

条纹晶缺陷对 CMSX-4 镍基单晶合金拉伸性能影响

余旭^{1,2,3} 玄伟东^{1,2,3} 张诚江^{1,2,3} 王鑫奕^{1,2,3} 张翔宇^{1,2,3} 王保军^{1,2,3} 屠挺生^{1,2,3,4} 任忠鸣^{1,2,3,4}

[1. 上海大学省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室, 上海 200444; 2. 上海市钢铁冶金新技术开发应用重点实验室, 上海 200444; 3. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444; 4. 上大超燃(上海)特种精铸有限公司, 上海 200444]

摘要 采用拉伸试验和微观组织观察, 结合晶体塑性理论, 研究了条纹晶缺陷对 CMSX-4 镍基单晶高温合金拉伸性能的影响。结果表明, 在 980 °C 时, 无条纹晶试样拉伸断裂模式为剪切断裂, 有条纹晶试样断裂模式为混合型断裂。条纹晶缺陷导致单晶试样塑性降低, 但并未显著影响合金的抗拉强度。有条纹晶试样拉伸过程中条纹晶区域出现应力集中, 裂纹沿着晶界扩展, 导致试样塑性降低。

关键词 镍基高温合金; 晶体塑性; 条纹晶; 拉伸性能

中图分类号 TG146.1⁺⁵

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20240196

Effects of Sliver Defects on Tensile Properties of CMSX-4 Nickel-based Single Crystal Alloys

YU Xu^{1,2,3}, XUAN Weidong^{1,2,3}, ZHANG Chengjiang^{1,2,3}, WANG Xinyi^{1,2,3}, ZHANG Xiangyu^{1,2,3},
WANG Baojun^{1,2,3}, TU Tingsheng^{1,2,3,4}, REN Zhongming^{1,2,3,4}

(1. State Key Laboratory of Advanced Special Steel, Shanghai University, Shanghai 200444; 2. Shanghai Key Laboratory of Advanced Ferrometallurgy, Shanghai 200444; 3. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444; 4. Shangda Chaoran Precise Casting Co., Ltd., Shanghai 200444)

Abstract: Combined with crystal plasticity theory, effects of sliver defects on tensile properties of CMSX-4 nickel-based single crystal superalloy were investigated using tensile testing and microscopic observation methods. The results reveal that the tensile fracture mode of specimens without sliver defects is characterized by shear fracture at 980 °C, while that of ones with sliver defects is the features of mixed fracture. The sliver defects lead to a reduction in the plasticity of single crystal specimen, which has little effect on the tensile strength. Stress concentration occurs in the sliver region of specimens containing sliver defects during tensile process, and cracks propagate along the grain boundaries, resulting in the decline in plasticity.

Key Words: Ni-based Superalloys, Crystal Plasticity, Sliver, Tensile Properties

镍基高温合金因其良好的高温力学性能和抗氧化耐腐蚀性能, 广泛应用于航空发动机和燃气轮机的热端部件^[1-4]。随着航空工业的发展, 航空发动机叶片需要承受更高的工作温度。因此, 在铸造过程中, 添加难熔元素愈发普遍。然而这也增大了条纹晶、雀斑和小角度晶界等凝固缺陷产生的倾向性^[5-6]。这些缺陷的出现引入了不必要的晶界, 导致了铸件力学性能下降。

当前关于凝固缺陷对高温合金拉伸性能的影响研究主要集中于小角度晶界。秦健朝等^[7]研究了小角度晶界对 DD5 镍基单晶合金中高温下拉伸性能的影响,

发现小角度晶界对高温合金拉伸的影响主要体现在塑性方面, 对抗拉强度的影响并不显著。赵金乾等^[8]研究了小角度晶界对 DD6 单晶高温合金高温拉伸性能的影响, 发现试样的抗拉强度与塑性均随着晶界角度的增大而下降。但目前尚未见条纹晶缺陷对高温合金拉伸性能影响的研究, 这是揭示凝固缺陷对高温合金力学性能损伤机制的重要研究方向之一。因此, 本研究揭示条纹晶缺陷对 CMSX-4 镍基单晶高温合金拉伸性能的影响, 并结合晶体塑性理论探讨其损伤机理, 旨在为高性能镍基高温合金铸件的生产提供参考。

收稿日期: 2024-05-10; 修订日期: 2024-05-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52274386, 92060104)

第一作者简介: 余旭, 男, 1999 年出生, 硕士研究生, E-mail: yuxu@shu.edu.cn

通信作者: 玄伟东, 男, 1982 年出生, 研究员, E-mail: wdxuan@shu.edu.cn

引用格式: 余旭, 玄伟东, 张诚江, 等. 条纹晶缺陷对 CMSX-4 镍基单晶合金拉伸性能影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(5): 737-742.

