

材料裂纹型损伤愈合过程观测

徐永东

(兵器工业第五二研究所宁波分所 宁波 315041)

张文兴 柴东朗

(西安交通大学材料科学与工程学院 西安 710049)

文 摘 对预制裂纹型损伤的愈合过程进行了实时原位观察,结果发现裂纹愈合过程分为裂尖锐化、裂纹分节、裂腔球化、孔洞愈合及质量均匀化等几个明显阶段。所得结果与金相法得到的纯铁的裂纹愈合过程相符,通过建立相关裂纹愈合模型分析认为裂纹愈合过程必须满足一定的热动力学条件,空位迁移是裂纹愈合的主要机制。

关键词 裂纹,愈合,原位观察,热动力学,空位迁移

Observation of Material Crack Healing Process

Xu Yongdong

(No. 52 Research Institute of China Ordnance Industries Ningbo 315041)

Zhang Wenxing Chai Donglang

(Xi 'an Jiaotong University Xi 'an 710049)

Abstract In this paper full process of crack healing is in situ observed for the first time. It is found that there are several obvious stages in the process of crack healing, including crack tip blunting, crack disintegration, crack sphericizing to void, void healing and well distributing. Thermodynamic conditions of damage healing are analyzed and it is proved that the void diffusing is a main mechanism during the crack healing process, which is in accord with the crack healing process of pure iron by metallographic examination.

Key words Crack, Healing, In situ, Thermodynamic, Void diffusing

1 引言

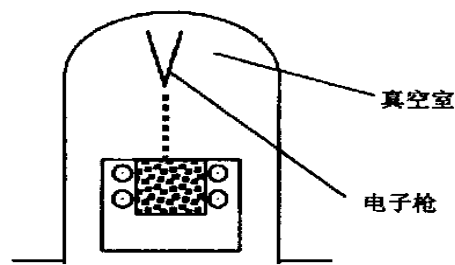
材料局部损伤后的修复对于提高材料的利用率,节约资金具有重要的实际意义,对于损伤愈合的研究仍处于探索阶段,愈合机理的认识和研究手段的发展仍然不够完善。本文首次实现了对裂纹型损伤愈合的原位观察,第一次完整地观察到了裂纹愈合的整个过程,所得结果与文献[1]金相法所得结果相同。

2 实验

2.1 试验条件

试样为粉末冶金 Mg 坯料,直径 5 mm,高 5 mm,冷压压力 400 MPa;扫描电镜自带真空加热台;加

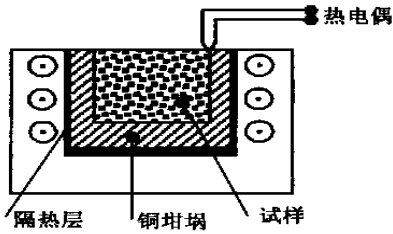
热电源为直流稳压电源,电压为 15 V,电流为 1 A;温度监测用电位差计;用扫描电镜(SEM)进行观测。实验设备示意图如图 1 所示。



(a) 扫描电镜中的原位观察

收稿日期:1999-09-03;修回日期:2000-05-08

徐永东,1974 年出生,硕士,主要从事金属基复合材料制备及损伤分析工作
宇航材料工艺 2001 年 第 3 期



(b) 加热台
图 1 试验设备示意图

Fig. 1 Schematic drawing of experimental facilities

2.2 实验过程

把制备得到的 Mg 坯料放入扫描电镜的真空加热台上升温到 420 保温, 观察试样表面裂纹在不同加热时间的形态变化情况, 直至加热到裂纹球化阶段形状无显著变化为止, 因此后裂纹的质量均匀化过程需较长的时间, 以后的变化较难直接通过电镜观察得出。图 2 为 Mg 坯料加热过程中不同时间的形貌。



