

超导线圈绕制过程的力学行为研究*

李兰凯^{1)2)†} 王厚生¹⁾ 倪志鹏¹⁾²⁾ 程军胜¹⁾ 王秋良¹⁾

1) (中国科学院电工研究所, 应用超导重点实验室, 北京 100190)

2) (中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2012年9月11日收到; 2012年10月4日收到修改稿)

为了增加超导线圈中导线的占空比, 提高超导磁体正常运行时的机械稳定性, 通常在超导线圈绕制过程中施加一定的绕制张紧力. 绕制张紧力的大小会对超导磁体的失超特性和退化性能产生重要的影响, 因此有必要对绕制过程中的机械应力进行详细的分析. 本文仔细地分析了绕制过程中导线的受力情况, 进行了一些合理的假设和近似, 提出了研究超导线圈绕制应力的理论模型, 并根据轴对称结构的弹性力学方程式推导了计算超导线圈应力应变分布的理论公式. 基于该模型分别研究了单一绕组的超导线圈和双绕组的超导线圈的绕制应力, 分析了绕制张紧力和绕组的各向异性特性对径向应力和环向应力的影响. 在该理论模型分析结果的基础上可以进一步分析多物理场作用下的超导磁体的应力应变行为, 为高性能超导线圈的设计和建造提供理论指导.

关键词: 超导线圈, 机械稳定性, 绕制张力, 应力

PACS: 84.71.Ba, 85.25.Am, 45.20.da, 81.40.Jj

DOI: 10.7498/aps.62.058403

1 引言

高性能绝热稳定的超导磁体主要应用于核磁共振成像^[1]和核磁共振谱仪^[2], 机械扰动是影响磁体性能和运行稳定性的主要因素^[3]. 洛伦兹力引起的导体运动是引起磁体失超的最重要的机械扰动源, 为了消除导体的运动, 保证磁体的可靠运行, 发展了灌封环氧树脂和填充强化材料的线圈建造技术^[4], 这样就使导线相互黏接在一起, 增强了整个线圈绕组的刚度. 但是, 由于环氧树脂等有机材料在低温下变得很脆, 环氧树脂破裂随之成为最主要的机械扰动^[5]. 环氧树脂破裂释放的能量与环氧树脂内部储存的应变能有关^[6], 线圈绕制过程中在导线上施加一定的张紧力, 会使组成超导线圈的导线排列地更加紧密整齐^[7], 因此能够减少环氧树脂的体积, 减小环氧破裂释放的扰动能量. 超导线圈内部的洛伦兹力产生朝外的径向拉应力, 过大的径向拉应力会导致层间导线的分离, 引起环氧树脂从导线的剥离而产生扰动能, 绕制过程施加的导线张紧力能够减少径向拉应力, 甚至使径向拉应力变成

径向压应力^[8], 保证层间导线的紧密结合, 减少发生环氧树脂剥离的概率. 然而, 过大的绕制张紧力可能会使内层的导线发生失稳^[7], 使环氧树脂在励磁过程中发生破裂^[9], 甚至引起导线发生微屈服, 导致超导线圈载流性能的下降. 总之, 导线的绕制张紧力能够减小机械扰动, 提高超导磁体的运行稳定性. 因此, 有必要详细研究绕制张紧力对超导线圈内部应力应变分布的影响, 在此基础上考虑绕制张紧力、降温热应力和电磁力的综合作用效果, 为定量分析超导磁体的各种机械扰动提供基本的力学数据.

对超导线圈的结构分析多集中在电磁应力的研究^[10–15], 很少关注绕制张紧力产生的绕制应力的影响. 文献[11, 15]解析求解了线圈的绕制应力, 采用连续积分来分析线圈绕制过程, 实际线圈绕制是一个离散的过程, 因此计算结果有很大的误差. 文献[16]用简单的薄壁筒的理论公式来计算绕制应力, 对厚壁线圈的分析则有很大的误差. 本文考虑了超导线圈的各向异性特性和实际绕制的离散过程, 提出了研究绕制应力的理论模型, 利用该模

* 国家重大科研装备研制项目 (批准号: ZDYZ2010-2) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lkli@mail.iee.ac.cn

型计算了单一绕组超导线圈和双绕组超导线圈的绕制张紧力引起的应力应变.

