

电磁热效应裂纹止裂研究的进展*

白象忠 胡宇达 谭文锋

燕山大学土木工程与力学系, 秦皇岛 066004

摘要 利用电磁场的热效应对带有裂纹的载流导体进行裂纹止裂, 是达到延长其工作寿命、提高安全性和可靠性的一种行之有效的办法。理论计算和试验观察都证明了: 载流导体中裂纹尖端处的热集中效应, 能够在附近的一个很小范围内熔化形成微小的焊口, 裂纹前缘处的曲率半径瞬间增加了 2~3 个数量级, 显著地减少了应力集中, 阻止了干线裂纹源的形成, 有效地遏制了裂纹的扩展。本文阐述了这一物理过程的研究现状、进展情况以及未来应用前景。

关键词 载流导体, 电磁热效应, 裂纹, 裂纹尖端, 止裂

1 引言

裂纹止裂技术是当前航空、航天、船舶、核工业、供电器械、石油工业、机械制造等许多工业生产和实际应用中急需解决的关键问题。利用电磁热效应来遏制导体内部裂纹的扩展是行之有效的办法之一^[1~3]。

20 世纪七、八十年代, 前苏联学者 В. М. Финкель 等人用实验的方法研究了导电薄板内通入脉冲电流时裂纹发展的动力过程。观察了通电瞬间裂纹前缘处的热集中现象, 提出了利用电磁热效应来遏制导体中的裂纹扩展的可能性^[1,2]。随后, Б. А. Кудрявцев, В. З. Партоп 等人对这一过程进行了理论分析^[4,5]。从此揭开了利用电磁热效应进行裂纹止裂研究的序幕。

在这 20 年的时间里, 随着科学的进步和工业技术的发展, 延长各种类型结构、产品的使用寿命, 提高工作的安全性、可靠性, 能够主动地、有效地控制破坏问题, 其中包括遏制裂纹的扩展, 以避免突然破坏所带来的灾难的需要越来越迫切了。因此, 今天进一步深入地研究这一课题, 使其能够在实际应用当中有所突破, 显示出了具有重大的工程实际应用意义和理论研究价值。

近年来, 关于电磁场效应的研究, 特别是涉及到应变、温度及电磁场的磁 - 热 - 弹性耦合理论的研究, 引起了人们的极大关注。原因是这一理论在各个领域内能够得到广泛的应用。例如, 在地球物理研究领域中的地球磁场对地震影响的研究、电磁场内声波的衰减规律、核装置电磁辐射的散发、高灵敏度的超导电磁感应测试仪的研究等等。其中 Nowacki^[6] 是开始从事这些形式问题研究的学者之一。Kaliski 和 Nowacki^[7] 首先探讨了在一完全导体内由热震荡引发的电磁 - 热 - 弹性波的半空间问题。Massalas 和 Dalamangas^[8] 考虑了耦合的电磁 - 热 - 弹性的同类问

收稿日期: 1999-05-24, 修回日期: 1999-10-08

* 国家自然科学基金 (19772046) 及河北省自然科学基金 (599255) 资助项目

题. 随后 Chatterjee 和 Roychoudhuri^[9] 使用 Green 及 Lindsay 的理论研究了在完全传导的弹性半空间体耦合的电磁 - 热 - 弹性问题. Roychoudhuri 和 Banerjee^[10] 应用 Lord 与 Shulman 理论分析了在具有一定传导的弹性半空间内, 由热震荡引发的电磁 - 热 - 弹性波的问题. Dhaliwal 等人^[11] 讨论了在含有孔的无限长弹性固体内的电磁 - 热 - 弹性波的普遍影响问题. Misra 等人^[12,13] 研究了在含有圆柱孔穴的无限长弹性体内的电磁 - 热 - 弹性的相互作用, 是在一个非均质固体圆柱承受坡道形加热的条件下进行的. 其中, 在文献 [13] 内, 由于材料被设定为非均质的, 没有考虑耦合热流动方程中的热效应. 而在文献 [12] 中, 将 Green-Lindsay 理论应用到热传导方程中. 与此同时, 国外有些学者尤其注意了导体内部裂纹在电磁场作用下前缘区的应力、应变状态^[14,15]、以及应力强度因子的计算方法^[16,17]. 但是, 对利用电磁热效应来遏制裂纹的扩展, 特别是在工程实际应用中的研究则很少见. 主要是因为裂纹的止裂以及控制它们的运动问题, 无论是从理论研究方面还是从实际应用技术的观点上来说都是很复杂的. 国内外一些学者的近期研究取得了一定的进展.

2 电磁热效应裂纹止裂的基本原理及特点

2.1 电磁热效应裂纹止裂的基本原理

众所周知, 在带有裂纹的导体中通入电流会伴随着焦耳热的产生和质动力的作用. 在不考虑质动力、机械、电效应同变形及温度场耦合的情况下, 由系统的电动力学方程可确定裂纹前缘附近的电磁场, 从而解得焦耳热源的分布, 再从所建立的带有热源的热传导方程中求得温度场的分布. 在此基础上, 由热弹性准静态问题的基本方程的解便可确定裂纹前缘附近的应力、应变状态.

为了达到良好的止裂效果, 通入电流的方向一般应垂直裂纹的走向. 裂纹的存在导致了电流的绕流和集中. 同时, 在非导电的裂纹尖端周围, 由于欧姆的损耗使材料加热. 这样, 在电磁场对变形和导热性的影响只是同焦耳热的作用有关的假设条件下, 使得电动力学方程和热弹性方程在相应的条件下有连续解, 从而可以得到在初始条件下, 不同状态下 (通电瞬间或者裂纹开裂瞬间) 电磁场的具体表达式, 由此即可确定非稳态温度场及裂纹前缘处的应力、应变状态.

应该指出, 由于裂纹的存在, 引起电流绕流的集中效应是非常明显的. 这种效应会使裂纹前缘附近小范围内强化加热, 足以达到使材料熔化的程度. 随着温度的升高, 裂纹前缘处的曲率半径增大可达到 2~3 个数量级, 并局部迸发爆炸形成焊口. 这样, 不但减少甚至是消除了裂纹前缘处的机械应力集中, 而且在裂纹前缘处会产生相当大的热压应力. 这就意味着在制止裂纹扩展时, 允许利用上述的磁热效应抑制形成裂纹主干线的势能源, 从而达到止裂的目的.

2.2 电磁热效应裂纹止裂的特点

人类长时间在生产与实际生活中, 常常利用裂纹有利的一面和消除它不利的因素而得到遏制裂纹扩展的一些方法^[18], 其中包括:

(1) 大幅值的弹性压应力场的建立. 用纯机械方法得到的这种场, 可以使具有任何扩展速度的裂纹止裂.

