

文章编号: 1001-4888(2005)03-0411-06

高压脉冲放电技术在金属裂纹止裂中的应用^{*}

吴 杰^{1,2}, 李晓惠^{1,3}, 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(LNM), 北京 100080;

2. 燕山大学 电气工程学院; 3. 燕山大学 建筑工程与力学学院, 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研究的一个关键问题。本文介绍了高压脉冲放电装置的工作原理; 从理论上分析了充电电压、回路参数与放电电流幅值、放电周期之间的关系。在此基础上, 自主设计、开发了一套高压脉冲放电装置。采用它对金属模具钢中裂纹进行了脉冲放电止裂实验。放电时裂纹尖端熔化形成堆焊和高压应力区, 使裂纹尖端钝化, 达到了止裂的目的。由于脉冲放电快速加热和冷却, 在裂纹尖端处实现了冲击淬火, 得到了超细化的隐晶马氏体和细粒碳化物等微观组织, 提高了裂纹尖端处的硬度、强韧性和耐磨性, 试验结果验证了该装置的有效性, 本文的成果为采用电磁热效应对金属模具裂纹止裂提供了实验技术基础。

关键词: 电磁热效应; 裂纹止裂; 高压脉冲放电; 装置开发

中图分类号: O346.1 **文献标识码:** A

1 引言

金属裂纹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。近几年来, 利用电磁热效应来遏制金属内部裂纹的扩展取得了一定的进展^[1,2]。利用电磁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方法。

文献[3]通过热传导方程的求解, 推导了尖端区域在电流所产生的焦耳热作用下, 温度升高并伴随着压应力的产生, 从而达到裂纹止裂的目的。文献[4]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: (1) 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; (2) 裂纹和构件的尺寸、形状也是影响止裂效果的重要因素; (3) 电流流通过程也会影响止裂效果; (4) 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顺利进行, 使电磁热效应止裂不仅在薄板上有效, 而且在较厚的构件也有效, 继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则成为关键环节。

2 电磁热效应止裂原理

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、电阻局部增加, 这种效应会

* 收稿日期: 2004 - 04 - 19; 修订日期: 2005 - 04 - 20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50275128)

通讯作者: 吴杰(1959 -), 男, 大学本科学历, 副教授。研究方向: 从事电力系统无功补偿及高电压脉冲放电技术研究。E-mail: wujie590130@163.com

使裂纹尖端处小范围内强化加热,足以达到使材料融化的程度。随着温度的升高,裂纹前缘处的曲率半径增大可达 2~3 个数量级,并局部迸发爆炸形成焊口,这样不但减少了甚至是消除了裂纹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,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表达式为^[4]:

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

式中: γ 为材料的电导率; J_0 为垂直于裂纹方向通入电流的密度; j_1, j_2 分别表示裂尖处垂直于裂纹和平行于裂纹方向的电流密度; $2l$ 为裂纹长度; r, θ 分别是极坐标中的半径和角度坐标。

裂尖附近的温度场由下面热传导方程式确定:

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

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

3 高压脉冲放电装置研制

近四、五十年来,高压脉冲放电技术得到了迅速地发展,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等储能方式等等^[5]。早为人知的高压强脉冲放电可用于液电成型、矿藏勘探和与人们生活紧密相联的医疗领域。传统的高压强脉冲放电技术应用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中更是一个新的课题。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,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,如何减少放电回路电感来提高放电脉冲陡度等一系列问题均有待于在理论计算的基础上,通过实验不断探索和完善。

高压脉冲放电装置有五部分组成。其中包括直流充电装置,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)。

3.1 直流充电装置

直流充电装置由三相交流电引入,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。电容器组最高工作电压 30kV,最大储存能量 81kJ。充电电流按指数规律变化^[6]:

$$i_c = \frac{E}{R_1} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (3)$$

式中: $\tau = R_1 C$ 为充电回路时间常数; E 为直流输出电压; R_1 为充电回路电阻。从理论上分析,当放电时间 $t = \tau$ 时,电容器上的电压才会达到直流电源电压 E 。实际上,当 $t = (4 \sim 5)\tau$ 时,电容器组的电压可达到电源电压的 98%,即认为充电结束。该装置的充电时间不超过三分钟。

