

# 脉冲磁体中电磁与温度场耦合的有限元分析

彭涛, 李亮

(华中科技大学 强磁场中心, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 脉冲强磁体处于复杂的电磁、热、应力等多物理场共同作用下, 设计中考虑的因素众多, 物理关系复杂, 分析过程繁琐。借助大型有限元软件分析工具 ANSYS 建立了 70 T 脉冲强磁体中电磁、温度场耦合分析模型, 实现了磁场与温度场的计算, 并通过有限元方法实现了脉冲磁体性能的优化。实验结果表明, 磁体样机达到 70 T 磁场水平。

**关键词:** 脉冲磁体; 强磁场; ANSYS; 耦合场

中图分类号: TM836

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)06-0740-05

## Analysis of Electromagnetic Thermal Coupled Field in Pulsed Magnet With Finite Element Method

PENG Tao, LI Liang

(High Magnetic Field Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Pulsed magnet bears the effect of electro-magnetic, thermal and structural fields. During the design procedure, lots of factors have to be taken into account, which makes the analysis extremely complicated. The model of the coupled magnetic and thermal analysis in a 70 T prototype pulsed magnet was established with commercial finite element analysis software ANSYS. The magnetic field and temperature distribution were calculated. Based on the analysis, the performance of the pulsed magnet was optimized. Experimental results show that 70 T magnetic field is achieved with the pulsed magnet.

**Key words:** pulsed magnet; high magnetic field; ANSYS; coupled field

强磁场作为科学研究的极端条件,是现代科学实验最有效的工具之一。它为发现新效应、产生新概念提供了许多科学机遇。据美国国家研究协会统计<sup>[1]</sup>,自 1913 年以来,与强磁场有关的诺贝尔奖就有 19 项。因此,西方发达

国家都建有强磁场实验室<sup>[2]</sup>。我国已于 2008 年开始在华中科技大学和中国科学院合肥物质科学研究院分别建设脉冲强磁场和稳态强磁场实验室,其中,脉冲强磁场的建设目标是到 2012 年底实现范围在 50~80 T 之间的不同磁

场,达到国际先进水平<sup>[3]</sup>。

目前,利用脉冲强磁场技术,可轻易实现 60 T 左右的磁场,更高磁场的发展直接依赖于磁体结构优化技术。磁体设计过程中使用的物理量数目繁多,尤其是当磁场达到 70 T 以上后,物理量之间的关系变得十分复杂,很多在弱磁场环境下可忽略的现象也对磁体性能有十分重要的影响,因此,磁体设计技术要求对多物理场耦合过程进行十分准确的分析。目前,用来进行磁体多物理场耦合分析的工具分为两类: 1) 利用计算机编程语言编写的程序包<sup>[4-6]</sup>,可完成简单的电磁场、温度场和应力计算等功能; 2) 商用有限元分析软件,包括 ANSYS、Comsol 等<sup>[7-8]</sup>。自行开发的程序包简单易用、针对性强、运行速度快,但通用性差;商用软件建模和计算费时,但功能强大,灵活性高,因此被广泛采用。本工作采用 ANSYS 对脉冲磁体电磁、温度场耦合分析进行研究,实现对磁体结构的优化。

## 1 耦合场建模

在不可压缩平面导体中,磁场扩散方程为:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho \cdot \frac{\partial B}{\partial x} \right) \quad (1)$$

式中:  $B$  为磁感应强度;  $\rho$  为电阻率;  $\mu_0$  为真空磁导率;  $t$  为时间。

对于轴对称圆柱结构,由环向电流产生的轴向磁场扩散方程为:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \frac{1}{\mu_0 r} \cdot \frac{\partial \rho r}{\partial r} \cdot \frac{\partial B}{\partial r} \quad (2)$$

在导体中,热传导方程为:

$$Dc r \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial r} (Kr \frac{\partial T}{\partial r}) - DrQ = 0 \quad (3)$$

式中:  $D$  为材料密度;  $Q$  为热功率;  $T$  为温度;  $K$  为热传导系数;  $c$  为材料比热;  $r$  为半径。

在 A、B 两种材料分界面处,热流量方程为:

$$K_A \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_A = K_B \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_B \quad (4)$$

在磁场脉冲作用过程中,电流(TC)、集肤效应(SE)及磁电阻效应(MR)引起导体电阻率、温升及温度梯度变化,这几种因素反过来又影响电磁场过程。电磁场与热分析相互耦合,磁体线圈电阻是连接这两个耦合分析的纽带。