(2) 使裂纹变钝. 在静态机械处理的方法中, 通常采用钻孔法. 它在预防板材裂纹扩展的实践中得到了广泛的应用. 这种办法是用增加裂纹尖端的半径、降低应力集中来遏制裂纹扩展的.

(3) 载荷和破坏系统弹性势能的松弛. 即松弛所有的弹性场, 使裂纹尖端处的塑性变形区吸收弹性应力的能量来遏制裂纹的扩展.

(4) 在裂纹传播的路径上设置障碍. 这些障碍可以是宏观的, 也可以是微观的; 可以是夹杂、缺陷、断层、焊缝、中间层、复合层等物的各种边界.

(5) 借助于其它裂缝组来遏制裂纹的扩展. 这要求其它裂纹组中的裂纹分布要足够的密集,

并且相互独立又特殊地相互制约着。

(6) 用分叉的方法来遏制裂纹的扩展。高速扩展的裂纹往往是不稳定的，常常具有倾斜的趋向，使裂纹主干线的方向发生变化并降低惯性。若裂纹扩展时容易分叉，使能量分散、速度降低到停止的程度，便可以达到遏制扩展的目的。

与以上介绍的几种方法不同，利用电磁场热效应遏制裂纹扩展的方法具有一定的优越性。对于导电材料中的裂纹，利用强大的电流或超强度电磁场的作用，遏制快速扩展的裂纹具有广泛应用的可能性。这种方法具有的特殊优越性就在于能够保持外力作用不变，方法简单，收效迅速且具有实际应用价值。它给了许多工业部门中各类产品和工程结构延长服务寿命的可能性，更重要的是避免了突然破坏所带来的灾难。

2.3 工业应用实例

用电磁热效应遏制裂纹扩展能够广泛地应用在工业生产之中。例如，可以在解决输液、输气管路的干线上的裂纹止裂问题中得到应用。在工业生产和实际生活中，有几十种管路的破坏问题，有的长度超过几千米，由脉冲电磁场感应作用而产生的质动力和温度梯度所创建起来的各种各样场的配置方案，可以有效地控制裂纹的扩展。在文献 [19] 给出的实验中，就验证了由 20 号低碳钢制成的管道，用上述办法控制破坏的实例。

由于科学技术和应用物理不同分支学科的飞速发展，近期，可变形固体中的电磁弹性日益受到重视。例如，核反应堆中的许多技术设备都工作在电磁场当中，磁弹性波、磁场力对结构内部的应力、应变的影响引起了工程技术人员的关注。文献 [20~22] 给出了裂纹磁弹性问题的解析解。以核反应堆结构的完善而论，其结果是非常重要的。一个可能被应用的例子是用于控制核反应堆的铁磁性马氏体不锈钢制成构件的破坏^[23~25]。当结构有缺陷和裂纹时，有必要知道剩余强度，特别是动载状态下，系统的惯量能使裂纹的应力水平提高，且动力强度因子将随着磁场强度的增加而增加。由此，人们对结构的磁断裂力学性能、安全可靠性的评估指标研究重要性的认识越来越深刻了。

在理论研究电磁场与机械场、温度场耦合机理的基础上，可将电磁场热效应应用在带有裂纹的金属模具裂纹止裂的研究之中，遏制金属模具内部和表面裂纹的扩展，开发出金属模具裂纹止裂的工艺将具有普遍的工业应用意义。该技术还可以用来遏制轧辊龟裂、铸管模等构件的裂纹止裂，可提高构件的工作寿命、排除工作险情，必定会带来巨大的经济效益和社会效益。

当前的研究表明：电磁热效应理论的应用有着十分广阔的应用前景。例如，应用磁场脉冲电流技术可以遏制飞机机翼与机身连接部位所出现的裂纹扩展，延长飞机的工作寿命。还可以为飞机建立高效率除冰系统提供理论计算依据^[26]。

3 电磁热效应裂纹止裂的理论研究与实验研究现状

3.1 理论研究现状

在断裂力学问题的研究中，通常被考虑的是机械载荷。但在一些导电材料中，内部的应力、应变状态不仅是与机械载荷有关，而且与工作环境中的电磁场强度有关。电磁场对裂纹尖端具有奇异性应力分布的影响是不容忽视的^[21]。文献 [16] 的研究结果指出：由于电磁场的存在，在裂纹尖端附近产生了动力奇异应力，其动力强度因子将随着磁感应强度的增加而增加。

与实际应用的可能性联系在一起，对带有裂纹的导体的磁热弹性问题，裂尖区电磁场和热场集中过程的理论分析需要建立近似系统，即建立不考虑质动力与温度场及变形场之间联系的系统。理论研究的主导思路是：(1) 由建立带有裂纹的导电体的电动力学方程的解求得裂纹前缘区的电磁场；(2) 由所确立的电磁场来确定裂纹附近的热源分布；(3) 由对带有裂纹的导体

的热传导方程可解出裂纹前缘附近的温度场。当对带有裂纹的导体通入一定密度的电流时，通过计算，便可以得到能够使裂尖材料熔化而形成焊口的温度值与各个因素的关系；(4) 通过求解导体在热弹性准静态问题范围内的热应力的平衡方程式，可以确定裂尖附近由于热量集中而产生的压缩应力。该压缩应力的产生，有效地遏制了裂纹的扩展。

目前，大多数学者多是从理论研究入手，指出研究和解决裂纹体强度问题的思想和路径。

Eringen A.C. 的理论研究^[27] 给出了在电磁场的作用下，液晶的平衡规律及静力学、动力学的方程。该基本方程考虑了热、电传导及电磁场的耦合效应，为研究耦合场的热效应打下了理论基础。Sumi, Naobumi^[28] 研究了带有便士形状裂纹的圆形板，在电磁波辐射作用下所产生的应力波的动态响应。在整个作用时间内，磁场脉冲强度是按照高斯指数衰减规律作用的。忽略热传导的影响，按照热弹性动力学理论，采用有限差分法作近似计算，通过算例给出了动态热应力分布和动力强度因子的数值计算结果。Shibui M., Sawada Y.^[29] 给出了核技术装备中托卡马克装置的螺线管接头处的裂纹分析结果，是采用线性断裂力学理论研究了连接处疲劳裂纹的传播情况。且指出：焊接应力和周围温度的上升影响着裂纹的传播。若沿着电力线方向安装螺线管，便可确定连接部位螺线管尺寸的最小值。

