词 00Cr18Ni10N 奥氏体不锈钢 高温疲劳极限 疲劳寿命 断口分析 应力集中

200 ~ 600 °C Elevated Temperature Fatigue Properties of 00Cr18Ni10N Austenitic Stainless Steel

LIU Mutong, WANG Yu, ZHONG Ping, TIAN Ye, ZHAO Zhenye

(AECC Beijing Institute of Aeronautical Material, Beijing 100095)

Abstract The tested 00Cr18Ni10N steel (/% :0.018C,0.41Si,1.68Mn,18.18Cr,10.38Ni,0.16N) is melted by 1 t EAF-AOD-ESR process, forged to $\Phi 30$ mm bar and solid-solution-treated at 1 050 °C. The axial high-cycle fatigue properties of 00Cr18Ni10N steel with two stress-concentration coefficients (SCs) (smooth: $K_t = 1$, notch: $K_t = 3$) at 200 ~ 600 °C are studied. The fatigue S-N curve is obtained, the fatigue limits of two SCs are calculated and the typical fracture morphologies of fatigue specimens are observed by SEM. The results show that fatigue limits of the smooth specimens decrease with increasing of test temperature, and the fatigue limits of the notch specimens are not sensitive to the change of test temperature. When SCs rises from $K_t = 1$ to $K_t = 3$, the 10^7 cycles fatigue limits of 00Cr18Ni10N steel at 200, 400, and 600 °C decreases respectively from 530, 506, 410 MPa to 323, 370, 392 MPa. It shows that the 00Cr18Ni10N steel has obvious fatigue limit stress concentration sensitivity at elevated temperatures, and the stress concentration sensitivity decreases with increasing of test temperature. The fracture of the fatigue specimen is composed of three parts: the fatigue source zone, the fatigue crack propagation zone and the instant fracture zone. The fatigue originates from the discontinuous positions of the surface machined tool marks and exhibits a ductile-fracture characteristic.

Material Index Austenitic Stainless Steel 00Cr18Ni10N, Elevated Temperature Fatigue Limit, Fatigue Lifetime, Fracture Analysis, Stress Concentration

现代飞机几乎各个系统都要用奥氏体不锈钢,如系统导管、卡箍、壳体、角盒等。传统的 18-8 型奥氏体不锈钢由于耐蚀性较差,已无法满足使用要求。为实现现代飞机高可靠性、长寿命的设计目标,腐蚀及高温环境下的奥氏体不锈钢零件采用超低碳 00Cr18Ni10N(304LN)奥氏体不锈钢制造,其耐晶间腐蚀性能好,且在各种强腐蚀环境中均有良好的耐蚀性,广泛用以代替 0Cr18Ni9, 1Cr18Ni9 及 1Cr18Ni9Ti 等传统奥氏体不锈钢使用^[1-2]。

目前国内对于超低碳奥氏体不锈钢的研究,主要集中于材料室温常规力学性能及疲劳性能等方面,李勇^[3]等研究了不同热处理制度对 00Cr18Ni10N 钢强度、韧性及晶粒尺寸的影响;杨

旭^[4]等研究了 00Cr18Ni10N 钢的高温持久强度,利用全微分和状态函数特征,建立了在给定温度条件下持久强度与高温抗拉强度之间关系的数学模型;田兴^[5]等研究了 304LN 等奥氏体不锈钢的室温加工硬化特性;罗通伟^[6]研究了非金属夹杂物 TiN 对 00Cr18Ni10Ti 奥氏体不锈钢性能的影响;刘宁^[7]等研究了超低碳 316L、316LN 奥氏体不锈钢在常温下的低周疲劳行为及组织结构变化规律。目前尚无对高温环境下超低碳奥氏体不锈钢的疲劳行为及失效机理的研究。

本研究针对国产超低碳 00Cr18Ni10N 奥氏体不锈钢,开展了不同温度下的高周疲劳寿命研究,分析了应力集中对不同温度疲劳极限的影响,并对疲劳

试样断口特性进行了分析,为高温环境下更良好的应用提供理论和实践依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验材料为宝武特冶生产的 00Cr18Ni10N 钢棒材,直径为 100 mm,冶炼工艺为电弧炉 + AOD 冶炼 + 电渣重熔,冶炼炉容量为 1 t。将 Φ100 mm 棒材改锻成 Φ30 mm 棒材后取样,改锻加热温度为 1 100 °C,终锻温度为 950 °C,锻后空冷。00Cr18Ni10N 钢棒材的主要化学成分见表 1,主要力学性能数据见表 2。疲劳试样沿棒材轴向取样,经 1 050 °C 固溶处理后进