2 理论模型

考虑超导螺管线圈的绕制过程, 整个绕制过程中导线上施加了一定的绕制张紧力. 每层导线绕上时, 相当于该层导线对已绕上的导线和骨架筒体施加一个外压 σ_{re} , 使它们沿径向产生一个小的位移. 随着绕制层数的不断增加, 线圈外半径不断增加, 在骨架筒体和线圈的不同层上产生不同的累积效应, 在线圈最外层的径向压应力为 0, 骨架筒体和线圈最内层的变形量最大. 为了推导数学模型, 做了以下的假设和近似:

- 1) 考虑每匝导线在相对很低的轴向压力下依序排列, 假定轴向应力 $\sigma_z = 0$, 即平面应力假设;
- 2) 整个绕制过程中骨架筒体内表面的径向应力 σ_{ri} 始终为 0;
- 3) 骨架筒体外表面和线圈内表面的径向应力和环向应变分别相等;
- 4) 假定绕制张紧力在导线上产生均匀的绕制预应力 σ_{w0} ;
- 5) 不考虑剪切应力 τ_{rz} 的影响;
- 6) 忽略骨架两侧端板的影响.

根据前面分析可知, 每层导线的绕制相当于施加一个外压作用, 因此, 先推导外压圆筒的应力方程. 超导线圈由导线、环氧树脂、增强材料等复合而成, 可以看作是横观各向同性材料; 骨架筒体的材料一般是各种金属, 其弹性性能是各向同性的. 由轴向应力 $\sigma_z = 0$, 得到以下应力应变关系式:

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E_r} - \mu_{\theta r} \frac{\sigma_\theta}{E_\theta}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_\theta = -\mu_{r\theta} \frac{\sigma_r}{E_r} + \frac{\sigma_\theta}{E_\theta}, \quad (2)$$

式中 σ_r, σ_θ 分别为径向应力和环向应力; $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta$ 分别为径向应变和环向应变; E_r, E_θ 分别为材料的径向弹性模量和环向弹性模量; $\mu_{\theta r}, \mu_{r\theta}$ 为相应的泊松比. 由对称性关系可以得到

$$\varepsilon_\theta = \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} - \mu_{\theta r} \frac{\sigma_r}{E_r}. \quad (3)$$

根据应变位移公式可知

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr} = \frac{d(r\varepsilon_\theta)}{dr} = \varepsilon_\theta + r \frac{d\varepsilon_\theta}{dr}. \quad (4)$$

将 (1), (2), (3), (4) 式代入径向力平衡方程, 得到关

于 σ_r 的微分方程

$$r^2 \frac{d^2 \sigma_r}{dr^2} + 3r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r \left(1 - \frac{E_\theta}{E_r}\right) = 0. \quad (5)$$

令 $\kappa = \sqrt{E_\theta/E_r}$, 求解以上微分方程得到

$$\sigma_r = c_1 r^{-1+\kappa} + c_2 r^{-1-\kappa}, \quad (6)$$

式中 c_1, c_2 为系数, 可以根据边界条件来确定. 根据径向力平衡方程进一步可以得到环向应力的表达式为

$$\sigma_\theta = c_1 \kappa r^{-1+\kappa} - c_2 \kappa r^{-1-\kappa}. \quad (7)$$

将 (6), (7) 式代入 (3) 式得到环向应变表达式

$$\varepsilon_\theta = \frac{c_1(\kappa - \mu_{\theta r})}{E_\theta} r^{-1+\kappa} - \frac{c_2(\kappa + \mu_{\theta r})}{E_\theta} r^{-1-\kappa}. \quad (8)$$