Yagawa G., Yoshimura S.^[30,31] 介绍了电磁力在核压力容器裂纹动力学问题研究中的应用。给出了具有单边裂纹的高强度钢制成的试件，在瞬变电流和电磁场的作用下，变化的电流和电磁场与裂纹相互作用的结果，在整个试件中体现了电磁力的动力学效应。采用有限元计算方法，通过对电势作 J - R 曲线积分计算，确定了裂纹的开裂条件。Ru C.Q. 研究了在压电介质中，电磁场的极化作用产生的感生应力对应力强度因子的影响^[32]，该理论是建立在 Dugdale 的模型基础上的，其研究结果指出：在裂纹尖端周围的场和应力强度因子的变化取决于感生电压的突变性。在裂纹垂直于极轴的状态下，电磁场感应使裂纹开裂。

Teramoto T., Nagai T., Utsugi Y., Saito M. 的文章^[33] 给出了在电磁力的作用下，单边裂纹开裂的数值分析结果，并指出：在强电磁场的作用下，由于等离子体的分裂，损害了核聚变反应堆结构中的组件。此作用对于工作在含有裂纹且处于恶劣条件下的薄板型的组件之应力、应变将产生非常明显的影响。该文章引入磁场矢势，对单边裂纹板件的裂纹开裂进行了数值分析，结果证明：在裂纹尖端处，涡流有个奇点，并且其大小随着裂纹长度的增加而增加。裂纹开裂的计算，取决于边界条件。对于 I、II、III 型裂纹，根据等效应力分析原理，在三种不同的边界条件下进行了裂纹开裂的计算。

Kobidze G., Lord W. 用有限元法模拟计算了管道中裂纹密集处的电磁场的分布^[34]，对做好工业气体、液体输送管道中裂纹腐蚀开裂的危险检测预报，提供了有效的数值模拟方法。由于裂纹的存在，改变了管道壁处电磁场的数值。在建立合理的数学模型的基础上，在常用的几种坐标系下，采用标准裂纹方程和偏微分方程所对应的解析解方程，进行有限元计算，给出了管道裂纹附近磁场的数值计算结果。

Badics, Zsolt, Komatus, Hidenobu 等人^[35]，建立了计算薄板裂纹的涡流非破坏性评估的有限元模型，其理论研究结果证明：对薄板裂纹进行分析的有限元模型，已经发展到能够在传感器探头线圈与裂纹之间相互作用过程中对输入涡流亏损值的测量水平，提供了进一步提高无损检测精度的数值分析方法。作者将裂纹视作非常薄的绝缘薄层，且忽略薄层沿其宽度上的离散效应，计算中考虑了裂纹表面矢势的法向分量和电位值的跃迁，有限元计算结果与试验数据有较好地吻合。

Асанян Д. Д., Багдасарян Г. Е.^[36] 研究了带有裂纹的、位于定常横向磁场中的软磁层应力、应变的计算方法。确定了裂尖附近的应力、应变状态与磁场强度的关系。在他们的另一篇文章^[37] 中研究了带有裂纹的各向同性软磁层位于横向磁场中的应力、应变状态的基本特征，确定了裂尖附近的感应电磁场的特殊性。Фильштивский Л. А.^[38] 研究了具有微裂纹的磁化介

质的磁弹性平面问题。作者在分析裂纹附近的应力状态的基础上,分析了材料磁化的影响,得到了裂纹前缘应力强度因子的表达式和算例。

以上的理论分析结果为进一步开展利用电磁热效应裂纹止裂的研究打下了一个良好的理论基础,指出了应用电磁场效应实施裂纹止裂是可行的。

3.2 实验研究现状

当前,许多学者的试验研究结果给出了检测裂纹、测定裂纹疲劳扩展及裂纹止裂的方法等等,为电磁热裂纹止裂技术的研究奠定了基础。只要掌握上述方法,就能很好地了解裂纹体内部的裂纹分布状态,监测裂纹扩展情况,以至于正确地制定、有效地实施利用电磁热效应裂纹止裂的方案。

文献 [39] 介绍了 Morimoto, Kazuo, Urabe, Yoshio 等人利用超声波无损检测法检查核动力装置中压力容器的内部裂纹。他们采用的是稳定性好、灵敏度高、能够在恶劣环境中正常工作的电-磁-声传感器,他们的检测手段还可以应用到炮管及坦克附件的裂纹检测之中。

文献 [40] 给出了 Cochran A., Donaldson G. B. 等人利用对电磁场感应灵敏的超导量子干涉仪进行疲劳裂纹检测的结果,其优点在于可以利用高温超导体 (HTS) 来实施这项技术,具有广阔的应用前景。文献 [41] 推出了利用交流电检测低周疲劳裂纹扩展的方法,采用涂层和拉压交替快-快、慢-快形式的波形,通过测定交流电势能的改变量来确定裂纹在其表面和内部的传播状态,从而可以确定裂纹的起裂及裂纹界面的位置。文章指出:低频检测的精度高于高频检测的精度。文献 [42] 研究了利用电磁波检测低温状态下的 Ti-6Al-4V 和 25-Mn-Ni 钢的内部裂纹的方法。这种方法是通过利用超导体合金制成的传感器接收电磁波与裂纹表面相互碰撞作用的效应工作的,其中变形的动力信号被电磁拾声器线圈接收,在强度为 6 T 的磁场作用下,测定峰值电流来决定裂纹的长度。Christner B. K., Long D. L. 和 Rummel W. D. 在文献 [43] 中,介绍了利用涡流流场效应确定材料内部缺陷的无损检测法,就是利用对已进行标定、精制的云母芯片制成的涡流传感器接收到的涡流响应来确定材料内部裂纹的几何尺寸、走向等参数。文献 [44] 给出了利用电磁场无损检测技术,通过测定交流电势差来确定管道接合部分的裂纹相互作用和疲劳扩展情况,同时在每个接头周围的应力场采用电阻应变测量的方法监测。并指出:在多支头管道的 Y 型连接处的表面应力最大位置,裂纹有扩展倾向。当应力达到峰值时,可根据控制函数来预测裂纹扩展的特征。

以上介绍的几种无损探伤方法用来确定裂纹的状态参数,为正确采用电磁热效应进行裂纹止裂提供了确定电磁场强度或通电电流强度、确定磁场或电流方向的已知条件,这对于应用电磁热效应裂纹止裂来说是十分必要的前期工作。