行试样加工。光滑 ($K_t = 1$) 和缺口 ($K_t = 3$) 疲劳试样见图 1。

1.2 试验方法

表 1 00Cr18Ni10N 钢的化学成分/%

C	Si	Mn	Cr	Ni	N
0.018	0.41	1.68	18.18	10.38	0.16

表 2 00Cr18Ni10N 钢的力学性能

固溶/°C	R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A_{5d} /%	KU_2 /J
1 050	625	290	55.0	450

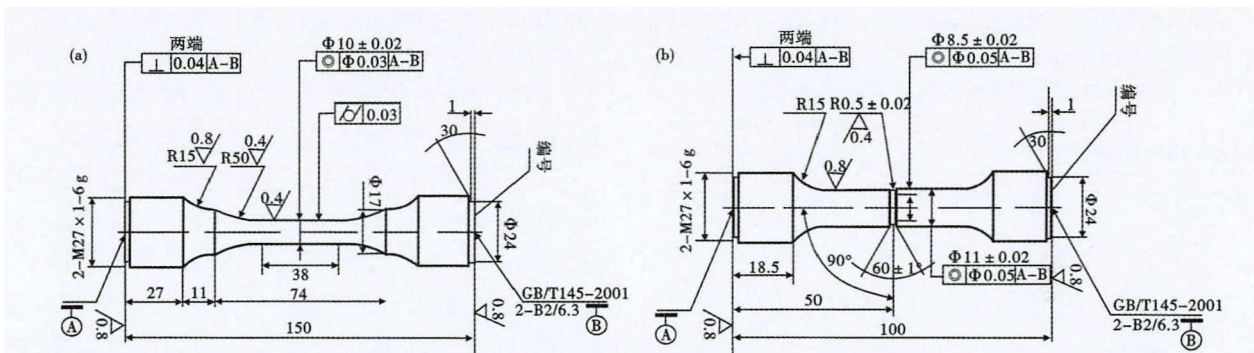


图 1 00Cr18Ni10N 钢光滑 (a) 和缺口 (b) 疲劳试样
Fig. 1 Smooth (a) and notch (b) fatigue specimens of 00Cr18Ni10N steel

轴向疲劳试验在 QBG-100B 高频疲劳试验机上进行,按照 HB 5287《金属材料轴向加载疲劳试验方法》进行试验。疲劳 S-N 曲线测试选用横幅载荷,采用光滑 ($K_t = 1$) 和缺口 ($K_t = 3$) 疲劳试样,试验温度为 200、400、600 °C,应力比 $R = 0.5$,采用成组法测定了疲劳寿命曲线,采用升降法计算了指定寿命 10^7 下的疲劳极限。每组数据均满足 50% 存活率下 95% 置信度的要求。

采用 JSM-5600 型扫描电子显微镜 (SEM) 分析了典型寿命疲劳试样的疲劳断口形貌特征,并采用倾转 30° 观察了疲劳源区,目的是为了确定疲劳起源处的表面加工状态。

2 试验结果及分析

2.1 疲劳 S-N 曲线和疲劳极限

00Cr18Ni10N 不锈钢棒材不同温度下光滑试样 ($K_t = 1$) 和缺口试样 ($K_t = 3$) 的轴向加载疲劳 S-N 曲线见图 2,不同条件下的疲劳极限见表 3。由图 2 可以看出,随着试验温度的升高,光滑试样的疲劳寿命降低,温度越高,降低的趋势越明显;而对于缺口试样,温度对疲劳寿命的影响不明显。随着应力水

平的降低,两种应力集中系数的试样疲劳寿命均提高,这和其它奥氏体不锈钢所表现出的行为一致^[8]。在相同试验条件下,光滑试样的疲劳寿命大于缺口试样的疲劳寿命。由表 3 可知,当应力集中系数由 $K_t = 1$ 提高到 $K_t = 3$ 时,不同温度下的 10^7 周次条件疲劳极限均有明显的下降。200、400、600 °C 的条件疲劳极限分别从 530、506、410 MPa,降低到 323、370、392 MPa,这说明 00Cr18Ni10N 钢的疲劳强度对应力集中敏感。通常,构件的应力集中来自于结构设计或表面加工缺陷。应力集中是影响高强度合金构件疲劳性能的敏感问题,也是制约关键构件长寿命高可靠性服役的重要因素^[9]。

