

# 铁磁构件应力集中的有限元分析和磁记忆检测

Finite Element Analysis and Magnetic Memory  
Testing of Ferromagnetism Items

宋 凯<sup>1</sup>, 唐继红<sup>1</sup>, 钟万里<sup>2</sup>, 刘伟成<sup>3</sup>, 任吉林<sup>1</sup> (1 南昌航空工业学院, 南昌 330034;  
2 广东省电力试验研究院, 广州 510600; 3 江西省锅炉压力容器检验所, 南昌 330029)  
SONG Kai<sup>1</sup>, TANG Ji-hong<sup>1</sup>, ZHONG Wan-li<sup>2</sup>, LIU Wei-cheng<sup>3</sup>, REN Ji-lin<sup>1</sup>  
(1 Nanchang Institute of Aeronautical Technology, Nanchang 330034, China;  
2 Guangdong Power Test and Research Institute, Guangzhou 510600, China;  
3 Inspection Institute of Boiler and Pressure Vessel, Nanchang 330029, China)

**摘要:**应用 ANSYS 软件对平板中心裂纹构件的应力分布进行有限元分析, 不仅得出了符合积分理论解的精度较高的分析结果, 并且通过对加载构件表面漏磁场的测量, 验证了应力集中与磁记忆效应之间的规律, 进一步探讨了磁记忆检测在铁磁构件损伤预诊断中应用的可行性。

**关键词:**磁记忆检测; 有限元分析; 应力集中

**中图分类号:** TB972 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2004) 04-0040-03

**Abstract:** Stress distribution of flat plate, which has a crack in center, was analyzed in terms of finite element method by ANSYS software. The results agreed with theoretical calculation of integration, and some regulations between stress concentration and magnetic memory effect are proved through measuring magnetic leakage field of flat plate. The applicability of magnetic memory testing in pre-diagnosis of ferromagnetism items was discussed.

**Key words:** magnetic memory testing; finite element analysis; stress concentration

机械金属构件在制造和运行过程中常会因各种微观或宏观的应力作用而产生应力集中。在应力集中区域, 构件局部所承受的应力常常高达名义应力的数倍或数十倍, 极易发生位错滑移变形, 导致蠕变、疲劳、腐蚀的加速, 甚至发展成宏观裂纹等, 从而引发构件的最终破坏。由此可以看出, 构件的应力集中区域是构件承力的薄弱环节, 因此若能及时准确探测到金属构件的应力集中区域, 则能为金属构件的结构强度和可靠性评价提供一个重要的依据。

本研究应用 ANSYS 软件对平板中心裂纹构件的应力状态进行有限元分析, 不仅得出了符合积分理论解的精度较高的分析结果, 并且通过对加载构件表面漏磁场的测量, 验证了应力集中与磁记忆效应之间的规律。可以预计, 这种方法随着研究的不断深入, 将有着良好的发展和应用前景。

## 1 磁记忆检测技术原理

通常的磁性材料是多晶体, 具有复杂的磁畴结构。在同一晶粒内, 磁畴的磁化方向有一定关系; 而对于大量晶粒而言, 由于晶粒的方向是杂乱的, 磁畴的磁化方向并没有一定的关系, 从而构件对外显示出

各向同性。对铁磁构件施加载荷, 若材料为各向同性, 在立方晶系中, 应力能的表达可简化为<sup>[1]</sup>

$$U_{\sigma} = -\frac{3}{2}\lambda_s\sigma\cos^2\theta \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为应力;  $\lambda_s$  为磁致伸缩系数;  $\theta$  为应力方向与磁化方向之间的夹角。

弹性应力作用在铁磁体时, 使构件中不连续区聚集相当高的应力能, 产生很强的应力集中, 为了使铁磁构件内的总的自由能趋于最小, 在磁机械效应的作用下必将引起构件内部的磁畴作畴壁的位移甚至不可逆的重新取向排列, 在动态载荷消除之后, 这种磁畴组织的重新取向排列也会保留下来, 并在应力集中区形成类似缺陷的漏磁场分布形式, 即磁场的切向分量  $H_p(x)$  为最大值, 而法向分量  $H_p(y)$  的发生改变, 且具有过零值点<sup>[2]</sup>。磁记忆检测技术即通过  $H_p(y)$  的测量结果反映构件的应力集中情况。