对于仅承受外压 σ_{re} 的圆筒, 其边界条件为

$$\begin{aligned} r=r_i, \sigma_r &= 0, \\ r=r_o, \sigma_r &= \sigma_{re}, \end{aligned} \quad (9)$$

式中 r_i 为圆筒的内径, r_o 为圆筒的外径, 设 $\alpha = r_o/r_i$, σ_{re} 为圆筒外表面承受的压力. 将以上边界条件代入 (6) 式可以求得系数 c_1, c_2 , 因此, 可以得到承受外压圆筒的径向应力、环向应力和环向应变分别为

$$\sigma_r = \frac{\sigma_{re}\alpha}{(\alpha^\kappa - \alpha^{-\kappa})} \left[\left(\frac{r}{r_i}\right)^{-1+\kappa} - \left(\frac{r}{r_i}\right)^{-1-\kappa} \right], \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\kappa\sigma_{re}\alpha}{(\alpha^\kappa - \alpha^{-\kappa})} \left[\left(\frac{r}{r_i}\right)^{-1+\kappa} + \left(\frac{r}{r_i}\right)^{-1-\kappa} \right], \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_\theta = \frac{\sigma_{re}\alpha}{E_\theta(\alpha^\kappa - \alpha^{-\kappa})} &\left[(\kappa - \mu_{\theta r}) \left(\frac{r}{r_i}\right)^{-1+\kappa} \right. \\ &\left. + (\kappa + \mu_{\theta r}) \left(\frac{r}{r_i}\right)^{-1-\kappa} \right]. \end{aligned} \quad (12)$$

接着, 进一步分析超导线圈绕制过程的受力情况. 如图 1 为线圈绕制过程的受力简图, 当在绕制预应力 $\sigma_{w0,1}$ 作用下第一层导线绕上骨架时, 相当于该层导线组成的薄壁圆筒承受来自骨架筒体的内压, 相应地骨架筒体承受大小相等的外压; 当第 i 层导线绕上时, 该层导线组成的薄壁圆筒 (第 i 个薄壁圆筒) 承受来自下面 $i-1$ 层导线和骨架筒体的内压, 相应地由 $i-1$ 层导线和骨架筒体组成的圆筒承受与之相等的外压. 设绕制过程中最外层 (第 i 层) 导线的环向应力为绕制预应力 $\sigma_{w0,i}$, 第 i 个薄壁圆筒承受的内压 p_i 可由下式计算得到

$$p_i = \frac{\sigma_{w0,i} \Delta r_i}{r_{o,i} - \Delta r_i}, \quad (13)$$

式中 $r_{o,i}$ 为第 i 层导线的外径, Δr_i 为第 i 层导线的厚度. 因此, 由 $i-1$ 层导线和骨架筒体组成的圆筒承受的外压 $\sigma_{re,i}$ 为

$$\sigma_{re,i} = -p_i = -\frac{\sigma_{w0,i}\Delta r_i}{r_{o,i} - \Delta r_i}. \quad (14)$$

考虑由 n 层导线组成的超导线圈, 当全部层数绕制完成后, 根据前面的分析可知, 线圈中第 k 层导线的径向正应力 $\sigma_{rw,k}$ 由上面的 $n-k$ 层导线的压力作用叠加产生; 第 k 层导线的环向正应力 $\sigma_{\theta w,k}$ 由上面的 $n-k$ 层导线的压力作用和该层导线的预应力引起; 骨架筒体的径向正应力 σ_{rf} 和环向正应力 $\sigma_{\theta f}$ 则由 n 层导线的压力作用累积引起. 设由第 i 层导线的压力 $\sigma_{re,i} (k < i \leq n)$ 在第 k 层产生的径向正应力和环向正应力分别为 $\sigma_{rk,i}$ 和 $\sigma_{\theta k,i}$, 在骨架筒体产生的径向正应力和环向正应力分别为 $\sigma_{rf,i}$ 和 $\sigma_{\theta f,i}$. 因此, 绕制完成后第 k 层导线的径向应力 $\sigma_{rw,k}$ 和环向应力 $\sigma_{\theta w,k}$ 分别为

$$\sigma_{rw,k} = \sum_{i=k+1}^n \sigma_{rk,i}, \quad (15)$$

$$\sigma_{\theta w,k} = \sigma_{w0,k} + \sum_{i=k+1}^n \sigma_{\theta k,i}. \quad (16)$$