在工程上,缺口敏感因子 q 反映了材料的缺口敏感性,表达式为:

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \quad (1)$$

式中, K_f 为光滑试样与缺口试样疲劳极限的比值。一般认为, q 越小,表明材料对缺口越不敏感。计算可得,00Cr18Ni10N 不锈钢在 200、400、600 °C 下的缺口敏感性因子 (q) 分别为 0.32、0.18、0.02。

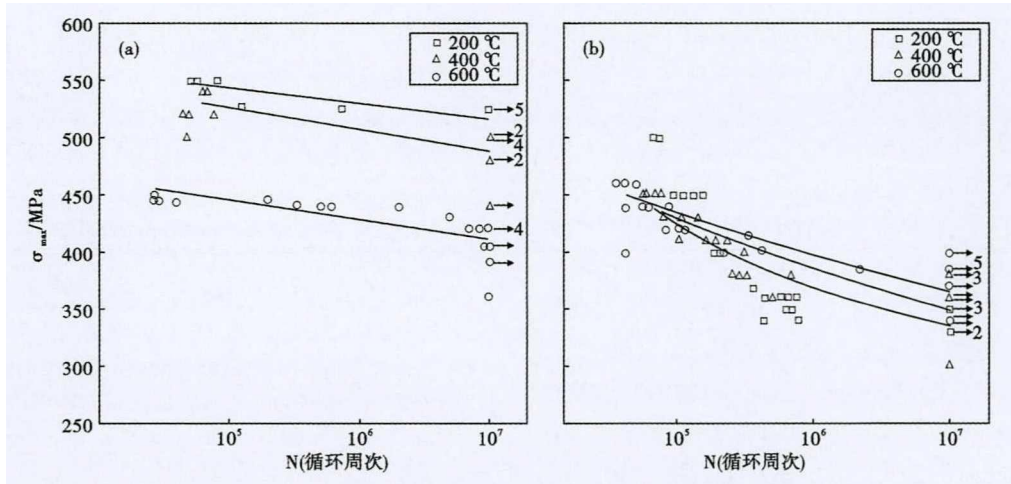


图 2 00Cr18Ni10N 钢光滑(a)和缺口(b)试样的 S-N 曲线
 Fig. 2 S-N curve of smooth (a) and notch (b) specimens of 00Cr18Ni10N steel

表 3 00Cr18Ni10N 钢的高温疲劳极限
 Table 3 Elevated temperature fatigue limits of 00Cr18Ni10N steel

试验温度/℃	应力集中系数	疲劳极限/MPa
200	$K_t = 1$	530
400		506
600		410
200	$K_t = 3$	323
400		370
600		392

说明随着试验温度的升高,缺口敏感性逐渐下降。

2.2 疲劳断口分析

为方便对比,分析了 200 °C 下光滑试样应力 525 MPa/疲劳寿命 1.27×10^5 (图 3) 以及 600 °C 下缺口试样应力 400 MPa/疲劳寿命 2.25×10^5 (图 4) 的断口形貌。

观察图 3 可以发现,光滑疲劳试样的断面较平整,截面与应力方向垂直,呈多源断口形貌,在断口上可以观察到裂纹扩展区和瞬断区。高倍照片下可观察到,疲劳起源于表面机械加工的不连续刀痕位置,呈现小刻面形态,在裂纹扩展区可观察到疲劳条

带。瞬断区主要组成为等轴韧窝,韧窝底部可观察到第二相颗粒,断口呈典型的韧性断裂特征。

观察图 4 可以发现,缺口疲劳试样的断面相较光滑试样更加平整,疲劳起源于缺口根部加工缺陷处,呈多源疲劳断裂特征。宏观断口图像中可见裂纹扩展区和瞬断区,瞬断区在断口几何偏心位置。高倍照片下可见,疲劳裂纹源同样萌生于表面机械加工的不连续刀痕位置,主要由撕裂棱组成,裂纹扩展区主要呈现疲劳条带特征,条带相互平行,同时伴有少量的二次裂纹。瞬断区主要由大小不同的韧窝组成,在韧窝底部可观察到第二相颗粒,对第二相颗粒做能谱分析,结果见图 5,可判断为非金属夹杂物氧化铝。根据塑性形变理论,材料在疲劳载荷下首先在夹杂物界面处形成裂纹,随着裂纹的不断扩展,基体形成“内塑颈”,达到一定程度后发生剪切断裂,从而形成了韧窝。非金属夹杂物的尺寸对裂纹的成核与扩展起决定性作用,对疲劳性能有着重要的影响^[10-12]。