Kovalenko, Volodymyr S. 等人给出了应用电磁热效应处理气体-粉末激光器涂层龟裂的实例 [45]。激光器涂层中龟裂裂纹的出现,对激光器的工作是不利的。可变电磁场的相互作用和电流扰动在龟裂裂纹前缘形成的电弧被认为是附加的能源,能够使裂纹尖端熔化,熔化的过程可看成是热量积累的过程。并指出:这一研究成果可应用到避免管道裂纹开裂的技术之中。文 [46] 的研究结果证明:脉冲电流能够使裂纹在导体内的传播减速。当脉冲电流通过含有裂纹的金属薄板时,裂纹前缘的电流密度增加,板内的电磁热、弹性应力场的变化对裂纹的传播起到抑制作用。

文献 [19] 介绍了由 20 号钢制成的、外径为 25 mm、内径为 21 mm 的管道在破坏瞬间裂纹止裂的研究情况。其管内的压力是由火药气体造成的,或者是由电爆炸延时造成的。此研究实现了文献 [47] 提供的研究系统,即测量同步系统在裂纹产生瞬间同时启动脉冲电磁场发生器的出口,施加在管子上的脉冲电磁场是通过套在管子上的螺旋管建立的。通过感应,在试件中形成的环向压应力遏制了裂纹的扩展。

文献 [1, 2] 介绍了用实验方法研究电磁场、温度场在带有裂纹的载流导体内的集中及裂尖附近材料的强化加热过程, 揭示了遏制裂纹扩展、达到裂纹止裂的可能性. Головин Ю. И. 等人 [48] 给出了在强电磁场的作用下, 裂纹尖端处材料破坏的动力学实验结果. 确定了过程的动力特性, 即: 材料的加热 - 冷却速度、表面温度梯度、材料的破坏速度、破坏瞬间裂纹表面的温度和压力、裂纹前缘处曲率半径变化情况等. 这些参数完全由脉冲电流的参数来控制. 在他们的另一篇文章 [49] 中, 介绍了矽钢片中脉冲电流对裂纹传播动力影响的实验结果.

裂纹止裂实验研究是为了观察在向带有裂纹的导电平板内通入脉冲电流的时候, 电磁场和温度场在裂纹前缘处的集中过程, 表明可利用电磁热效应来遏制导电材料中裂纹的扩展, 达到止裂的目的.

实验研究结果证实了: 利用电磁热效应遏制裂纹扩展是可行的. 所欠缺的是少见与理论分析结果的比较.

4 电磁热效应裂纹止裂研究的进展

4.1 理论研究的进展

为了满足工业技术发展和生产、生活的需要, 对于磁热电效应裂纹止裂的理论和实际应用的研究急需再向前深入地发展一步, 以期解决工业生产中的实际问题, 获取大的经济效益和社会效益. 目前, 国内外一些力学工作者正在进行这一理论和计算方法的研究, 特别是对于单脉冲电流、多脉冲电流、阶跃递增电流作用下的几种带有裂纹的导电平板不同状态下的电磁热效应进行了理论分析和实例计算, 概括为以下几个方面 [50]:

- (1) 在通过稳恒电流的薄板中, 对裂纹形成瞬间, 裂尖附近电磁场、温度场及应力场的计算;
- (2) 在含有穿透裂纹的导电薄板中, 对通入电流瞬间, 裂尖附近电磁场、温度场及应力场的计算;
- (3) 单脉冲电流作用下, 导电薄板中裂尖附近电磁场与温度场的计算;
- (4) 多次脉冲电流作用下, 裂纹附近电磁场与温度场的计算;
- (5) 在通入阶跃递增电流时, 对裂尖附近电磁场与温度场的计算;
- (6) 在含有穿透裂纹的导电薄板中, 通入稳恒电流时, 裂尖附近的温度场和应力场的计算.

上述几种情况下的实例计算表明: 当通入电流强度达到一定值或一定作用的次数时, 裂尖附近温度即可达到熔化程度, 从而形成焊口, 便可遏制裂纹的扩展, 达到止裂之目的.

理论研究的基本思路是:

在带有有限长裂纹的导电薄板中, 垂直于不导电裂纹方向通入电流时, 裂尖处就会伴随焦耳热的产生. 暂不考虑机电耦合效应, 可由电动力学方程确定电磁场及其热源分布, 再从相应的热传导方程的解中来确定裂尖处的温度场, 从而可确定通电电流参数与裂尖处温度、应力间的关系.

例如: 一无限大导电平板, 所在域为 $-\infty < x_1, x_2 < \infty, |x_3| \leq h$ ($2h$ 为板的厚度), 其中 (x_1, x_2) 为板中面, x_3 为法向坐标. 设初始时刻, 板内沿 x_2 方向通入密度为 J_0 的稳恒电流 (图 1), 根据麦克斯韦方程, 得到板内的静态磁场为 [51]

$$H_{01} = J_0 x_3, \quad H_{02} = H_{03} = 0 \quad (1)$$

式中, H_{0i} ($i = 1, 2, 3$) 为磁场强度沿坐标 x_1, x_2, x_3 的分量. 设初瞬时, 板中沿 x_1 方向形成有限长裂纹, 位于 $|x_1| \leq l, x_2 = 0$ 处. 由对称性和磁弹性假设, 裂纹出现产生的扰动磁场分量为:

$H_1^* = 0, H_2^* = 0, H_3^* = H_3^*(x_1, x_2, x_3)$. 略去磁化和极化的影响, 由麦克斯韦方程有

$$\begin{aligned} j_1 &= \sigma E_1 = \frac{\partial H_3^*}{\partial x_2}, & j_2 &= \sigma E_2 = J_0 - \frac{\partial H_3^*}{\partial x_1} \\ j_3 &= 0, & \frac{\partial^2 H_3^*}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 H_3^*}{\partial x_2^2} &= \sigma\mu \frac{\partial H_3^*}{\partial t} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 j_i ($i = 1, 2, 3$) 为相应方向的电流密度分量.
 μ, σ 为材料的磁导率、电导率. 裂纹处的边界条件为

$$\begin{aligned} |x_1| \leq l, \quad x_2 = 0 \text{ 时}, \quad j_2 &= 0 \\ |x_1| > l, \quad x_2 = 0 \text{ 时}, \quad j_1 &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

由式 (2), (3) 采用积分变换后 [52], 可求得裂纹尖端处的电流密度分量为

$$\begin{aligned} j_1 &\approx \frac{-2^{1/4} J_0 \sin(\theta/2)}{\pi\tau^{1/4}\sqrt{\rho}} \exp\left(\frac{-\rho^2}{8\tau}\right) D_{-1/2}(0) \\ j_2 &\approx \frac{2^{1/4} J_0 \cos(\theta/2)}{\pi\tau^{1/4}\sqrt{\rho}} \exp\left(\frac{-\rho^2}{8\tau}\right) D_{-1/2}(0) \end{aligned} \quad (4)$$

式中, 极坐标 $\rho = \sqrt{(x_1 - l)^2 + x_2^2}/l, 0 \leq \theta \leq \pi,$
 $\tau = t/(l^2\sigma\mu), D_{-1/2}(\dots)$ 为抛物柱面函数.

