

文章编号:1671-6833(2010)03-0115-04

拉伸速率对FGH95缺口小试样断裂性能的影响

崔伟华¹, 刘志宏², 李兴照¹

(1. 河南工业大学 土建学院, 河南 郑州 450052; 2. 西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 720072)

摘要:研究了不同加载速率和不同的缺口形状对粉末冶金 FGH95 缺口小试样拉伸断裂性能的影响。结果表明:名义断裂应力 σ_{nom} 随着加载速率的增大而减小;仅对具有相同缺口深度的缺口试样, σ_{nom} 随着名义应力集中因子 K_t 的增大而减小, 缺口深度对断裂应力的影响远大于缺口形状, 当缺口深度达到某一数值, 将产生缺口强化现象。随着加载速率的增大, 缺口敏感系数 C_m 呈下降趋势, 应力集中因子越大的试样, 缺口敏感性越强。 γ' 沉淀粒子的强化作用和高温动态回复对 FGH95 高温变形起主要作用。

关键词: 拉伸; 缺口; 加载速率; 缺口敏感系数; 断裂

中图分类号: V256 **文献标识码:** A

0 引言

FGH95 粉末合金由于其具有较好的高温力学性能, 被广泛应用于航空发动机涡轮盘材料, 对粉末冶金合金材料的高温力学性能的研究已成为涡轮盘应用的前提之一^[1-3]。在不同的工况下涡轮盘有不同的转速, 且在实际工作状态中处于复杂应力状态, 加载速率、应力状态都会影响到材料的断裂性能。一般来说单轴应力下的实验数据不能准确的评价构件在多轴应力状态下的断裂性能, 试样中缺口的存在将引起应力集中并且将应力状态从单轴状态改变成多轴状态, 目前国内外学者普遍采用缺口试样来研究多轴应力状态对材料力学性能的影响^[4-6]。缺口引起的应力集中可以造成材料的强化或软化, 这与材料的性能、缺口的几何特征以及实验条件(如温度、外加负载、周围环境等)等有关^[7-8]。

作者对 FGH95 粉末冶金的矩形平板小试样和缺口小试样在不同加载速率下的拉伸断裂性能进行了实验研究, 分析了缺口效应及加载速率对断裂应力有影响, 并对试验结果进行了讨论。

1 实验部分

实验材料是北京航空材料研究所提供的

FGH95 粉末盘坯件, 实验在长春 CSS-2910 高温试验机上完成, 矩形平板小试样及缺口小试样如图 1 所示, 为了研究不同加载速率下缺口的敏感性, 分别研究了“钝”缺口(U形)和“尖”缺口(V形)两种缺口形式, 缺口几何参数见表 1, V形缺口的根部半径为 0.025 mm。由于不同缺口处截面大小不同, 实验采取载荷控制方式, 加载速率依次为: 0.1 kN/min、1 kN/min、10 kN/min 和 100 kN/min, 试验温度控制为 550 °C ± 3 °C。

2 实验结果及分析

所有缺口试样均在最小截面处断裂, 平板小试样沿与拉伸轴线成 45° 的斜截面断裂, 各试样在不同的加载速率下的名义断裂应力即最小截面处的断裂应力如表 2 所示。

2.1 加载速率对抗拉强度的影响

如图 2 所示, 名义断裂应力随加载速率的增大而减小, 且缺口试样与平板试样有大致相同的下降趋势, 也就是说, 加载速率对断裂强度的影响规律受应力状态的影响很小。对大多数晶体材料, 形变速率增加, 可使临界剪应力增大, 同时晶体的加工硬化率增加, 在宏观则表现为材料的断裂强度增加^[9], FGH95 平板小试样及缺口小试样都表现出了与此相反的规律。

收稿日期:2009-12-03; 修订日期:2010-01-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50905142), 陕西省自然科学基金资助项目(2009JQ1006), 河南省基础与前沿技术研究(82300440010)

作者简介:崔伟华(1976-), 女, 山东潍坊人, 河南工业大学讲师, 博士, 主要从事粉末冶金的力学性能研究, E-mail: cw@npu@yahoo.com.cn.

