

文章编号: 1673-5196(2006)03-0029-05

初始损伤影响钢的低温解理断裂韧性的细观力学分析

王国珍, 马 进, 杨伟顺, 陈剑虹

(兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 通过长条形孔洞附近的局部应力应变分布的细观有限元模拟计算, 对初始损伤影响钢的低温解理断裂韧性的原因进行了研究. 计算结果表明, 预加载时引入的长条形孔洞缺陷在后续低温加载时, 其前端产生了局部高应力应变集中, 促使了解理裂纹的形核($\xi_p \geq \xi_{pc}$)和扩展($\alpha_y \geq \alpha$), 使解理发生在较低的载荷下, 引起了韧性的降低. 随预载荷比 P_0/P_{gy} 的增加, 材料中的损伤量和损伤孔洞的尺寸增大, 引起的局部高应力应变集中程度增大, 可促使解理发生在更低的载荷下. 这就是随着预载荷比 P_0/P_{gy} 的增加, 材料的缺口解理断裂韧性 P_t/P_{gy} 降低的细观力学原因.

关键词: 初始损伤; 断裂韧性; 有限元分析; 应力; 应变; 钢

中图分类号: TB301 文献标识码: A

Meso scopic mechanical analysis of effect of initial damage on cleavage fracture toughness of steel at low temperature

WANG Guo zhen, MA Jin, YANG Wei shun, CHEN Jian hong

(State Key Lab. of Gansu Advanced Nonferrous Metal Materials, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

Abstract: The origin of effect of initial damage on the cleavage fracture toughness of steel at low temperature was investigated by means of meso scopic FEM analysis for the local stress and strain distribution around large string cavities. The calculation result showed that, during loading at low temperature, a high local stress and strain concentration was produced ahead of large string cavities induced originally by pre-load. This high local stress and strain concentration promoted nucleation ($\xi_p \geq \xi_{pc}$) and propagation ($\alpha_y \geq \alpha$) of cleavage fracture, and made both the fracture load and toughness low. With increasing the pre load ratio P_0/P_{gy} , the damage amount and the cavity size increased, which caused higher local stress and strain concentration and lower fracture load. This is the meso scopic mechanical reason for the decrease of the notch cleavage fracture toughness with increasing the P_0/P_{gy} .

Key words: initial damage; fracture toughness; finite element method; stress; strain; steel

材料在制备、加工过程中通常会引入各种初始缺陷, 如微裂纹、微孔洞、夹杂物等, 同时会形成不均匀的细观组织结构. 这些材料在一定环境下(温度、腐蚀介质、辐射、电、磁等)受载(拉、压、弯曲、疲劳等)过程中, 这些初始缺陷会扩展、合并, 同时其不均匀的细观组织结构中粗大晶粒、第二相或夹杂物构成的薄弱组元在细观应力、应变的作用下不断萌生出微裂纹、微孔洞. 上述这些在制备、加工过程中引入的各种初始缺陷和后来在使用过程中(如蠕变、疲劳)不断萌生、长大的细观缺陷, 可统称为初始损伤. 其损伤基元包括各种尺寸和形态的微裂纹、微

孔洞、剪切带及相界面裂纹等. 这些初始损伤基元在材料后续受载使用过程中不断扩展、合并和相互作用, 在宏观层次上影响材料的整体承载能力和加工硬化行为; 在细观层次上改变了材料细观组元中的局部应力分布, 这些都会影响到材料随后的变形、损伤和断裂的过程, 从而对材料的后续力学性能, 如韧性、强度、塑性和刚度等产生很大影响, 进而对材料和结构的安全服役性及剩余寿命产生很大影响. 因此需要就损伤对材料力学性能的影响及机理进行深入的研究. 但这方面的工作相对较少, 近年来有限的几项代表性工作主要包括: 1) 塑性损伤对复合材料弹性模量、强度、流动应力、拉伸延性和断裂韧性的影响.^[1~3] 现已发现较大塑性应变时增

收稿日期: 2005-08-30

作者简介: 王国珍(1965-), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授, 博导.

