

# 18CrNi4A 钢力-磁效应的 ANSYS 模拟

Simulation of Stress-magnetization Effect on 18CrNi4A Steel by ANSYS

任吉林, 舒铭航, 伍家驹, 宋 凯, 陈 曦, 陈 晨

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063)

REN Jī-lin, SHU Míng-hang, WU Jiā-jū, SONG Kai, CHEN Xi, CHEN Chen

(Key Laboratory of Non Destructive Test, Ministry of Education,

Nanchang Hang Kong University, Nanchang 330063, China)

**摘要:** 采用大型有限元分析软件 ANSYS 建立 18CrNi4A 试样及其周围空气层的有限元模型, 对其进行地磁场中拉伸载荷下的力-磁效应有限元模拟, 得出试样应力分布图以及试样表面切向和法向漏磁场分布结果; 磁场下应力集中对磁记忆信号的影响进行分析; 最后, 将模拟结果与实际试验结果进行对比, 得出分析结果, 为磁记忆检测技术的机理和试验的深入研究提供依据。

**关键词:** 有限元法; 力-磁效应; 磁记忆信号; 拉伸载荷; 应力集中

**中图分类号:** V250.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2009)11-0040-05

**Abstract:** To analysis the stress-magnetization effect on 18CrNi4A steel specimen under the geomagnetic field, the mode of the specimen and the air around it was constructed with the help of ANSYS, famous software of Finite Element Analysis (FEA). The stress and magnetic flux leakage distribution of the mode was given. The influences of stress concentration under the geomagnetic field on magnetic memory signal were discussed. Lastly, through the contrast analysis between finite element result and experimental phenomena, the summing-up was given, providing the gist for the deepgoing study of magnetic memory testing theory and experiment.

**Key words:** finite element method; stress-magnetization effect; magnetic memory signal; axial tensile load; stress concentration

磁记忆检测技术因具有能及时发现构件上的应力集中部位, 操作简单, 不需要对构件表面作特殊清理, 便于现场使用等优点, 作为一种新的无损检测技术得到了广泛的关注<sup>[1-4]</sup>。该方法基于铁磁构件的磁机械效应和磁弹性效应原理, 利用构件在工作载荷和地磁场的作用下其内部会发生磁畴组织定向和不可逆的重新取向, 在应力集中区形成漏磁场, 通过检测该漏磁场, 并结合被检构件的实际运行条件来确定构件表面或近表面的以应力集中为主要特征的早期损伤部位<sup>[1]</sup>。当前对该项技术的研究主要集中在以宏观有效性试验、微观机理试验为基础来进行检测机理的理论分析及缺陷信号的处理与评定等方面, 而在应用数值模拟方法对检测机理的理论分析方面的研究极少。如美国爱荷华州大学的 Ivanov P. A.<sup>[5]</sup> 等人曾应用 ANSYS 有限元软件模拟铁磁性管道在球形压强载荷下产生残余应力和大内凹形变后管件表面附近漏磁通分布, 模拟结果与实际结果基本相符。基于此, 本工作以应力集中为出发点, 从铁磁材料的力-磁效应原理出

发, 基于材料内部的能量平衡, 依据“能量最小原理”, 利用外应力引起的应力集中会导致材料磁特性变化的规律, 对应力集中区域铁磁材料的属性进行赋值, 模拟地磁场和外应力作用的加载条件, 并对地磁场条件下因试样本身几何因素引起的漏磁场进行屏蔽, 对 18CrNi4A 钢进行力-磁效应有限元模拟, 得出应力集中处试样表面空气层中磁记忆信号分布规律, 并对其作了机理分析, 对开展该项技术的深入研究和应用有很好的借鉴。

## 1 三维电磁场有限元分析原理

在电磁场这种特殊的物质形态中, Maxwell 方程组描述了电磁场的宏观特性, 是支配所有宏观电磁现象的一组基本方程, 对于时谐场, 可描述为:

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

$\nabla \cdot D = \rho$  (3)

$\nabla \cdot B = 0$  (4)