在 ANSYS 模型中,脉冲磁体不仅是轴对称结构,还是中平面对称结构,因此,可只用 1

个二维的 1/4 磁体来分析整个磁体,这样,就可建立如图 1 所示的二维有限元模型。模型分为两部分,一部分是图 1a 所示的电路有限元部分,包括电容器组  $C$ 、线路电感  $L_{ex}$  和电阻  $R_{ex}$  及续流回路 CD。电容器组、线路电感和电阻均由单元 CIRC124 来模拟。二极管 CD 由单元 CIRC125 模拟。另一部分是图 1b 所示的磁体线圈本身构成的有限元模型,使用的单元包括 PLANE53、INFIN110、PLANE77,分别用于电磁场分析和热分析。

由图 1 可看出,脉冲磁场发生系统实际上是一 RLC 电路结构,其工作原理为:当电容器充电完成后,合上放电开关,电容器对磁体线圈放电,电流在磁体中心产生强磁场。当电容器电压反向后,续流回路二极管 CD 开通,电流流过续流回路,既可增加磁场的脉宽,又可以让部分能量消耗在二极管电阻上,从而降低线圈的最终温升。

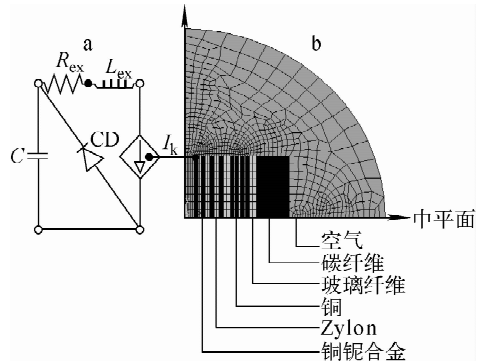


图 1 ANSYS 中建立的脉冲强磁体系统模型

Fig. 1 Finite model of pulsed magnet in ANSYS

根据对称性可知,在磁体中轴线上,磁场方向与轴向平行。而在中平面上,磁场与中平面垂直。对于圆弧部分,磁场会延伸到无穷远处,所以,采用远场单元 INFIN110 来模拟其边界。电流  $I_k$  将电路部分和磁体线圈部分连接在一起,完成两个有限元部分的电磁耦合。

电磁场分析与温度场分析同时进行,整个计算分若干步。首先根据初始条件求解电流、磁场,再根据电流焦耳定律、集肤效应和磁电阻效应计算导线发热量和温度分布,然后根据温度校正线路电阻,最后将新的电阻值作为初始条件重复上述计算过程,直至完成全脉宽的分

析。电磁场与温度场求解反复迭代,是顺序耦合场分析,其分析流程如图2所示。

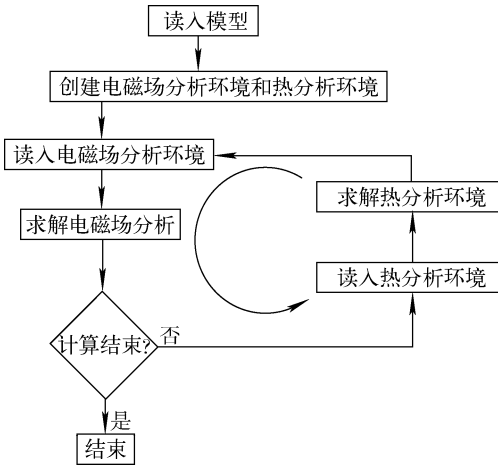


图2 电磁场与热场耦合分析流程图

Fig. 2 Flow diagram of electromagnetic-thermal coupled analysis

在温度场分析中,只考虑磁体线圈的热过程,边界条件只施加在磁体线圈外围。在实验时,整个磁体线圈置于77 K的液氮中,因此,线圈左右及顶部的边界条件是温度恒定保持77 K。而中平面上的边界条件是热传导为0。

## 2 仿真与实验结果

以70 T的磁体为例,具体分析线圈电阻变化和涡流对磁场波形的影响。表1列出磁体的结构参数和材料属性。表2列出放电参数,包括线圈、电容器与线路参数。

表1 磁体结构与材料参数

Table 1 Structure and material properties of magnet

层	厚度/mm	材料	横截面/mm <sup>2</sup>	匝(层)
1, 3, 5, 7	2.5	铜铍合金	2.3×4.2	17
9, 11, 13, 15	2.2	铜	2.0×3.1	23
2	1.6	Zylon	—	—
4	2.6	Zylon	—	—
6	3.4	Zylon	—	—
8	4	玻璃纤维	—	—
10	0.7	玻璃纤维	—	—
12	1.1	玻璃纤维	—	—
14	0.9	玻璃纤维	—	—
16	4	玻璃纤维	—	—
17	20	碳纤维	—	—

