

文章编号:1674-2869(2008)03-0087-03

晶界损伤对裂尖应力场的影响分析

何家胜¹, 危卫¹, 鲁录义¹, 朱晓明², 吴建平², 路远明²

(1. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 中国石化股份有限公司武汉分公司, 湖北 武汉 430082)

摘要:以奥氏体钢低应力脆断微观组织特征为基础,提出了晶界损伤的分析模型;采用有限元方法分析了裂尖邻域里微观组织晶界上杂质、孔洞对宏观裂纹裂尖应力集中情况的影响;建立了晶界损伤对裂尖应力集中系数影响的等势图,分析结果与实验观测结果基本一致。

关键词:晶界损伤;应力集中;裂纹扩展

中图分类号: TG 142.13

文献标识码: A

0 引言

一般认为塑性材料破坏前都有较为明显的先兆,经历变形、屈服、颈缩几个过程直至最后断裂。但工程实践中,许多塑性良好的材料往往发生脆性断裂,且大多数情况均属低应力脆断。这类断裂由于没有明显的宏观塑性先兆,往往引起灾难性的突发事件。多起奥氏体钢低应力脆断的断面扫描电镜分析结果表明:断面上晶粒大都没有发生破坏,断裂失效起源于晶粒间的晶界,如图1所示。在一定条件下,晶界会产生杂质和孔洞,它们的存在影响着材料的力学性能。材料的宏观破坏分析中将材料视为一个均匀的无缺陷的整体进行分析,这样的分析不能描述裂纹萌生、扩展等局部化破坏现象。为了使力学分析更加贴近工程材料发生破坏的实际情况,有必要针对材料的晶界损伤情况进行微观力学分析^[1~3]。讨论材料宏观裂纹裂尖邻域的微观晶界损伤对裂尖应力场的影响。

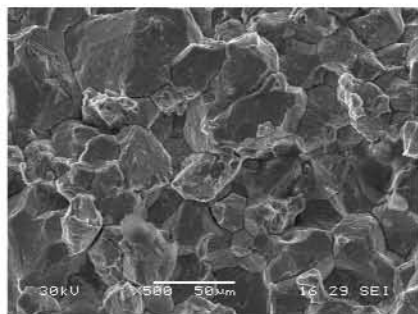


图1 奥氏体材料低应力脆断扫描电镜分析

Fig. 1 The fractography of austenite low stress brittle fracture

1 晶粒-晶界结合模型

以奥氏体钢微观组织为分析对象,认为晶界上存在着孔洞、杂质,如图2所示,仅进行二维分析。将晶粒简化为正六边形,同时将所有孔洞均简化为圆形。晶界的宽度为晶粒尺寸的5%,其弹性模量为晶粒弹性模量的1.318倍^[4]。

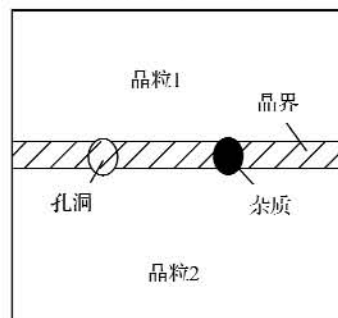


图2 晶粒-晶界结合模型简图

Fig. 2 The grain-grain boundary model

2 几何模型

研究的微观断裂模型是受到无穷远处均匀拉应力的有限宽度长条板单边裂纹模型。实际模型的长条板不可能无限长,通过考虑长条板长度对裂尖应力集中的影响,并权衡系统资源消耗与精确度的关系,最后确定长条板的最佳长度。

如图示3所示,长条板的晶粒直径约为0.1 mm,为4级晶粒度;晶界的宽度为0.004 mm。由于模型的对称性,可采用半模型进行分析计算,最后确定的几何模型为1.4 mm×1.0 mm(半模型),长条板的两端受均匀载荷为1 N/μm,图3中Λ为板中心位置。

收稿日期:2008-01-09

作者简介:何家胜(1958-),男,湖北武汉人,副教授,硕士,研究方向:化工设备的结构强度与失效分析。

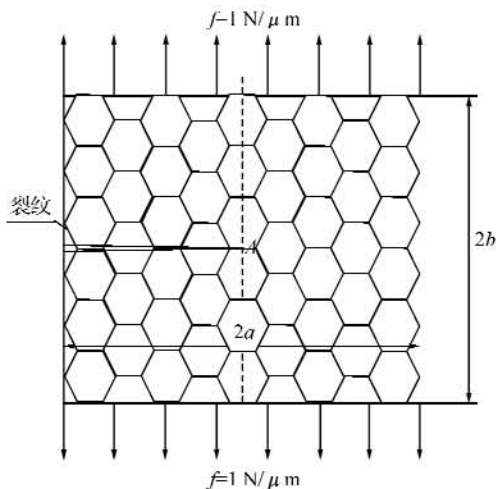
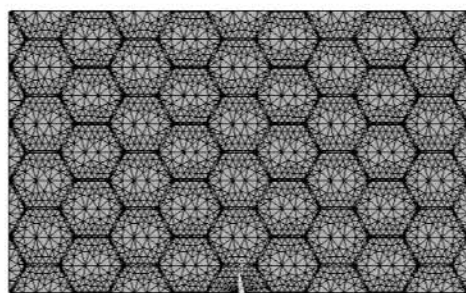