式中:  $H$  为磁场强度;  $B$  为磁感应强度;  $J$  为传导电流密度;  $\frac{\partial D}{\partial t}$  为位移电流密度;  $\rho$  为自由电荷体密度。在三维电磁场中, 通常  $J$  和  $B$  都各有三个分量, 直接用  $J$ ,  $B$  求解需 6 个未知数; 采用矢量磁位时, 须考虑各分量能否消除的问题; 若选用位函数及其组合作为未知函数, 为了获得唯一的解或建立定解问题的数学模型, 须对位函数作出进一步的规范<sup>[6]</sup>。

通常情况下, 在模型中要考虑边界条件的变化, 将不同媒质分界面上的边界条件作为每种媒质区域的边界条件引入数学模型。因此, 对于三维电磁场的有限元分析, 须对求解场域进行剖分, 然后进行数值分析。

同时, 要得到各个节点上待求变量的集合(即三维有限元法的解), 在单元内部任意一点处待求函数值要用单元节点处变量插值来近似。不同的立体单元内, 若采用三维一次元素形函数, 单元内磁势插值函数  $u$  则沿三坐标轴( $x, y, z$ ) 呈线性变化:

$u = a_1 + a_2x + a_3y + a_4z$  (5)

假定在节点  $i, j, k$  与节点  $l$  的磁势值分别为  $u_i, u_j, u_k, u_l$ , 将各节点磁势值代入式(5), 可得

$$u = \begin{bmatrix} 1 & x & y & z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_k & y_k & z_k \\ 1 & x_l & y_l & z_l \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \\ u_l \end{Bmatrix} = [N] \{\phi\}$$
 (6)

其中  $[N]$  定义为形函数, 是关于坐标  $x, y, z$  的函数。

2 力 磁效应模拟

以含小孔的 18CrNi4A 钢平板为研究对象, 试样

的尺寸和主要技术参数如图 1 和表 1 所示。

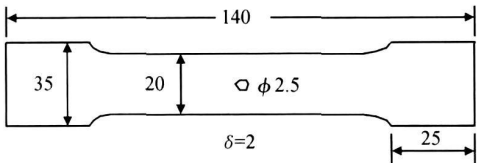


图 1 试样尺寸  
Fig. 1 Dimension of specimen

表 1 含中心小孔的 18CrNi4A 钢平板  
试件的主要技术参数

Parameter	Elastic modulus / GPa	Poisson's ratio	Yield stress / MPa
Value	203.4	0.28	1145

模拟分为两个步骤: 静力学分析和静磁学分析。静力学分析中采用非线性分析的方法, 得出加载模型应力分布结果。静磁学分析中, 先对同尺寸大小且网格分布情况相同的铁磁模型进行分析, 得出该模型在地磁环境下未加力学载荷时的表面漏磁场分布; 再按照静力学分析中的模型体应力分布结果, 对铁磁性单元材料的磁学属性进行赋值, 进行二次静磁学分析, 得出模型在地磁场下施加力学载荷后表面漏磁场分布情况。最后, 根据地磁场环境下铁磁模型施加力学载荷前后的磁场分布抑制背景磁场, 得出分析结果。

2.1 建立有限元模型

试样是关于小孔对称的, 在分析中为了节约计算时间并方便观察结果, 对模型进行简化, 仅取试样的 1/2 建模。由于试样外部空气中存在漏磁通, 因此在 18CrNi4A 试样周围区域建立空气模型, 如图 2 所示, 内层为带小孔板件模型, 外层为空气模型。

