

含埋藏椭圆型裂纹的构件脉冲放电瞬间的耦合场分析*

ANALYSIS ON THE COUPLED FIELD IN A COMPONENT WITH A THREE COORDINATE EMBEDDING CRACK AT THE MOMENT UNDER THE PULSE CURRENT SWITCHED ON

郑丽娟** 付宇明 白象忠

(燕山大学 机械工程学院, 秦皇岛 066004)

(中国科学院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

ZHENGLiJUAN FU YuMing BAI XiangZhong

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(LNM, Nonlinear Mechanics Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

摘要 采用数值分析的方法,对含三维埋藏椭圆型裂纹的构件放电瞬间的耦合场进行分析。计算脉冲放电瞬间椭圆形裂纹尖端附近的温度场和等效应力场的分布状态;并通过改变模型尺寸的模拟分析影响放电参数的主要因素。计算结果表明,由于电流绕流产生的焦耳热源的作用,裂纹尖端处温度瞬时急剧升高,但沿椭圆形裂纹尖端的温度值并不相同,最大值发生在长轴附近,只要放电电流的强度足够大,可以使椭圆环形裂尖均熔化形成焊口,并围绕环形裂纹尖端附近产生很大的热压应力场,可有效地遏制裂纹的扩展;在相同放电电流强度下,对椭圆裂纹尖端温度影响较大的是裂纹的绝对尺寸和椭圆长短轴的相对尺寸。在研究过程中分成热—电耦合和热—应力耦合两个过程,综合考虑材料非线性、状态变化非线性和几何非线性,结果比较符合实际。

关键词 耦合场分析 椭圆形裂纹 裂纹止裂 电磁热效应

中图分类号 O346.1

Abstract The numerical simulation method is proposed for analyzing the coupled field in a component with a three coordinate embedding crack at the moment when the current is switched on. The distribution of temperature field and equal stress fields are studied around the crack tips in component with ellipse crack when the pulse current is switch on. The main factor effecting to current parameters is analyzing by changing the dimension of calculation models. The numerical calculations show that the temperature of crack tip grows up instantly by Joule heat source processing because of the current flowing over. The temperature is different along the ellipse crack tips, the maximum temperature appears near the long axes. If the current density is enough, the crack tip along the ellipse crack will be melt and the small welded joints can be formed at a small sphere near the crack tips, which decreases the stress concentration and forms a compressive stress area. So, the formation of the main crack source will be prevented and the goal of crack arrest can be reached. The analysis process is composed of the thermal-electrical coupled and thermal-mechanical coupled. The temperature field and stress field analysis results of numerical simulation correspond to the fact.

Key words Coupled fields analysis; Ellipse crack; Crack arrest; Electromagnetic heating effect

Corresponding author: ZHENG LiJUAN, E-mail: zljfc@263.net, Fax: +86-335-8059894

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50275128).

Manuscript received 20040223, in revised form 20040401.

1 引言

裂纹止裂技术是当前工业生产和实际应用中急需解决的问题。对带有裂纹的金属构件通入适当强度的脉冲电流,会在裂纹尖端引起热集中效应,这种热效应使裂纹前缘小范围内在瞬间熔化形成微小的焊口,可

以达到止裂的目的。通过对带有裂纹的载流薄板进行理论分析与实验研究^[1,2]均证实了这一结果。

工程中实际遇到的裂纹绝大多数是三维裂纹,而这些三维裂纹又大多可以简化为椭圆型深埋裂纹、半椭圆型表面裂纹或1/4椭圆型角裂纹^[3],因此对带有椭圆型裂纹的金属构件进行电磁热止裂分析更具有实

* 20040223 收到初稿,20040401 收到修改稿。国家自然科学基金资助项目(50275128)。

** 郑丽娟,女,1971年2月生,黑龙江省肇东市人,汉族。燕山大学机械工程学院讲师,博士研究生,从事裂纹止裂技术的研究,目前在各类刊物发表论文17篇。

际意义。由于放电瞬间裂纹尖端温度梯度变化巨大,材料的特征参数如比热、电阻率、热传导系数等均随温度发生变化,属于材料非线性问题,同时放电瞬间裂纹尖端熔化产生固液相变,属于结构状态变化的非线性问题,构件裂尖附近瞬间几何形状发生了有限的变形属于几何非线性问题,所以它是一个材料非线性、状态变化非线性和几何非线性并存的复杂耦合场问题,通常采用有限元法进行求解。下面以常见的椭圆型裂纹为例,采用数值模拟的方法,通过热、电、应力三场耦合分析裂纹尖端的温度场及热应力场。

