

高压强脉冲电流对金属裂纹的止裂效果

李晓惠^{1,3}, 吴 杰^{1,2}, 白象忠^{1,3}

(1. 中国科学院力学研究所国家非线性连续介质力学重点实验室, 北京 100080; 2. 燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 3. 燕山大学建筑工程与力学学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要:如何产生高强度脉冲电流是应用电磁热效应遏制金属裂纹扩展的一个关键问题。介绍了高压脉冲放电装置的工作原理,从理论、数值模拟、实验三个方面,通过对不同尺寸的裂纹试件导入强脉冲电流而产生的电磁热效应的止裂效果进行了分析和研究,研究结果表明:强脉冲电流产生的电磁热效应,能够使裂纹尖端处熔化形成微小的焊口,遏制了裂纹的扩展。试件的通流尺寸、电阻率、导入电流密度是影响裂纹尖端温度场和温度梯度场的主要因素。

关键词:高压脉冲电流;电磁热效应;裂纹止裂;温度场;金属

中图分类号: TM8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0963(2006)08-0053-05

Effect of High Voltage Pulse Current on Crack Arrest

LI Xiao-hui^{1,3}, WU Jie^{1,2}, BAI Xiang-zhong^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Nonlinear Continuum Mechanical, Mechanical Research Institute, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China; 2. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China; 3. Institute of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, Hebei, China)

Abstract: Generation of powerful pulse current is a key problem for crack arrest by electromagnetic heat effect. The principle of high voltage pulse discharging is introduced. The theoretical analysis, numerical simulation and experiment study were carried out for crack arrest by electromagnetic heat effect in metal samples of different size. The experiment showed that the metal at tip of crack was melted and joint was formed to arrest crack. The size of current path, resistivity, power density are main factors that effect the temperature field and temperature gradient field at crack tip.

Key words: high voltage pulse current; electromagnetic heat effect; crack arrest; temperature field; metal

半个多世纪以来,高压脉冲放电技术得到了迅速的发展,早为人知的高压强脉冲放电可用于液电成形、矿藏勘探、采油^[1]、环境工程^[2]和与人类生活紧密相关的医疗领域。储能方法也多种多样,如电容器储能、电磁储能、机械储能和超导压缩磁通储能等方式^[3]。近几年来,脉宽在 30 ~ 40 ns 范围的强脉冲放电技术的研究取得了一定的进展,这种高压强脉冲放电技术在模拟核爆炸、激光聚变等国防尖端技术中得到了越来越广泛的应用。传统的高压强脉冲放电技术主要是利用放电时所产生的力效应、

声效应。如何利用高压强脉冲放电时所产生的电场、磁场及热效应还没有引起人们的足够重视。将高压强脉冲放电应用于金属裂纹止裂更是一个新的课题。目前,电磁热效应用于金属裂纹止裂的研究虽然取得了一定的进展^[4~5],但还有很多问题需要进一步的探讨,如放电电流各项参数与止裂效果的关系,强脉冲电流如何导入裂纹工件,如何限制电流流通过程来使裂纹尖端处的电流密度集中,如何提高放电装置单位体积的储能能量,如何减少放电回路的电感来提高放电脉冲的陡度等一系列问题均有

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50275128)

作者简介:李晓惠(1959-),女,大学专科,工程师;

E-mail:wujie590130@163.com;

修订日期:2005-07-11

待于在理论计算的基础上,通过实验不断探索和完善。

1 电磁热效应止裂的原理

金属裂纹的止裂技术是当前许多行业生产和运行中急需解决的关键问题。利用电磁热效应对带有裂纹的载流导体进行裂纹止裂是延长其使用寿命、提高安全性和可靠性的一种行之有效的方法。

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。由于裂纹的存在和导入电流的脉动变化,导致了电流的绕流集中和集肤效应,裂纹尖端处的电流密度、电阻增加,这种效应会使裂纹尖端处小范围内的强化加热,足以达到使材料熔化的程度。随着温度的升高,裂纹尖端的曲率半径可增大 2~3 个数量级,并局部迸发爆炸形成焊口,这样不但减少甚至消除了裂纹尖端的应力集中,而且在裂纹尖端处会产生相当大的热压应力,从而达到止裂的目的。