(a) 420 , 20 min



(b) 420 , 40 min



(c) 420 , 60 min



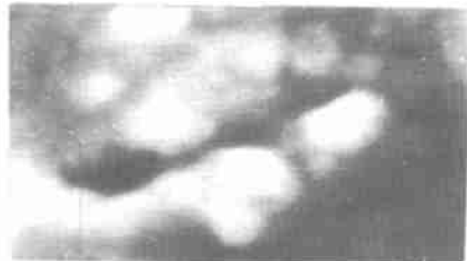
(d) 420 , 80 min



(e) 420 , 100 min



(f) 420 , 120 min



(g) 420 , 150 min

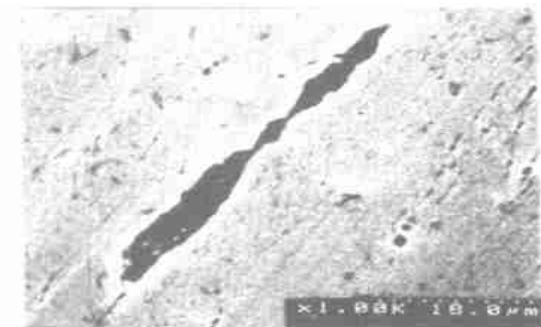


(h) 420 , 180 min

图 2 Mg 裂纹愈合过程中不同时间的形貌 4 000 ×

Fig. 2 Magnesium crack shapes during healing process

文献[1]采用金相法观察了预制裂纹的纯铁试样中裂纹在外加条件(加热)下材料内部裂纹数量和形貌的变化如图3所示。



(a) 原始裂纹



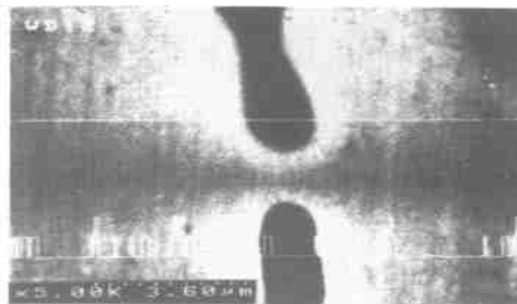
(b) 裂纹分节,裂尖锐化 920 / 1 h



(c) 部分裂腔球化 920 / 1.5 h



(d) 孔洞减少,缩小 920 / 3 h



(e) 孔洞愈合及成分均匀化

图3 纯铁裂纹的愈合过程

Fig.3 Crack healing process of pure iron

由图2可以看出,Mg坯裂纹愈合过程存在几个明显阶段:原始裂纹尖端钝化、长裂纹的分节、分解后裂纹裂腔球化及缩小,可以推断此后在孔洞消失部位还有一个质量均匀化过程。直接观察裂纹愈合完整过程期间的形态变化还未见有文献报道,虽然观察到的只是露在表面的裂纹形态,但仍可以较好的反映裂纹愈合过程的特点。通过对比Mg坯裂纹愈合过程的观察结果和文献[1]采用金相法观察预制裂纹的纯铁的裂纹数量和形态的试验即容易发现二者存在相似的过程,裂纹愈合几个阶段的特征形貌较为相似。由于材料内部约束机制有所不同,纯铁试样裂纹完全封闭,因而约束形成的愈合驱动力大于表面裂纹。二者在愈合驱动力上稍有差异——二维约束和三维约束的不同导致裂纹愈合最后阶段孔洞消失时表面裂纹在原部位仍存在隐约可见的裂痕。综合二者结果,可见裂纹愈合过程可分为以下几个阶段:

- (1) 由表面扩散导致的裂面趋于光滑及裂尖锐化;
- (2) 裂面内凹及裂尖曲率半径增大;
- (3) 裂纹分节;
- (4) 非球形裂腔球化;
- (5) 球化孔洞的缩小愈合;
- (6) 孔洞愈合后的质量均匀化。

3 裂纹愈合模型

3.1 裂纹愈合驱动力

把损伤材料看作一个封闭系统,材料以外看作环境,封闭系统与环境间只存在能量交换而无物质交换,材料内部损伤的愈合只能靠内部物质迁移及结构变化完成。裂纹愈合驱动力可表述如下:

$$F = F_{\text{stru}} + F_{\text{gem}} \quad (1)$$

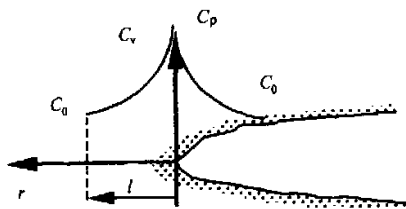
F_{stru} ——与晶体缺陷和浓度场相关的结构驱动力;