## 2 构件的有限元计算

现选取以 45<sup>#</sup> 钢为材料的平板试件为例, 在平板中间加工人工缺陷模拟裂纹。试件的宽度为  $2b = 80\text{mm}$ , 长度  $2L = 160\text{mm}$ , 厚度为  $6\text{mm}$ , 穿透裂纹

为  $2a = 10\text{mm}$ 。材料为各向同性, 弹性模量  $E = 2.09105 \text{ MPa}$ , 泊松比  $\nu = 0.269$ , 材料的屈服应力  $\sigma_s = 355\text{MPa}$ , 剪切弹性模量为  $8.2 \times 10^4 \text{ MPa}$ 。塑性材料模型采用经典的双线性随动强化。试验时, 施加的载荷逐步递增, 依次为  $0.2\sigma_s, 0.4\sigma_s, 0.6\sigma_s, 0.8\sigma_s, 1.0\sigma_s$  和  $1.2\sigma_s$ , 并假设为平面应力状态。在计算时, 为简化计算模型, 只取模型的  $1/4$  部分进行分析。试件在  $X$ - $Y$  平面, 裂纹平行于  $X$  轴。划分网格后, 单元共为 7089 个, 节点 14474 个。根据 ANSYS 软件的计算结果, 可获得施加各载荷的试件应力等值线图。以  $0.2\sigma_s$  为例, 如图 1 所示, 在裂纹附近产生了明显的应力集中。

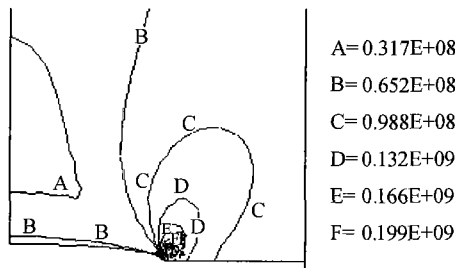


图 1 试件的应力等值线图  
Fig. 1 Isolines of stress distribution of specimen

### 3 断裂参量的有限元计算及理论验证

应力强度因子  $K_I$  表征 I 型裂纹尖端应力场的强弱程度, 与应力成正比, 并依赖于裂纹的形状与尺寸。应用有限元法可求出  $K_I$  的数值解。值得注意的是, 应力强度因子仅适用于线弹性和小范围屈服条件下, 在大范围屈服阶段它已失去其表征的意义。

$J$  积分避开了直接计算在裂纹尖端附近的弹塑性应力、应变场, 而用  $J$  积分作为表示裂纹尖端应变集中特征的平均参量。假设裂纹位于  $X$ - $Y$  平面内, 且  $X$  轴平行于裂纹, 如图 2 所示。 $J$  积分的定义式为<sup>[3,4]</sup>

$$J = \int_{\Gamma} W dy - \int_{\Gamma} (t_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + t_y \frac{\partial u_y}{\partial y}) ds \quad (2)$$

式中:  $\Gamma$ —包围裂纹尖端的任一曲线, 起始于裂纹下表面, 逆时针方向围绕裂纹尖端而止于裂纹上表面;  $W$ —回路  $\Gamma$  上任一点  $(X, Y)$  的应变能密度;  $t_x$ —回路  $\Gamma$  上任一点  $X$  方向上应力分量;  $t_y$ —回路  $\Gamma$  上任一点  $Y$  方向上应力分量;  $u$ —回路  $\Gamma$  上任一点的位移矢量;  $ds$ —回路  $\Gamma$  上的弧元;  $n$ —回路  $\Gamma$  上的外法线方向的单位矢量。

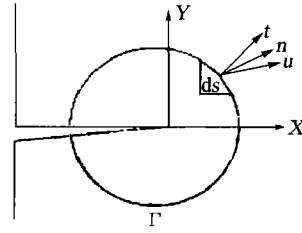


图 2 裂纹尖端  $J$  积分的回路  
Fig. 2  $J$ -integral contour path surrounding a crack-tip