相应地, 绕制完成后骨架筒体的径向应力 σ_{rf} 和环向应力 $\sigma_{\theta f}$ 为

$$\sigma_{rf} = \sum_{i=1}^n \sigma_{rf,i}, \quad (17)$$

$$\sigma_{\theta f} = \sum_{i=1}^n \sigma_{\theta f,i}, \quad (18)$$

式中 $\sigma_{w0,k}$ 为施加在第 k 层导线的绕制预应力, $\sigma_{rk,i}$,

$\sigma_{\theta k,i}$, $\sigma_{rf,i}$ 和 $\sigma_{\theta f,i}$ 可由 (6), (7), (8), (10), (11), (12) 式计算得到.

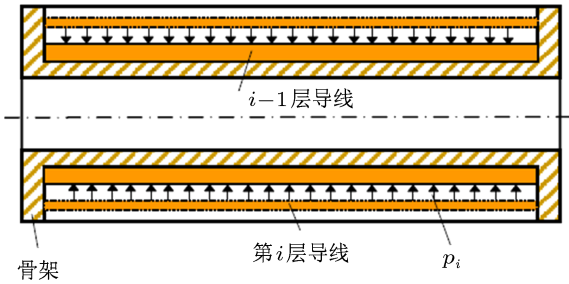


图 1 线圈绕制过程的力学模型

3 计算分析

3.1 单一绕组的超导线圈的绕制应力

先考虑最简单的情况, 即单一绕组的超导线圈由于导线的绕制张紧力引起的线圈内部的应力应变, 所谓单一绕组的超导线圈是指骨架上的线圈由一种线规的导线缠绕组成, 如图 1 所示. 表 1 给出了计算所用的单一绕组的超导线圈的线规, 导线 OST74-135-7884 是包含 31 根 NbTi 超导丝的扁线, 超导丝直径为 $118 \mu\text{m}$, 导线的稳定基为 RRR 值大于 80 的无氧铜. 表 2 是该超导线圈和骨架的尺寸参数. 先根据复合材料细观力学的混合法则计算线圈的宏观弹性常数^[17], 由于绕制时环氧树脂没有固化, 所以不考虑环氧树脂对超导线圈的宏观弹性性能的影响, 表 3 给出了计算得到的单一绕组的超导线圈的宏观弹性常数.

表 1 单一绕组的超导线圈的线规

编号	裸线尺寸/mm×mm	绝缘线尺寸/mm×mm	Cu:Sc	绝缘材料
OST74-135-7884	3.27×2.05	3.49×2.25	10	polyester

表 2 单一绕组的超导线圈的尺寸参数

绕组内径/mm	绕组外径/mm	绕组长度/mm	层数	每层匝数	骨架内径/mm	骨架材料
588.44	648.5	3000	26	852	580.4	5083Al

表 3 单一绕组的超导线圈的弹性常数

E_r/GPa	E_θ/GPa	μ_{rz}	$\mu_{\theta r}$	$G_{\theta r}/\text{GPa}$
15.03	102.57	0.309	0.311	4.14

根据前面推导的理论模型计算在恒定绕制预应力 σ_{w0} 下线圈内部的应力应变, 为了得到方程 (6), (7), (8) 中的系数, 给定以下边界条件: 骨架筒体内表面的径向应力始终为 0; 超导线圈和骨架筒体

