

金属材料内裂纹愈合研究综述¹

赵中里 韩静涛 张永军

北京科技大学材料科学与工程学院 (100083)

E-mail: zhongli5167@163.com

摘要: 综述了近年来金属材料内部裂纹愈合研究在愈合方法、愈合过程形态演化、愈合影响因素、愈合机理、愈合形态演化过程的扩散热力学分析及数值模拟方面的进展。针对目前侧重于高温愈合, 提出应对中温愈合进行研究; 针对目前研究很少涉及内部因素的现状, 指出应加强对其研究, 尤其应加强合金元素对裂纹愈合影响的研究。对以非平衡热力学为基础进行金属材料内部裂纹愈合研究作了展望。

关键词: 金属; 内裂纹; 愈合; 非平衡热力学

中图分类号: TG111.91

1. 引言

金属材料在制备、加工成形及使用过程中, 不可避免地产生内部或表面的微小缺陷。微缺陷的存在与扩展, 是使构件强度、刚度、韧性下降或剩余寿命降低的原因; 在一定的外部因素(载荷、温度变化以及腐蚀介质等)作用下, 这些缺陷会不断扩展和合并, 形成宏观裂纹。裂纹继续扩展后, 最终可导致构件或结构的断裂破坏。近期的研究工作^[1~8]表明, 对目前大量使用的传统金属结构材料而言, 通过改变环境条件促使其内部物质迁移与结构重排, 使裂纹逐步愈合并进而引起性能恢复, 是延长金属材料使用寿命, 确保其安全使用的现实有效的途径。

金属材料裂纹愈合是指通过采取相应的措施使已经失去原子间作用力的界面重新恢复作用力的过程, 这是一个十分复杂的、前沿性、多学科相互交叉的问题。这一问题的研究工作将涉及金属材料学、损伤理论、断裂力学、热力学和材料加工等学科。

目前, 国内外学者在物理模拟、计算机模拟及理论方面, 对金属材料内裂纹的愈合进行了一系列的研究, 取得了显著的成效。

2. 金属材料内部裂纹愈合的物理模拟

随着对金属材料内裂纹愈合研究的不断深入, 在物理模拟试样的制备方法、愈合方法、愈合过程形态演化、愈合控制因素、愈合机理及其应用等方面, 取得了一定的研究进展。

2.1 金属材料内裂纹试样制备技术的研究现状

在金属材料内部裂纹愈合问题的研究中, 制备含有内部裂纹试样是基础性和关键性的工作。目前人们使用的试样制备技术有钻孔压缩法^[1]、平板撞击法^[4]、氢腐蚀法^[9]和疲劳实验法^[10]等。方法不同, 制备出的内裂纹的形式也不同。可以根据具体研究内容, 选择适当的

¹ ¹ 本课题得到高等学校博士学科点专项科研基金(项目编号: 20030008001)资助

试样制备技术。

2.2 金属材料内裂纹愈合方法的研究现状

材料裂纹愈合的方法大致可归纳为物质补给和能量补给两种。从已进行的一些研究来看,对于普通金属材料中的裂纹,实现愈合采用的方法主要是外部能量补给。

目前研究金属材料愈合方法采用的外部能量补给形式主要有加热与施加电流脉冲两种方式,如果考虑到有塑性变形的情形,则还包括机械能的注入。其中加热又包括常规加热、微波加热及激光加热等方式。

2.2.1 加热

文献^[11]研究了冷变形后金属塑性容限的恢复。指出金属冷变形后会出现微观上的不连续,即所谓的损伤。退火处理可用于恢复塑性容限和避免损伤。微观不连续引起构件疲劳寿命的降低。该文对采用常用热处理方法和非常规热处理的方法(三面轴向压缩变形)对恢复构件的塑性容限和增加构件的疲劳强度进行了研究,实验结果显示,金属中的微观损伤出现了愈合,并可应用于实践。

文献^[12]利用衍射技术研究了铝拉伸变形退火过程中微裂纹(100nm)长大与在退火过程中的愈合。结果显示,微裂纹长大主要出现在变形初期的试样表层,缺陷层的厚度随着变形程度的增加而加大,退火处理后微裂纹立刻开始愈合,表层宽 10 μ m 的微裂纹愈合依据空位扩散机制进行。