裂尖附近的电流集中, 产生了焦耳热, 其热源功率的平均密度 $Q(\rho, \tau)$ 由式 (4), 有

$$Q(\rho, \tau) = \frac{1}{2k} \int_{-h}^h \frac{1}{\sigma} (j_1^2 + j_2^2) dx_3 \approx \frac{\sqrt{2} J_0^2}{\sigma\pi^2 \rho\sqrt{\tau}} \exp\left(-\frac{\rho^2}{4\tau}\right) D_{-1/2}(0) \quad (5)$$

设薄板表面与周围介质按牛顿定律进行热交换, 在焦耳热源作用下所产生的温度场可由下面的热传导方程来确定

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial \rho} - \alpha T - \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{-Ql^2}{\lambda} \quad (6)$$

式中, $T(\rho, \tau)$ 为按板厚度的平均温度, $\alpha = \alpha_0 l^2/(\lambda h), a = a_0 \sigma\mu, a_0 = \lambda/(c\rho_0)$, 且 α_0 为表面放热系数、 λ 为热传导系数、 c 为热容量、 ρ_0 为材料密度. 考虑到初始条件, 并借助于源函数 [53], 经过 $\tau - \tau_1 = \tau\gamma^2$ 变量代换后, 由方程 (6), 当 $t \rightarrow 0$ 时, 得到裂尖处初始瞬间的温度:

$$T(0, 0) = T_0(0, 0) \left[1 + \frac{\alpha\sqrt{a}}{\sqrt{\pi}\Gamma^2(3/4)} \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{1 - (1-a)\gamma^2}} d\gamma \right] \quad (7)$$

式中, $T_0(0, 0) = J_0 h/(\sigma\alpha_0)$ 为裂纹出现瞬时板中的静态温度.

在裂纹形成的瞬间, 裂尖处的温度能够非常显著地提高且达到材料熔化的程度. 板中局部强烈加热, 导致了在裂纹尖端附近很小的弹性区域内出现压缩热应力. 这一压应力的近似值可由式 (8) 来确定 [54], 即

$$\begin{aligned} \sigma_r(\rho, \tau) &= -\frac{E\alpha_t}{\rho^2} \int_0^\rho \xi T(\xi, \tau) d\xi \\ \sigma_\theta(\rho, \tau) &= -E\alpha_t \left[T(\rho, \tau) - \frac{1}{\rho^2} \int_0^\rho T(\xi, \tau) \xi d\xi \right] \end{aligned} \quad (8)$$

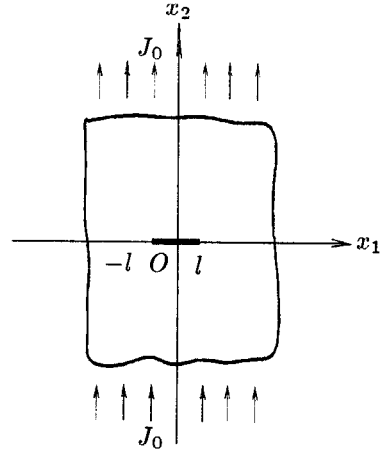


图1 板内裂纹

将式(7)代入式(8)中,即可得到初始裂纹尖端处的压应力 $\sigma_r(\rho, \tau)$, $\sigma_\theta(\rho, \tau)$. 当保持外部机械载荷作用不变的情况下,该压应力的产生及裂纹前缘焊口的形成便可有效地遏止了初始时刻所形成裂纹的扩展.

若已知薄板分别由铜材和低碳钢(含碳量0.23%)制成,铜板给定的参数为:电导率 $\sigma = 5.88 \times 10^7 (\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$,磁导率 $\mu = 1.25 \times 10^{-6} \text{H/m}$,热传导系数 $\lambda = 401 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$,板厚 $2h = 2.0 \times 10^{-4} \text{m}$,导温系数 $a_0 = 1.16 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$,表面放热系数 $\alpha_0 = 400 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $\alpha = 50$,裂纹长 $2l = 2.0 \times 10^{-2} \text{m}$,材料弹性模量 $E = 100 \text{GPa}$,线膨胀系数 $\alpha_t = 1.65 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$,低碳钢薄板为: $\sigma = 1.12 \times 10^7 (\Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$, $\mu = 7.5 \times 10^{-3} \text{H/m}$, $\lambda = 39.4 \text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, $a_0 = 1.1 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$, $\alpha_0 = 40 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, $2l = 2.0 \times 10^{-2} \text{m}$, $E = 200 \text{GPa}$, $\alpha_t = 12.5 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, $2h = 2.0 \times 10^{-4} \text{m}$. 经计算得知:随着通入电流的增强,裂尖处的温度在升高.当 $J_0 = 2.66 \times 10^8 \text{A}/\text{m}^2$ 时,铜板内裂尖处开始熔化并形成焊口.在这过程中,裂纹前缘形成 $\sigma_r = -68 \text{MPa}$, $\sigma_\theta = -70 \text{MPa}$ 的压应力;而当 $J_0 = 1.40 \times 10^8 \text{A}/\text{m}^2$ 时,低碳钢薄板内裂尖处开始熔化并形成焊口.随着通入电流密度的增加,尖端处压应力在增大.此过程中,仅当 $J_0 = 0.5 \times 10^8 \text{A}/\text{m}^2$ 时,裂纹前缘就产生了 $\sigma_r = -220 \text{MPa}$, $\sigma_\theta = -192 \text{MPa}$ 的压应力.可见,这两种材料对电磁热效应的反映程度有很大的差别.低碳钢裂尖处的 σ_r , σ_θ 随电流密度 J_0 的增加迅速增大,而铜板内裂尖处的 σ_r , σ_θ 变化得较缓慢.这种差异取决于材料不同的物理特性.计算结果还说明了:对于由碳钢制成的金属构件,应用电磁热效应进行裂纹止裂有着更加广阔的应用前景.

对于在含有有限长裂纹的板中,(1)垂直裂纹方向上通入一方脉冲电流,电流强度为 J_0 ,持续时间为 t_0 ^[55];(2)在单次脉冲电流作用结果的基础上,考虑到板的散热效应,连续作用有限次脉冲电流(其中 $t_{2n} < t \leq t_{2n+1}$ 为脉冲电流持续时间, $t_{2n+1} < t \leq t_{2n+2}$ 为脉冲电流是零的时间, n 为脉冲次数);(3)垂直裂纹通入阶跃递增电流,其密度为: $J(t) = \{3, (n+1)J_0, 0\}$, $t_n < t \leq t_{n+1} = (n+1)\Delta t$, $(n = 1, 2, \dots, m; m$ 为阶跃次数).计算证明:在单次脉冲、多次脉冲及阶跃递增电流的作用下,只要适当地调整电流强度和作用次数,均可以使裂尖处形成焊口,同时产生压应力,从而达到止裂的目的.