以极坐标描述的裂尖附近焦耳热源功率密度的表达式为^[5]:

$$Q(r, \vartheta) = \frac{1}{2} (j_1^2 + j_2^2) = \frac{J_0^2 l}{2r} \quad (1)$$

式中: γ ——材料的电导率; J_0 ——在垂直于裂纹方向上通入电流的密度; j_1, j_2 ——分别表示裂尖处在垂直于裂纹和平行于裂纹方向上的电流密度; $2l$ ——裂纹长度; r, ϑ ——极坐标参数。

裂尖附近的温度场由以下热传导方程式确定:

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} - AT = -\frac{Q}{2h} \quad (2)$$

式中: $A = \frac{\gamma}{h}$, γ ——为表面热扩散系数, h ——为热传导系数, T ——温度, $2h$ ——板厚。

文献[6]通过热传导方程的求解,推导了裂纹尖端区域在电流所产生的焦耳热作用下温度的升高。与此同时,伴随着压应力的产生,从而导致裂纹止裂的作用。文献[7]从理论、试验和数值模拟三个方面研究了利用电磁热效应对导体内裂纹止裂时,止裂效果与电流通路尺寸的关系。有关研究表明,除金属材料的材质外,影响止裂效果的因素还有很多,如: 通入到板内的电流密度是影响止裂效果的主要因素,电流密度过高、过低都达不到理想的止裂效果,甚至烧损试件; 裂纹和板的尺寸、形状也是影响止裂效果的重要因素; 电流流通的路径也会影响止裂效果; 脉冲放电电流的脉宽应尽量窄,即电

磁能量要集中。为了满足上述参数可调的要求,使电磁热效应止裂不仅对薄板有效,而且对较厚的工件也有效,进而逐步走向实用阶段,研究大容量、短周期、电参数可调的高压脉冲放电装置至为关键。

2 高压脉冲放电装置

高压脉冲放电装置由 5 部分组成,它包括直流充电装置、主放电回路、触发回路、测量装置和控制回路。电路原理图见图 1(a),放电装置见图 1(b)。

直流充电装置的工作原理为:三相交流电经自耦调压器 T_1 送到三相调压变压器 T_2 ,三相调压变压器输出的电压经三相桥式整流器 ($D_1 \sim D_6$) 转换成直流,直流电压经充电电阻 R_1 给高压电容器组充电。电容器组的最高工作电压为 30 kV,最大储存能量为 81 kJ。

主放电回路由储能电容器组 C 、放电开关 K 和负载(试件)电阻 R_L 组成。电容器组 C 充电的过程,就是把电网的电能储存到电容器的过程,它储存的能量 $W_c = \frac{1}{2} CE^2$, E 为电源电动势。当触发回路送来高压触发脉冲时,放电开关 K 击穿,电容器组对负载电阻放电,强大的脉冲电流在试件中产生的电磁热效应,足以使裂纹尖端处熔化形成焊点。

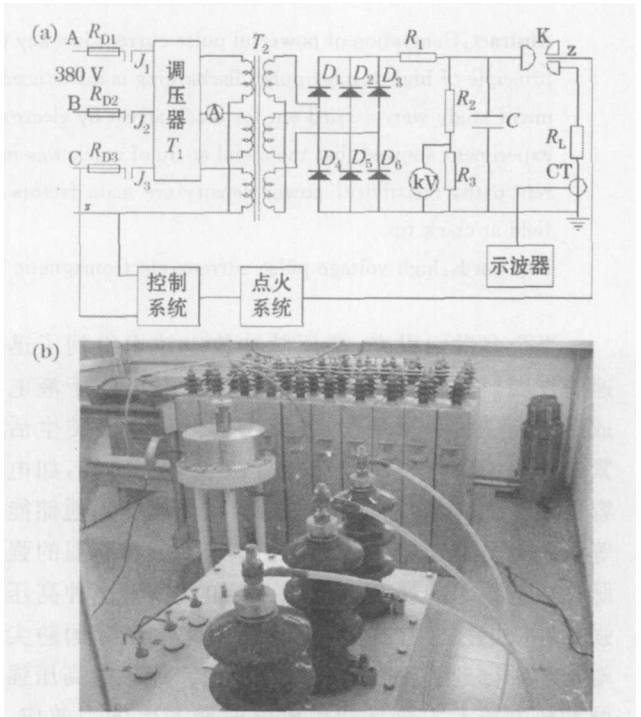


图 1 高压脉冲放电的电路原理图(a)及装置(b)
Fig 1 Circuit (a) and apparatus (b) of high voltage pulse discharge