李晓刚^[9]对含氢腐蚀甲烷气泡和裂纹的 304 不锈钢进行了 600 $^{\circ}$ C、360min 的热处理。SEM 观察表明,氢蚀气泡和裂纹发生了完全愈合,氢蚀气泡和裂纹的愈合机制是热扩散。Fe 和 C 在奥氏体中的快速扩散是 304 不锈钢中氢蚀裂纹自愈的必要条件。发生氢蚀裂纹愈合的动力是氢蚀气泡长大导致的塑性变形能 E_n ; 在 Fe、C 和 H 原子都扩散足够快的情况下,氢蚀气泡和裂纹愈合的条件 $E_n \geq 2\gamma/r$ (γ 为界面表面张力, r 为气泡半径或裂纹半长)。氢蚀气泡和裂纹的愈合过程伴随亚晶长大、多边形化的高温恢复过程甚至再结晶。

文献^[13]利用高温显微镜,对碳钢氢腐蚀裂纹的愈合过程进行原位、实时观察,通过录像记录了整个裂纹愈合实验过程。结果表明,裂纹在加热到 630 $^{\circ}$ C 左右时,发生明显愈合而变小变细。观察得到裂纹闭合的临界温度 630 $^{\circ}$ C 低于实际裂纹闭合温度。发生氢蚀裂纹愈合的机制是热扩散,动力是氢蚀气泡长大导致的塑性变形能 E_s 。

文献^[10]采用对称拉—压低周疲劳方法在轴对称工业纯铁试样中引入临界长度约为 30 μ m, 穿越铁素体晶界的内部微裂纹。随后在 1173K 温度下对试样分别进行 120min 和 300min 的真空加热处理。结果表明,随保温时间的延长,穿晶疲劳微裂纹扁椭圆型的二维纵剖面首先在表面扩散与晶界扩散的耦合作用下在晶界处分隔为两部分,随后在表面扩散单独作用下演化为由多个球形空洞组成的球洞串截面形态。由于晶界在退火过程中的迁移运动,晶界上裂纹演变形成的空洞最终被遗留在晶粒内部。

文献^[14,15]用透射电镜观察了高纯 Fe 单晶中主裂纹附近微裂纹的愈合过程,认为 Fe 中微裂纹的愈合是由于 Fe 原子的自扩散引起的,裂纹愈合存在一个临界温度,对 Fe 约为 973-1023K。

2.2.2 施加脉冲电流

周亦胄等^[16~19]对有淬火裂纹的 45 钢试样进行脉冲电流处理, 通过 SEM 观察处理前后试样的变化, 发现在脉冲电流作用下, 裂纹能够在无熔化的情况下愈合, 且愈合在极短的时间内发生, 愈合过程不改变材料的原有结构, 认为快速温升引起的瞬时热压应力是造成裂纹成键结合的重要因素之一。文献^[21]对人工预置贯穿裂纹的钢进行脉冲电流处理, 也得出了同样的结论。

沈以赴等^[2]则研究了低碳钢经大电流脉冲处理后改善疲劳性能的可能性。当材料经过一段疲劳实验后, 内部将产生一定数量的微观缺陷而使其微观结构处于紊乱的非稳定状态。此时输入适当的能量, 可促使其恢复到较完整的稳定状态。大电流脉冲可以作为瞬时输入能量的一种方式, 调整其微观结构, 以实现材料疲劳性能的改善。

Qin, R 等^[21]研究了电脉冲下 1045 钢内椭圆形显微裂纹的演化, 得出了裂纹愈合驱动力与施加的电流强度、裂纹的几何形状、杨氏模量以及试样尺寸之间的关系。研究认为, 由焦耳热而使试样温度升高是裂纹愈合的原因。