2.2 缺口几何形状对抗拉强度的影响

表2给出了有限元计算的各试样在弹性应力状态时的应力集中因子——弹性应力集中因子 K_t 。比较U1、U2、U3、U4 4个试样,具有相同缺口半径的试样,随着缺口深度的增大, K_t 减小, σ_{nom} 增大,具有相同缺口深度的试样,随着缺口半径的增大, K_t 减小, σ_{nom} 增大,当缺口深度达到某一数值,缺口的存在导致缺口试样的名义断裂应力大

于平板试样的断裂应力,即引起缺口强化,可见缺口深度对断裂应力的影响远大于缺口半径。图2给出了具有相同缺口深度的缺口试样($h=0.5$)的名义断裂应力 σ_{nom} 与名义应力集中因子 K_t 的关系,由图3知,对于具有相同缺口深度的缺口试样,在不同的加载速率下, σ_{nom} 随 K_t 的变化规律大致相同, σ_{nom} 随着 K_t 的增大而减小,近似成线性关系。

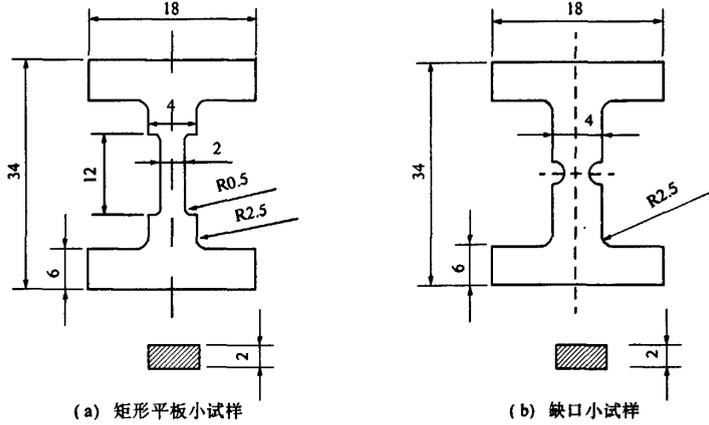


图1 试验用试样几何尺寸

Fig.1 Geometry parameters of experimental specimens

表1 缺口的几何参数

Tab. 1 Geometry parameters for different notches

U形				V形			
试样编号	t/mm	h/mm	r/mm	试样编号	t/mm	h/mm	$\alpha/(^\circ)$
U1	3	0.5	0.5	V1	3	0.5	30
U2	3	0.5	1	V2	3	0.5	60
U3	2	1.0	0.5	V3	3	0.5	90
U4	2	1.0	1	V4	3	0.5	120
				V5	3	0.5	150

表2 各试样的名义断裂应力及名义应力集中因子

Tab. 2 The nominal fracture stress and elastic stress concentrated factor

加载速率 $\dot{\epsilon}/(kN \cdot min^{-1})$	断裂应力/MPa									
	U4	U3	P	U2	V5	U1	V1	V3	V4	V2
0.1	1 617	1 568	1 524	1 524	1 482	1 450	1 360	1 358	1 338	1 322
1	1 593	1 558	1 518	1 503	1 469	1 440	1 334	1 327	1 326	1311
10	1 555	1 504	1 469	1 450	1 414	1 388	1 316	1 279	1 260	1233
100	1 533	1 467	1 455	1 432	1 390	1 360	1 260	1 153	1 156	1156
K_t	1.467	1.683	1	1.592	1.659	1.809	2.061	2.379	2.503	2.765

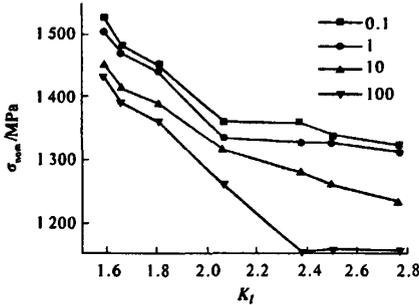


图 2 σ_{nom} 与 K_t 的函数关系
Fig. 2 Effect of K_t on σ_{nom}

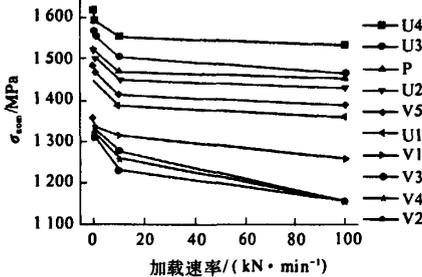


图 3 σ_{nom} 与加载速率的函数关系
Fig. 3 Effect of the loading rate on σ_{nom}

表 3 不同加载速率下的缺口敏感系数 C_m

Tab. 3 The coefficient of notch sensitivity at different loading rate

加载速率 /($\text{kN} \cdot \text{min}^{-1}$)	试样编号									
	U4	U3	P	U2	V5	U1	V1	V3	V4	V2
0.1	1.061	1.029	1	1.000	0.972	0.951	0.892	0.891	0.878	0.867
1	1.049	1.026	1	0.990	0.968	0.949	0.879	0.874	0.868	0.864
10	1.059	1.024	1	0.987	0.963	0.945	0.896	0.871	0.858	0.839
100	1.054	1.008	1	0.984	0.955	0.935	0.866	0.792	0.795	0.795