为了使放电能量尽量多地消耗在试件上,放电回路连接导线的电阻很小,回路参数满足 $R \ll \sqrt{\frac{L}{C}}$ 时,放电电流为^[7]:

$$i = \frac{E}{L} e^{-t/\tau} \sin t \quad (3)$$

式中: $\tau = \sqrt{\frac{L}{C}}$, t ——时间, $\omega = \frac{R}{2L}$ 。当忽略回路电阻时, $\omega = 0$, $\tau = \frac{1}{\omega}$, 式(3)可写成:

$$i = I_M \sin t = E \sqrt{\frac{C}{L}} \sin t \quad (4)$$

放电电流幅值 $I_M = E \sqrt{\frac{C}{L}} = \sqrt{\frac{2WC}{L}}$ 。不难看出,当电容器组储存的能量一定时,提高充电电压、增加电容量是提高放电电流幅值的有效方法,但这会受到装置的限制。回路电感越大,放电电流幅值越小,振荡周期越长,对试件中电磁热效应的瞬时功率集中不利,应尽量科学布线,采取适当的措施,减少回路的电感。

为了研究放电电流参数与裂纹止裂效果之间的关系,准确测量脉冲电流的波形和幅值十分重要。本装置采用罗柯夫斯基线圈测得放电电流信号,经积分环节将信号还原,送到数字存储示波器上观察放电电流的幅值和波形。采用电阻分压器测量放电电压。

3 电磁热效应的止裂效果及分析

3.1 止裂效果与电流通路尺寸的关系

通过热-电耦合分析焦耳热问题的数值分析方法,求解了放电瞬时各种电流通路尺寸下裂纹尖端

附近的温度场和温度梯度场。当通入的电流密度为一定值时,裂纹的几何尺寸是影响止裂效果的重要因素。裂纹的长度、厚度、裂尖的曲率半径决定着热集中的效果。获得电流通路的相对尺度与止裂效果间的关系,可为选择合适的电流密度,使裂纹前缘不过热、不欠温,恰好达到最佳的止裂效果打下基础。实验研究了在垂直于裂纹的方向均匀通入相同电流时,随电流通路尺寸的变化,裂纹尖端温度场的变化。采用实验研究的方法观察到电磁止裂后裂纹尖端的钝化。

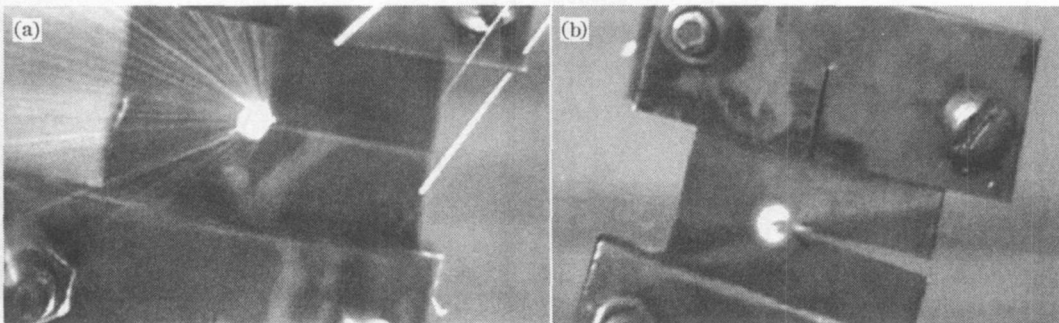
实验中利用高速数字摄像机记录下放电的瞬间,如图 2 所示,这是在高温下熔化的金属产生的喷射。通电结束后,发现裂纹尖端熔化,局部迸发爆炸形成焊口,裂尖处的曲率半径增大 2~3 个数量级,形成接近于水滴形状的孔,裂纹尖端的形貌如图 3 所示,它与数值模拟的计算结果相符(见图 4)。孔的边缘留下了强烈熔化的痕迹,这是电容放电瞬间,裂纹尖端处迸发爆炸,材料瞬间熔化,金属薄板的上下两个侧面没有约束而产生的喷射所形成的。