YU X, XUAN W D, ZHANG C J, et al. Effects of sliver defects on tensile properties of CMSX-4 nickel-based single crystal alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(5): 737-742.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

采用第二代镍基单晶高温合金 CMSX-4, 其化学成分见表 1。CMSX-4 含有 3% (质量分数, 下同) 的稀有元素 Re, 使其承温能力和力学性能大幅提升。CMSX-4 合金作为现代航空发动机涡轮叶片的常用材

表 1 CMSX-4 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of CMSX-4 alloy								%
w_B								
Cr	Co	W	Al	Ti	Ta	Mo	Re	Ni
6.5	9.0	6.0	5.6	1.0	6.5	0.6	3.0	余量

料, 具有优异的综合性能。使用螺旋选晶技术在 ALD 真空定向凝固炉中制备了含有条纹晶缺陷的试样, 其尺寸及宏观形态见图 1。

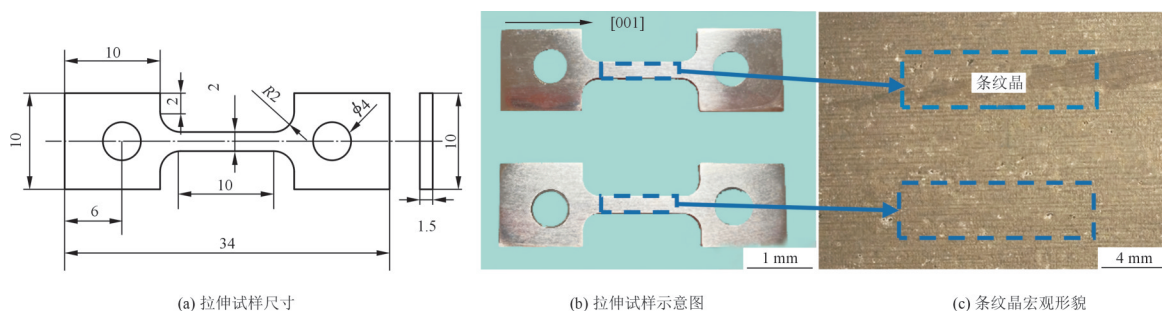


图 1 条纹晶形貌及拉伸试样示意图

Fig.1 Morphology of sliver and schematic diagram of tensile specimens

对试验铸件进行宏观腐蚀, 腐蚀剂采用体积配比为 1:1 的 HCl 和 H_2O_2 混合试剂。使用电火花线切割制备拉伸试样, 见图 1a, 经打磨、电解抛光后, 利用 FEI-Quanta 型扫描电镜观察拉伸试样标距段的取向特性。电解抛光液采用 10 mL 的 $HClO_4$ + 20 mL CH_3COOH 的混合溶液。标距段截面的晶粒取向结果见图 2。可以看出, 无条纹晶试样标距段截面上的晶粒是完整单晶; 含条纹晶试样的标距段内存在两个晶粒, 条纹晶嵌于基体中, 条纹晶与基体取向差约为 10° 。对拉伸试样进行热处理, 具体热处理方案为: $1\ 321\ ^\circ C \times 3\ h$, 空冷 + $1\ 140\ ^\circ C \times 2\ h$, 空冷 + $870\ ^\circ C \times 20\ h$, 空冷。拉伸试验温度为 $980\ ^\circ C$, 应变速率为 $0.000\ 1\ s^{-1}$ 。

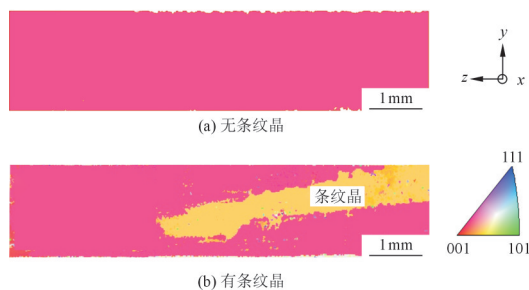


图 2 无条纹晶及有条纹晶试样标距段晶体取向

Fig.2 Crystal orientations of specimens without and with sliver in the gauge sections