2.3 内裂纹愈合过程形态演化研究现状

韦东滨等^[4~8]对纯铜、20 钢、45 钢和 20MnMo 钢及 80 钢试样, 分别在高温条件下和热塑性条件下进行了内部裂纹的热愈合实验。根据观察, 提出了单纯高温扩散处理条件下, 较长但相对两裂纹面间距足够近金属材料内部裂纹愈合过程主要经历四个阶段: 1) 裂纹面上凸起的形成及其接触; 2) 凸起接触处长大融合使长裂纹段被分隔; 3) 较长分隔裂纹段边缘趋于光滑、中部收缩使裂纹段继续分解为短裂纹段, 较短分隔裂纹段边缘逐渐光滑并趋于球化; 4) 球化形成的孤立球形孔洞收缩。若裂纹较短且相对两裂纹面间距足够近, 则愈合过程应只经历阶段 3) 和 4)。如果裂纹的两相对裂纹面间距自裂纹尖端至裂纹中部逐渐增大, 则裂纹的愈合主要体现于自裂纹尖端的不连续收缩, 不连续收缩过程中留下微小的圆形截面孔洞。

张海龙等^[10,22]通过实验描绘了工业纯铁内部疲劳裂纹扩散愈合过程中的形态变化, 研究发现随着在 900℃ 下真空退火处理时间从 1.5 到 5 小时的延续, 内部疲劳微裂纹的总剖面二维形态呈现“波峰一波谷”状的形态演变, 由初始的两端尖锐, 近似扁椭圆型的截面形态演化为由多个定向排列的球形空洞组成的球洞串截面形态; 在横剖面上观察到初始裂纹体分解为“外围圆环(随后分解为环状排列的球洞)+环内球洞”的形态演变图象。即工业纯铁中疲劳微裂纹的演化将首先经历圆币型裂纹分隔为环型圆筒的过程, 该阶段演化为铁原子沿裂纹内表面进行表面扩散的结果。

文献^[23]研究了纯钛内部疲劳裂纹的愈合形态演化过程。原始疲劳裂纹长度为 30μm, 深度不小于 1μm。研究发现经过高温扩散愈合处理后, 在试样的纵向剖面上的微裂纹由硬币形演化成一串球形孔洞, 球形孔洞的半径以及球形孔洞之间的距离不仅与裂纹的类型(穿晶裂纹、沿晶裂纹或者晶内裂纹)、晶向等有关, 而且还与愈合过程的热力学过程、动力学过程和表面张力等都有关系。

文献^[24,25]采用自制带有真空加热台的扫描电镜对含有内部损伤的镁试样和纯铁试样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, 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。

文献^[26]分析了电磁场作用下的金属裂纹愈合过程。指出受损金属连续性恢复要经历如下三个阶段：由电流在缺陷边界集中而引起裂纹尖端附近一部分金属熔化；这部分熔化金属流到裂纹孔洞中并进行结晶，而使裂纹愈合。该文还对愈合试样的组织和性能进行了研究，确定了在电磁场作用下实现裂纹愈合所要求的参数。

2.4 裂纹愈合影响因素研究现状

综观材料裂纹愈合研究，影响裂纹愈合因素可以归纳为内部因素和外部因素。内部因素有：裂纹的几何形状、裂纹的取向、裂纹的类型、裂纹附近的微观组织结构、化学成分、晶粒大小、杂质、残余应力、位错的密度与分布等因素。外部因素主要包括温度、压力、环境气氛、时间等。

影响裂纹愈合的因素很多，但对于普通金属材料来说，对裂纹愈合因素研究多限于外部因素^[1,4]，如：温度、时间、塑性变形等，而对温度的研究侧重于高温愈合，而对中温愈合则少有研究。在目前能源、资源紧张的状况下及建立节约型社会的需求，对中温愈合进行研究具有重要的理论意义和实际意义。另一方面，对于那些影响裂纹愈合进程的内部因素很少涉及，尤其是合金元素的作用。因此，对其进行研究具有重要意义。