以上回路所定义的  $J$  积分, 是比较严密的裂尖场参量, 该参量在线弹性和大屈服状态都可以使用。编写宏命令流, 便可求出  $J$  积分值。

当载荷为  $0.2\sigma_s$  时, 试件处于线弹性范围。此时, 若计算应力强度因子理论解时, 可采用估算公式

$$K_I = F \sigma \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

式中:  $\sigma$  为远端应力,  $F$  为修正系数, 取对 Isida 公式的最小二乘法拟合  $F = 1 + 0.128 \frac{a}{b} - 0.288 (\frac{a}{b})^2 + 1.525 (\frac{a}{b})^3 = 1.0145$

理论解  $K_I = 285.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$

若应用 ANSYS 软件可计算应力强度因子<sup>[5]</sup>, 可得  $K_I = 283.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$  可以看出, ANSYS 软件计算结果与理论解的相对误差仅为 0.77%。

当载荷为  $1.2\sigma_s$  时, 裂纹尖端附近已发生较大屈服, 并产生了较大变形。 $K_I$  已不满足其使用条件, 只能使用  $J$  积分值进行验证, 应用 ANSYS 软件求得  $J$  积分值为  $J = 23.56 \text{ MPa/m}$

为获得  $J$  积分的理论解, 采用美国电力研究院的  $J$  积分估算公式

$$J = f_1(a_e) \frac{P^2}{E} + \alpha \sigma_s \epsilon_s a (\frac{c}{b}) h_1(\frac{a}{b}, n) (\frac{P}{P_0})^{n+1} \quad (4)$$

式中,  $a_e$  为等效裂纹长度;  $P$  是单位厚板上的广义载荷;  $P_0$  是单位厚板上的极限载荷;  $\alpha$  和  $n$  是材料的幂硬系数和指数;  $\sigma_s, \epsilon_s$  是材料屈服应力和屈服应变;  $(c/b)h_1(a/b, n)$  为标定函数。代入各个参数数值, 可计算  $J$  积分理论解的估算值为  $J = 22.76 \text{ MPa/m}$  从而看出, ANSYS 软件计算结果与估算值误差仅为 3.5%。

### 4 磁记忆检测结果及有限元结果分析

为探索加载构件的应力状态与其产生的漏磁场之间的规律, 我们进行了磁记忆检测试验。试验时, 载荷与有限元分析载荷档一致, 在每个载荷档加载完毕后, 对应力集中部位的漏磁场垂直分量  $H_p(y)$  进行测

量,并记录构件各点漏磁场大小。经大量的试验,发现以下规律:

(1) 以载荷  $0.2\sigma_s$  结果为例,如图 1 所示,观察应力等值线图,其最大应力值处在裂纹尖端,整个构件处于线弹性范围,应力等值线基本上呈现蝶形。磁记忆检测信号也大致是沿这一走向,零值线基本上在靠近 45 度或有一定偏离角度的区域,如图 3 试件上白线所示。根据断裂力学理论分析,材料在受到拉力作用时,将同时受到拉力和剪切力作用,构件最终受力是其叠加结果。

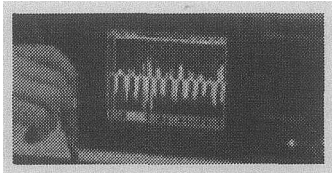


图 3 磁记忆检测的应力集中线  
Fig. 3 Stress concentration lines of magnetic memory testing

(2) 按载荷档逐步加载,磁记忆信号的幅值大小有变化,在  $0 \sim 0.8\sigma_s$  阶段信号值逐渐增大, $0.8 \sim 1.2\sigma_s$  阶段信号逐步变小,而在  $1.2\sigma_s$  以后,信号又逐渐变大,当材料接近屈服极限时信号几乎消失,如图 4 所示。产生上述信号变化的主要原因是,构件加载第一阶段,应力逐渐加大,应力能随之增加,构件应力集中处的磁化状态也逐渐加剧,但此时构件仍然处于线弹性或小范围屈服状态。如图 1 所示,当载荷为  $0.2\sigma_s$  时,应力等值线最大应力值已达 300 MPa,在裂尖处有屈服,但屈服的范围非常小。在第二阶段,随着继续加载,构件发生大范围屈服,产生塑性变形;同时,构件发生应变强化过程,阻止继续变形,并使屈服极限提高。发生塑性变形后,塑性区能量有所释放,转化为磁弹性能的能量减小,因而测得的磁记忆信号变小。再继续加载,在裂尖的局部区域中出现弹性卸载和非比例塑性变形。裂纹处于稳态扩展或非稳态扩展与材料的阻力曲线和外加载荷有关,但因剪应力的作用都会从裂纹尖端到板的边缘约成 45 度方向向外产生滑移线场,从而使磁记忆测量信号增强。卸载后,塑性变形已不可恢复,构件存在较大残余应力,此时