3.2 主放电回路

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

3.2.1 放电电流幅值

为了使放电能量尽量多地消耗在试件上,放电回路连接导线电阻很小,回路参数满足下式:

$$R \ll \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4)$$

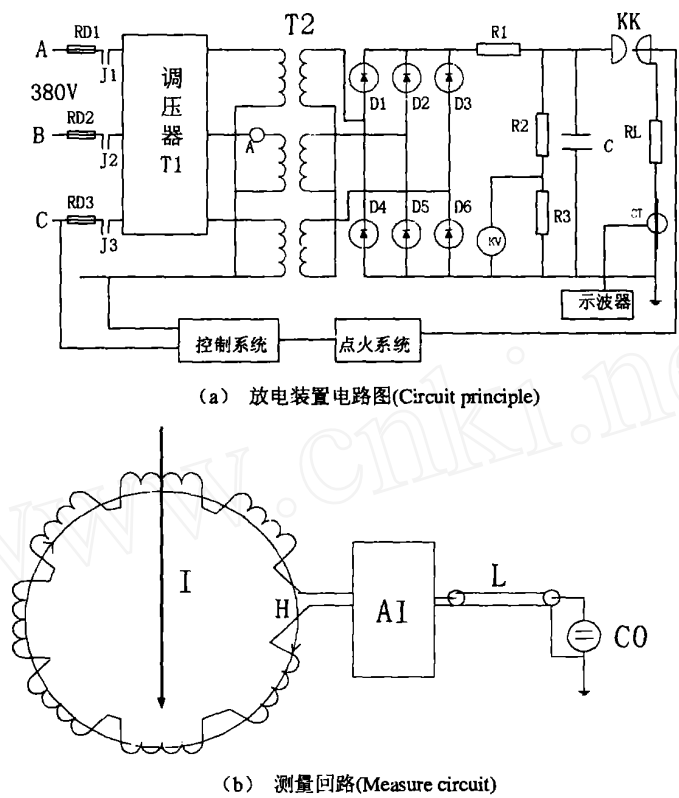


图 1 高压脉冲放电装置电路图

Fig. 1 The circuit of high voltage pulse discharge

式中： R 为放电回路总电阻； L 为放电回路总电感； C 为电容器组电容量。放电电流为^[6]：

$$i = \frac{E}{L} e^{-t} \sin t \tag{5}$$

式中： $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$ ， $\gamma = \frac{R}{2L}$ 。当忽略回路电阻时， $\gamma = 0$ ， $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ，式(5)可写成：

$$i = I_M \sin t = E \sqrt{\frac{C}{L}} \sin t \tag{6}$$

放电电流幅值 $I_M = E \sqrt{\frac{C}{L}} = \sqrt{\frac{2W_c}{L}}$ ， W_c 为电容器上储存的能量。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的幅值的有效方法，但会受到装置的限制。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，应尽力科学布线，采取适当的措施，减少回路电感。

3. 2. 2 影响放电回路电感与电动力因素

平行导线回路电感和两导线之间单位长度上电动力分别以用下式计算^[6]：

$$L = \mu_0 \ln \frac{d}{r} \tag{7}$$

$$F = 2 \times 10^{-7} \frac{I_m^2}{D} \tag{8}$$

式中 d 为两导线距离； r 为导线半径； I_m 为放电电流峰值。企图要回路电感小，就要使两导线距离小。但是另一方面，导线距离小，电动力大。所以是矛盾的。布线时要尽量使导线短、距离小，但要对导线进行加固和绝缘处理，抵抗电动力的破坏作用。

3.2.3 振荡频率 f

由式 $f = \frac{1}{2\sqrt{LC}}$ 可知,振荡频率和充电电压无关,只取决于回路的结构参数。要提高振荡频率,必须降低回路电感和电容量,但降低电容量与增加放电能量、提高放电电流幅值是矛盾的。实验时如果需要调整振荡频率,可通过串接电感来实现。

3.2.4 放电电流最大上升速度

放电电流的上升速度是影响止裂效果的一个因素。将式(6)求导,当 $t=0$ 时,上升速度最大。即

$$\left(\frac{di}{dt}\right) = I_M W_C = \frac{E}{L} \quad (9)$$

从式(9)可见,增加充电电压和减少回路电感都会提高电流上升速度。

3.3 触发与控制回路

考虑到下述因素:(1)放电电流幅值上百千安;(2)放电电压达几万伏;(3)放电动作比较频繁;(4)要求放电电流上升速度尽量快。放电开关没有采用高压断路器,而是采用了带触发极的放电隔离间隙。触发回路的作用就是提供高压触发点火脉冲,使隔离间隙从绝缘状态快速转向导电状态。控制回路的作用是实现装置的充电、放电、安全接地与保护等功能。