界面上的径向应力和环向应变分别相等; $i-1$ 层导线组成的线圈的外表面的径向应力等于第 i 层导线的绕制张紧力产生的压力. 进而, 由方程 (6)—(8), (10)—(18) 可以得到绕制完成后线圈内的应力分布. 图 4 给出了计算得到的绕制预应力分别为 40 MPa, 80 MPa 时线圈内的径向应力和环向应力分布. 由图中可以看出: 在径向方向, 超导线圈内部都处于相互挤压状态; 在环向方向, 内层导线处于压应力状态, 外层导线主要受导线张紧力的影响, 因此处于拉应力状态. 增加导线的绕制预应力 (导线的张紧力) 能够增大线圈内的径向压应力, 使导线排列的更加紧密, 因此能够增强超导磁体的机械稳定性. 但是, 带来的问题是使骨架筒体和内层导线的环向应力增大, 图中 80 MPa 绕制预应力时铝合金骨架的环向应力为 150 MPa, 内层导线的环向应力约为 100 MPa, 这么高的应力状态可能会使骨架和内层导线发生失稳, 所以在超导线圈建造过程中要根据

实际情况施加合理的绕制张紧力.

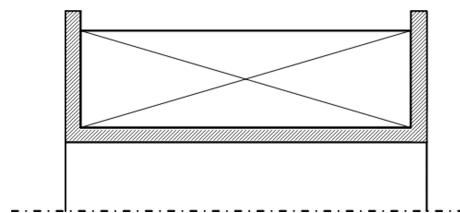


图2 单一绕组的超导线圈

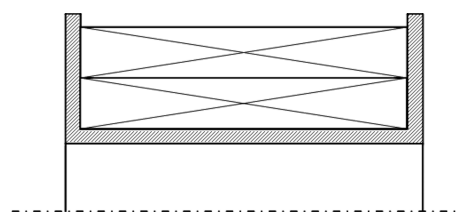


图3 双绕组的超导线圈

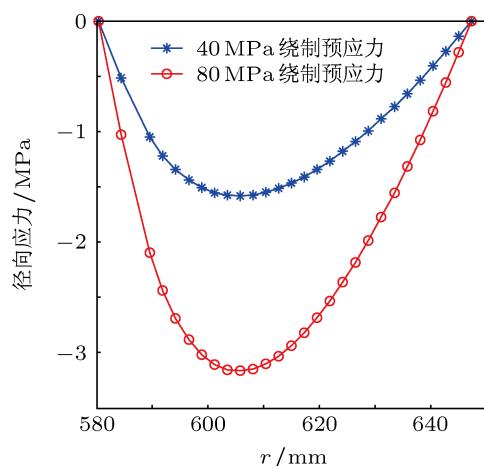


图4 绕制张紧力产生的单一绕组超导线圈内的径向应力和环向应力

由复合材料力学可知, 组成超导线圈的绝缘材料、增强材料等对径向模量 E_r 的影响很大, 而对环向模量 E_θ 的影响非常小. 在前面的理论模型中, $\kappa = \sqrt{E_\theta/E_r}$ 作为无量纲参数被引入, 反映了超导线圈的各向异性程度, 方程 (6), (7) 中都包含有参数 κ . 图 5 给出了绕制预应力都为 40 MPa 时 κ 分别为 1.1, 5.0 和 10.0 情况下单一绕组超导线圈内的径向应力和环向应力, 由于径向模量 E_r 受绕制工艺的影响很大, 所以这里固定环向模量 E_θ 来分析参数 κ 的影响. 由图中可以看出, 随着 κ 的增大, 线圈内的径向压应力随之减小, 骨架筒体和内层导线

的环向压应力随之减小, 外层导线的环向拉应力也随之减小, 但是减小的幅度都很小. 若超导线圈的无量纲参数 κ 小于 5.0, 在粗略计算绕制张紧力引起的径向应力和环向应力时可以将超导线圈作为各向同性材料来处理. 绕制过程中一般在层间铺玻璃丝布等高模量的增强材料, 能提高超导线圈的 E_r 值, 相应地可以增加绕制张紧力产生的径向压应力.