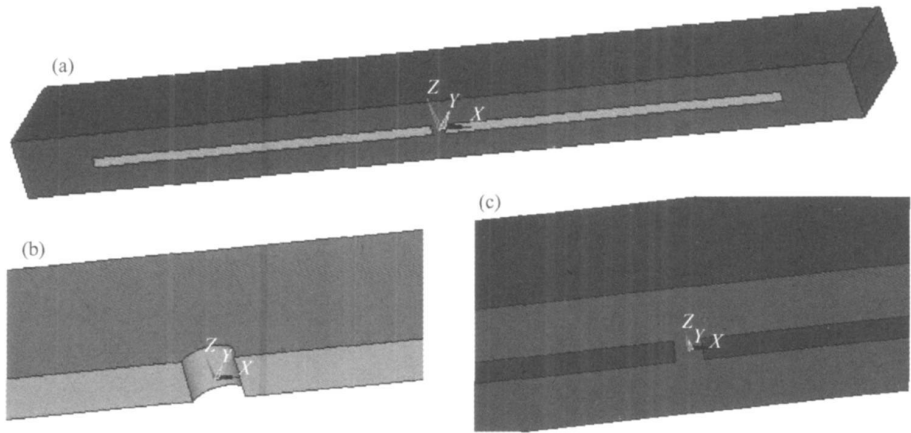


图 2 实体模型 (a) 整体模型; (b) 试样模型; (c) 空气模型  
Fig. 2 Entity mode (a) whole mode; (b) mode of specimen; (c) mode of air

本次分析中以既保证求解结果精度, 又尽量节约计算机资源的原则, 对该模型进行网格划分。鉴于试样本身是板状形态, 板厚方向划分三层就完全可以满足求解精度, 而圆孔附近区域与板边有所不同, 该区域为应力集中处, 为得到相对精确的计算结果, 对圆孔附近的网格进行细分, 如图 3 所示。外层空气模型中, 距试样较近区域为漏磁场检测处, 亦对其进行了细分, 距

试样较远的地方为了节约计算机硬件资源和求解时间, 网格划分可相对粗大, 如图 4 所示。在静磁学计算中, 空气的最外层应使用远场单元来施加标志约束, 若不选取远场单元须对空气层最外表面施加通量平行或垂直约束, 本次模拟考虑到模型本身已经很大的因素, 不再对其添加远场单元, 采取直接对空气层外表面施加通量平行约束的方法来确保求解精度<sup>[6-8]</sup>。

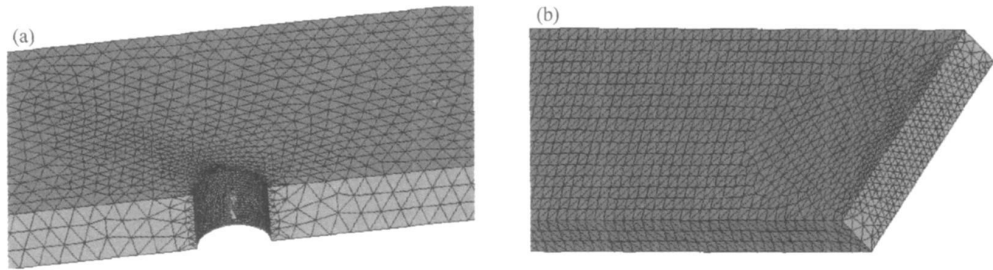


图 3 试样的网格分布 (a) 圆孔周围; (b) 试样板边缘  
Fig. 3 Finite element mode of specimen (a) hole; (b) edge of specimen

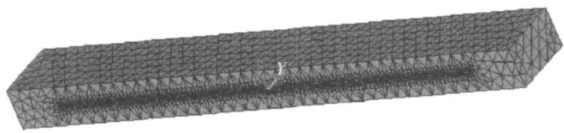


图 4 空气模型的网格分布  
Fig. 4 Finite element mode of Air

2.2 加载和求解

在静力学分析中, 对模型对称面施加位移约束, 端

面施加拉应力载荷, 位移约束和拉应力载荷位置会自动地转化到相应的节点上, 采取输入真实应力应变曲线方法进行非线性静力学分析, 加载 40kN 的应力分布结果如图 5 所示。静磁学分析中, 模型中加了地磁场和约束, 应用 APDL 参数化程序在试样上方空气中提取仅有地磁场作用下的试样漏磁场分布结果, 磁导率与应力的关系如式(7)所示。