图 3 几何模型图

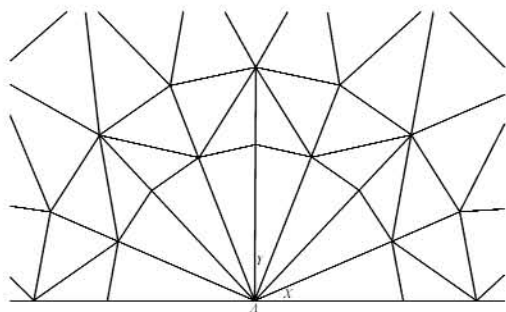
Fig. 3 The geometric model

3 有限元模型

利用有限元分析软件 ANSYS 进行分析,采用平面网格单元对晶体及晶界进行任意网格划分,如图 4(a)所示,长板条中心裂尖处采用特殊的奇异单元划分,为 6 节点三角形单元,这些三角形单元是以裂尖为顶点的等腰三角形,在绕顶点的 360° 平面上,每隔 22.5° 划分一个单元.如图 4(b)所示.



(a) 有限元网格



(b) 裂尖处的奇异单元

图 4 有限元模型

Fig. 4 The finite element model

位移边界条件:由于模型的对称性,只需在模型的底部右半边加对称边界条件, $x=0 \sim a, y=0$;

$v=0$ (v 为 y 方向的位移).

力边界条件:由于模型的对称性,在板的上面加均布载荷 $1 \text{ N}/\mu\text{m}$. ($y=b, p=1 \text{ N}/\mu\text{m}$)

4 晶界损伤的有限元模拟

理论和实验研究表明,在一定条件下材料内部的微小缺陷不断生长、合并而成为宏观裂纹.在实际工程结构中,由于加工过程、载荷、温度、化学腐蚀以及其它多种因素的影响,在材料内部薄弱部位往往首先出现许多微小裂纹和微小孔洞.为了能在有限元分析中模拟晶界的孔洞和杂质,引入 ANSYS 有限元分析中的单元生死技术将孔洞、杂质处的单元“杀死”,其实质是把单元刚度矩阵乘上一个很小的因子,并将其载荷矩阵、质量矩阵等赋零值.本文模拟了晶粒间的孔洞及晶界开裂两种情况.

设裂尖应力集中系数为 K_{AM} , 则

$$K_{AM} = \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \quad (1)$$

式(1)中: σ_c 为裂尖处的等效应力,

$$\sigma_c =$$

$$\sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] / 2},$$

σ_a 为板的均匀拉应力.

经计算可得到孔洞位于裂尖邻域不同位置时裂尖应力集中系数 K_{AM} 的数值,将使 K_{AM} 值相同的各孔洞所处点的位置连接起来,就得到了两晶粒间的孔洞对应力集中系数 K_{AM} 的等势线图,如图 5 所示.

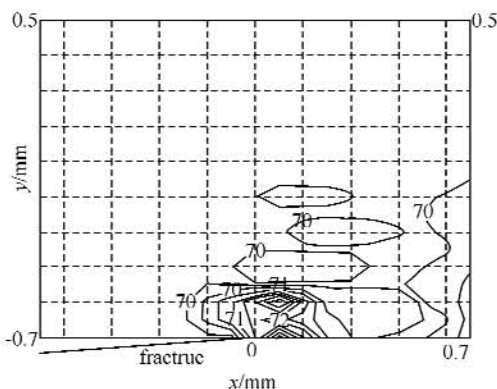


图 5 两晶交汇孔洞对裂尖应力集中影响的等势线图

Fig. 5 ISO-Stress line graph of the effects of the cavity on the stress concentration on the crack tip

当损伤沿着某一晶界扩展,形成两晶粒间的晶界开裂时,晶间开裂对裂尖应力集中系数影响的等势线图如图 6 所示.