3.2 双绕组的超导线圈的绕制应力

为了减小磁体的建造成本, 有时候会在同一线

圈中进行电流分级, 位于高磁场区域的内层绕组选用尺寸大、性能高的超导线, 外层的绕组处于较低的磁场区域, 选用尺寸小、性能较低的导线, 从而实现由内到外不同绕组的电流密度的递减, 这样就可以大大减少导线的消耗^[18]. 由于不同的绕组采用不同规格的导线, 这样会使组成同一线圈的不同绕组的宏观弹性性能不同, 因此进行分析时要考虑这种差别, 这里考虑双绕组超导线圈的结构, 如

图 3 所示. 表 4 给出了该超导线圈的两种导线的参数, 编号 OST74-135-7731 和编号 OST74-135-7880 都为铜稳定基的 NbTi 超导线, 丝数都为 31, NbTi 超导丝直径都为 103 μm , 稳定基的材料都是 RRR 值大于 80 的无氧铜, 不同的是铜超比分别为 12 和 7. 表 5 则为该超导线圈的两个绕组的尺寸参数. 根据线规和绕组的设计参数, 计算了两个绕组的宏观弹性常数, 其结果如表 6 所示.

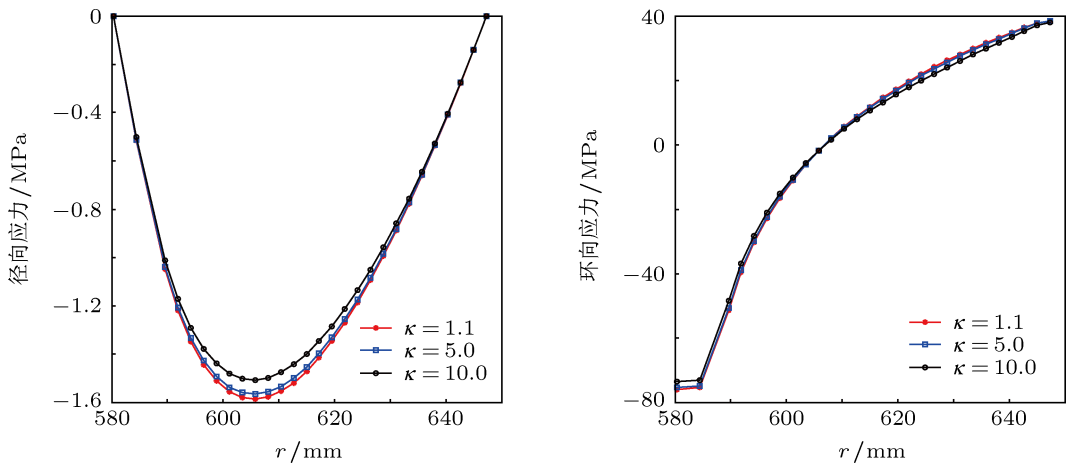


图 5 不同 κ 下单一绕组超导线圈内的径向应力和环向应力 (绕制预应力 40 MPa)

表 4 双绕组的超导线圈的线规

编号	裸线尺寸/mm $\times$ mm	绝缘线尺寸/mm $\times$ mm	Cu:Sc	绝缘材料
OST74-135-7731	2.71 $\times$ 1.38	2.94 $\times$ 1.59	12	Polyester
OST74-135-7880	1.98 $\times$ 1.17	2.24 $\times$ 1.43	7	Polyester

表 5 双绕组的超导线圈的尺寸参数

	绕组内径/mm	绕组外径/mm	绕组长度/mm	层数	每层匝数	骨架内径/mm	骨架材料
绕组 1	737.18	760.28	3000	14	1010	728.18	5083Al
绕组 2	760.28	781.14	3000	14	1323		

表 6 双绕组的超导线圈的弹性常数

	E_r/GPa	E_θ/GPa	μ_{rz}	$\mu_{\theta r}$	$G_{\theta r}/\text{GPa}$
绕组 1	11.31	95.68	0.313	0.315	3.16
绕组 2	9.60	84.78	0.318	0.321	2.56