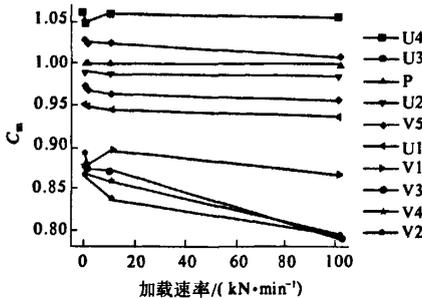


图 4 C_m 与加载速率的函数关系
Fig. 4 Effect of the loading rate on C_m

2.3 缺口敏感系数

将相同加载速率下缺口试样与平板试样名义断裂应力的比值定义为缺口敏感系数:

$$C_m = \sigma_{bn} / \sigma_b \quad (1)$$

式中: σ_{bn} 、 σ_b 为缺口试样与平板试样的名义断裂应力.

不同加载速率下各试样的缺口敏感系数 C_m 见表 3.

C_m 、 σ_{nom} 与名义应力集中因子有相同的函数关系. 各试样 C_m 随加载速率变化曲线如图 4 所示. 由图知, 缺口敏感系数随着加载速率的增大呈下降的趋势, 对于缺口强化的试件, 加载速率越大, 缺口敏感性越低, 而对于缺口软化的试样, 加载速率越大, 缺口敏感性越高. 并且应力集中因子越大的试件对加载速率越敏感, 也就是说, 加载速率越大的时候, 应力集中因子越大的试件的缺口敏感系数随着加载速率下降的幅度更大.

着滑移程度的增加, 晶体继续变形所需要的临界剪应力增高, 在宏观则表现为材料的断裂强度增加, 试验用 FGH95 材料表现出了与此相反的规律.

对于高温金属材料, 在变形时同时发生加工硬化和软化两个相反的过程. 塑性变形过程中位错密度的增加及其所产生的钉扎作用是导致加工硬化的决定性因素^[9], 随着变形出现的动态恢复机制将使位错减少, 从而导致材料软化. 稳态的位错密度是由应变硬化和动态回复率决定的, 故稳态的应力水平是温度和应变速率的函数, 随着应变速率的增加, 动态回复率增加, 产生位错所需要的应力减小.

文献[10]指出在应变速率较低的时候多发生延晶断裂, 因为应变速率低的情况下有晶界的

3 讨论

对大多数晶体材料, 形变速率增加, 可使临界剪应力增大, 同时晶体的加工硬化率增加, 并且随

塑性耗尽机制(Ductility Exhausted),晶界对位错运动的阻碍作用和二相粒子对位错的钉扎作用明显,位错更容易在晶界处堆积,引起晶界处能量升高,造成晶界破坏.由于FGH95是高密度 γ' 相沉淀粒子的高温晶体材料,在FGH95合金变形过程中, γ' 相沉淀粒子对位错和晶界很强的钉扎作用所引起的强化作用,相较于位错密度的增加引起的强化对合金变形的影响更加明显.在相同的温度下,刚进入塑性变形的开始阶段,晶体中可动位错的密度都很低,提高应变速率,临界切应力也随之增大;随着塑性变形的进一步发展,位错在晶界处产生堆积,滑移面及晶粒的方向角也发生转动,应变速率越大,位错在晶体内密度升高,晶界角的转化率也越大,则位错就容易从一个晶粒进入下一个晶粒,并且考虑到动态应变时效(溶质原子的扩散和对位错的钉扎作用),位错运动到沉淀相粒子的时间就会变小,从而降低了晶界对位错的钉扎作用.

所以增大加载速率引起的动态回复率的增加和晶界角的转化率增大,是造成断裂应力降低和缺口敏感系数减小的主要原因.

位错是微观尺度上的损伤.粉末冶金合金中的制备过程带来的夹杂和孔洞,在进入塑性变形的开始阶段,容易与周围基体粘脱,在大粒子处形成孔洞,并且在应力作用下也会扩展长大,对材料形成损伤.假设在弹性变形阶段不发生损伤,假设损伤和净应力成幂次关系^[11]

$$\omega = C_0 s^{n_0} \quad (2)$$

应力越大,则因为位错堆积引起的损伤越大;加载速率越大,因位错堆积引起的硬化作用越小,损伤发展越快,缺口敏感系数 C_m 减小,且应力集中因子越大的试件对加载速率越敏感,则应力集中因子越大的试件的断裂应力对加载速率越敏感.

4 结论

(1)笔者研究的FGH95平板小试样和缺口小试样,在同一加载速率下,仅对具有相同缺口深度的试样,名义断裂应力 σ_{nom} 随着 K_t 的增大而减小,近似成线性关系;缺口深度对断裂应力的影响远大于缺口形状的影响,当缺口深度达到某一数值,将产生缺口强化现象.