2 热—电—应力三场耦合分析方法

热—电—应力耦合分析属于考虑三个物理场之间相互作用的分析。由于脉冲放电时间短暂,三场耦合属于弱耦合,可采用单向顺序耦合方法。

首先是热—电耦合过程,通过电流流过金属构件时电阻随温度变化与通电电流产生的内热源的相互作用体现。计算中采用在每个增量步内首先求解电流生热的瞬态过程,再将由于电流流过生成的热量作为热传导问题分析中的附加内热源,通过热传导求解得到温度场分布,根据特征参数随温度发生变化曲线图,求解该温度下的材料特征参数,作为下一步的电流生热的分析条件,依此类推,可获得达到一定精度的计算结果。

其次是热—应力的耦合分析,将热—电耦合过程中每一载荷步的节点温度作为体载荷施加到结构应力分析中,由于裂纹尖端温度变化剧烈,当超过金属熔点时发生固、液相变,可采用单元死活技术,以熔点温度作为单元死活的门槛值,来给这种状态变化的非线性问题建模。在不同的物理场中,单元和节点的编号在数据库和结果文件中必须是相同的,不同的是实常数和单元类型。

求解器采用牛顿—拉普森平衡迭代方法(Newton-Raphson法, NR法)来近似求解非线性问题,它迫使在每一个载荷增量的末端解达到平衡收敛(在某个容限范围内)。在每次求解前, NR法估算出残差矢量,然后使用非平衡载荷进行线性求解,且核查收敛性。如果不满足收敛准则,重新估算非平衡载荷,修改刚度矩阵,获得新解。持续这种迭代过程直到问题收敛。

3 电磁热效应裂纹止裂的数值模拟

3.1 电磁热效应裂纹止裂的数值模拟模型

模型所用材料为 12CrMoV 冷作模具钢,常温下的物理性能为,密度 $\rho = 7\ 800\ \text{kg/m}^3$,比热容 $c = 461\ \text{J/(kg}\cdot\text{)}^{\circ}\text{C}$,导热系数 $\lambda = 45.64\ \text{W/(m}\cdot\text{)}^{\circ}\text{C}$,电阻率为 $0.19 \times 10^{-6}\ \text{m}^2/\text{m}$,弹性模量 $E = 210 \times 10^9\ \text{Pa}$ 。线胀

系数如表 1 所示^[4]。

表 1 12CrMoV 冷作模具钢线胀系数随温度变化值

Tab. 1 The linear expansion coefficient of cold work die steel 12CrMoV changing with temperature

温度 Temperature/	20 ~ 100	~ 200	~ 400	~ 600	~ 800
线胀系数 Coefficient of linear expansion $\times 10^6$	10.8	11.8	12.8	13.6	13.8

模型形状如图 1 所示,尺寸如表 2 所示,其中 $2b$ 为构件 x 向尺寸, $2W$ 为构件 y 向尺寸, $2h$ 为构件 z 向尺寸, $2a$ 为椭圆短轴长度, $2c$ 为椭圆长轴长度, $2h_0$ 为椭圆裂纹 z 向深度,此模型中 $2h_0 = 1\ \text{mm}$ 。

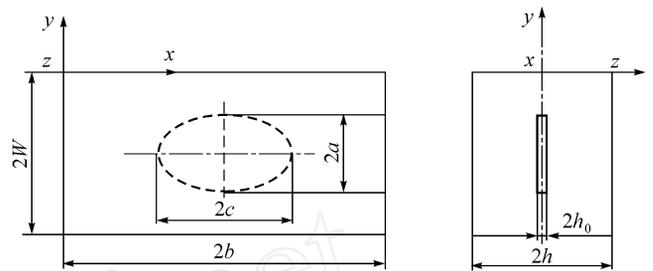


图 1 含深埋椭圆型裂纹构件模型

Fig. 1 The component model with high embedding ellipse crack

表 2 模型尺寸

Tab. 2 Model size mm

序号 Serial	$2W$	$2h$	$2b$	$2a$	$2c$
1	100	50	160	20	60
2	100	50	160	30	60
3	100	50	160	40	60
4	100	25	160	40	60
5	150	50	160	40	60