2.5 裂纹愈合机理的研究现状

尽管金属材料内裂纹愈合的机理有扩散、相变以及防凝血等，但扩散反应导致内裂纹的愈合是目前普遍为人们所接受的机理。扩散（Diffusion）是晶体内部的原子迁移。所谓原子迁移，在这里是指晶体中原子脱离它原来的平衡位置跃迁到另一平衡位置的位移。任何成份与结构不均质(包括含微裂纹)的材料，在热力学许可的条件下，都将趋于均匀化。其本质是在扩散力(浓度、电场、应力场等的梯度)作用下，金属原子定向、宏观的迁移，结果是使系统的化学自由焓下降^[27]。微裂纹尖端一般都具有较高的畸变能，在受热状态下，裂纹尖端及其邻域的金属原子具有相对更强的向微裂纹区域迁移的能力。含缺陷材料在热愈合过程中，在愈合基体材料微观缺陷的同时，也孕育着裂纹区重结晶晶粒的形核、长大、均匀化过程逐渐完成，直至愈合。不难看出，在缺陷愈合过程中，原子的扩散迁移起着决定性控制作用，为基体缺陷的愈合及裂纹愈合区的重结晶过程输送所需要的物质。大量实验结果表明，通过热愈合，内部裂纹可以产生明显的修复，愈合区组织主要为铁素体，因此愈合过程主要受控于基体Fe原子从基体到裂纹区的扩散迁移^[28]。

张永军^[29]在连续介质热力学框架内，以热力学第二定律为出发点，推导出裂纹愈合耗散不等式，确定了裂纹愈合内变量的定义式。在裂纹愈合内变量演化趋势上，基于实验研究并利用能量分析方法定性分析的结果与采用分子动力学模拟而获得定量结果是一致的，愈合速率由快至慢。

毕庆霞^[30]从扩散的角度，对高温扩散改变锻件微孔隙形态的问题进行了理论分析，建立了以内表面为扩散源，以表面张力为驱动力的扩散方程，并利用计算机编程求解，得到了高温扩散作用下微孔隙形态改变与温度、时间的关系，其算例结果与实际生产工艺基本一致。

张海龙^[10]对工业纯铁内部疲劳微裂纹的扩散愈合过程进行了研究，建立了体扩散控制下的晶粒内部空洞的收缩模型，较好地预测了在体扩散作用下，穿晶疲劳微裂纹分解形成的晶内空洞的表面空位向铁素体晶界处扩散聚集，使得空洞体积逐渐减小直至最终愈合消失这

一过程。

2.6 裂纹愈合应用技术研究

塑性成形件无论是在加工还是使用过程中出现的内部缺陷,利用裂纹愈合现象,制定出合理的修复工艺,修复缺陷不但具有非常高的理论价值,而且具有重大的使用价值。

塑性成形中的内裂纹多以夹杂性裂纹为主,生产性实验采用的是生产中经探伤已报废的五块大型管板锻件,经高温愈合处理后,再次进行探伤,探伤结果表明,其中两块锻件内部的缺陷完全消除,锻件质量完全符合国家有关标准,可以作为合格产品出厂;另外几块也有明显愈合效果,探伤发现夹杂性裂纹缺陷的范围已经由 $\phi 90\text{mm}$ 减少到 $\phi 300\text{mm}$,而且单个缺陷也由 $\phi 14\text{mm}$ 降到 $\phi 9\text{mm}$,锻件基本合格^[31]。

对含有内部裂纹的 45 钢圆棒材分别进行低温保温处理 ($150\sim 300^{\circ}\text{C}$) 和自然放置处理^[32]。从拉伸结果来看,无论是经过低温保温处理还是经过长时间自然放置的 45 钢圆棒材,其面缩率都有一定的提高,面缩率的提高可能是内部裂纹的愈合的结果。

杨昱东^[33]对锻钢冷轧辊内裂纹缺陷进行了控制研究,采用高温扩散过程解决了冷轧辊坯超声波探伤超标缺陷问题。同时,对锻造过程还要加以控制。

国内科技工作者采用热加工修复技术,修复了许多大型锻件^[34,35]。这说明热修复技术具有很大的技术实用性和经济意义。

3. 金属内裂纹愈合过程的数值模拟

计算机软、硬件及计算技术的发展,材料及热加工模拟技术成为材料科学中一个非常活跃的研究领域,成为材料科学研究由“经验”走向“科学”,由“定性”走向“定量”的桥梁。物理模拟可以揭示热加工过程中的材料组织、性能变化规律;数值模拟可以描述许多无法用实验方法去展示的科学问题。在数值模拟早期发展阶段,往往采用物理模拟来检验计算程序的可靠性。但随着数值模拟的进一步发展,人们发现它能够比物理模拟更好地满足工程需要。近年来,数值模拟得到了蓬勃发展。