强粒子的断裂或从基体剥离造成的损伤降低了复合材料的弹性模量, 强度, 流动应力和拉伸延性. 但这些损伤也降低了裂纹前端的应力水平, 有增加复合材料断裂韧性的作用. 2) 疲劳损伤对钢和复合材料断裂韧性的影响^[4,5]. 研究表明, 随着疲劳峰值应力和疲劳循环次数的增加, 材料的断裂韧性降低, 对于不同热处理状态及不同微观组织的材料降低的程度不同. 3) 焊接加工中产生的初始蠕变损伤对 Cr Mo V 钢焊接热影响区冲击韧性的影响^[6]. 结果表明, 蠕变损伤较低时(蠕变孔洞低于 15%), 对韧性基本没有影响; 蠕变孔洞损伤较高时, 钢的韧性降低.

关于钢的解理断裂行为已进行了许多研究^[7~9], 然而关于微孔洞初始损伤对钢的解理断裂行为的影响很少有研究报道. 作者曾对初始损伤对不同钢组织缺口试样解理断裂韧性的影响进行了实验研究^[10]. 发现材料中的初始损伤量增加, 其缺口解理断裂韧性降低. 本文进一步通过长条形孔洞附近的局部应力-应变分布的细观有限元模拟计算, 对初始损伤影响钢的低温解理断裂韧性的原因进行研究.

1 实验方法与结果

1.1 材料、试样及实验

所用材料为 16MnR 热轧钢, 其成分为 $w(C) = 0.18\%$, $w(Mn) = 1.40\%$, $w(Si) = 0.36\%$, $w(S) = 0.18\%$, $w(P) = 0.02\%$. 钢中含有较多轧制的长条形 MnS 夹杂物. 将 16MnR 钢加热至 900 °C, 保温 2 h 后空冷, 得到的组织为铁素体和珠光体, 铁素体晶粒平均尺寸是 14.9 μm. 拉伸试样直径为 8 mm, 标距长为 50 mm, 在 -196 °C 下以 1 mm/min 的速度在万能拉伸机上进行拉伸, 用以测量材料的拉伸性能, 为有限元分析提供材料性能参数. 四点弯曲试样尺寸和加载方式与文献[10]相同. 试样尺寸为 12.7 mm × 12.7 mm × 80 mm, 缺口深度为 4.25 mm, 夹角为 45°, 缺口根部半径为 0.25 mm. 常温下在 SHIMADZU AG-10TA 万能试验机上对四点弯曲试样进行不同预载荷(P_0)的正向四点弯曲(张开缺口)加载, 以引入不同的微孔洞损伤量; 而后再反向弯曲(闭合缺口)加载, 使缺口尺寸恢复到原始尺寸, 以消除缺口尺寸对后续加载时韧性的影响. 对这些预加载的试样(包括 3 个未预加载的对比试样)进行 650 °C 保温 2 h 的高温回火处理以消除预加载时引入的残余应力和加工硬化^[11], 保持相同的显微组织, 分离出损伤因素, 实验观察发现产生的缺陷没有

愈合, 晶粒组织也没有变化. 而后对这些试样在 -196 °C 的低温下进行四点弯曲解理断裂试验, 测量断裂载荷 P_f . 对解理断口在扫描电子显微镜(SEM S-520)下进行仔细观察, 通过河流纹走向寻找起裂源, 判定起裂源性质, 测量引发解理的初始损伤孔洞的尺寸.

1.2 实验结果

图 1 为表征低温解理断裂韧性的平均 P_f/P_{gy} (P_f 为断裂载荷, P_{gy} 为整体屈服载荷)随预载荷比 P_0/P_{gy} 的变化. 由图可见, 当 $P_0/P_{gy} = 0$ 时, 即试样没有预损伤时, 表征低温缺口韧性的参数 P_f/P_{gy} 的值最大. 随着预载荷比 P_0/P_{gy} 的增加, P_f/P_{gy} 逐渐降低. 并且当 $P_0/P_{gy} < 0.86$ 时, P_f/P_{gy} 的值下降较慢; $P_0/P_{gy} > 0.86$ 后, P_f/P_{gy} 的值下降较快. 图 2 为测量的初始损伤孔洞面积分数 f_a 的平均值(损伤量)随 P_0/P_{gy} 的变化. 初始损伤孔洞面积分数 f_a 的测量方法为在每一载荷(P_0)下取三个低倍断口照片, 通过调整亮度和对比度, 突出微孔洞和长条形孔洞损伤(在处理后的照片中为黑色). 测量出微孔洞和长条形孔洞所占的面积与总面积之比, 这一比值即为 f_a . 由图 2 可见, 随着 P_0/P_{gy} 的增加, 材料中的损伤孔洞面积分数 f_a 增加. 当 $P_0/P_{gy} < 0.86$ 时, f_a 随 P_0/P_{gy} 的增加而略有增加, 其增加速率较慢. 而当