3.2 数值模拟方程式

由于放电时间短暂,可忽略试件向周围环境的散热问题,仅考虑试件内的热传导问题与热应力问题。热传导方程的具体表达式为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中 ρ 为材料密度, c 为材料比热, t 为时间, λ 为材料的导热系数, T 为温度, Q 为内热源,其值为 $Q = i^2(\cdot)R$, R 为放电回路电阻, $i(\cdot)$ 为 t 时刻电流。边界的绝热条件为, $q|_n = 0$, n 为边界, q 为热流密度。

热应力方程根据热弹性理论建立,其平衡方程和几何方程与无温度改变的一般弹性理论的方程完全相同,物理方程为

$$\begin{cases} x = e + 2G_x - T \\ y = e + 2G_y - T \\ z = e + 2G_z - T \\ x_y = G_{x_y} \\ x_z = G_{x_z} \\ y_z = G_{y_z} \end{cases} \quad (2)$$

式中 e 、 G 为拉梅系数, T 为热应力系数, 它们的值分别为

$$\begin{cases} e = \frac{E\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \\ G = \frac{E}{2(1+\mu)} \\ = \frac{E}{1-2\mu} \end{cases} \quad (3)$$

其中 E 为弹性模量, μ 为泊松比, α 为线胀系数。

3.3 有限单元网格的划分

采用 SolidWork 建立实体模型, 以 IGES 格式保存文件。在利用 IGES 接口输入 ANSYS 模型时, 为避免失去椭圆裂纹小面, 强制使用拓扑和几何修复工具, 引入框架模型后, 再采用自底向上的方式重新建模。在求解温度场时, 选择耦合热—电六面体单元 SOLID69, 设定网格划分控制, 控制单元的尺寸。在求解应力场时, 首先转换分析场的类型, 然后将单元类型转换为耦合热—应力单元 SOLID45, 并填入相应的物理性能参数。划分有限单元网格模型如图 2 所示, 内含埋藏椭圆裂纹。

4 数值模拟结果及其讨论

4.1 裂纹尖端附近的温度场

模型 3 受到垂直裂纹面密度为 $J = 1 \times 10^{11} \text{ A/m}^2$ 的脉冲电流作用, 由于裂纹面的存在, 电流由中心向椭圆形边界呈放射状绕流, 图 3 为放电瞬间的 XY 剖面温度场云纹图。由图中可以看出, 由于电流的绕流作用, 热量主要集中在椭圆形裂纹尖端附近, 裂纹尖端升温很大, 达到 1600 以上, 超过试件的熔点。但是沿着椭圆形裂纹尖端各点温度是不同的, 最高温度点发生在椭圆长半轴附近。整个温度场由于试件的结构对称

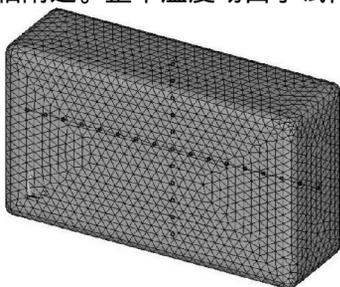


图 2 有限单元网格模型
Fig. 2 The model of finite element mesh

性而呈对称性分布。

图 4 为沿 x 向、 y 向路径节点温度曲线, x 向、 y 向路径如图 2 中交叉线所示。由图可见, 无论是 x 向还是 y 向, 温度场的分布都是对称的, 而且可以看出温度的变化过程。本研究的埋藏裂纹是椭圆形的, 所以无论 x 向、 y 向均有 2 个裂尖, 短轴尖端温度略低于长轴尖端。裂纹裂缝处的温度最低, 接近室温。