4.2 实验研究的进展

近期实验观测了止裂效率与通入电流密度、能量之间的关系,止裂效率与不同材料的电阻率之间的关系,止裂效率与试件的几何尺寸之间的关系,止裂效率与裂纹的数量及其走向之间的关系等等^[56].实验研究结果证明:

(1)通入电流能量的变化是通过控制电压的变化或改变放电电容容量实现的.实际上,无论是改变电压还是改变放电电容容量均改变了通过试件的电流密度,因此,改变电流密度是变化裂纹尖端热量的根本原因.当放电电容容量一定,控制电压愈高,电流密度愈大,裂纹尖端被熔化的就愈厉害.裂纹尖端处的熔化程度取决于实验装置输出能量的大小.欲使多裂纹体,特别是多埋藏裂纹体的裂纹尖端均能形成焊口,只要保证输出能量足够,即能达到止裂的目的.

(2)电磁热止裂效率不仅与试件的厚度、裂纹的长度有关,而且与裂纹在裂纹体内部的位置有关,但与试件长度的关系并不十分明显.实验采用长度、宽度相同,厚度不同的康铜薄板试件,所预制的裂纹长度相同.通入电流的能量相同,板越厚的试件,板中裂纹尖端被熔化的程度就越差些.

(3)尺寸相同、由同种材料制成的薄板试件,裂纹尖端距试件边界尺寸不同时,尖端被熔化的程度也不同.实验测定:裂尖距边界尺寸小的试件,尖端处熔化得厉害.

(4)如果试件上的裂纹数量很多,通电后各裂纹前缘几乎均被钝化.其中,与电流通入方向成 90° 角的裂纹的尖端被熔化得最厉害,成 45° 角的裂纹尖端被熔化的程度只是前者的30%左右,而成 0° 方向走向的裂纹的尖端则几乎不被熔化.相互平行且与通入电流方向垂直的裂纹

中，最长的裂纹尖端被熔化得最厉害。

(5) 材料的电阻率 ρ 的不同，材料中的裂纹尖端被熔化的程度也就不同。实验采用与上述试件尺寸完全相同的、带有同样裂纹但材料不同的试件，其实验结果证明：材料的电阻率愈高，裂纹尖端处的热集中程度愈高，熔化得愈厉害。这与通常的认识规律都是一致的。

图 2 给出了薄板中裂纹前缘熔化后的状态。由于实验时通入电流的能量过大，裂纹尖端在厚度方向上无约束，瞬间被熔化的金属喷溅到四周使尖端处形成一孔洞。其圆角半径增加了 2~3 个数量级，起到了止裂的作用。

(6) 裂纹尖端处熔化形成焊口处，尖端的曲率半径增加了 2~3 个数量级，尖端钝化的目的是达到了。但是，焊口的材料性质如何也是衡量该方法好坏的一个重要方面。现将焊口附近材料制成金相试样进行观察，图 3 给出了镀锌铁板裂纹尖端处的观察结果。显然，焊口附近材料的组织被明显细化，珠光体含量明显增多，同时出现了板条状马氏体组织，极大地提高了裂纹区材料的强韧性，遏制了裂纹主干线的形成，增强了制止裂纹扩展的能力。

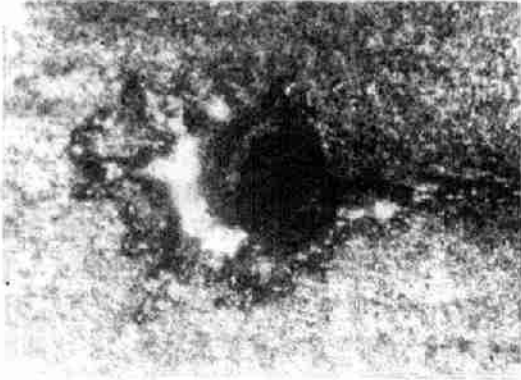


图 2 裂纹尖端处被熔成的孔洞 ($\times 100$ 倍)



图 3 焊口附近材料的金相组织 ($\times 800$ 倍)

由此可见，电磁热效应裂纹止裂是可以推广用来解决工程实际断裂问题的一种行之有效的方法。由上述实验内容得知：在了解到导体内部裂纹的裂度、尺寸、位置、数量及走向、排列顺序的情况下，适当调节止裂装置的输出功率，同时控制电流的走向，即可使裂尖处温度升高，材料熔化并形成焊口，从而达到止裂目的。特别是当处理金属内部埋藏裂纹的止裂问题时，此方法会显示出突出的优越性，因此，有必要将它推广应用到解决生产实际问题中去。

4.3 影响止裂效果的有关参数

由于理论分析与试验结果有较好的吻合，影响止裂效果的各个参数可以从理论计算和试验结果得到验证。通过推导、计算和试验表明：影响利用电磁热效应进行裂纹止裂的因素是很多的。在计算和试验过程中应该注意到这些因素的影响，以便取得理想的止裂效果。

首先，要注意到通入电流密度的大小是影响止裂效果的主要因素。它决定着裂尖附近的热集中的程度，决定着所产生热压应力的数值。通入电流的时间也是影响止裂效果的重要因素。适当的脉冲电流密度和恰当的脉冲作用时间，可以使裂纹止裂达到最佳的作用效果，因此，变换电流参数，可以控制裂纹的破坏速度、目标方向及单值方向，控制大量的热析出会使裂纹扩展速度降下来，最终遏止破坏。

其次，要注意到裂纹的几何尺寸是影响止裂效果的重要因素之一。裂纹长度、厚度，裂纹尖端处的曲率半径决定着热集中的效果，因此，在确定裂纹几何尺寸的前提下，适当地选择通入电流密度，使裂纹前缘升温不过热、不低温，恰恰达到瞬间形成焊点的程度，进而提高止裂效率。

有关带有裂纹的导体材料性质的参数，特别是包含在热传导方程中的各个参数，都会给

止裂效果带来影响。这些影响结果是可以由上述的分析、计算、归纳、总结出来的。

5 电磁热效应裂纹止裂应用展望

近十年来,一些学者致力于磁弹性、热磁弹性理论和实际应用的研究,提出了一些实际应用的建议和设想。本文的第2.3节中谈到利用电磁热效应裂纹止裂的工业应用实例,足以说明这种办法具有广阔的应用前景。因为它对构件的其他部位不会造成毁坏,受力情况也无影响,操作迅速、简便,与机械及其他方法比较,具有极大的优越性。