表2 电路参数

Table 2 Parameters of circuit

器件	电阻/mΩ	电感/ $\mu$ H	电容/mF
线圈	9.34	350	
电容器			9.5
线路	22	70	
续流二极管	80		

图3所示为仿真计算得到的线圈电阻和电感随时间的变化曲线。从图中可看出,在脉冲开始阶段的0.1 ms时间内,电感有一下降过程。这是由于开始过程中,集肤效应作用明显,它降低了初始线圈电感。随后,集肤效应减弱,电感逐渐增加。而对于线圈电阻,同样由于开始时集肤效应明显,交流电阻较大,随后集肤效应减弱,电阻减小。但线圈电阻由于升温作用又迅速上升,在1个脉冲结束时电阻值增加到起始值的10倍左右。脉冲结束后,磁体一直浸泡于液氮中冷却,一般在30 min左右重新降温至77 K恢复至初始状态,可开始下一个放电脉冲。

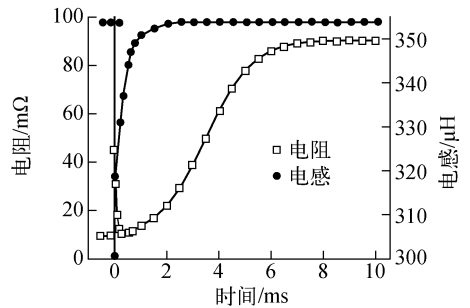


图3 电阻与电感随时间的变化

Fig. 3 Change of resistance and inductance for magnet with time

实验中采用感应法测量磁场,图4所示为探测线圈上感应电压的波形图,它直接反映了探测线圈内磁通量 $\Phi$ 的变化率。由于涡流造成集肤效应,磁通在脉冲开始瞬间未完全穿透磁体线圈导体,磁体线圈电感很小,整个线路等效电感也较小,因而在开始阶段的0.1 ms内, $d\Phi/dt$ 出现1个很大的脉冲尖峰。

图5所示为实验中测量得到的磁场波形与

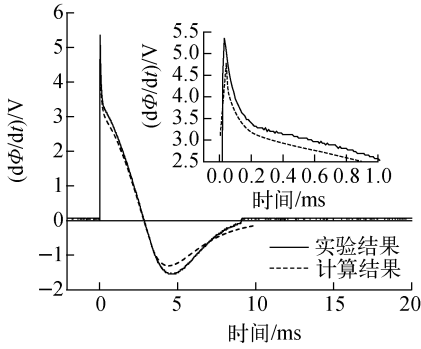


图 4 探测线圈上计算感应电压与实验测量波形的对比

Fig. 4 Comparison of voltage on pick-up coil

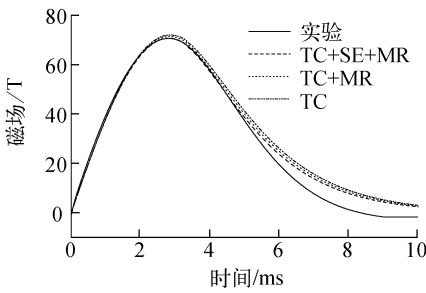


图 5 实验测量磁场波形与计算仿真波形的对比

Fig. 5 Comparison of magnetic field waveforms obtained by simulation and experiment

计算仿真结果的对比。从图中可看出,由于集肤效应和磁致电阻效应使线圈电阻增加,因而磁场峰值有所减小。当仿真分析中考虑这两种效应时,仿真波形与实验测试得到的磁场波形吻合较好,只是在磁场波形的下降沿,实验测量波形衰减速度快于计算仿真结果。这是由于在脉冲尾部,连接磁体与电容器的电缆温升已较大,导致电缆电阻增加,结果相当于增加了回路电阻,因而波形衰减速度加快。但在计算仿真中,未计及电缆部分的电阻变化,因而,计算仿真结果与测量结果出现偏差。由于续流回路的作用,磁场波形尾部较长,在 10 ms 时仍有磁场,直到 15 ms 时才完全衰减至 0。

由图 3、4 还可看出,尽管集肤效应对  $d\Phi/dt$  波形有很大影响,但这种影响只发生在  $d\Phi/dt$  波形最开始 0.1 ms 时间内。另外,磁致电阻和集肤效应虽增加了磁体电阻,降低了磁场峰值,但对整个磁场波形的影响并不太显著。

表 3 列出磁场脉冲峰值与脉冲结束时电路中的能量分布情况。可看出,集肤效应产生的焦耳热只占整个能量的 1.6%,而这其中超过 90% 的能量又集中在磁场到达峰值之前的时间内。这与图 3、4 中理论及实验结果吻合得很好。

表 3 磁场脉冲峰值与结束时电路中的能量分布

Table 3 Energy distributions at peak and end of pulse

类别	焦耳热/kJ				电容器 能量/kJ	磁能/kJ	能量总和/kJ	误差/%
	线圈电阻	续流电阻	线路电阻	集肤效应				
峰值	31.1	0	36.2	4.6	14.5	225.5	311.9	1.3
结束	131.8	93.8	82.4	5.1	0	0.1	313.2	1.7