$$\mu = \mu_r (1 + bH / \mu_r) [a_0 + a_1 |\sigma|^m e^{n|\sigma|}] \quad (7)$$

式中:  $\mu$  为磁导率;  $\mu_r$  为初始磁导率;  $H$  为磁场强度;  $b$

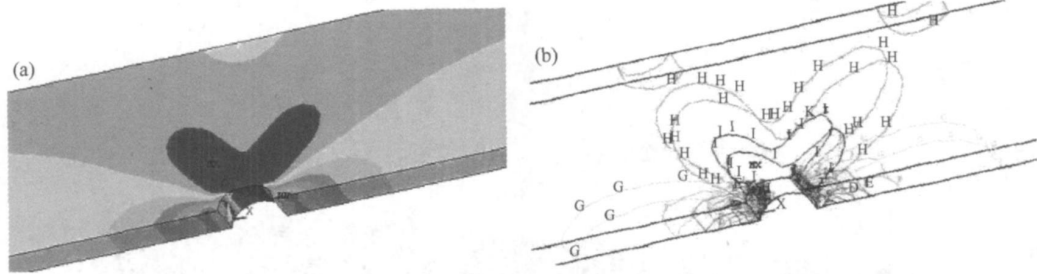


图 5 试样圆孔处应力集中分布结果 (a) 云图; (b) 等值线图  
Fig. 5 Stress concentration of specimen in hole (a) contour plot; (b) chorisogram

为与材料本身性质有关的常数,  $a_0, a_1, m, n$  为系数, 与载荷方向和应力值有关。力-磁效应数值模拟程序流程图如图 6 所示。

2.3 模拟结果及分析

在 ANSYS 的三维磁场分析后处理中没有磁力线图, 可以通过磁通密度矢量图查看模型的磁场分布情况。根据静力学模拟得到的应力结果, 计算应力集中

引起的磁特性变化即材料磁导率变化而导致的磁场变化, 可以实现材料力-磁效应模拟的研究。模拟中主要针对的是地磁场条件下由应力集中作用产生的泄漏磁场值的变化。此时, 地磁场作为背景磁场是计算中的影响因素, 必须对其进行抑制, 因此, 通过计算内部特定平面上的考虑了应力作用与未考虑应力时的漏磁场值的计算结果, 并加以比较即可实现上述目的。计算