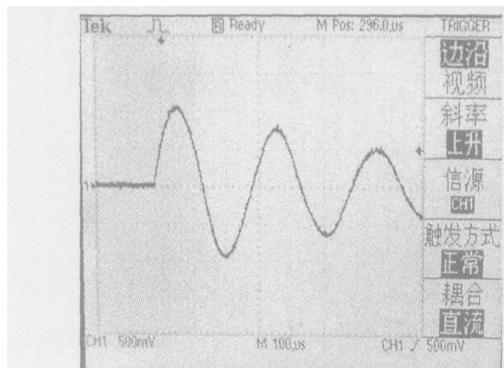


图 2 放电电流波形
Fig. 2 Discharge current

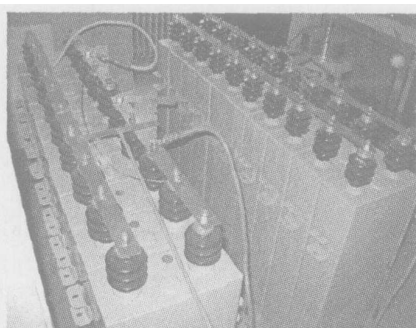


图 3 高压脉冲放电装置
Fig. 3 Discharge equipment

3.4 测量回路

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。脉冲电流的测量方法分为:罗柯夫斯基线圈法、分流器法、光学方法。分流电阻电感的存在使分流法只适用于频率较低信号的测量,光学测量设备较复杂。本装置采用了图 1(b)所示的罗柯夫斯基线圈测得放电电流信号,经积分环节 A_1 将信号还原,送到数字存储示波器 CO 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。

4 电磁热效应止裂效果分析

图 2 是对试件放电的电流波形,最小放电周期 $250\mu\text{s}$,最大输出放电电流 140kA (71kA/V)^[7]。图 3 是高压放电装置实物,图 4 是放电后带有裂纹的典型试件[板厚 10mm (a)、 8mm (b)],从图中可以看到电流烧蚀而形成的热影响区。图 4(c)、(d)中分别显示裂纹尖端曲率半径增大、熔化金属的喷射状态以及热影响区的金相组织变化情况。图 4(d)中 A 区主要是白亮组织,其间不规则的黑色环为极细的马氏体组织。但因离裂尖稍远而没有被白亮组织完全覆盖。图中 B 区为过热区。该区没有白亮组织,也没有被熔化,属于白亮组织的外围。由极细的隐晶马氏体和细粒状碳化物构成。区中散布的几处白亮块状物并非是碳化物而是少许的白亮组织。图中 A 区、B 区界限分明,说明两区间发生了温度陡降。显微分析没有发现微观二次裂纹,可见裂尖因周围过大的压应力也抑制了微观裂纹(二次裂纹)的产生。

利用该放电装置对部分试件进行放电后的分析表明:在超强脉冲电流的作用下,裂纹尖端处的温度

急剧升高,使材料熔化形成焊口,从而达到遏制裂纹的目的;由于裂纹尖端巨大的温度梯度、电动力和磁场耦合所产生的压应力,使裂纹前沿处的热影响区结晶组织细化,增强了止裂效果。