1.2 晶体塑性有限元模型

本研究利用有限元法分析条纹晶周围的滑移带演化和塑性变形, 简要介绍了晶体塑性模型的运动学和本构规律, 并通过用户材料子程序 UMAT 将运动学和

本构规律引入到有限元仿真软件 ABAQUS 中。通过单轴拉伸试验验证了 CMSX-4 高温合金的本构参数, 并对边界条件、载荷、网格等模拟条件进行了说明。目前研究中使用的晶体塑性模型的运动学和本构规律可以参考文献[9-11]。

在连续塑性理论中, 总变形梯度 F 可分解为弹性部分和塑性部分:

$$F = F^e F^p \quad (1)$$

式中, F^e 为晶格的弹性拉伸和旋转; F^p 为塑性剪切。变形速度梯度 L 可表示为:

$$L = \dot{F} \cdot F^{-1} = L^e + L^p \quad (2)$$

此外, L 也可以写成:

$$L = \frac{1}{2}(L + L^T) + \frac{1}{2}(L - L^T) = D + W \quad (3)$$

式中, D 和 W 分别为变形张量和反对称自旋张量的速率。因此, L^e 和 L^p 可以写成^[12]:

$$L^e = D^e + W^e \quad (4)$$

$$L^p = D^p + W^p \quad (5)$$

速度梯度 L^p 的塑性部分可表示为:

$$L^p = \sum_{a=1}^N \dot{\gamma}^{(a)} (s^{*(a)} \otimes m^{*(a)}) \quad (6)$$

式中, $s^{*(a)}$ 和 $m^{*(a)}$ 向量分别为变形状态下滑移系统的滑移方向和滑动面法线; $\dot{\gamma}^{(a)}$ 为滑移系 α 的剪切速率。通过下式可以计算出对称伸缩 D^p 和反对称自旋张量 W^p 的塑性部分为:

$$D^p = \frac{1}{2} [L^p + (L^p)^T] = \sum_{a=1}^N P^{(a)} \dot{\gamma}^{(a)} \quad (7)$$

$$P^{(\alpha)} = \frac{1}{2} [s^{*(\alpha)} \otimes m^{*(\alpha)} + m^{*(\alpha)} \otimes s^{*(\alpha)}] \quad (8)$$

$$W^p = \frac{1}{2} [L^p - (L^p)^T] = \sum_{a=1}^N W^{(a)} \dot{\gamma}^{(a)} \quad (9)$$

$$W^{(a)} = \frac{1}{2} [s^{*(\alpha)} \otimes m^{*(\alpha)} - m^{*(\alpha)} \otimes s^{*(\alpha)}] \quad (10)$$

式中, $P^{(\alpha)}$ 和 $W^{(a)}$ 为取向因子。此外, 变形状态的滑移方向和滑移面法向矢量可计算为:

$$s^{*(\alpha)} = F^e s^{(\alpha)} \quad (11)$$

$$m^{*(\alpha)} = m^{(\alpha)} (F^e)^{-1} \quad (12)$$

滑移系 α 上的分切应力 $\tau^{(\alpha)}$ 可以由 Schmid 定律获得^[13]:

$$\tau^{(\alpha)} = s^{*(\alpha)} \sigma m^{*(\alpha)} \quad (13)$$

式中, σ 为 Cauchy 应力张量。在此基础上, 通过应力速率、变形速率和塑性剪切速率的耦合, 建立了晶体塑性本构关系:

$$\sigma^\nabla = C : D - C : D^p - \sum_{a=1}^N [W^{(a)} \sigma - \sigma W^{(a)}] \dot{\gamma}^{(a)} \quad (14)$$

式中, σ^∇ 和 C 分别为 Jaumann 应力速率张量和弹性模量张量。

本研究采用了基于 Schmid 定律的速率相关硬化模型^[14]。 α 滑移体系的剪切应变率 $\dot{\gamma}^{(\alpha)}$ 表示为 RSS 的函数。

$$\dot{\gamma}^{(\alpha)} = \dot{\gamma}_0^{(\alpha)} \left| \frac{\tau^{(\alpha)}}{g^{(\alpha)}} \right|^m \text{sign} [\tau^{(\alpha)}] \quad (15)$$