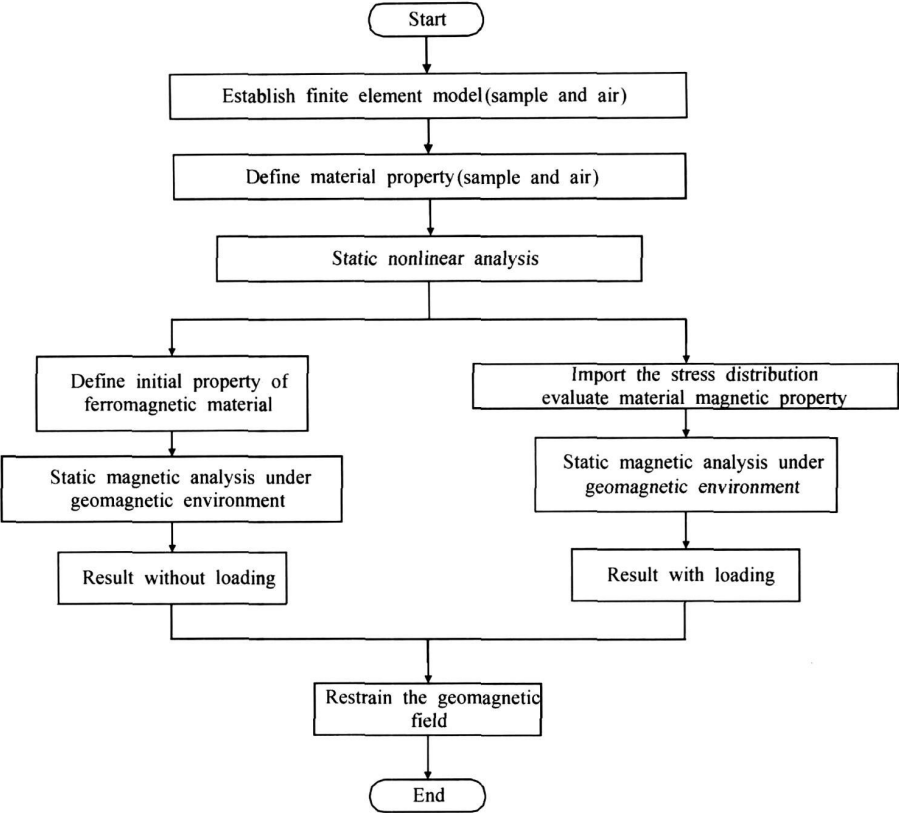


图 6 力磁效应数值模拟程序流程

Fig. 6 Simulation of Stress magnetization effect plan

时,通过提取铁磁试件表面上方 1mm 处的平面的漏磁场值,对结果进行分析。由于计算中数据的提取量非常多,因此,须运用 APDL 参数化程序设计才能迅速方便地完成上述过程。将分析结果数据以表格形式导入 Origin 软件,可以得到如图 7 所示的图形。图 7a 为无应力存在时,在地磁场环境中以材料初始磁导率进行赋值得到的磁感应强度法向分量计算结果,其泄漏磁场由缺陷形状决定,由于有小孔缺陷的存在,使得泄漏磁场在小孔附近出现了双峰值现象。图 7b 为模拟应力集中与地磁场共同作用下对磁导率赋值后的磁感应强度法向分量计算结果,可以看出,该磁场值与图 7a 有所不同,这是由于应力集中的存在,使铁磁体内部磁畴组织发生了定向和不可逆转的重新取向,其产生的泄漏磁场与圆孔空间几何位置在地磁场作用下产生的漏磁场相互叠加的结果。为了突现应力集中引起的泄漏磁场的变化,必须对背景磁场—地磁场进行抑制,图 8 即为抑制了背景磁场的计算结果,其中由图 8a 可以看出,模型应力集中处的磁感应强度法向分量发生了明显的变化,只不过其双峰的方向与图 7 不同。图 8b 为仅应力集中引起的磁感应强度切向分量的计算结果,在应力集中部位有最大值。图 8 充分表明在

应力集中的作用下引起了试件磁导率的变化,从而导致了磁场的变化,其泄漏磁场的磁感应强度切向分量出现最大值,法向分量有过零现象。

由磁记忆检测的基本原理可知:铁磁材料在应力作用下的磁性能发生变化,在构件的应力集中部位表面形成泄漏磁场。受到外应力的作用后,磁晶体内总的自由能除了原有的磁晶各向异性能、磁弹性能、弹性能,又增添了应力能部分,原有能量的平衡受到破坏,为了使系统达到新的稳定状态,铁磁体内的磁畴结构要发生改变来降低能量。试样受拉应力过程中:磁致伸缩系数为正的情况下,磁畴结构的改变主要表现为其自发磁化方向与应力方向成锐角的磁畴通过畴壁的位移作体积的扩张;同时,磁畴内部的磁化矢量偏离其原有方向,而趋于转向应力方向分布。通过磁畴结构的变化,有部分应力能向磁弹性能、退磁能等其他能量形式作了转化,系统能量得到重新分配从而趋于最小,铁磁体由此得以在新的能量状态下达到稳定并在宏观上表现出磁性的改变<sup>[9, 10]</sup>,应力集中区域漏磁场法向分量出现过零,切向分量出现最大值,且在真实试验中,试样应力集中处漏磁场法向与切向分量磁感应强度值为零点几 Gauss 左右,模拟结果与之相符。

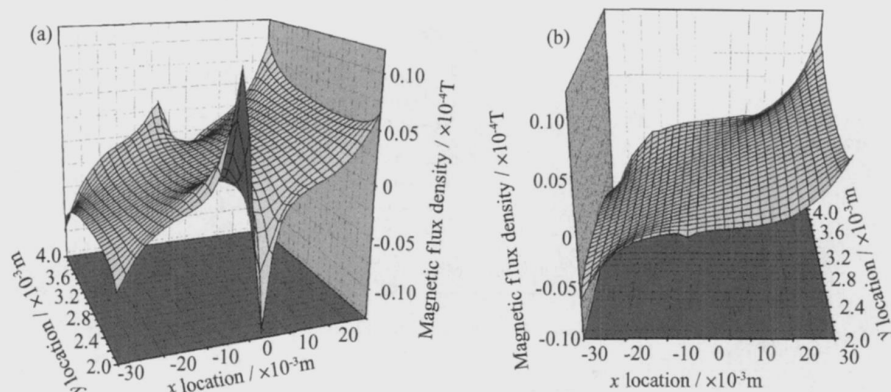


图 7 有限元模拟结果-磁感应强度法向分量 (a)未考虑应力作用,仅缺陷形状引起磁场;(b)考虑了应力集中的作用

Fig. 7 Finite element result-normal component of magnetic flux density

(a)magnetic flux density caused by geometry;(b)magnetic flux density caused by geometry and stress