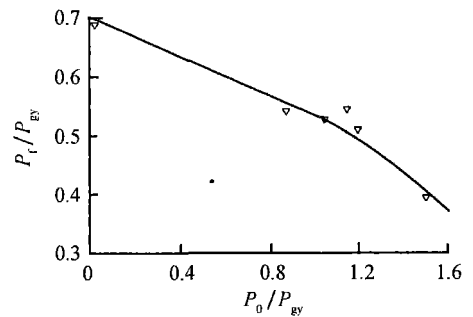


图 1 P_f/P_{gy} 平均值随 P_0/P_{gy} 的变化

Fig. 1 Variation of average value of P_f/P_{gy} with P_0/P_{gy}

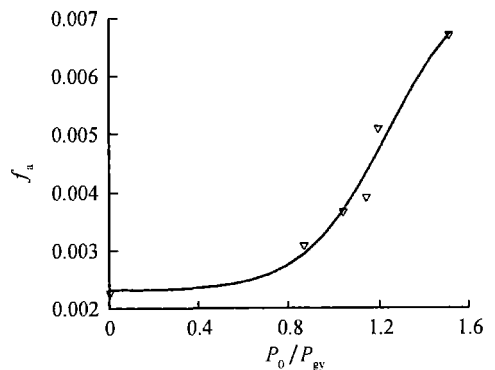


图 2 f_a 随 P_0/P_{gy} 的变化

Fig. 2 Variation of the f_a with the P_0/P_{gy}

$P_0/P_{gy} > 0.86$ 后, f_a 随 P_0/P_{gy} 的增加而迅速增加. 从图 1 和图 2 的比较可以看出: 材料的低温解理断裂韧性 P_f/P_{gy} 随预载荷比 P_0/P_{gy} 的增加而降低的结果是由材料预加载时引入的初始损伤所引起的, 随初始 f_a 的增加, 韧性下降的程度增大. 图 3 的断口观察结果表明, 试样的解理断裂起源于大尺寸的条状 MnS 孔洞前端(图 3a 和图 3b 中的黑色长条形缺陷前端). 说明长条形的初始损伤孔洞促使了解理起裂, 分析其原因是条形孔洞前端或旁边产生较高的局部应力-应变集中, 使解理裂纹形核条件 $\epsilon_p \geq \epsilon_c$ 和裂纹扩展条件 $\sigma_y \geq \sigma_y^{[8,9]}$ 容易满足. 下面的长条形孔洞附近的局部应力-应变分布的细观有限元模拟计算将对这一分析提供进一步的证明.