图 6 所示为磁体中平面上温度分布的仿真结果。图中共给出 3 个温度,分别表示 3 种不同情况下的温度分布。该线圈由两部分组成,里面是 4 层铜铌合金导线和 4 层 Zylon 加固层,外面是 4 层铜导线和 4 层玻璃纤维加固层。图中实线表示仅考虑传导电流引起的温升。因同一导线中通过的电流密度相同,所以,最终同种导线中的温升也相同。当考虑磁致电阻效应和集肤效应时,由于靠近内层处的磁感应强度大,磁致电阻效应与集肤效应更加明显,对于同种导体,线圈内层温度明显高于线圈外层,温度从内到外逐渐降低,同种导线内温升不再是均

匀的。对比图 5 中的放电计算结果可看出,磁致电阻和集肤效应虽对磁场的波形和大小影响不明显,但对磁体内温度分布却有很大的影响。

从图 6 中还可看出,磁体中平面上铜导线的平均温度与铜铌合金导线的平均温度大致相当,这是对磁体进行优化后得到的结果。脉冲强磁体设计的一重点问题是控制温升。如果整个线圈使用同种导线,由于磁致电阻和集肤效应,线圈内层温度会明显高于外层。如果不对这种现象加以优化,往往出现内层线圈烧坏而外层线圈温度还极低的情况。在磁体设计中,采用优化手段,搭配好两种导线的横截面积和

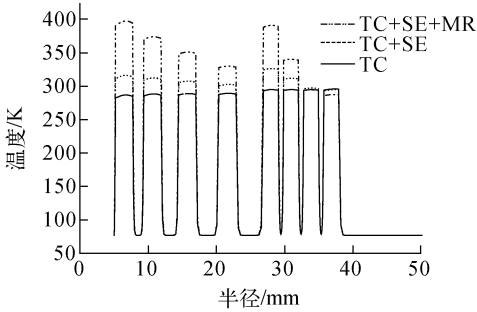


图6 3种不同条件下磁体内部温度分布

Fig. 6 Temperature distributions in mid-plane of magnet with different assumptions

电阻率,将部分热量从线圈内层部分转移到外层部分,从而使温度分布趋于均匀。有时根据需要,可使用3种或更多的导线来优化温度分布,使所有导体层的温度几乎相同,但这样做会增加线圈加工制造难度。

### 3 结论

在磁场脉冲初始时刻,集肤效应增加磁体等效电阻而减小等效电感,造成探测线圈感应电压信号在初始时刻出现脉冲尖峰,但对磁场波形几乎无影响。集肤效应和磁电阻效应使磁体线圈内部导体温升高而外部温降低,适当匹配不同的导体材料可优化磁体温升,防止局部过热。

采用ANSYS软件,可在脉冲强磁体设计时综合考虑电流、能量、温度、材料强度等多方因素。通过简单的顺序耦合过程,可实现复杂的电磁场、温度场耦合分析,优化磁体结构,具有较明显的优势,适合进行脉冲磁体耦合场分析。基于该设计的磁体样机达到70 T磁场,证明设计方法可靠。

### 参考文献:

- [1] MORE P B, AEPPLI G, ARONSON M, et al. Opportunities in high magnetic field science[M]. Washington D. C., USA: The National Academies Press, 2004.
- [2] HERLACH F, MIURA N. Introduction with survey of magnet laboratories in high magnetic fields: Science and technology[M]. Singapore: World Scientific, 2003.
- [3] LI L, DING H F, PENG T, et al. The pulsed high magnetic field facility at HUST, Wuhan, China[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, 18(2): 596-599.
- [4] 彭涛,辜承林. 脉冲强磁体专用设计软件开发研究[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(2): 173-176.  
PENG Tao, GU Chenglin. Development of specialized software package for pulsed high field magnet[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2008, 42(2): 173-176(in Chinese).
- [5] EYSSA Y, MARKIEWICZ W D, PERNAMBU-CO W P. Plastic stress analysis of pulse and resistive magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32: 2 528-2 529.
- [6] VANACKEN J, LI L, ROSSEEL K, et al. Pulsed magnet design software[J]. Physica B, 2001, 294-295: 674-678.
- [7] WITTE H, GAGANOV A, KOZLOVA N, et al. Pulsed magnets—Advances in coil design using finite element analysis[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2006, 16(2): 1 680-1 683.
- [8] ZHERLITSYN S, BIANCHI A D, HERMANNSDOERFER T, et al. Coil design for non-destructive pulsed field magnets targeting 100 T[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2006, 16(2): 608-611.