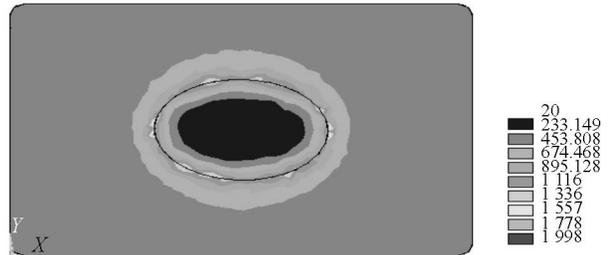
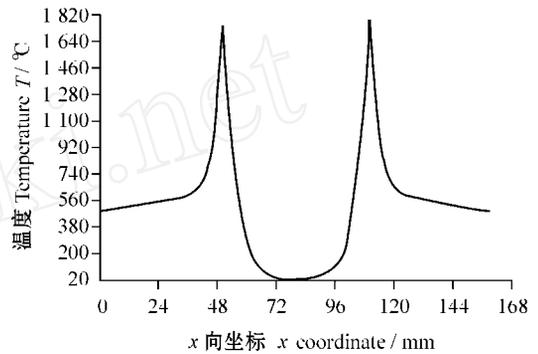


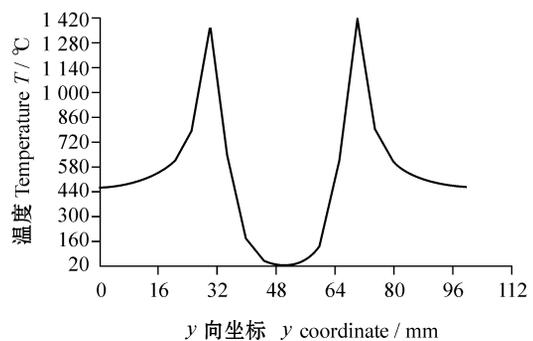
图 3 xy 剖面温度场云纹图

Fig. 3 Temperature contour bands in xy plate



(a) x 向路径节点温度曲线

(a) Temperature curve of nodes along x direction path



(b) y 向路径节点温度曲线

(b) Temperature curve of nodes along y direction path

图 4 沿 x 向、 y 向路径节点温度曲线

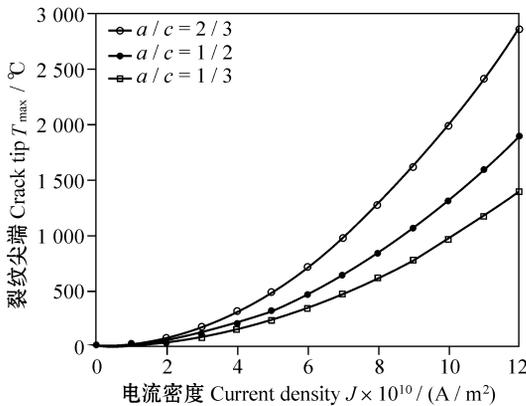
Fig. 4 Temperature curve of node along x 、 y direction path

4.2 影响放电参数的因素

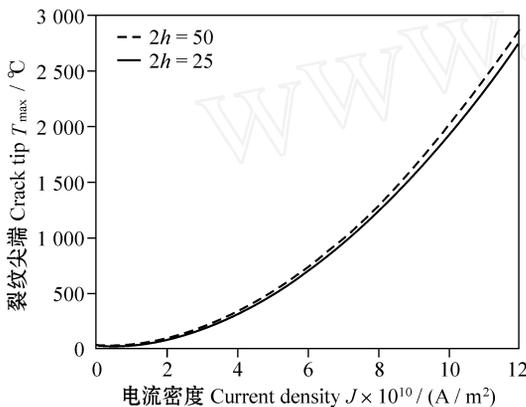
在使用强脉冲电流放电止裂中, 如果脉冲电流过小, 很可能无法使裂纹尖端金属熔化, 达不到止裂目的。如果电流过大, 会使裂尖处过热, 使得熔化区变大, 甚至形成大的熔洞, 使试件的疲劳强度下降。研究表明, 使裂尖处曲率半径增加 2~3 个数量级即可达到很好的止裂效果^[3]。可以通过调整超强度脉冲电流发生装置的电压和改变充电电容的容量, 使试件获得不