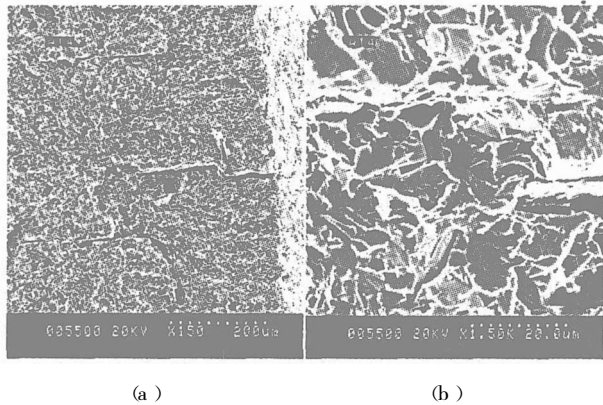


图 3 解理起裂的典型断口照片

Fig. 3 Typical cleavage initiation site on fracture surfaces

2 细观有限元(FEM)计算模型

采用 ABAQUS 软件模拟计算含有初始损伤缺陷和没有缺陷的四点弯曲试样缺口前端的应力-应变分布. 由于试样具有对称性, 有限元模型采用二维平面应变模型, 并且只计算试样的一半. 对称面施加法向的位移约束, 切向上可以自由移动. 对于四点弯曲加载, 下支撑刚体完全固定, 上加载刚体在垂直方向按一定速度, 一定的位移加载, 且保证其在水平方向上不移动. 以长条形孔洞缺陷引发解理的典型 SEM 观察为模型背景(如图 3 所示). 采用二维平面应变模型, 按断口上的实际测量, 取长 l , 宽 b 的条形孔洞, 位于缺口中心线, 缺陷左端(近端)距缺口根部距离为 x_L , 缺陷右端(远端)距缺口根部距离为 x_R , 对三个典型试样进行了计算, 有关计算参数见表 1. 对于缺口根部, 由于存在较大的应力-应变集中, 且往往是损伤断裂的起源区, 为了得到较精确的结果, 采用较细的网格划分, 缺口根部的条形孔洞及网格划分如图 4 所示. 计算模型中共包含 4 639 个单元, 4 817 个节点. 单元类型采用平面应变线性减缩积

分单元(CPE 4R).

上述拉伸实验测量的材料应力-应变响应服从幂硬化规律: $\sigma = E \epsilon (\sigma < \sigma_y)$; $\sigma = K \epsilon^n (\sigma \geq \sigma_y)$. 屈服应力 $\sigma_y = 828$ MPa; 弹性模量 $E = 2.0 \times 10^5$ MPa; 泊松比 $\nu = 0.3$; 加工硬化指数 n 和系数 K 分别为 0.14 和 1 445 MPa. 将这些材料参数输入到有限元模型中, 计算了含有初始损伤缺陷和没有缺陷的四点弯曲试样缺口前端的应力-应变分布及其随外加载荷的变化分布.

表 1 长条形孔洞缺陷细观 FEM 分析数据表

Tab. 1 Data of mesoscopic FEM analysis for string cavity

试样号	$l/\mu\text{m}$	$b/\mu\text{m}$	$x_L/\mu\text{m}$	$x_R/\mu\text{m}$
A 22	149	2	173	322
A 01	50	12	123	173
A 33	242	8.4	172	414
试样号	$(\Delta\sigma_y)_L/\text{MPa}$	$(\Delta\epsilon_p)_L$	$(\Delta\sigma_y)_R/\text{MPa}$	$(\Delta\epsilon_p)_R$
A 22	873	0.230	630	0.242
A 01	185	0.088	250	0.101
A 33	319	0.149	468	0.070

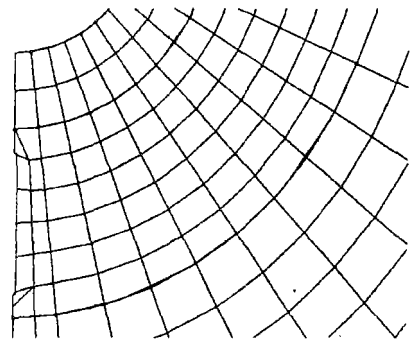


图 4 缺口根部的条形孔洞和网格划分

Fig. 4 String cavity and mesh distribution in front of notch

3 计算结果与讨论

在有限元计算中, 用载荷比 P/P_{gy} 表征外加载荷的大小, P 为外加载荷, P_{gy} 为整体屈服载荷, 即塑性区扩展到整个韧带时所对应的载荷, P_f 为实验测量的断裂载荷.