两个绕组也都在恒定的绕制预应力下绕制, 绕制预应力 $\sigma_{w0} = 40 \text{ MPa}$. 根据边界条件: 1) 铝合金

骨架筒体内表面的径向应力为 0; 2) 绕组 1 内表面和铝合金骨架筒体外表面的径向应力和环向应变分别相等; 3) 绕组 2 内表面和绕组 1 外表面的径向应力和环向应变分别相等; 4) $i - 1$ 层导线组成的筒体的外表面的径向应力等于第 i 层导线的绕制张紧力产生的压力, 因此可以得到绕制过程中各方程式的系数, 进一步得到绕制完成后铝合金骨架和线圈内的径向应力和环向应力分布, 如图 6 所示. 由图中可以看出, 由于宏观弹性常数的不同, 在绕组 1

和绕组 2 的界面 (即 $r = 760.28 \text{ mm}$) 附近, 环向应力的分布曲线出现拐点. 另外, 根据骨架筒体的环

向应变还可以计算得到骨架筒体内表面的径向变形量为 -0.66 mm .

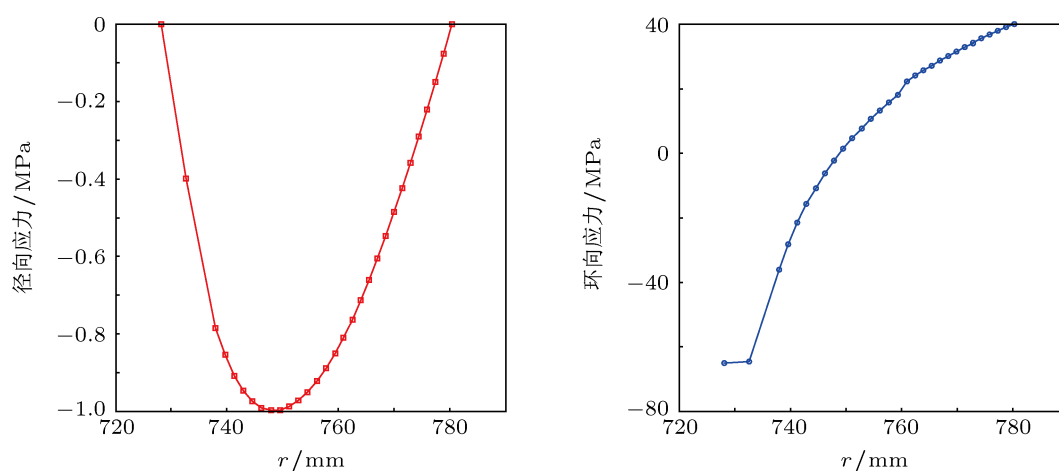


图 6 绕制张紧力产生的双绕组超导线圈内的径向应力和环向应力

4 结 论

本文研究了超导线圈绕制过程的力学性能, 提出了研究超导线圈绕制应力的理论模型, 该模型充分考虑超导线圈材料的各向异性特性和绕制过程的离散特性, 能够非常准确地计算绕制过程产生的应力应变. 基于该理论模型, 研究了单一绕组超导线圈和双绕组超导线圈的绕制应力, 并且分析了绕制张紧力、材料的各向异性对径向应力和环向应力的影响. 该理论模型主要应用于低温超导线材和高温超导线材缠绕成型的螺管线圈, 尤其适用于轴向尺寸较大的超导螺管线圈. 根据计算分析结果得出以下结论:

1. 绕制过程中在导线上施加一定的张紧力能够使超导线圈处于径向压应力状态, 因此可以增加超导磁体的机械稳定性, 但是过大张紧力会使骨架筒体和内层导线失稳, 所以, 在设计绕制工艺时要选用合理的张紧力.

2. 若超导线圈的无量纲参数 κ 较小, 粗略计算绕制张紧力引起的径向应力和环向应力时可以将超导线圈作为各向同性材料来处理.

3. 由于宏观弹性常数的影响, 多绕组超导线圈的绕制应力在绕组界面上会出现拐点, 因此在进行电流分级时要尽量选择尺寸和性能相近的导线.

4. 类似于分析双绕组超导线圈的过程, 可以研究具有绑扎带的超导线圈内部的绕制应力.