同的电流密度。为研究影响放电参数的因素,分别对不同尺寸的模型 1~5(如表 2 所示)进行数值模拟。图 5 的结果为裂纹或模型尺寸变化时,通入不同的脉冲电流,裂纹尖端最高温度值比较图。分析可知:

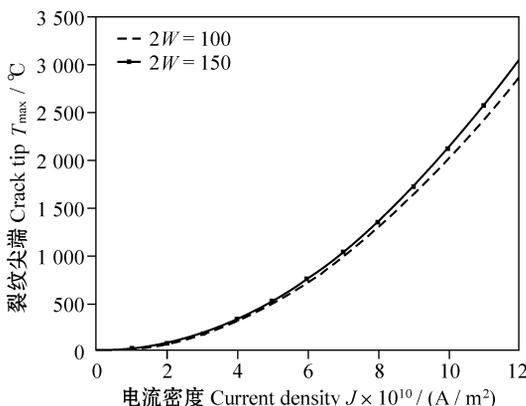
(1) 图 5a 为模型 1、2、3 通入不同的脉冲电流,裂纹尖端最高温度值比较图。三种模型的椭圆形裂纹虽然具有相同的长半轴,但通入相同的脉冲电流时,裂尖温度并不相同。当长轴相同时,最高温度值与长短半轴的比值 (a/c) 有关,它随 a/c 的增大而增高。当 a/c 的值较大时,必须通入较高电流密度的电流才可



(a) Influence curve of a/c to discharge parameter



(b) Influence curve of $2h$ to discharge parameter



(c) Influence curve of $2W$ to discharge parameter

图 5 结构尺寸对放电参数的影响关系曲线

Fig. 5 Influence curve of structural dimension to discharge parameter

以使裂尖锐化。

(2) 图 5b 为模型 3、4 通入不同的脉冲电流时,裂纹尖端最高温度值比较图。两种模型的 z 向尺寸相差一倍,而裂尖温度变化很小,可见 z 向尺寸对放电参数影响较小。

(3) 图 5c 模型 3、5 通入不同的脉冲电流时,裂纹尖端最高温度值比较图。两种模型的 y 向尺寸不同,随着 y 的增大,裂纹尖端的温度略有提高。主要是由于模拟模型采用表面均匀加载, y 的增大导致加载面积增大的原因。

4.3 裂纹尖端附近的应力场

图 6 为放电瞬间的 xy 剖面的等效应力场云纹

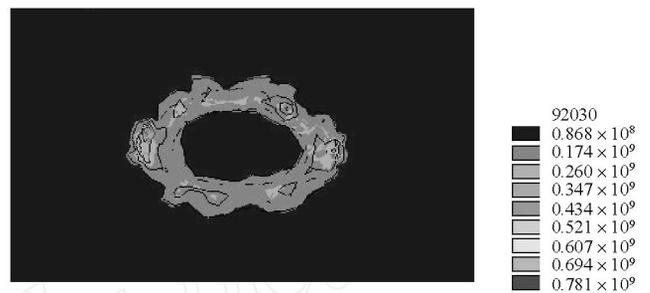
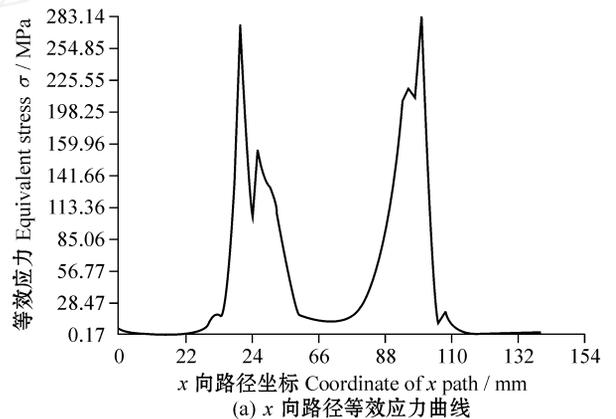
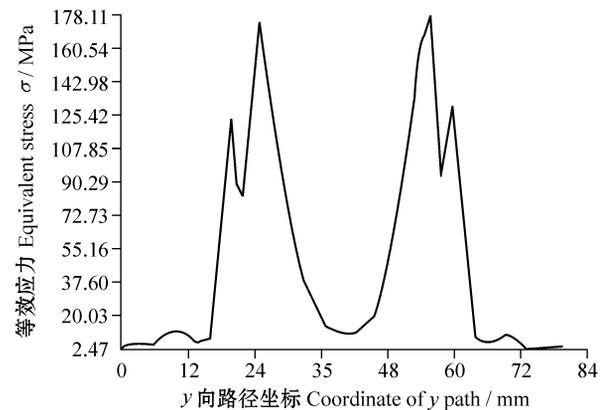