解决由大量原子组成的非线性多体动力学问题可采用分子动力学方法。同时分子动力学 (Molecular Dynamics, 简称 MD) 方法在各种系综模型中算法日趋成熟^[36],出现了金属材料内裂纹愈合过程的分子动力学模拟。分子动力学模拟可以描述许多无法用实验方法去展示的科学问题,有助于揭示内裂纹的愈合机理。

文献^[4]在纳观尺度上模拟了内部裂纹愈合过程,结果表明只有在临界温度 673K 以上, BBC-Fe 内部裂纹出现愈合趋势;环境温度对愈合速度影响非常大,当计算设定环境温度较高时,愈合过程进行得相当快;在裂纹愈合过程中,出现空位、位错和孪晶等晶体缺陷,愈合过程中这些缺陷形态和位置可能发生变化,但很难消失。

文献^[37,38]分别对铝、铜单晶中心贯穿微裂纹的愈合过程进行了分子动力学模拟,结果表明,当加热温度超过临界温度,或外加压应力 K_I 超过临界值时微裂纹将完全愈合。在裂纹愈合过程中伴随着位错的产生和运动,以及孪晶和空位的产生及变迁。裂纹愈合的临界温度和裂纹面的相对取向有关;沿滑移面的裂纹最容易愈合。如果晶内预先存在位错(预先塑性变形),则可使裂纹愈合的临界温度明显降低。

4. 内裂纹愈合的非平衡热力学研究展望

由上述分析可知,裂纹愈合具有工程先导性,它决定了实验研究是主要的研究方法。由于工程先导性带来的时间、经费上的限制和研究者学科背景的约束,使实验往往选择少数几个变量,在有限的区间内进行实验。为了较好地指导工业实践,裂纹愈合不仅需要对具体问题做大量的实验研究,当前更需要对裂纹愈合过程开展深入系统的理论探讨。如果不能对裂纹愈合过程给出定量的评判和分析,就难于在工业上实现定量控制,就会使得该技术成果的推广和使用范围受到局限。

热力学是研究热现象和力现象两者之间关系的科学,在少数几个一般原理和假设的基础上,热力学的结论可应用于完全不同的物质组成的体系,具有普适性的特点^[39]。非平衡热力学是与非平衡过程中的状态和过程相联系的宏观唯象理论,主要对连续介质中输运现象的唯象定律、恒定状态及不可逆动力学过程做出统一的研究和处理。同时涉及系统的稳定性条件、失稳行为、达到稳定的途径及系统达到平衡态的过程中发生的弛豫现象等问题。

大量不可逆过程的单因素实验积累为非平衡热力学的发展提供了实验基础。Onsager 理论则是非平衡热力学发展为一个真正系统的、一般的有关不可逆过程的宏观理论的基石。非平衡热力学把一切不可逆过程归纳为广义力(热力学力)推动的结果,在广义力作用下产生广义流(热力学流)。原则上每一种广义流是系统所有广义力推动的结果。这为我们研究交叉效应提供了启示,而 Onsager 倒易关系进一步推动了交叉效应的研究。因而可以说非平衡热力学为我们提供了一些最普遍的原理、最有一般性的方法和解决问题的最基本的框架。

以耗散性、不可逆性和非平衡为基本特征金属材料愈合过程涉及到化学反应、传热、扩散、材料塑性流动等许多量纲不同的因素。非平衡热力学研究多种因素(称为热力学力)作用下系统的行为,其中热力学力之间可以存在交互作用,该学科的近代发展为研究强非线性耦合和强交互作用奠定了基础^[40~42]。因此以非平衡热力学为基础建立裂纹愈合的数学物理模型是合理可行的。

5. 结语

(1) 金属材料可以通过多种工艺方法实现内部微裂纹的自愈合、自修复。但材料裂纹自愈合是一个与材料的成分、结构、加工工艺及使用条件、能量及物质补给有关,受各种复杂因素控制的过程。要彻底探清其机理、行为和规律,形成系统的、可指导实际生产的金属材料裂纹自愈合理论,还需要做很多细致、创新性地探索。

(2) 对金属材料内部裂纹愈合进行深入、系统地研究,是改善金属材料性能、提高品质和延长使用寿命的重要基础性工作,对丰富材料学理论具有十分重要的意义,在材料设计、材料成形和材料使用指导方面有着广泛的工程应用背景和潜在的经济和社会效益。