- [1] Liu W T, Zu D L, Tang X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 018701
- [2] Fu R, Brey W W, Shetty K, Gorkov P, Saha S, Long J R, Grant S C, Chekmenev E Y, Hu J, Gan Z, Sharma M, Zhang F, Logan T M, Bruschweiler R, Ediscon A, Blue A, Dixon I R, Markiewicz W D, Gross A 2005 *J. Magn. Reson.* **177** 1
- [3] Iwasa Y 1992 *IEEE Tran. Magn.* **28** 113
- [4] Winslow M N 1983 *Superconducting Magnet* (New York: Oxford University Press)
- [5] Iwasa Y 1991 *Cryogenics* **31** 575
- [6] Yasaka Y, Iwasa Y 1984 *Cryogenics* **24** 423
- [7] Bobrov E, Williams J 1981 *IEEE Tran. Magn.* **17** 447
- [8] Iwasa Y 2009 *Case Studies in Superconducting Magnets* (2nd ed) (New York: Springer Science)
- [9] Ohira S, Nishijima S 2001 *IEEE Tran. Appl. Supercon.* **11** 1474
- [10] Melville D, Mattocks P G 1972 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **5** 1745
- [11] Arp V 1977 *J. Appl. Phys.* **48** 2026
- [12] Markiewicz W D, Vaghar M R, Dixon I R, Garmestani H 1994 *IEEE Tran. Magn.* **30** 2233
- [13] Mulhall B E, Prothero D H 1973 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **6** 1973
- [14] Caldwell J 1982 *Appl. Math. Modelling* **6** 157
- [15] Kokavec J, Cesnak L 1977 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **10** 1451
- [16] Pan H, Liu X K, Wu H, Guo X L, Xu F X, Wang L, Green M A 2010 *Atomic Energy Science and Technology* **44** 611 (in Chinese) [潘衡, 刘孝坤, 吴红, 郭兴龙, 徐风雨, 王莉, Green M A 2010 原子能科学与技术 **44** 611]
- [17] Jones R M 1999 *Mechanics of Composite Materials* (Blacksburg: Taylor & Francis)
- [18] Wang Q L 2006 *High Field Superconducting Magnet Science* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [王秋良 2006 高磁场超导磁体科学 (北京: 科学出版社)]

Mechanical stress in superconducting coils during winding process*

Li Lan-Kai^{1)2)†} Wang Hou-Sheng¹⁾ Ni Zhi-Peng¹⁾²⁾
Cheng Jun-Sheng¹⁾ Wang Qiu-Liang¹⁾

1) (*Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

2) (*Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(Received 11 September 2012; revised manuscript received 4 October 2012)

Abstract

In order to increase the filling factor of conductor in superconducting coils and improve the mechanical stability of superconducting magnet, the pre-tension is always applied to the conductor during winding the coils. Because the winding pre-tension has a great effect on the quench and degradation performance of superconducting magnet, it is necessary to analyze the mechanical stress caused by the fabrication. First, the winding physical process of conductor is analyzed. Then the theoretical model is developed to calculate the winding stress of superconducting coils based on some reasonable assumptions and approximations. And some formulas used for stress and strain are derived from the theory of elastic mechanics. Two kinds of superconducting coils (one consists of one type of wire, and the other one consists of two types of wires.) are researched according to the model. The effects of winding pre-stress and material anisotropy on radial stress and hoop stress in superconducting coils are also analyzed. On the basis of the analyzed results, one can further research the stress and strain of superconducting coils under the effect of multiphysics and give some theoretical suggestions for the design and construction of superconducting coils.

Keywords: superconducting coil, mechanical stability, winding pre-tension, stress

PACS: 84.71.Ba, 85.25.Am, 45.20.da, 81.40.Jj

DOI: 10.7498/aps.62.058403

* Project supported by the Instrument Developing Project of China (Grant No. ZDYZ010-2).

† Corresponding author. E-mail: lkli@mail.iee.ac.cn