图 6 xy 剖面的等效应力场云纹

Fig. 6 The equivalent stress contour bands in xy cut plate



(a) The equivalent stress curve in x path



(b) The equivalent stress curve in y path

图 7 沿 x 向、 y 向等效应力变化曲线图

Fig. 7 The curve of equivalent stress along x, y direction

图,由图可见,环绕椭圆形裂纹尖端处形成较大的热压应力场,可以阻止裂纹的进一步扩展,而远离裂纹尖端处应力较小。

图 7 为等效应力场在 $z = 0.5 \text{ mm}$ 的平面上,沿 x 向、 y 向的应力变化曲线图。由图中可以看出应力变化趋势,裂纹长短半轴尖端处应力较大。

5 结论

1) 数值模拟结果证实,向带有埋藏椭圆形裂纹的金属构件中通入强脉冲电流的瞬间,裂纹尖端实现了超快速加热,但沿椭圆形裂纹尖端的温度值并不相同,最大值发生在长轴附近,只要放电电流的强度足够大,可以使椭圆环裂尖均熔化形成焊口。围绕环形裂纹尖端附近产生了很大的热压应力场,起到防止裂纹扩展的目的。

2) 通过对不同模型进行放电止裂模拟发现,在相同放电电流强度下,对椭圆裂纹尖端温度影响较大的是裂纹的绝对尺寸和椭圆长短轴的相对尺寸。

3) 在研究过程中分成热—电耦合和热—应力耦合两个过程,实现对带有裂纹体脉冲放电瞬间这一非线性问题的模拟,计算结果对电热裂纹止裂技术有重要

的指导意义。

References

- 1 FU YuMing, BAI XiangZhong, XU ZhiQiang. Numerical simulation of coupled field in a current-carrying plate with a central crack. *Acta Mechanica Solid Sinica*, 2002, 23(3): 306 ~ 311 (In Chinese) (付宇明, 白象忠, 许志强. 带有中间裂纹载流薄板放电瞬间耦合场的数值模拟. *固体力学学报*, 2002, 23(3): 306 ~ 311).
- 2 ZHENGLiJuan, FU YuMing, BAI XiangZhong, TIAN ZhenGuo. Numerical simulation on electro-thermal stress around crack tip in metal thin plate with crack. *Journal of Mechanical Engineering*, 2002, 38(3): 90 ~ 93 (In Chinese) (郑丽娟, 付宇明, 白象忠, 田振国. 带有裂纹的金属薄板构件裂尖处电热应力的数值分析. *机械工程学报*, 2002, 38(3): 90 ~ 93).
- 3 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) (付宇明, 白象忠, 胥红敏. 电磁热效应止裂效果与电流通路尺寸关系的研究. *机械强度*, 2002, 24(4): 558 ~ 561).
- 4 ZHANG Hang. Solution of stress intensity factor in Fracture mechanics. Beijing: Defense Industry Press, 1994. 186 ~ 187 (In Chinese) (张行. 断裂力学中应力强度因子的解法. 北京: 国防工业出版社, 1994. 186 ~ 187).
- 5 XU Jin, CHEN ZaiZhi. Application manual of die materials. Beijing: Mechanical Industry Press, 2001. 178 ~ 180 (In Chinese) (徐进, 陈再枝. 模具材料应用手册. 北京: 机械工业出版社, 2001. 178 ~ 180).