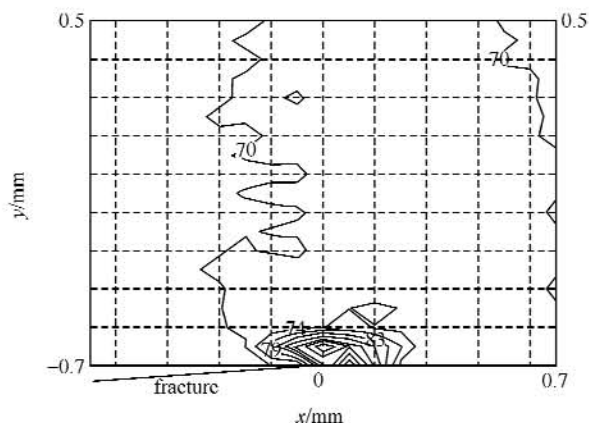


图6 晶界开裂对裂尖应力集中影响的等势线图
Fig. 6 ISO-stress line graph of the effects of the intercrystalline cracking on the stress concentration on the crack tip

5 结 语

a. 从损伤到裂尖的距离来看,靠近裂尖处的

损伤对裂尖的应力集中影响较大,当损伤距离裂尖较远时,几乎对裂尖的应力集中没有什么影响。裂尖前方的损伤对裂尖应力集中系数影响较大,当损伤在裂纹后方时几乎没有什么影响。

b. 从图5、图6中可以看到,损伤对应力集中系数影响的最大处位于裂尖前方约 $10\ \mu\text{m}$ 。当损伤位于这个区域时,裂尖的扩展就会加剧。这与文献[5]记录的310钢中纳米微裂纹的演化过程是一致的。图7(a)表明,在裂纹前方中已形成B,C,D和E 4个纳米裂纹。其中D裂纹已钝化成空洞。在恒位移条件下,D空洞不断长大,E裂纹开始钝化成空洞,并出现微裂纹F(见图7(b))。在图7(c)中,F裂纹也已钝化成空洞,并和已连通的D,E空洞相连。这说明邻近裂尖的孔洞确实促进了裂纹的扩展,反过来裂纹的扩展又使裂尖邻域处损伤较之其它位置的损伤处于扩大的优势之中。

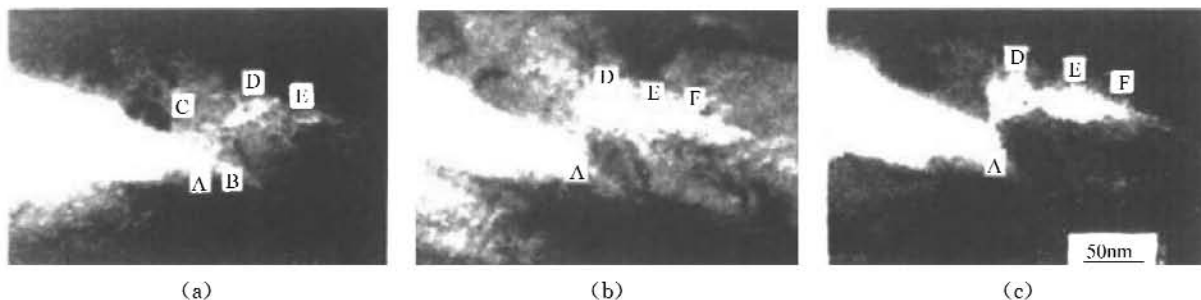


图7 310钢中纳米裂纹钝化成空洞并相互连接的过程

Fig. 7 The process of the nano-crack in the 310 steel blunted to the void

参考文献:

- [1] 黄克智,肖纪美.材料的损伤断裂机理和宏微观力学理论[M].北京:清华大学出版社,1999: 62-70.
- [2] 杨卫.细观力学与细观损伤力学[J].力学进展,1992,22(1):1-9.
- [3] 杨卫.宏微观断裂力学[M].北京:国防工业出版社,1995: 134-146.
- [4] 郑磊,徐庭栋.一种实验确定多晶材料晶界区弹性模量的方法[J].自然科学进展,2004,14(5):573-577.
- [5] 陈奇志,褚武扬.薄膜中纳米裂纹在无位错区中的形核、钝化或扩展[J].自然科学进展,1995,5(6):743.

Effect of grain boundary damage on stress field of the crack tip

HE Jia-sheng¹, WEI Wei¹, LU Lu-yi¹, ZHU Xiao-ming², WU Jian-ping², LU Yuan-ming²

(1. School of Mechanical Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Petrochemical Refinery, SINOPEC, Wuhan 430082, China)

Abstract: A model of grain boundary damage was proposed based on the characteristics of the microstructure of low stress brittle fracture of the austenitic steels, the affect of the holes and the impurities of the grain boundary on stress concentration factor of the crack tip was analyzed by the finite element method. The equal affect diagram of the grain boundary damage on the stress concentration factor was set up. The analysis results in this paper agree with what has been observed in some experiments.

Key words: grain boundary damage; stress concentration; crack growth

本文编辑:陈晓芳