预计将来,该法不但可应用在输液、输气管道、核反应堆某些构件及防护壳中的裂纹止裂,金属压力加工模具、铸造模具的裂纹止裂,轧辊龟裂、金属板壳的裂纹止裂,飞机机翼裂纹止裂之中,还可能应用在电磁热效应控制、信号传递、传感器制作、磁感应加热、建立飞机除冰系统、防雷系统等工业之中。那时,它为人类带来的效益将是不可估量的。

6 结束语

本文简要地介绍了电磁热效应裂纹止裂的理论研究及其应用前景。其中,对单脉冲、多脉冲、阶跃递增电流作用下的止裂问题,以及止裂效果与各个参数之间的关系作了简单的介绍,为今后进一步深入研究以求解决工程实际问题打下了基础。相信在不久的将来,利用电磁热效应裂纹止裂这一新方法,能够在提高工程结构及构件的工作寿命、排除险情、提高安全性、可靠性的技术革命中发挥巨大的作用。

参 考 文 献

- 1 Финкель В М, Головин Ю И, Слетков А А. О возможности торможения быстрых трещин импульсами тока. Докл. АН СССР, 1976, 227(4): 848~857
- 2 Финкель В М, Головин Ю И, Слетков А А. Разрушение вершины трещины сильным электромагнитным полем. Докл. АН СССР, 1977, 237(2): 325~327
- 3 白象忠. 磁弹性、热磁弹性理论及其应用. 力学进展, 1996, 26(3): 389~406
- 4 Кудрявцев Б А, Партон В Э, Рубинский Б Д. Магнитотермоупругое поле в теле с полубесконечным разрезом. Прикл. матем. и мех., 1980, 44(5): 916~922
- 5 Партон В Э, Кудрявцев Б А, Рубинский Б Д. Распространение трещины под действием электромагнитного поля. Докл. АН СССР, 1980, 250(5): 1096~1100
- 6 Nowacki W. Dynamic Problems of Thermoelasticity. Warsaw: Leyden, Noordhoff & PWW, 1975
- 7 Kaliski S, Nowacki W. Excitation of mechanical electromagnetic waves induced by a thermal shock. Bull Acad Polon Sci, Ser Sci, Techn, 1962, 10(25): 25~33
- 8 Massalas C, Dalamangas A. Coupled magnetothermoelastic problem in elastic half-space. Lett Appl Engng Sci, 1983, 21: 171~178
- 9 Chatterjee G, Roychoudhuri S K. The coupled magnetothermoelastic problem in elastic half-space with two relaxation times. Lett Appl Engng Sci, 1985, 23: 975
- 10 Roychoudhuri S K, Banerjee (Mukhopadhyay) S. Magneto-thermoelastic waves induced by a thermal shock in a finitely conducting elastic half space. Int J Math Math Sci, 1993, 19: 131~143
- 11 Dhaliwal R S, Saxena H S, Rokne J G. Generalized magnetothermoelastic waves in an infinite elastic solid with a cylindrical cavity. J Thermal Stresses, 1991, 14: 353~369
- 12 Misra J C, Samanta S C, Chakrabarti A K, Misra S C. Magnetothermoelastic interaction in an infinite elastic continuum with a cylindrical hole subjected to ramp-type heating. Int J Engng Sci, 1991, 29(12): 1505~1514
- 13 Misra J C, Samanta S C, Chakrabarti A K. Magneto-thermoelastic interaction in an anisotropic solid cylinder subjected to a ramp-type heating. Int J Engng Sci, 1991, 29(9): 1065~1075
- 14 Shindo Y. Impact response of a cracked soft ferromagnetic medium. Acta Mechanica, 1985, 57: 99~112
- 15 Shindo Y. The linear magnetoelastic problem of a uniform current flow disturbed by a penny-shaped crack in a constant axial magnetic field. Engineering Fracture Mechanics, 1986, 23(6): 977~982
- 16 Shindo Y. Dynamic bending of cracked soft ferromagnetic plate in uniform magnetic field. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1991, 15: 207~217