式中, $\dot{\gamma}_0^{(\alpha)}$ 为滑移系 α 上的参考剪切应变率; $g^{(\alpha)}$ 为描述滑移系 α 上的剪切阻力的流动应力; 常数 m 为应变率灵敏度。

最后, 单晶的滑移硬化行为可表示为:

$$\dot{g}^{(\alpha)} = \sum_{\beta=1}^N h^{a\beta} |\dot{\gamma}^{(\beta)}| \quad (16)$$

$$h^{a\beta} = q^{a\beta} h^\beta \quad (17)$$

$$h^\beta = h_0 \text{sech}^2 \left| \frac{h_0 \gamma^{\text{total}}}{\tau_s - \tau_0} \right| \quad (18)$$

式中, $h^{a\beta}$ 为硬化模量, 表示滑移系 β 对滑移系 α 的硬化^[15-16]; h^β 为自硬化模量。当 $\alpha=\beta$ 时, $q^{a\beta}$ 变成 q^{aa} , 表示自硬化常数, 而 $q^{a\beta} (\alpha \neq \beta)$ 为潜在硬化常数; h_0 为参考硬化模量; τ_s 为控制 $g^{(\alpha)}$ 极限的饱和应力; τ_0 为屈服应力, 等于初始 CRSS。 γ^{total} 为滑移体系的总累积剪应变, 可通过下式计算:

$$\gamma^{\text{total}} = \sum_{a=1}^N \int_0^t |\dot{\gamma}^{(a)}| dt \quad (19)$$

使用用户材料子程序 UMAT 在 ABAQUS 软件中实现晶体塑性模型^[17]。通常情况下, 晶体塑性模型参数会被调整以适应多晶体的应力应变行为, 不过也可以直接用于研究单晶的性质^[18]。通过参考试验数据和文献^[19-21], 确定了 CMSX-4 合金的本构参数。有限

元模拟的工程应力-应变曲线与试验结果拟合较好, 结果见图 3。后续含条纹晶的模拟均是基于经过验证的材料参数进行的, 参数见表 2。

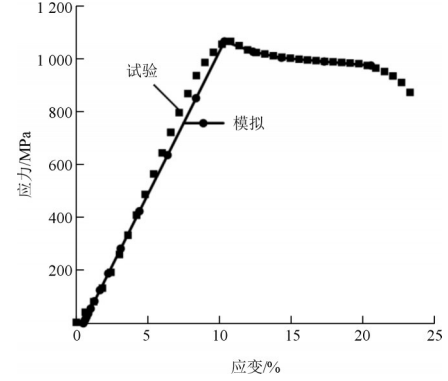


图 3 无条纹晶试样拉伸试验与模拟应力-应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of tensile test and simulation for the specimen without sliver defects

表 2 晶体塑性模拟材料参数

Tab.2 Parameters for crystal plasticity simulation

$C_{11}/$ GPa	$C_{12}/$ GPa	$C_{44}/$ GPa	$\dot{\gamma}_0^{(\alpha)}$	m	$h_0/$ MPa	$\tau_s/$ MPa	$\tau_0/$ MPa	q^{aa}	$q^{a\beta}$
177.53	113.50	80.03	0.001	50	400	405	349.8	1	1.3

C_{11} 、 C_{12} 、 C_{44} 为弹性参数, 与材料的弹性模量和泊松比有关:

$$C_{11} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (20)$$

$$C_{12} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (21)$$

$$C_{44} = \frac{A}{2} (C_{11} - C_{12}) \quad (22)$$

式中, A 为各向异性系数, 单晶高温合金的各向异性系数一般取 2.5^[22]。

图 4 为无条纹晶试样与有条纹晶试样的有限元模型。为了节约计算资源及加速计算过程, 有限元建模省略了实际试样的夹持段部分。采用 C3D8 实体单元,

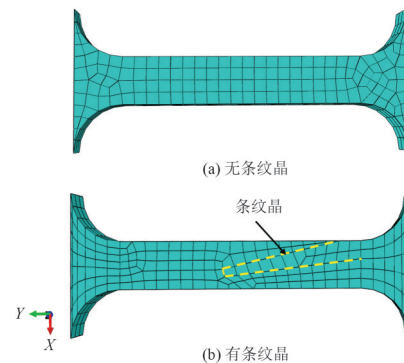


图 4 无条纹晶与有条纹晶试样有限元模型

Fig.4 Finite element models of specimens without and with sliver

无条纹晶缺陷试样的有限元模型网格数为 456,有条纹晶缺陷试样的有限元模型网格数为 573。

2 试验结果与讨论

2.1 力学性能

表 3 为 980 ℃下 CMSX-4 合金的力学性能。可以看出条纹晶对合金的强度影响不大,但会明显降低其塑性。

表 3 无条纹晶和有条纹晶试样拉伸性能

Tab.3 Tensile properties of specimens without and with sliver

试样	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
无条纹晶	977.81	1 066.47	23.74
有条纹晶	973.76	1 072.72	18.12

图 5 为无条纹晶和有条纹晶试样的应力-应变曲线。可以看出,有无条纹晶试样的应力-应变曲线均可分为 3 个阶段:弹性变形阶段、塑性变形阶段和断裂阶段。流变应力在上升至最高点后缓慢降低,其原因可能与试样截面积的减小以及多个滑移系开动导致的变形软化效应有关。

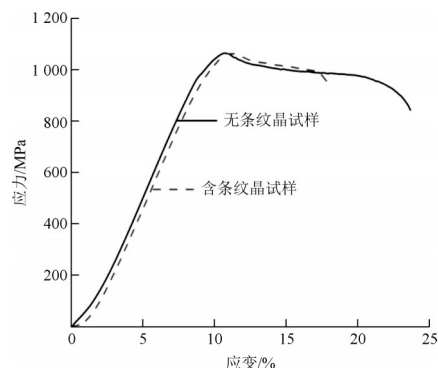


图 5 无条纹晶和有条纹晶试样的应力-应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves for specimens without and with sliver

2.2 拉伸断口

图 6 为无条纹晶试样和有条纹晶试样的拉伸断口形貌。可以看出,无条纹晶试样的断口形貌整体上呈相对平滑的倾斜表面,且存在一些微小的孔洞和撕裂棱。有条纹晶试样孔洞的体积更大,在条纹晶区域内,拉伸断口变得更加粗糙,出现了大量的撕裂棱,由于条纹晶的存在,断口的边缘还形成了一条明显的裂缝。

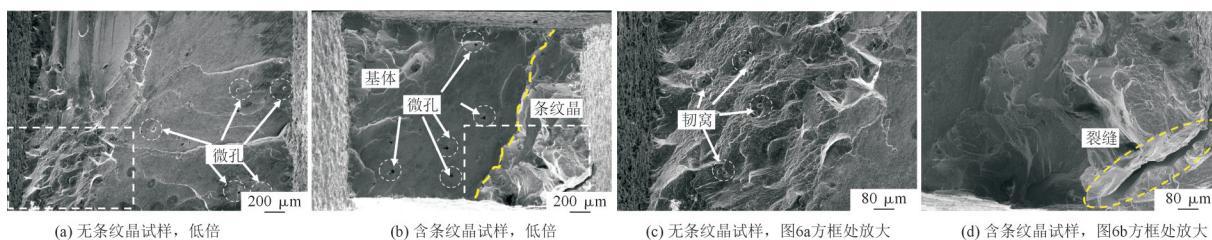


图 6 无条纹晶与有条纹晶试样拉伸断口形貌

Fig.6 Fracture morphologies of tensile specimens without and with sliver

图 7 为拉伸断口的纵截面形貌和断口附近的显微组织。可以看出,无条纹晶试样中,试样表面的微孔产生裂纹。同时,在应力作用下,这些微孔被拉长,呈现出椭圆形的外貌,内部微裂纹垂直于应力方向扩展,最终成为裂纹源。有条纹晶试样中,晶界存在导致试样沿晶界开裂,并且产生了粗大的裂缝。此外,