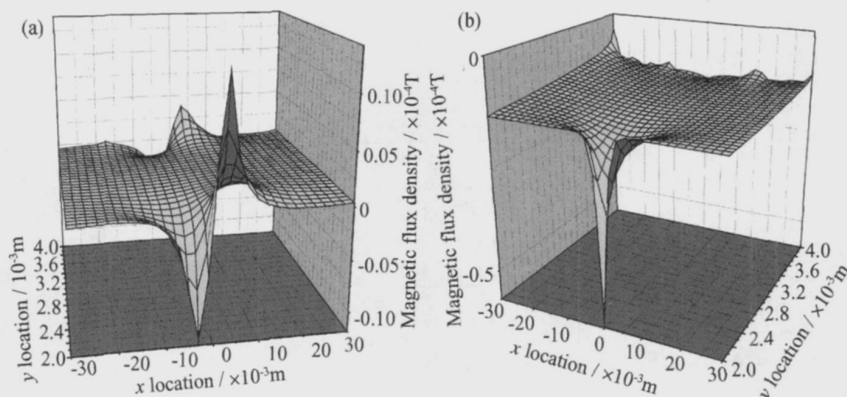


图 8 仅应力作用下的有限元模拟结果 (a)磁感应强度值(法向分量);(b)磁感应强度值(切向分量)

Fig. 8 Finite element result-magnetic flux density caused by stress

(a) normal component of magnetic flux density; (b) tangential component of magnetic flux density

### 3 结论

(1) 以 18CrNi4A 钢为研究对象,对含圆孔试样进行力-磁效应数值模拟,通过 APDL 参数化程序提取铁磁试样表面上方空气中的漏磁场,结果表明,外力的作用下试样整体的漏磁场值产生了不同程度的变化,圆孔附近应力集中区域漏磁场法向分量出现过零,切向分量出现最大值。

(2) 该数值模拟结果的泄漏磁场分布区域、数值趋势走向及幅值分布范围与金属磁记忆检测理论和试验结果相吻合。

#### 参考文献

- [1] 任吉林,林俊明.金属磁记忆检测技术[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [2] 董丽虹,徐滨士,董世运,等.金属磁记忆技术检测低碳钢静载拉伸破坏的实验研究[J].材料工程,2006,(3):40-43.
- [3] DUBOV A A. Express method of quality control of a spot resistance welding with usage of metal magnetic memory[J]. Welding

in the World, 2002, 46(SPEC):317-320.

- [4] 王丹,董世运,徐滨士,等.应力集中部位的金属磁记忆检测研究[J].失效分析与预防,2007,2(2):12-15.
- [5] IVANOV P A. Magnetic flux leakage modeling for mechanical damage in transmission pipelines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1998, 34(5):241-250.
- [6] 阎照文. ANSYS 10.0 工程电磁分析技术与实例详解[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [7] 曙光,谢桂兰. ANSYS 操作命令与参数化编程[M].北京:机械工业出版社,2004.
- [8] 宋凯,唐继红,钟万里,等.铁磁构件应力集中的有限元分析和磁记忆检测[J].材料工程,2004,(4):40-42.
- [9] 钟文定.铁磁学(中册)[M].北京:科学出版社,1987.
- [10] 任吉林,王东升,任尚坤,等.应力状态对磁记忆信号的影响[J].航空学报,2007,28(3):724-728.

基金项目:航空科学基金资助项目(03G56001)

收稿日期:2008-08-26;修订日期:2009-04-12

作者简介:任吉林(1945—),男,教授,主要研究方向:电磁无损检测技术,联系地址:江西省南昌市丰和南大道696号南昌航空大学自动化学院(330063),E-mail:jlren@tom.com