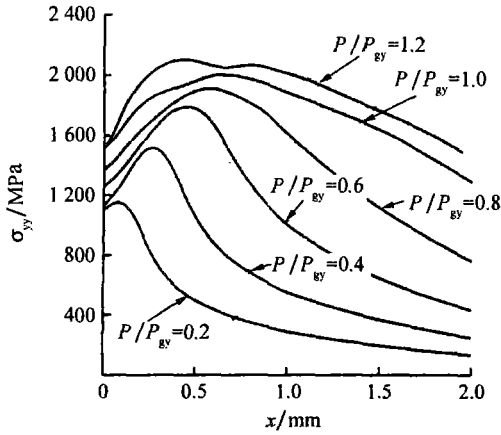
图 5a 和图 5b 为表 1 中的 A 33 试样缺口前无损伤孔洞时的最大正应力 σ_y 和等效塑性应变 ϵ_p 的分布及其随外加载荷的变化. 图 5c 和图 5d 为相应的缺口前有长条形损伤孔洞时的 σ_y 和 ϵ_p 的分布. 由图可见, 缺口前有长条形损伤孔洞时, 在孔洞两端附近存在明显的局部高应力-应变集中, 且随着外加载荷的增加而增加. 表 1 中 A 22 和 A 01 试样的计算结果与此相似.

图 6 为 A 33 试样在解理断裂时(相应于断裂载荷 P_f)缺口前有无孔洞时的 σ_y 和 ϵ_p 的分布. 由图可见, 在 P_f 载荷时, 在条形孔洞两端存在明显的应力-

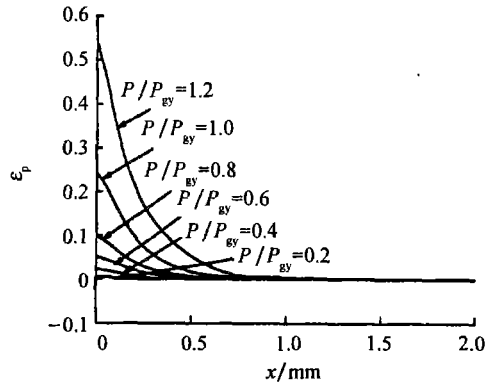
应变集中,从而在缺陷的前端容易促使解理裂纹的形核($\epsilon_p \geq \epsilon_c$)和扩展($\sigma_y \geq \sigma$).无孔洞损伤时缺口前起裂点处的应变 ϵ_p 和应力 σ_y 还未达到临界值 ϵ_c 和 σ ,但有条形孔洞时,孔洞前的局部应变 ϵ_p 和应力 σ_y 已超过 ϵ_c 和 σ ,从而促使了解理裂纹的形核和扩展,导致试样的解理断裂发生在较低载荷下,测得的缺口韧性 P_f/P_{gy} 较低(见图 1).对于无损伤的

缺口,要发生解理,则需外加载荷 P 进一步提高,以提升 σ_y 峰值使其超过 σ ,因而其测得的缺口韧性 P_f/P_{gy} 较高(如图 1 所示).这是初始损伤降低解理断裂韧性的细观力学原因.表 1 中 A 22 和 A 01 试样的计算结果与 A 33 试样计算结果相似.

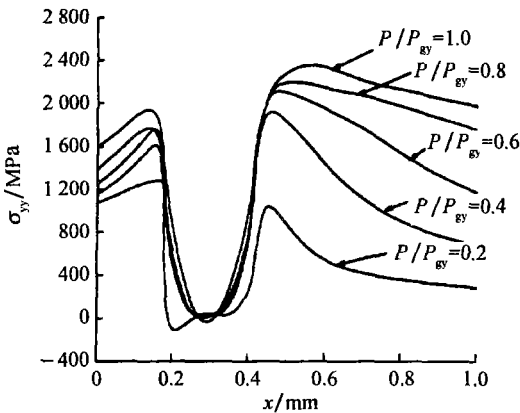
表 1 列出了 A 33, A 22 和 A 01 三个试样模型中计算的在断裂载荷 P_f 下条状孔洞缺陷两端的局部