可以看到无条纹晶试样断口与应力方向呈 45°的尖锐楔形特征,结合图 6 中断口形貌特征,推断其断裂机制更偏向于剪切断裂。而有条纹晶试样断裂面与加载方向虽然同样呈 45°角,但有条纹晶试样由于条纹晶的出现,断口形貌复杂性增加,推断其断裂模式为混合型断裂。

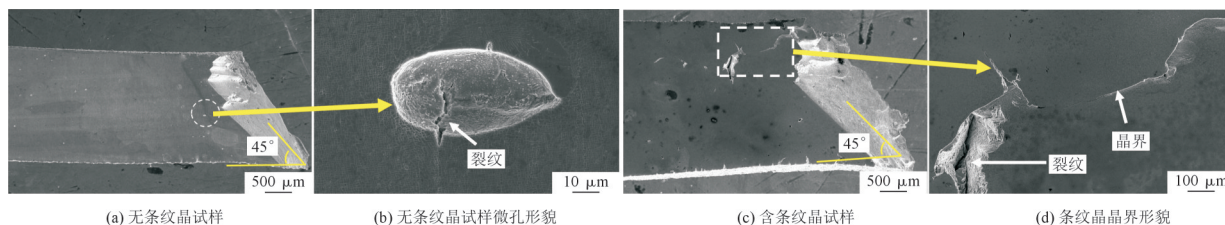


图 7 无条纹晶与有条纹晶试样拉伸断口纵截面形貌

Fig.7 Longitudinal cross-section morphologies of tensile fracture of specimens without and with sliver

分析试样断口结构可以发现,有条纹晶试样的断裂区域局部呈现解理特征,这很可能是在断裂过程的

晚期阶段发生的。在试样经历了一定程度的裂纹扩展后,未断裂部分承受了很大的应力,然而,980 ℃下,合

金的局部塑性变形能力受到限制,无法有效地减轻这种巨大的应力集中。因此,当这些应力超过解理断裂面的结合强度时,最终导致解理断裂发生。在条纹晶试样的断裂面上,不同的断裂特征呈现出不同的形貌,这些特征可能并非同时产生。总的来说,试样的解理断裂与试验条件下合金的塑性变形能力和应力集中有关,而条纹晶试样的断裂面上的不同特征可能反映了不同的断裂机制。

2.3 有限元分析

研究表明,条纹晶对合金的塑性有明显影响。为进一步了解其内在机制,通过晶体塑性理论对拉伸过程进行模拟。图 8 为试验与模拟应力-应变的对比,仿真结果与试验结果吻合较好,进一步证明了本研究建立模型的正确性。图 9 为无条纹晶和有条纹晶试样拉伸过程中的应力分布演变图。分析可知,对于无条纹晶试样,标距段内应力分布均匀。应力分布由靠近载荷方向两侧逐渐向标距段中间传递,整个标距段内应力逐渐变得均匀。随着拉伸的进行,靠近载荷的两侧应力逐渐集中,最终导致拉伸试样断裂。对于有条纹晶试样,由于条纹晶取向与基体取向存在差异,导致标

距段内应力分布不均匀。在拉伸初始阶段,应力首先在条纹晶区域集中,并且不断增大,但是随着拉伸的继续进行,条纹晶区域内应力集中消失。根据图 7c 推测,在拉伸后期,由于条纹晶的存在,在晶界上产生位错积累,最终导致晶界开裂,释放了条纹晶区域的应力。

对于单晶拉伸的断裂机制,在镍基单晶高温合金拉伸的过程中,位错通常会在 γ/γ' 共晶处积累^[23],因此,共晶组织是单晶合金拉伸过程中的薄弱环节,裂纹通常在共晶处产生。在含条纹晶的试样中,位错将优先积累在晶界前沿,从而导致晶界部位更易成为裂纹源。条纹晶与基体晶粒之间的晶界可近似为两个不同一次枝晶取向的晶粒产生的枝晶界。980 °C 时,由于枝晶界的结合强度相对较低,应力作用下裂纹更容易产生于枝晶界。在高温拉伸试验中,条纹晶的存在使得晶界处的位错密度更高,晶界容易成为裂纹扩展的起始点,并且晶界上萌生的裂纹迅速扩展,导致有条纹晶试样塑性降低。此外,由于晶界结合力较弱,在有条纹晶试样中,晶界处的裂纹扩展速度比基体晶粒内部的裂纹扩展速度更快。因此,条纹晶试样的断裂行为起始于晶界,并且裂纹扩展速度相比无条纹晶试样也更快,在达到抗拉强度后,试样更容易断裂。