3.2 止裂效果与通入电流能量的关系

通入电流能量的变化是通过控制电压的变化或改变电容的容量实现的。当电容的容量一定,控制电压愈高,则电流密度愈大,裂纹尖端的熔化就愈厉害。实验结果表明:裂纹尖端处的熔化程度取决于实验装置输出能量的大小。

3.3 止裂效果与试件厚度的关系

电磁热止裂效果与试件的厚度有关。将其余尺寸与上述实验相同而厚度不同的 45 号钢试件预制相同长度的裂纹。同样通入能量为 384 J 的脉冲能量之后,厚度为 1 mm 的板中裂纹尖端熔化成 ϕ 1.58 mm 的小孔,而厚度为 2 mm 的板中裂纹尖端却熔化成



(a) 通电瞬间的喷射现象; (b) 通电后裂尖的熔化

图 2 通电瞬间和通电后的试样

Fig 2 Sample at moment of switch on and after that

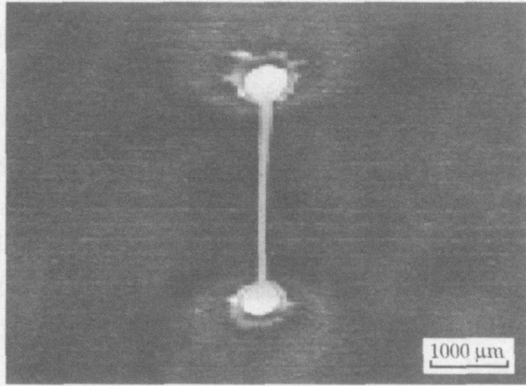


图 3 裂尖的形貌

Fig 3 Morphology of crack tip

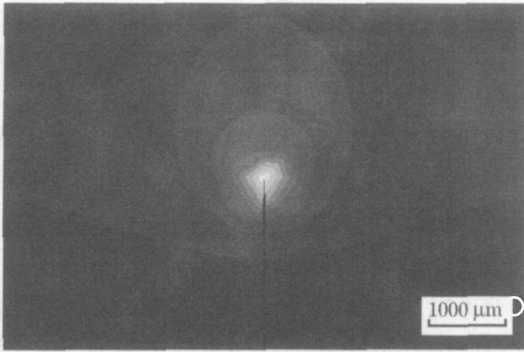


图 4 裂纹尖端处温度场的数值模拟

Fig 4 Temperature field at crack tip

φ 9 mm 的小孔。厚度为 10 mm、8 mm 的 45 号钢试件分别需要 70 kJ 和 60 kJ 的能量才能达到预期的熔化效果。图 5(a) 和 (b) 分别是厚度为 10 mm、8 mm 的 45 号钢试件的放电电流波形图,图 6(a) 和 (b) 分别是