(3) 鉴于目前国内外学者对于金属材料内裂纹的研究多侧重于高温愈合,并且对于那些影响裂纹愈合进程的内部因素却很少涉及,尤其是合金元素的作用。因此,对其进行研究具有重要意义。在目前能源、资源紧张的状况下及建立节约型社会的需求,对裂纹中温愈合进行研,具有重要的理论意义和实际意义。

(4) 以非平衡热力学为工具对金属材料内裂纹进行系统研究是合理可行的,也是一项紧迫的工作。

参考文献

- [1] 韩静涛. 大型饼块类锻件夹杂物裂纹形成机理及控制锻造工艺研究[D]. 北京: 清华大学, 1995.
- [2] 沈以赴, 周本濂, 何冠虎等. 材料疲劳恢复新途径的探索 I ——低碳钢疲劳寿命的延长[J]. 材料研究学报, 1996, 10(2): 165~166
- [3] 肖永亮, 郭义, 姚戈, 等. Co 基高温合金疲劳裂纹的修复[J]. 材料研究学报, 1996, 10(3): 271~274
- [4] 韦东滨. 金属材料内部裂纹愈合规律的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2001.
- [5] 韦东滨, 韩静涛, 谢建新等. 金属材料内部损伤愈合研究进展[J]. 材料导报, 1999, 13(6): 10~11
- [6] 韦东滨, 韩静涛, 谢建新等. 热塑性变形条件下钢内部裂纹愈合的实验研究[J]. 金属学报, 2000, 36(6): 622~625
- [7] 韦东滨, 韩静涛, 谢建新等. 真空环境中金属材料裂纹高温愈合的研究[J]. 金属学报, 2000, 36(7): 713~717
- [8] 韦东滨, 韩静涛, 谢建新等. 金属材料内部裂纹高温愈合的实验研究[J]. 北京科技大学学报, 2000, 22(3): 245~248
- [9] Li X G, Dong, C F, Chen H. Healing of hydrogen attack in austenite stainless steel under heat treatment[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2002, 15(4): 385~390
- [10] 张海龙, 杨君刚, 孙军. 工业纯铁内部穿晶疲劳微裂纹的扩散愈合过程[J]. 金属学报, 2002, 38 (10): 1015~1020
- [11] Kolmogorov V L, Smirnov S V. The restoration of the margin of metal plasticity after cold deformation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 74 (1): 83~88
- [12] Kon'kova V A. Propagation and healing of microcracks in deformed aluminium[J]. Metallovedenie i Termicheskaya Obrabotka Metallov, 1996, (11): 30~32
- [13] 董超芳, 徐璟, 李晓刚等. 用高温显微镜原位观察钢中氢腐蚀裂纹愈合过程[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003, 23(3): 179~182
- [14] Gao K W, Qiao L J, Chu W Y. In situ TEM observation of crack healing in α -Fe[J]. Scripta Materialia, 2002, 44(7): 1055~1059
- [15] 高克玮, 乔利杰, 褚武扬. Fe 单晶中裂纹愈合过程中的 TEM 原位观察[J]. 金属学报, 2001, 37 (2): 118~120
- [16] 周亦青, 周本濂, 郭晓楠等. 脉冲电流对 45 钢损伤的恢复作用[J]. 材料研究学报, 2000, 14, (1): 29~36
- [17] Zhou Y Z, Qin R S, Xiao S H, et al. Reversing effect of electropulsing on damage of 1045 steel[J]. Journal of Materials Research, 2000, 15(5): 1056~1061
- [18] Zhou Y H, Zeng Y, He G H, et al. The healing of quenched crack in 1045 steel under electropulsing[J]. Journal of Materials Research, 2001, 16(1): 17~19
- [19] 周亦青, 肖素红, 甘阳等. 脉冲电流作用下碳钢淬火裂纹的愈合[J]. 金属学报, 2000, 36(1): 43~45
- [20] 周亦青, 罗申, 昊玺等. 在脉冲电流作用下钢中裂纹的愈合[J]. 材料研究学报, 2003, 17 (2): 169~172
- [21] Sun Z. Study of solidification crack susceptibility using the solidification cycle hot-tension test[J]. Materials Science & Engineering A: Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, 1992, 154(1): 85~92
- [22] 张海龙. 工业纯铁内部疲劳微裂纹扩散愈合过程中形态演变[J]. 金属学报, 2002, 38(3): 239~244
- [23] Yang J G, Sun J, Zhang H L. Diffusive healing of internal fatigue micro-cracks in pure titanium[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 2001, 11(5): 675~680
- [24] 柴东朗. 材料内部损伤的愈合过程[A]. 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, 1998, 183~192
- [25] 徐永东, 张文兴, 柴东朗. 材料裂纹型损伤愈合过程观测[J]. 宇航材料工艺, 2001, (3): 37~41