图 10 为有条纹晶试样标距段内不同位置的应力-应变图,点 1 和点 2 为条纹晶区域,点 3 和点 4 为基体区域。可以看出,条纹晶区域内应力高于平均应力,在拉伸过程中,条纹晶内部应力集中逐渐增加,最终在晶界上发生断裂。

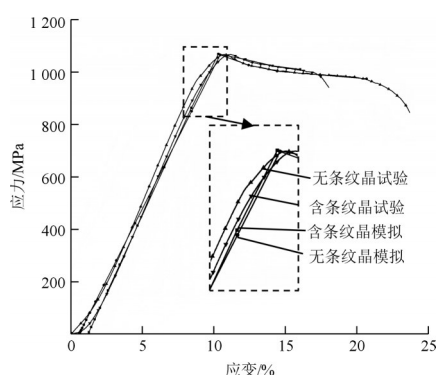


图 8 试验与模拟应力-应变对比

Fig.8 Comparison of stress and strain from experiments and simulations

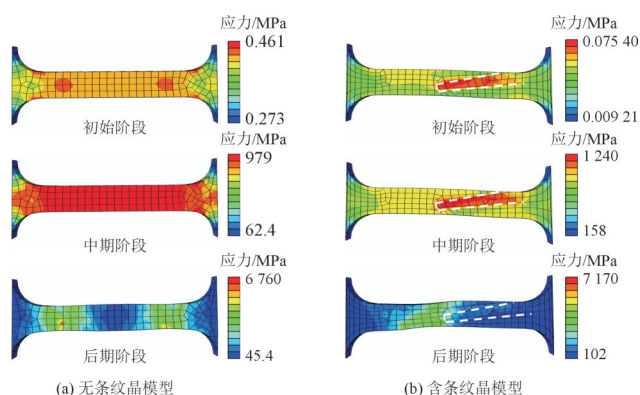


图 9 无条纹晶试样与有条纹晶试样应力分布演变

Fig.9 Evolution of stress distribution in specimens without and with sliver

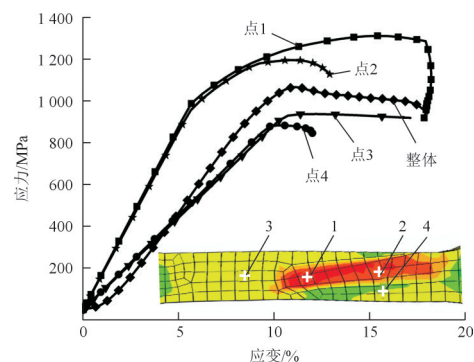


图 10 有条纹晶试样标距段不同位置的应力-应变曲线

Fig.10 Stress-strain curves of specimen with sliver at different locations in the gauge sections