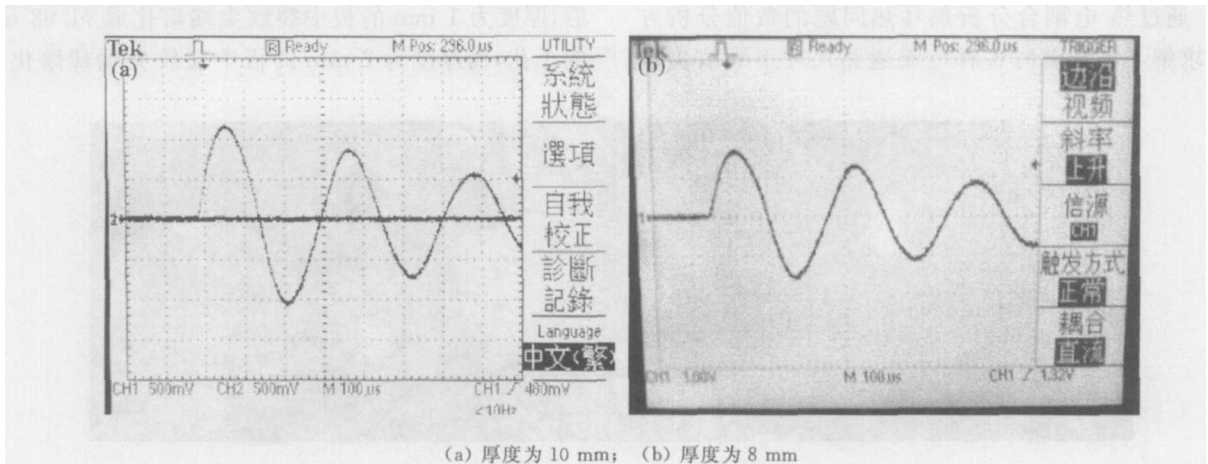
厚度为 10 mm、8 mm 的 45 号钢试件放电后裂尖的熔化状态。

3.4 止裂效果与材料电阻率的关系

材料的电阻率不同,材料中的裂纹尖端被熔化的程度也不同。采用与上述试件尺寸相同并预制有同样长度裂纹的紫铜板,施加相同的电压,放电后在裂纹尖端处仅能熔化成 φ 0.2 mm 的小孔。这表明,材料的电阻率愈高,裂纹尖端处的热量集中程度愈高,金属的熔化愈厉害。这与已知的规律是一致的。

3.5 裂纹尖端处压应力的形成

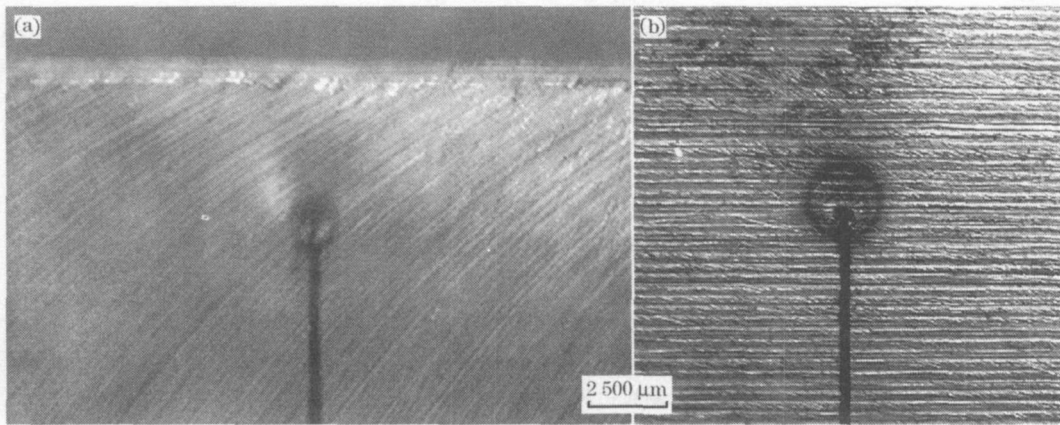
利用电磁热效应对带有裂纹的金属模具材料实施脉冲放电止裂之后,最终会在裂纹尖端处产生一个压应力场。脉冲放电止裂后,裂尖变成更大的圆形,且其边缘光滑完整。可见裂尖熔化后是在强大的压力作用下凝固结晶的。由于裂尖周围无二次裂纹产生,在冷却凝固过程中,裂尖处压应力始终占主导地位。分析压应力产生的原因有: 裂纹前缘瞬间熔化时,裂尖处的应力集中在液态下得以释放,这降低甚至消除了裂纹尖端附近原始的残余应力; 通电瞬间,由于熔化、气化、空气的电离使裂尖处产生了瞬间爆炸力,使熔融的金属液体向四周溅射,在裂尖处形成堆焊,致使周围未熔化的金属产生环向和径向压应力; 裂纹尖端的金属发生了相变,引起体积膨胀,产生了组织压应力。由于放电时间非常短促,因此所产生的爆炸压力和相变压力二者可能有较大的重叠,形成了强大的合成压应力场。正是由于压应力的存在,使熔化的材料局部迸发。裂纹前缘的焊口和压应力场是使裂纹不再继续延伸的两个主要原因。