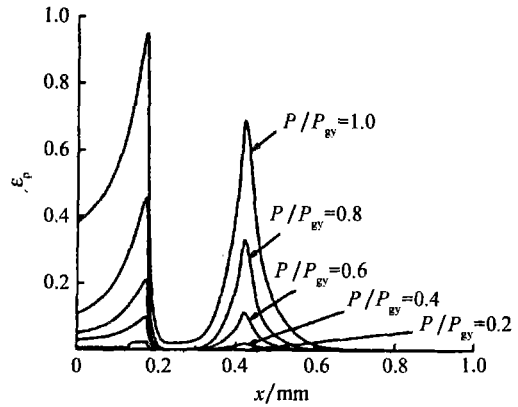
(a) 无孔洞 σ_y



(b) 无孔洞 ϵ_p



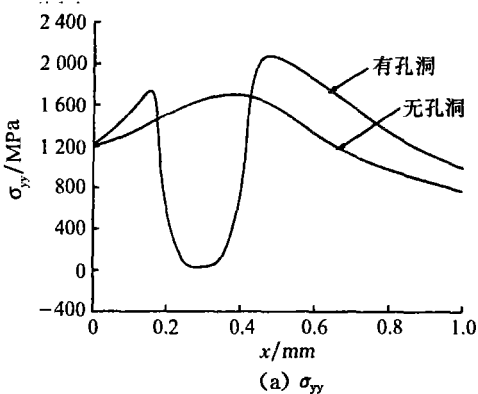
(c) 有孔洞 σ_y



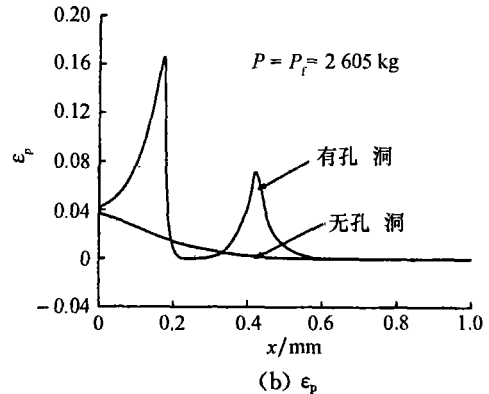
(d) 有孔洞 ϵ_p

图 5 A33 试样无孔洞(a,b)和有长条形孔洞(c,d)时缺口前的应力 σ_y 和应变 ϵ_p 分布

Fig. 5 Distribution of stress σ_y and strain ϵ_p ahead of notch for specimen A33 without cavity (a,b) and with string cavity (c,d)



(a) σ_y



(b) ϵ_p

图 6 A33 试样断裂时有无孔洞损伤的缺口前应力和应变分布

Fig. 6 Distribution of stress and strain ahead of notch for the specimen A33 without cavity and with cavity at fracture

应力和应变集中的值(缺陷两端有无孔洞时最大应力、应变的差值)。表中 l 为条状孔洞缺陷长度; b 为条状孔洞缺陷宽度; x_L 为缺陷左端(近端)距缺口根部距离; x_R 为缺陷右端(远端)距缺口根部距离; $(\Delta\sigma_y)_L$ 为左端应力集中值; $(\Delta\epsilon_y)_L$ 为左端应变集中值; $(\Delta\sigma_y)_R$ 为右端应力集中值; $(\Delta\epsilon_y)_R$ 为右端应变集中值。

从表1的数据可以看出,不同尺寸(l, b)的长条形孔洞缺陷位于缺口前不同位置时,所引起的局部应力和应变集中的值不同。 $\Delta\sigma_y$ 的值在185~873 MPa范围内, $\Delta\epsilon_y$ 的值在0.070~0.242。一般长条形孔洞缺陷的尺寸(l, b)越大,且其端部位于在缺口前无孔洞时的峰值应力附近时,所引起的局部应力和应变集中越高。这些局部的高 $\Delta\sigma_y$ 和 $\Delta\epsilon_y$ 弥补了外场 σ_y 和 ϵ_y 的不足使解理发生在低载荷下。随预载荷比 P_0/P_{gy} 增加,材料中的损伤孔洞面积分数 f_a 增加(如图2),相应的孔洞缺陷的尺寸(l, b)增大,引起的 $\Delta\sigma_y$ 和 $\Delta\epsilon_y$ 增大,可促使解理发生在更低的载荷下。这就是随着预载荷比 P_0/P_{gy} 的增加,材料的缺口解理断裂韧性 P_f/P_{gy} 降低(如图1所示)的细观力学原因。在同一 P_0/P_{gy} 下,不同试样由于缺口前初试损伤孔洞的尺寸和位置不同,引起的 $\Delta\sigma_y$ 和 $\Delta\epsilon_y$ 不同,这也是引起解理起裂的几率不同,造成韧性数据分散的原因之一。