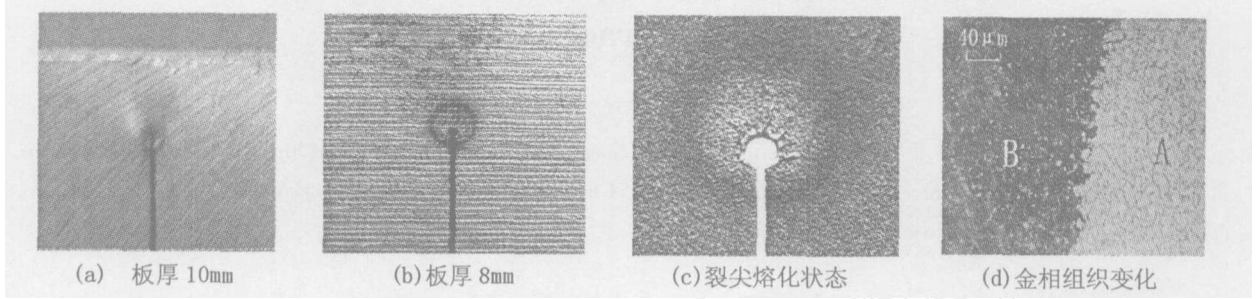


图4 裂尖熔化状态及组织分析

Fig. 4 Fusion state and microstructure analysis of crack tip

5 结论

- 1) 实验证明:该高压脉冲放电装置技术指标达到了设计要求,能够满足近期电磁热效应止裂研究的需要。
- 2) 为提高装置的能量水平,尽可能减小装置的体积和占地面积,应选择高能量密度的电容器。
- 3) 为了减小回路电感和适用频繁放电电流的冲击,应选择脉冲电容器。
- 4) 放电开关应具备稳定的触发性、较宽的放电电压范围和较长的工作寿命。
- 5) 采用恒流充电技术,以减少能量损耗,缩短充电时间。
- 6) 高压脉冲放电装置的安全与接地问题要确有技术保证措施。
- 7) 为了保证操作人员的人身安全,高压脉冲放电装置的控制回路及设备隔离门应设联锁装置。
- 8) 制定必要的操作规程和步骤。

参考文献:

- [1] 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 (Bai Xiangzhong. Magnetoelasticity, Thermal-Magnetoelasticity and Their Applications. Advances in Mechanics, 1996, 26(3): 389 ~ 406 (in Chinese))
- [2] 白象忠, 胡宇达等. 电磁热效应裂纹止裂研究的进展 [J]. 力学进展, 2000, 30(4): 546 ~ 557 (Bai Xiangzhong, Hu Yuda *et al.* Advance of the Study of Crack Prevention by the Electromagnetic Heat Effect. Advances in Mechanics, 2000, 30(4): 546 ~ 557 (in Chinese))
- [3] 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 (Hu Yuda, Bai Xiangzhong. Stress Field Around Crack Tips in a Thin Current-Carrying Plate. Journal of Mechanical Strength, 2002, 24(1): 98 ~ 100 (in Chinese))
- [4] 付宇明, 白象忠等. 电磁热效应止裂效果与电流通路尺寸关系的研究 [J]. 机械强度, 2002, 24(4): 558 ~ 561 (Fu Yuming, Bai Xiangzhong, Xu Hongmin. Research on Relationship of Crack Arresting Effect using Electromagnetic Heat Effect with Dimension of Current Path. Journal of Mechanical Strength, 2002, 24(4): 558 ~ 561 (in Chinese))
- [5] 秦曾衍, 左公宁, 王永荣等. 高压强脉冲放电及应用 [M]. 北京工业大学出版社, 2000 (Qing Zengyan, Zuo Gongning, Wang Yongrong *et al.* The Application of High Voltage and Super-Density Pulse Discharge. Beijing Industry University Press. 2000 (in Chinese))
- [6] 清华大学电力系高电压技术专业. 冲击大电流技术 [M]. 科学出版社, 1978 (High Voltage Speciality, Qinghua University. The Technology of Super-Density Pulse Current. Science Press, 1978 (in Chinese))
- [7] 付宇明, 郑丽娟, 白象忠. T10 钢金属模具中裂纹电磁热止裂的实验研究 [J]. 实验力学, 2004, 19(4): 488 ~ 492 (Fu Yuming, Zheng Lijuan, Bai Xiangzhong. Experimental Research on Crack Arrest in Metal Die using Electromagnetic Heating. Journal of Experimental Mechanical, 2004, 19(4): 488 ~ 492 (in Chinese))

Application of High Voltage Pulse Discharging in Metal Crack Arrest

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

(1. The State Key Laboratory of Nonlinear Continuum Mechanical(LNM), Beijing 100080, China; 2. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhangdao 066004, China; 3. Institute of Civil Engineering and Mechanics, Yanshan University, Qinhangdao 066004, China)

Abstract : How to produce powerful pulse current is a key problem in the crack arrest by electromagnetic heat effect. In this paper, the principle of high pulse discharging was introduced. The relationship among charge voltage, circuit parameter and value of discharge current was analyzed. The discharge equipment was self designed and developed. Tests of crack arrest were executed at the crack tip of the metal die steel through pulse current discharge with the high voltage pulse current generator. The crack tip was melted, welded joints were formed and higher compressive stresses could be produced around the crack tip while the pulse current was switched on. The crack tip was blunted, so the crack was prevented. Because the heating and cooling was super fast while pulse current was switched on the impulse quenching was achieved around the crack tip. The superfine cryptocrystal martensite and fine-gray carbon compound appeared. The intensity, ductility and wearing capacity around the crack tip were promoted. The effective of the current generator is verified by the results of experiments. The present achievement provides a basis of experimental technique for crack arrest in metal dies using electromagnetic heating.

Key words: electromagnetic heat effect; crack arrest; high voltage pulse discharge; equipment development