(a) 厚度为 10 mm; (b) 厚度为 8 mm

图 5 放电电流的波形(71 kA · V⁻¹)

Fig 5 Waveform of discharge current



(a) 厚度为 10 mm; (b) 厚度为 8 mm

图 6 裂尖的熔化状态

Fig 6 Fusion at crack tip

3.6 电磁热裂纹产生的超高速淬火

脉冲放电过程是在微秒级时间内完成的。由于热源仅集中在裂尖附近很小的范围内,其平均温度在 2 000 以上,而金属构件其他部分的温度平均不超过 200 。金属内良好的热传导,使裂尖尖端的温度迅速下降,发生“自激冷”,形成了一次超高速淬火过程,奥氏体发生马氏体相变,出现了超细化的条状马氏体、细小的颗粒碳化物和极少量残余奥氏体的混合物,实现了组织的超细化,淬硬层可达 HV 900 ~ 1 200 的高硬度,淬火层还具有高韧性,极大地提高了裂纹尖端的硬度、韧性和耐磨性。

3.7 白亮层的形成

各种碳钢、合金钢模具在电磁热裂纹止裂实验中,在暂短的瞬间内裂尖尖端熔化,在极其陡峭的温度梯度作用下,裂尖附近的金属组织发生了变化后形成了白亮层。对用 20 号钢、45 号钢、T7 钢、GCr15 钢、3Cr2W8V 钢、W18Cr4V 钢等模具材料加工成的,尺寸为 60 mm × 20 mm × 0.5 mm,裂纹长度为 10 mm 的试件进行了脉冲放电止裂实验。放电后,对围绕裂尖前缘出现的白亮层进行了硬度测定。测定结果表明,白亮层的硬度普遍比基体的硬度高 30 % 左右。白亮层是一个薄的外层,它较严密地包在裂尖的周围,对裂纹的扩展有抑制作用。

4 结 论

(1) 理论和实验的结果表明:利用高压脉冲放电

装置所产生的电磁热效应,使金属裂纹尖端处温度急剧升高,从而使材料熔化形成焊口,可以遏制裂纹的扩展,达到止裂的目的。

(2) 裂纹的止裂效果与裂纹的形状、通流尺寸、试件的电阻率、试件的厚度、导入电流密度密切相关。当通流尺寸较大、试件较厚时,需要导入 10 万 A 以上的电流,此时如何将电流安全导入试件要引起足够的重视。

(3) 由于裂纹尖端处巨大的温度梯度,放电止裂后将产生强大的压应力,同时裂尖处的温度超过了金属的熔点,在强大的压应力作用下,使裂纹前沿处的组织细化,形成了白亮层,它较严密地包在裂尖处,进一步增强了止裂效果。

参考文献:

- [1] 孙鹤鸿,孙广生,严萍,等. 高压电脉冲采油技术发展[J]. 高电压技术,2003,28(1):41-44.
- [2] 李冬黎,曹丰文,张晋,等. 脉冲功率技术在环境工程领域的应用[J]. 高电压技术,2003,28(10):35-38.
- [3] 秦曾衍,左公宁,王永荣,等. 高压强脉冲放电及应用[M]. 北京:北京工业大学出版社,2000.
- [4] 白象忠. 磁弹性、热磁弹性理论及其应用[J]. 力学进展,1996,26(3):389-406.
- [5] 白象忠,胡宇达,谭文锋,等. 电磁热效应裂纹止裂研究的进展[J]. 力学进展,2000,30(4):546-557.
- [6] 胡宇达,白象忠. 载流薄板内裂尖附近的应力场[J]. 机械强度,2002,24(1):98-100.
- [7] 清华大学电力系高电压技术专业. 冲击大电流技术[M]. 北京:科学出版社,1978.