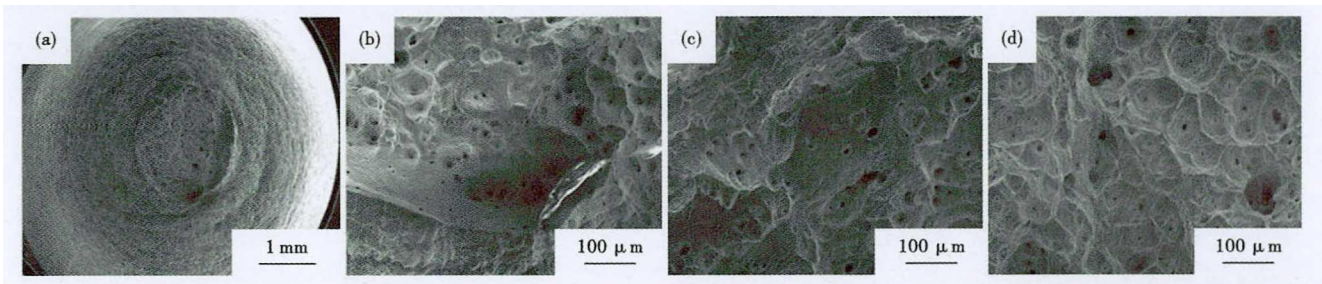


图 3 00Cr18Ni10N 钢 200 °C 光滑试样疲劳断口形貌(应力 525 MPa/疲劳寿命 1.27×10^5): (a) 宏观形貌; (b) 疲劳源区; (c) 裂纹扩展区; (d) 瞬断区

Fig. 3 Fatigue fracture morphology of smooth specimen of 00Cr18Ni10N steel at 200 °C (stress 525 MPa/fatigue lifetime 1.27×10^5): (a) fracture macro-morphology; (b) fatigue source zone; (c) crack propagation zone; (d) instant fracture zone

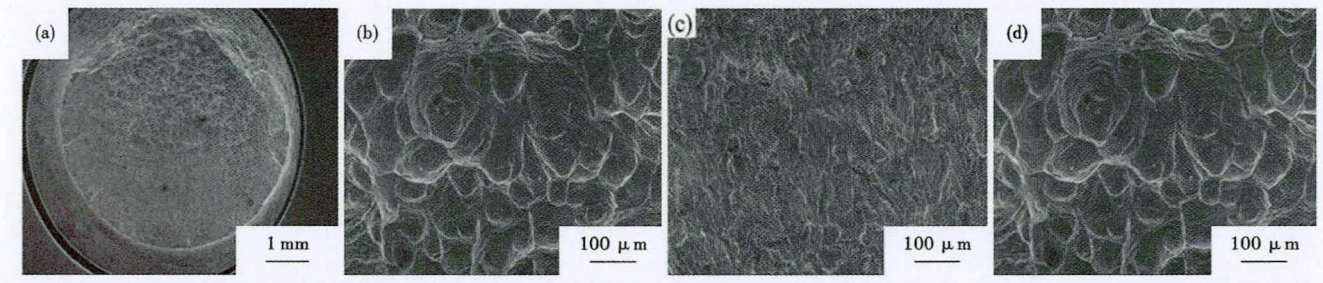


图4 00Cr18Ni10N 钢 600 °C 缺口试样疲劳断口形貌(应力 400 MPa/疲劳寿命 2.25×10^5):(a) 宏观形貌;(b) 疲劳源区;(c) 裂纹扩展区;(d) 瞬断区

Fig. 4 Fatigue fracture morphology of notch specimen of 00Cr18Ni10N steel at 600 °C (stress 400 MPa/fatigue lifetime 2.25×10^5): (a) fracture macro-morphology; (b) fatigue source zone; (c) crack propagation zone; (d) instant fracture zone