上述解理起裂的细观力学FEM分析模型均是二维平面应变模型,且微孔洞缺陷被视为穿透型,与实际材料中的三维孔洞的情形不同,是一种近似模拟。但根据文献[12],这种计算的结果反映的规律是正确的。

4 结论

1) 钢的低温解理断裂韧性 P_f/P_{gy} 随预载荷比 P_0/P_{gy} 的增加而降低的结果是由材料预加载时引入的初始损伤所引起的。随初始损伤分数的增加,韧性下降的程度增大。

2) 细观有限元计算结果表明:预加载时引入的长条形孔洞缺陷,在后续低温加载时,其前端产生了局部高应力,高应变集中,促使了解理裂纹的形核($\epsilon_y \geq \epsilon_{pc}$)和扩展($\sigma_y \geq \sigma_c$),使解理发生在较低的载荷下,引起了韧性的降低。

3) 随预载荷比 P_0/P_{gy} 的增加,材料中的损伤孔洞分数增大,引起的局部高应力-应变集中程度增大,可促使解理发生在更低的载荷下。这就是随着预

载荷比 P_0/P_{gy} 的增加,材料的缺口解理断裂韧性 P_f/P_{gy} 降低的细观力学原因。

致谢:本文得到兰州理工大学有色金属新材料省部共建国家重点实验室开放基金(0305)和博士研究生基金(0309)的资助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] KISER M T, ZOK F W, WILKINSON D S. Plastic flow and fracture of a particulate metal matrix composite [J]. *Acta Mater*, 1996, 44(12): 3 465-3 476.
- [2] TOHGO K, FUKUHARA D, HADANO A. The influence of debonding damage on fracture toughness and crack tip field in glass particle reinforced nylon 66 composites [J]. *Composites Science and Technology*, 2001, 61(5): 1 005-1 016.
- [3] SRI VASTAVA V K, MALE K, BOTHE K. *et al*. Effect of damage on flexural modulus of C/C SiC composites [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 354(2): 292-297.
- [4] TALUKDAR P, SEN S K, GHOSH A K. Effect of fatigue damage on the dynamic fracture toughness of En-8 Grade Steel [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, 32A(10): 2 547-2 552.
- [5] OZTUK A. The influence of cyclic fatigue damage on the fracture toughness of carbon carbon composites [J]. *Composites Part A*, 1996, 27A(4): 641-646.
- [6] MOSKOVIC R, LINGHAMI J, CROCKER A G. *et al*. An experimental and theoretical consideration of the effect of prior creep damage on the heat affected zone fracture toughness of Cr Mo V steel [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2004, 71(4): 587-599.
- [7] 王玉良, 王国珍, 陈剑虹. 不同缺口尺寸试样在不同加载速率下缺口前的应力-应变分布 [J]. *兰州理工大学学报*, 2004, 30(4): 9-11.
- [8] WANG G Z, LIU Y G, CHEN J H. Investigation of cleavage fracture initiation in notched specimen of a C-Mn steel with carbides and inclusions [J]. *Material Science and Engineering A*, 2004, 369(1-2): 181-191.
- [9] WANG G Z, CHEN J H. A statistical model for cleavage fracture in notched specimens of C-Mn steel [J]. *Fatig & Fract of Engng Mater & Struct*, 2001, 24(7): 451-459.
- [10] 王国珍, 王红, 陈剑虹. 损伤对低合金钢缺口试样解理断裂韧性的影响 [J]. *理化检验-物理分册*, 2005, 41(2): 61-64.
- [11] REED P A S, KNOT J F. Investigation of the role of residual stressing in the warm prestress (WPS) effect, part I - experimental [J]. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, 1996, 19(3): 485-500.
- [12] BANDSTRA J P, KOSS D A, GELTMACHER A. *et al*. Modeling void coalescence during ductile fracture of a steel [J]. *Materials Science and Engineering*, 2004, A 336(2): 269-281.