F_{gem} ——涉及损伤类型及几何形状的几何驱动力。

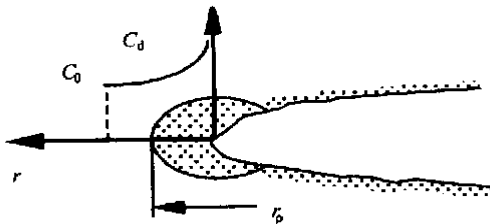
3.2 损伤愈合过程中的空位浓度场

裂纹的愈合与物质迁移密切相关。在封闭系统中,这种物质传递及迁移过程只能由物体本身完成。空位的迁移运动是晶体中原子自扩散得以进行的最重要的前提。空位扩散将引起原子的反向扩散流,在一定热力学条件下裂纹及裂尖附近的空位浓度场以及空位的扩散将对裂腔形状改变,对裂纹愈合起着十分重要的作用。裂纹的空位浓度场主要由三部分组成(如图4):损伤区的晶体缺陷(空位)浓度场(离表面浓度场) C_v ;裂纹内表面曲率变化引起的空位浓度场(沿表面浓度场) C 和塑性应变浓度场 $C_d^{[2]}$,即:

$$C = C_v + C + C_d \quad (2)$$



(a) 裂纹尖端沿表面浓度场和离表面浓度场



(b) 裂尖塑性区的空位浓度场

图4 裂纹尖端空位浓度场

Fig. 4 Void consistency field of the crack tip

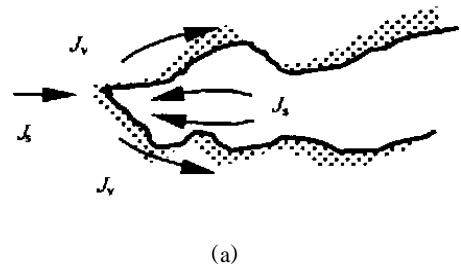
r 为沿裂纹尖端距离; C_0 为空位平均浓度;

l 为裂纹尖端与 C_0 间距离; r 为塑料浓度场半径。

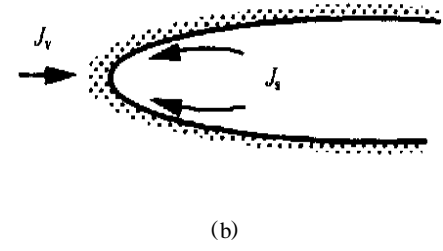
3.3 裂尖钝化过程中的物质迁移

用 G_v 、 J_v 表示与 C_v 相关的浓度梯度和扩散通量, G_s 、 J_s 与 C 相关的浓度梯度和扩散通量, G_d 、 J_d 与 C_d 相关的浓度梯度和扩散通量。分析表明三种空位的浓度梯度场及扩散通量,均在裂尖处达到最大值。在一定温度下,高浓度的裂尖的空位,在浓度梯度产生的热力学驱动力的作用下,背离裂尖沿浓

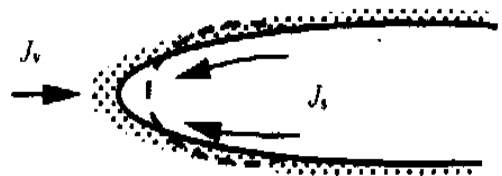
度梯度下降方向扩散,原子则不断向裂尖迁移,使裂纹钝化。扩散通量的大小直接影响裂尖钝化速率。温度一定时扩散通量受两个因素所支配:扩散系数 D 和空位浓度梯度 $\text{grad } C$ 。 G_d 与裂端的应变场有关,而 G_v 与 G_s 则随裂尖曲率半径的增大迅速降低。由扩散理论知:晶体中原子扩散的诸多方式体扩散、晶界扩散、位错扩散及表面扩散^[3],其中表面扩散系数大出其它扩散方式几个数量级,从而扩散通量 J_s 也远大于体扩散通量 J_v 。因此认为裂纹裂尖钝化及表面形状的改变主要由表面扩散控制。裂纹表面上原子的扩散,将使裂尖钝化的同时,在裂尖附近曲率半径较大的裂面处,由于表面原子不断向裂尖迁移而逐渐增大裂尖的曲率半径。粗糙的裂面也因原子的表面扩散而逐渐变得光滑(如图5)。