(2)试验用FGH95粉末冶金平板试样和缺口试样的抗拉强度随着加载速率的增加而降低,

缺口敏感系数 C_m 随着加载速率的增大呈下降的趋势,且应力集中因子越大的试件对加载速率越敏感.

(3)细观力学讨论分析表明,FGH95高温下出现的动态回复机制和材料本身特性(高密度 γ' 相沉淀粒子及材料制备过程中带来的初始损伤)是造成以上实验结果的主要原因.

参考文献:

- [1] 崔伟华,温志勋,侯乃先.夹杂对粉末冶金CT试样断裂性能影响的数值研究[J].郑州大学学报:工学版,2007,28(4):39-42.
- [2] YOKOMAKU T. Effects of defects and microstructure on the elevated temperature fatigue properties of P/M superalloy Mer176[J]. J Soc Mat Sci, 1990, 39(2): 188-198.
- [3] CUI W H, WAN J S, YUE Z F, et al. Tensile and low cycle fatigue properties of Nickel - base powder metallurgy superalloy FGH95[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2007, 36(12):2119-2123.
- [4] HA J C, TABUCHIA M, HONGO A H, et al. Creep crack growth properties for 12CrWCoB rotor steel using circular notched specimens[J]. Pressure Vessels and Piping, 2004, 81:401-407.
- [5] TABUCHI M, YOKOBORI T, JR A, T Y, et al. Evaluation of creep crack growth properties using circular notched specimens[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2003, 80:417-425.
- [6] FUJI A, TABUCHI M, JR A T Y, et al. Influence of notch shape and geometry during creep crack growth testing of TiAl intermetallic compounds[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 62:23-32.
- [7] JR A T Y. Difference in the creep and creep crack growth behaviour between creep ductile and brittle materials[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 62:61-78.
- [8] EGCELER G, TATO W, JEMMELY P, et al. Creep rupture of circular notched specimens; Influence of heat treatment and notch geometry[J]. Scripta Metall Mater, 1992, 27(8):1091-1096.
- [9] 王自强,段祝平.塑性细观力学[M].北京:科学出版社,1995.
- [10] 胡庚祥,蔡珣.材料科学基础[M].上海:交通大学出版社,2000.
- [11] 余寿文,冯西桥.损伤力学[M].北京:清华大学出版社,1997.

(下转第128页)

Experimental and Evaluation Study on Treatability of Domestic Wastewater

ZHAO Hong-mei^{1,2}, PENG Dang-cong¹, WANG Xiao-chang¹

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Environmental Science Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Treatment effect and efficiency of sedimentation, coagulation - sedimentation, oxygen ditch and moving bed biofilm reactor (MBBR) which could be given by methods of combination experimental and evaluation, and domestic wastewater was used as raw water in the experiment. The treatment effect and efficiency were used to evaluate quantitatively the treatability of domestic wastewater and which could provide reliable reference for wastewater treatment progress selection. The experiment results indicated that sedimentation 1h could remove 49.5% of SS, coagulation - sedimentation could remove 98% suspended and the efficiency was 3.5 ~ 32 times more than other progresses, treatment effect of coagulation - sedimentation were also decided by quantity of suspended and colloidal in wastewater. MBBR could effectively remove dissolved organic matter and the efficiency was 3 ~ 3.4 times more than that of DE oxygen ditch treatment system which could remove more than 80% contaminates of wastewater, but less efficient.

Key words: suspended; soluble; molecular weight distribution; removal rate; treatment efficiency

(上接第 118 页)

Study on the Influence of Loading Rate on Fracture Characteristic of FGH95 Notched Specimen

CUI Wei-hua¹, LIU Zhi-hong², LI Xing-zhao¹

(1. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China; 2. Marine College, Northwestern Poly-technical University, Xi'an 720072, China)

Abstract: Experiment was performed to investigate the influence of loading rate and notch effect on FGH95 notched small specimen. The results show that nominal fracture stress σ_{nom} decreases with the increase of the loading rate, and decreases with the increase of nominal stress concentrate factor K_t increase for the notched specimen with same notch depth. The notch depth plays a more significant role for the nominal fracture stress than notch shape. And the notch would cause notch strengthen if notch depth is up to a certain value. With the loading rate increasing, the coefficient of notch sensitivity C_m decreases, and notch sensitivity increases with K_t increase for notch softening specimen. Strengthen of γ' precipitation particle and high-temperature dynamic recovery play a major role in the high temperature deformation process of FGH95.

Key words: tensile; notch; loading rate; coefficient of notch sensitivity; fracture