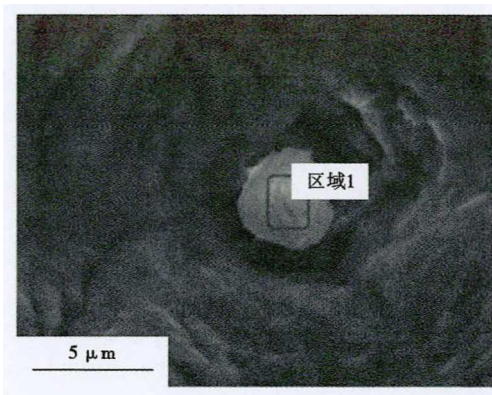


图5 00Cr18Ni10N 钢疲劳断口韧窝处第二相粒子的能谱分析

Fig. 5 Energy spectrum analysis of second phase particles at dimple of 00Cr18Ni10N steel fatigue fracture

元素	质量分数/%	原子分数%
O	40.88	56.26
Al	45.32	36.98
Fe	6.83	2.69
Cr	2.67	1.13
Mg	2.01	1.82
Ca	1.45	0.80
Ni	0.83	0.31

3 结论

(1) 当应力集中系数由 $K_t = 1$ 提高到 $K_t = 3$ 时, 00Cr18Ni10N 钢的 200、400、600 °C 下 10^7 周次条件疲劳极限分别从 530、506、410 MPa, 降低到 323、370、392 MPa, 证明不同温度下材料都存在明显的疲劳极限应力集中敏感性, 且应力集中敏感性随着试验温度的升高而降低。

(2) 温度对 00Cr18Ni10N 钢光滑试样 ($K_t = 1$)

的疲劳寿命有较大的影响, 随着试验温度的升高, 光滑试样的疲劳寿命降低, 温度对缺口试样 ($K_t = 3$) 的疲劳寿命的影响不明显。

(3) 00Cr18Ni10N 钢的高温疲劳试样断口由疲劳源区、疲劳裂纹扩展区、瞬断区组成。疲劳起源于表面机械加工的不连续刀痕位置, 裂纹扩展区呈现典型的疲劳条带特征, 瞬断区呈现典型的韧窝特征, 韧窝底部存在非金属夹杂物。

参考文献

- [1] Gavriljuk V G, Shanina B D, Berns H. Ab Initio Development of a High-Strength Corrosion-Resistant Austenitic steel[J]. Acta Materialia, 2008, 56(18): 5071-5082.
- [2] Rocha M, Oliveira C. Evaluation of the Martensitic Transformations in Austenitic Stainless Steels[J]. Materials Science & Engineering A, 2009, 517(1-2): 281-285.
- [3] 李勇, 寇宏超, 柳木桐, 等. 热处理对奥氏体不锈钢 00Cr18Ni10N 组织和性能的影响[J]. 科技导报, 2011, 29(5): 37-40.
- [4] 杨旭, 王正品, 要玉宏, 等. 00Cr18Ni10N 钢高温持久强度的预测与验证[J]. 西安工业大学学报, 2012, 32(6): 498-501.
- [5] 田兴, 田如锦, 王爱宝. 奥氏体不锈钢 304L 和 304LN 的加工硬化特点[J]. 大连铁道学院学报, 2001(4): 59-64.
- [6] 罗通伟. 0Cr18Ni10Ti 钢中 TiN 夹杂物的危害及应对措施[J]. 特钢技术, 2014, 20(03): 14+39.
- [7] 刘宁, 陈成澍, 罗治平. 超低碳奥氏体不锈钢在低周疲劳中的组织结构研究[J]. 理化检验(物理分册), 1995(6): 18-21.
- [8] 陈曦, 戴起勋, 陈康敏, 等. 一种新型高氮奥氏体不锈钢高周疲劳性能的研究[J]. 材料导报, 2008, 22(S1): 232-234.
- [9] 赵振业. 高强度合金抗疲劳应用技术研究与进展[J]. 中国工程科学, 2005(03): 90-94.
- [10] 范红妹, 曾燕屏, 王习术, 等. 航空用超高强度钢中夹杂物导致疲劳裂纹萌生与扩展的微观行为[J]. 钢铁, 2007(7): 72-75 + 86.
- [11] 张德堂. 钢中非金属夹杂物对疲劳性能的影响[J]. 理化检验. 物理分册, 1989, 25(5): 3-7.
- [12] 章伟钢, 韩顺, 厉勇, 等. 大型客机用 300M 钢疲劳破坏行为[J]. 钢铁, 2017, 52(10): 83-88.

柳木桐(1985-), 男, 博士研究生, 中国航发北京航空材料研究院, 工程师, 不锈钢新材料工艺研究. E-mail: liumutong@163.com.

收稿日期: 2022-05-20