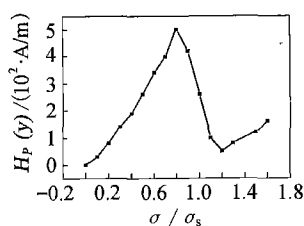


图 4 应力对磁记忆信号的影响  
Fig. 4 The effect of stress on magnetic memory signal

存在较大漏磁场,仪器测量的信号十分明显。

(3) 若设定每个载荷步均必须显示指定数值范围的等值线,通过比较施加不同载荷时某应力等值线位置的变化来反映出应力集中线的变化情况。图 5 a, b 为分别施加  $0.4\sigma_s$ ,  $0.6\sigma_s$  载荷时的不同应力等值线位置示意图,在图中观察 200MPa 和 300MPa 等值线的位置。可以发现,随载荷的增加(1~4 载荷逐渐增加),该应力等值线由开始在裂纹延伸方向向垂直裂纹方向移动,这和磁记忆检测得到的应力集中线的变化趋势是一致的,如图 6 所示。可见,在加载后,构件产生了应力集中,并且,随载荷的增加,应力集中线会逐渐偏移。该线的位置与外加载荷有很大关系。因此磁记忆检测测得的应力集中线不一定紧靠于裂纹尖端,可能会有一定的位移,这可能与裂纹尖端的能量释放有关。

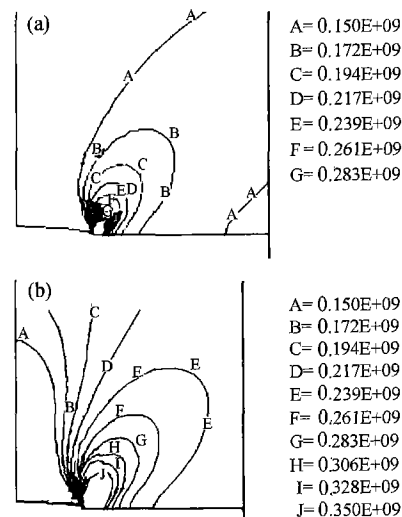


图 5 载荷对有限元结果的影响  
Fig. 5 The effect of load on finite element analysis  
(a)  $0.4\sigma_s$ ; (b)  $0.6\sigma_s$

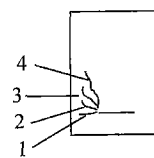


图 6 载荷对磁记忆检测结果的影响  
Fig. 6 The effect of load on magnetic memory testing

## 5 结论

通过对铁磁构件的有限元分析,获得了裂纹尖端的应力场,并应用应力强度因子和  $J$  积分值对弹性和塑性变形的情况进行验证,结果表明,有限元解和理论解非常相近。同时应用磁记忆检测仪对加载试验过

(下转第 48 页)

快,树脂与纤维接触时间短,流动树脂未能与纤维充分地接触、浸渍,从而导致浸透性差,因此,纤维运行速度不宜太快,在保证浸透纤维的前提下,才能增加纤维运行速度,提高生产效率。

### 3 大丝束预浸料典型力学性能

用所制的单位面积纤维质量为  $120\text{g}/\text{m}^2 \pm 5\text{g}/\text{m}^2$ 、树脂含量为  $38\% \pm 3\%$  的 60K 大丝束碳纤维预浸料通过模压法制备复合材料层压板,固化温度为  $120^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ,固化时间为 1.5h,层压板的纤维体积含量为  $58\% \sim 62\%$ 。其主要力学性能典型值见表 4。

表 4 主要力学性能的典型值  
Table 4 Typical mechanical properties

Flexure strength /MPa	Flexure modulus /GPa	Interlaminar shear strength /MPa
1700	117	88.7

### 4 结论

严格控制预浸温度、纤维张力、预浸压力和运行速度等因素是保证大丝束碳纤维充分展开和浸润的技术关键,从而保证预浸料的外观质量。

#### 参考文献

- [1] 赵稼祥. 大丝束碳纤维的进展 [J]. 高科技纤维与应用, 1999, (24) 6: 32—40.
- [2] 赵稼祥. 美国卓尔泰克公司碳纤维的进展 [J]. 高科技纤维与应用, 2001, 5 (26): 7—11.