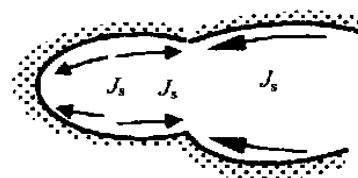
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

图 5 扩散引起的裂面内凹

Fig. 5 Concave shape of the crack surface by diffusing

3.4 裂腔“分节”过程

裂尖附近的裂纹表面由于原子不断向裂尖迁移而发生内凹。由于尖点处空位的化学位最低,而浓度最高,向两侧逐渐降低。在浓度梯度产生的热力学驱动力的作用下,尖点两侧曲面上的原子不断向该处扩散,使尖点不断生长接触而形成隔节。

3.5 裂腔球化

裂尖锐化及隔节形成后,裂表的曲率半径较大,同时裂纹塑性区中产生的空位也在裂纹钝化过程中消耗,故 C_v 及 C_d 对裂腔形状的改变已不起作用。即隔节形成后裂腔形状的改变将由裂面上原子的面扩散进行。由于面扩散不增加裂腔内物质的数量。可以认为,裂腔形状改变的过程中裂腔的体积基本保持不变。

3.6 空洞的愈合及愈合后的质量均匀化

裂腔球化后,由表面扩散而引起的物质迁移随之停止。空洞的缩小及愈合过程,开始转由空洞附近的空位浓度场引起原子的体扩散来完成。空洞的

愈合过程可分为两个过程:空洞缩小及空洞愈合后的质量均匀化。由于体扩散速率远远小于表面扩散,所以空洞的愈合将是一个长时间的过程。影响空洞愈合时间的因素可分三类:材料因素、几何因素和外部环境因素(主要是温度),采用热压力加工减小裂纹宽度或把较大的空洞压扁拉长,使之“分节”球化后形成较小的空洞,可有效地减少愈合时间。另外,细化晶粒以减少空洞距晶界距离 l 也可使愈合时间缩短。

对于 Mg 试样裂纹愈合过程的原位观察以及采取金相法得到的纯铁试样的裂纹愈合试验各个阶段均与裂纹愈合模型的各个过程相对应,说明试验与分析是相符的,由以上工作可知损伤愈合过程必须满足一定的热力学和动力学条件,空位迁移是愈合的主要机制。

4 结论

- (1) 原位定点观察裂纹的愈合过程是可行的。
- (2) 裂纹的愈合有几个明显的几个阶段:裂尖锐化;裂纹分节;裂腔球化;孔洞愈合及质量均匀化。
- (3) 裂纹愈合应满足一定的热力学和动力学条件,裂纹的愈合主要是空位的迁移。

参考文献

- 1 柴东朗. 材料内部损伤的愈合过程. 见:第五届全国典型零件热处理学术及技术交流会 & 第二届全国热处理学会物理冶金学术交流会论文集, 1998 :183 ~ 192
- 2 李新立译. 金属系中显微结构的稳定性. 科学出版社, 1984
- 3 崔忠圻. 金属学与热处理. 机械工业出版社, 1989

焙烘、充氮、封气孔机

本成果是密封继电器封壳后进行焙烘、充氮、封气孔三道工序合为一体的专用设备。可用于密封继电器以及其它需充氮的电器元件的生产工艺。本成果采用高真空系统,氮气含水量控制在 $1.2 \times 10^{-3} \%$ 以下,采用冷加工(压钢球)封堵充气孔。最高焙烘温度 500 ,温控精度 ± 3 ,升温速度 100 /h。焙烘真空度 5×10^{-3} Pa,充氮室真空度 1.33 Pa。氮气净化纯度露点 < -65 ,净化速率 300 m³/h。本成果每次焙烘 300 只,一次充氮 100 只。成本低、效益好,在同行业中有广阔的应用前景。

· 李连清 ·

— 41 —