3 结 论

(1) 在 980 °C 下,条纹晶对合金的强度影响不大,但会明显降低其塑性。

(2) 无条纹晶试样拉伸断裂模式为剪切断裂,有条纹晶试样中,由于晶界的存在,导致试样沿晶界开裂,

并且萌生了粗大的裂缝,因此有条纹晶试样的塑性明显下降。

(3)结合晶体塑性理论,对含晶界的条纹晶试样拉伸过程进行拟合。发现条纹晶区域出现明显的应力集中,当局部应力超过晶界结合力时,试样发生断裂。

参 考 文 献

- [1] GUDIVADA G, PANDEY A K. Recent developments in nickel-based superalloys for gas turbine applications[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 963: 171-128.
- [2] DAVIS J R. ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials [M]. Ohio: ASM International, 1997.
- [3] SUN S Y, LI L, HE K, et al. Fretting fatigue damage mechanism of Nickel-based single crystal superalloys at high temperature [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 186: 105-894.
- [4] CUI C, GONG X G, CHEN L J, et al. Atomic-scale investigations on dislocation-precipitate interactions influenced by voids in Ni-based superalloys[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 216: 106-945.
- [5] 马德新, 赵运兴, 徐维台, 等. 单晶高温合金异形铸件中的雀斑研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(11): 1-345-1-349.
- [6] XIA H X, YANG Y H, FENG Q S, et al. Generation mechanism and motion behavior of sliper defect in single crystal Ni-based superalloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2023, 137: 232-246.
- [7] 秦健朝, 崔仁杰, 黄朝晖. 小角度晶界对DD5镍基单晶高温合金中、高温条件下力学性能的影响[J]. 材料工程, 2020, 48(10): 114-122.
- [8] 赵金乾, 李嘉荣, 刘世忠, 等. 小角度晶界对DD6单晶高温合金980℃拉伸性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2007(12): 2-232-2-235.
- [9] HILL R, RICE J R. Constitutive analysis of elastic-plastic crystals at arbitrary strain[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1972, 20(6): 401-413.
- [10] RICE J R. Inelastic constitutive relations for solids: An internal-variable theory and its application to metal plasticity[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1971, 19(6): 433-455.
- [11] ZIKRY M A. An accurate and stab. algorithm for high strain-rate finite strain plasticity[J]. Computers & Structures, 1994, 50(3): 337-350.
- [12] ASARO R J, RICE J R. Strain localization in ductile single crystals [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1977, 25(5): 309-338.
- [13] PEIRCE D, ASARO R J, NEEDLEMAN A. Material rate dependence and localized deformation in crystalline solids[J]. Acta Metallurgica, 1983, 31(12): 1-951-1-976.
- [14] EIDEL B. Crystal plasticity finite-element analysis versus experimental results of pyramidal indentation into (001) fcc single crystal [J]. Acta Materialia, 2011, 59(4): 1-761-1-771.
- [15] BASSANI J L, WU T Y. Latent hardening in single crystals. II. Analytical characterization and predictions [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1991, A435(1-893): 21-41.
- [16] WU T Y, BASSANI J L, LAIRD C. Latent hardening in single crystals I[J]. Theory and Experiments, Mathematical and Physical Sciences, 1993, 435: 1-19.
- [17] HUANG Y. A User-Material Subroutine Incorporating Single Crystal Plasticity in the ABAQUS Finite Element Program [M]. Cambridge, UK: Harvard University, 1991.
- [18] LEE M G, LIM H, ADAMS B L, et al. A dislocation density-based single crystal constitutive equation[J]. International Journal of Plasticity, 2010, 26(7): 925-938.
- [19] LI Z W, GAO H S, WEN Z X, et al. Microcrack initiation behavior around film cooling holes in a Ni-based single crystal: In situ observation and crystal plastic analysis [J]. Materials Science and Engineering, 2020, A771: 138-609.
- [20] MAO H Z, WEN Z X, YUE Z F, et al. The evolution of plasticity for nickel-base single crystal cooled blade with film cooling holes [J]. Materials Science and Engineering, 2013, A587: 79-84.
- [21] ZHOU H, ZHANG X, WANG P, et al. Crystal plasticity analysis of cylindrical holes and their effects on the deformation behavior of Ni-based single-crystal superalloys with different secondary orientations[J]. International Journal of Plasticity, 2019, 119: 249-272.
- [22] SAUZAY M. Cubic elasticity and stress distribution at the free surface of polycrystals[J]. Acta Materialia, 2007, 55(4): 1-193-1-202.
- [23] 马晋遥, 王晋, 赵云松, 等. 一种第二代镍基单晶高温合金1150℃原位拉伸断裂机制研究[J]. 金属学报, 2019, 55(8): 987-996.

(编辑:刘晨辉)

2025年数智化铸造与增材制造 专题征稿

专题学术主编:华中科技大学 计效园 教授

征稿范围:

1. 基于人工智能、机器学习算法的产品设计、模型优化技术。
2. 构建数智化铸造与增材制造数据管理系统、基于大数据分析、模拟仿真技术,对增材制造工艺参数(如激光功率、扫描速度等)进行精准优化。
3. 新型智能化铸造与增材制造设备的研发、利用传感器、机器视觉等技术实现质量监控与检测、构建基于数据驱动的质量预测模型。
4. 针对数智化铸造与增材制造的新型材料研发。
5. 数智化铸造与增材制造在航空航天、医疗、汽车等领域的应用案例。

专题文章收录满之后将享有优先发表机会,欢迎踊跃投稿。

投稿网址: www.special-cast.com

收稿截止日期:2025年9月