收稿日期: 2003-07-28; 修订日期: 2003-08-18

作者简介: 刘宝锋 (1967-), 男, 高级工程师, 主要从事复合材料预浸料及树脂基体的研究, 联系地址: 北京 81 信箱 12 分箱 (100095)。

(上接第 33 页)

- tion kinetics on the high Nb region of the Nb-Si system [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1991, 25 (1): 237—242.
- [5] Mendiratta M G, Dimiduk D M. Strength and toughness of a Nb/Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> composite [J]. Metall Trans A, 1993, 24: 501—504.
- [6] Jackson M R, Bewlay B P, Rowe R G. High-temperature refractory metal- intermetallic composites [J]. JOM, 1996, 48: 39—44.
- [7] Ashby M F, Blunt F J, Bannister M. Flow characteristics of highly constrained metal wires [J]. Acta Metall, 1989, 7: 1847—1857.
- [8] Kim W Y, Tanaka H, Hanada S. Microstructure and high temperature strength at 1773K of Nb<sub>ss</sub>/Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> composites alloyed with molybdenum [J]. Intermetallics, 2002, 10 (6): 625—634.
- [9] Kim W Y, Tanaka H, Kasama A. Microstructure and room temperature deformation of Nb<sub>ss</sub>/Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> in situ composites alloyed with Mo [J]. Intermetallics, 2001, 9 (6): 521—527.
- [10] Yi T, Hisao T, Ma C L. Solid-solution strengthening and high-temperature compressive strength of Nb-X alloys (X=Ta, V, Mo and W) [J]. Journal of the Japan Institute of Metals, 2000, 64 (7): 559—565.
- [11] Peters B C and Hendrickson A A. Solid solution strengthening Nb-Ta and Nb-Mo alloy single crystals [J]. Met Trans. 1970, 1 (8): 2271—2280.
- [12] Kim W Y, Tanaka H, Kasama A, Hanada S. Microstructure and room temperature fracture toughness of Nb/ Nb<sub>5</sub>Si<sub>3</sub> in situ composites [J]. Intermetallics, 2001, 9 (9): 827—834.
- [13] 曲士昱, 王荣明, 韩雅芳. 航空材料学报, 2001, 21 (3): 9—12.
- [14] Schlesinger M E, Okamoto H, Gokhale A B. The Nb-Si (Niobium-Silicon) system [J]. J Phase Equil, 1993, 14 (4): 502—509.
- [15] Gokhale A B and Abbaschian G J. The Mo-Si (Molybdenum-Silicon) system [J]. J Phase Equil, 1991, 12 (4): 493—498.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50131030)

收稿日期: 2003-11-28; 修订日期: 2003-12-18

作者简介: 李伟 (1977-), 男, 博士生, 联系地址: 上海交通大学材料学院 (200030)。

\*\*\*\*\*

(上接第 42 页)

程中的铁磁构件进行测量,对照有限元分析结果,得到了应力集中与磁记忆效应之间的某些规律,对进一步探讨磁记忆检测机理的研究和推广应用有很好的参考价值。

#### 参考文献

- [1] 任吉林,等. 金属磁记忆检测技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [2] 任吉林,等. 电站铁磁构件的磁记忆检测 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24 (5): 470—476.
- [3] 高庆. 工程断裂力学 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1986.

- [4] 刘金依. 裂纹深度和材料特性对断裂参数的影响 [J]. 煤矿机械, 2002 (1): 26—28.
- [5] 龚曙光. ANSYS 工程应用实例解析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [6] 高春法,等. 磁记忆检测在压力容器检验中的应用 [J]. 无损检测, 2003, 25 (5): 247—249.

基金项目: 航空科学基金资助课题 (03G56001); 广东省科委工业攻关项目 (03005); 国家质监总局青年科技基金 (Q01-10)

收稿日期: 2004-01-28; 修订日期: 2004-03-18

作者简介: 宋凯 (1975-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电磁无损检测技术研究, 联系地址: 南昌航空工业学院测控系任吉林教授转宋凯 (330034)。