- [26] Finkel' V M, Ivanov V M, Golovin Y. Crack Healing in Metals by Crossed Electric and Magnetic Field[J]. Probl. Prochn., 1983,(4): 54~58
- [27] 戚正风. 固态金属学中的扩散与相变[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [28] 赵中里, 韩静涛, 刘靖, 等. Q235 钢内裂纹亚温愈合处理的金属学分析及试验研究[J]. 金属热处理, 2006, S1: 80-83
- [29] 张永军, 韩静涛, 韦东滨. 金属内部微裂纹愈合内变量及其演化分析[J]. 钢铁研究学报, 2004, 16 (2): 59~62
- [30] 毕庆霞, 任运来, 聂绍珉. 高温扩散改变微孔隙形态的研究[J]. 大型铸锻件, 2003, 2: 20~29
- [31] 韩静涛, 许树森, 陈钢, 等. 大型锻件的夹杂性裂纹与控制锻造工艺[J]. 钢铁, 1997, 32 (3): 35~39
- [32] 康建军, 祁化昆, 韩静涛. 石钢 45 钢棒材内裂分析[J]. 轧钢, 1999, 专辑: 120~123
- [33] 杨昱东, 聂仲毅, 韩静涛. 锻钢冷轧辊坯内裂纹缺陷控制研究[J]. 大型铸锻件, 2006, (1): 1~4
- [34] 任颖琦, 王圣君. 12Cr2Ni4 圆饼锻件内部缺陷的修复试验[J]. 一重技术, 2006, (1): 12~13
- [35] 孙海燕. 大型锻件内部缺陷的修复研究[J]. 大型铸锻件, 2003, (3): 6~8
- [36] Allen M P, Tidesley D J. Computer Simulation of Liquids. Oxford: Oxford University Press, 1987
- [37] Zhou G H, Gao K W, Qiao L J, et al. Atomistic simulation of microcrack healing in aluminum[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2000, 8 (4): 603~609
- [38] Li S, Gao K W, Qiao L J. Molecular dynamics simulation of microcrack healing in copper[J]. Computational Materials Science, 2001, 20(2): 143~150
- [39] 李如生. 非平衡态热力学和耗散结构[M]. 北京: 清华大学出版社, 1986
- [40] 黄继华. 金属及合金中的扩散[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996
- [41] 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004
- [42] 肖纪美. 宏观材料学导论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004

A SURVEY OF STUDIES ON INNER CRACK HEALING IN METALLIC MATERIALS¹

Zhao Zhongli Han Jingtao Zhang Yongjun

School of Materials Science and Engineering,

University of Science and Technology Beijing 100083

ABSTRACT

The research progress on inner crack healing in metallic materials, such as healing method, morphology evolution, influence factors of healing, healing mechanism, shape evolution analysis on diffusion thermodynamics of metallic materials and numerical simulation were reviewed. The mid-temperature inner crack healing should be studied for its studies currently laying emphasis on elevated temperature. For lack of the inherent influence factors study on inner crack healing, their studies should be strengthened. Especially the influence of alloy element on inner crack healing should be strengthened. The prospect was carried out that the study on inner crack healing in metallic materials should be based on non-equilibrium thermodynamics.

KEY WORDS: metal, inner crack, healing, non-equilibrium thermodynamics

作者简介: 赵中里(1965.12-), 男, 山东沂水人, 在读博士研究生, 主要从事金属塑性成型、金属材料内裂纹愈合与自愈合金金属材料的研究, 发表论文8篇。联系电话: 010-62332572