- 17 Shindo Y, Katsura H, Yan W. Dynamic stress intensity factor of a cracked dielectric medium in a uniform electric field. *Acta Mechanica*, 1996, 117: 1~10
- 18 Финкев В М. Физические Основы Торможения Разрушения. Москва: Металлургия, 1977. 1~12
- 19 Финкев В М, Муравин Г Б, Лезвинская Л М, Тялин Ю М. О возможности торможения трещин в трубах термоупругими полями. *Проблемы прочности*, 1975, 8: 100~104
- 20 Shindo Y. The linear magnetoelastic problem for a soft ferromagnetic elastic solid with a finite crack. *ASME J Appl Mech*, 1977, 44: 47~50
- 21 Shindo Y. Magnetoelastic interaction of a soft ferromagnetic elastic solid with a penny-shaped crack in a constant axial magnetic field. *ASME J Appl Mech*, 1978, 45: 291~296
- 22 Yamamoto Y, Miya K, eds. Electromagneto-Mechanical Interactions in Deformable Solids and Structures. Amsterdam, North-Holland, 1987
- 23 Rosenvasser S N, Miller P, Dalessandro J A, Rawls J M, Toffolo W E, Chen W. The Application of Martensitic Stainless Steels in Long Lifetime Fusion First Wall/Blankets. *J Nucl Mater* 85 and 86 Pt A, 1979. 177~182
- 24 Moon F C, Hara K. Buckling induced stresses in martensitic stainless steels for magnetic fusion reactors. *Nucl Eng*, 1982, 71(1): 27~31
- 25 Miya K, Rizana T, Semeya K. Analysis of the magnetomechanical behavior of a ferromagnetic beam plate. *Fusto-Des*, 1987, 5(2): 167~180
- 26 Древянников В И, Лазарев В Ю, Пешков Б П. Прикладные проблемы прочности и пластичности статика и динамика деформируемых систем. Всесоюз Межвуз сб, ГорьК. Уни-т, Горький: 1982
- 27 Eringen A C. Unified continuum theory of electrodynamics of liquid crystals. *International Journal of Engineering Science*, 1997, 25 (12-13): 1137~1157
- 28 Sumi Naobumi. Dynamic thermal stresses in a finite circular plate with a penny-shaped crack generated by impulsive heating. *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu, A Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 1995, 61(581) Part A: 13~19
- 29 Shibui M, Sawada Y. Applicability of in Situ Welded Joint to a High Field Solenoid Coil for a TOKAMAK System. V 2. Oxford, Engl and New York: Pergamon Press, 1984. 1457~1462
- 30 Yagawa G, Yoshimura S. On the dynamic fracture toughness and crack tip strain behavior of nuclear pressure vessel steel: Application of electromagnetic force. *Nuclear Engineering and Design*, 1986, 97(2): 195~209
- 31 Yoshimura S, Yagawa G. Determination of dynamic fracture toughness of nuclear pressure vessel steel using electromagnetic force. In: Transactions of the International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology 8th v G. Amsterdam, North-Holland, 1985. 1~6
- 32 Ru C Q. Effect of electrical polarization on stress intensity factors in a piezoelectric ceramic. *International Journal of Solids and Structures*, 1999, 36(5): 869~883
- 33 Teramoto T, Nagai T et al. Numerical analysis on fracture behavior of a single-edge-cracked plate subjected to electromagnetic force. *Fusion Engineering and Design*, 1998, 42(3)Pt C: 389~394
- 34 Kobidze G, Lord W. Tight crack modeling for the finite element simulation of inspection tools in pipelines. *Materials Evaluation*, 1998, 56(10): 1223~1226
- 35 Badics Zsolt, Komatsu, Hidenobu et al. Thin sheet finite element crack model in eddy current NDE. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1994, 30(50)Pt 2. *IEEE*, Piscataway: NJ, USA, 1994. 3080~3083
- 36 Асанян Д Д, Багдасарян Г Е. Напряженно-Деформированное состояние магнитоупругого слоя, трещиной, обусловленное внешним магнитным полем. *Механика твёрдого тела* 1997, 4: 61~68
- 37 Асанян Д Д, Багдасарян Г Е. Напряженно-Деформированное состояние магнитоупругого слоя с полубесконечной трещиной, находящегося во внешнем однородном магнитном поле. *Изв На Армении*, 1997, 50(2): 12~20
- 38 Фильштинский Л А. Плоская задача магнитоупругости для ферромагнитной Среды, ослабленной разрезами. *Пружл Мам и Мех*, 1993, 57(5): 143~151
- 39 Morimoto, Kazuo, Urabe Yoshio et al. Development of in-operation-inspection technique to detect crack of vessels in nuclear power plant by ultrasonic testing method. In: Fatigue/Fracture, NDE, Materials and Manufacturing Proceedings of the International Conference on Pressure Vessel Technology, ICPVT v 1 ASME. New York, 1996. 427~432
- 40 Cochran A, Donaldson G B et al. SQUIDS for NDT the technology and its capabilities. *British Journal of Non-Destructive Testing*, 1993, 35(4): 173~182
- 41 Takaki Keisuke, Sakane Masao et al. Low-cycle fatigue crack detection A. C. potential drop method for CoCrAlY coated 738LC Ni base superalloy. *Zairyo. Journal of the Society of Materials Science, Japan* 1997, 46(1): 58~64
- 42 Nakasone Yuuji, Hiraga Keijiro et al. Electromagnetic impact fracture of Ti-6Al-4V alloy and 25Mn-5Cr-1Ni steel at cryogenic temperature. In: Proceedings of the Seventh International Cryogenic Materials Conference-ICMC

- Held with the Cryogenic Engineering Conference-CEC. *Advances in Cryogenic Engineering* v 34. New York: Plenum Publ Corp, 1988. 405~412
- 43 Christner B K, Long D L, Rummel W D. Measurement and correlation of eddy current field interactions with material and flaw dimension variables. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1988, 7(A): 207~214
- 44 Monahan Craig C, Dover William D. Early fatigue crack shape development in welded tubular joints. In: *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE* v 3. New York, 1995. 223~231
- 45 Kovalenko, Volodymyr S et al. Gas-powder laser cladding with electro-magnetic agitation. In: *Proceedings* v 83 n 2 1997, Laser Inst of America, Orlando, 1997. F21~F26
- 46 Parton V, Tani J. On the retardation of a crack by means of passing a current pulse. *International Journal of Applied Electromagnetics in Materials*, 1994, 5(4): 279~290
- 47 Финкель В М, Муравин Г Б, Черный В В, Головин Ю И, Лезвинская Л М. Импульсные методы испытания трубчатых образцов. *Заводская Лаборатория*, 1974, 40(1): 101~103
- 48 Головин Ю И, Финкель В М, Слетков А А, Шибков А А. Динамика разрушения материала в вершине трещины под действием сильного электромагнитного поля. *Физика и Химия обработки материалов*, 1978, 2: 40~46
- 49 Головин Ю И, Финкель В М, Слетков А А. Влияние импульсов тока на кинетику распространения трещин в кремнистом железе. *Проблемы прочности*, 1977, 2: 86~91
- 50 白象忠, 胡宇达. 电磁热效应在导电薄板裂纹止裂中的应用. *中国学术期刊文摘*, 1999, 5(3): 403
- 51 Амбарцумян С А, Багдасарян Г Е, Белубекян М В. Магнитоупругость тонких оболочек и пластин. Москва: Наука, 1977. 150~160
- 52 Партон В З, Кудрявцев Б А. Электромагнитоупругость пьезоэлектрических и электропроводных тел. Москва: Наука, 1988. 419~453
- 53 Положий Г Н, Уравнения Математической Физики. Москва: Высшая школа, 1964. 559
- 54 徐芝纶. 弹性力学 (上册). 北京: 高等教育出版社, 1988. 177~179
- 55 白象忠, 胡宇达. 脉冲电流作用下导电薄板中裂尖附近的温度场. *燕山大学学报*, 2000, 24(1): 1~3
- 56 白象忠, 胡宇达. 电磁热效应裂纹止裂中的尺寸效应. *燕山大学学报*, 1999, 23(3): 196~198

ADVANCE OF THE STUDY OF CRACK PREVENTION BY THE ELECTROMAGNETIC HEAT EFFECT

Bai Xiangzhong Hu Yuda Tan Wenfeng

The Department of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066044, China

Abstract The crack prevention for a conductor with a crack by the heat effect of the electromagnetic field is effective, in extending its service life and improving its security and reliability. The theoretical calculations and experimental studies show that a small welded joint can be formed at a small sphere near the tip of a crack inside, the conductor by smelting as the result of heat concentration effect. The curvature of the crack front will be increased in several orders of magnitude instantly and the stress concentration will be reduced remarkably. So the formation of the main crack will be prevented and the extension of the crack will be prevented too.

The current status of studies about this physical phenomenon, their further development and the prospect of its application in the future are reviewed in this paper.

Keywords thin current-carrying conductor, electro-magnetic heat effect, crack, crack tip, crack preventing