

绕制预应力对 MICE 超导耦合磁体 冷质量应力状态的影响

潘 衡¹, 刘孝坤¹, 吴 红¹, 郭兴龙¹, 徐风雨¹, 王 莉¹, M. A. Green²

(1. 哈尔滨工业大学 低温与超导技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 美国劳伦兹伯克利国家实验室, 伯克利 加利福尼亚州 94720)

摘要:超导耦合螺线管磁体为 μ 介子离子化冷却实验装置 (MICE) 中的关键设备, 其线圈内径 1 500 mm, 长度 285 mm, 采用截面 1.65 mm \times 1.00 mm 的 NbTi 复合超导线, 励磁到 210 A 时, 峰值磁场可达 7.4 T。在降温 and 励磁过程中, 为减小导线窜动而导致失超, 线圈绕制过程中需对导线和紧固带施加预应力。本文根据组合简理论, 得出了绕制过程中线圈和紧固带的预应力与冷质量内部应力分量的关系。采用有限元方法对线圈绕制、冷却和励磁 3 个连续过程进行动态仿真, 分别分析了导线和紧固带绕制预应力的变化对冷质量内部各主要应力峰值的影响, 得出线圈和紧固带绕制时满足磁体稳定性和结构安全的预应力优化结果, 为 MICE 超导耦合磁体的研制及其他类似大直径、多层的超导螺线管磁体绕制提供理论依据。

关键词: MICE 超导螺线管磁体; 预应力; 有限元; 应力分析

中图分类号: TL503.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)05-0611-06

Effect of Conductor Winding Pre-stress on Stresses in Cold Mass Assembly of MICE Coupling Magnet

PAN Heng¹, LIU Xiao-kun¹, WU Hong¹, GUO Xing-long¹,
XU Feng-yu¹, WANG Li¹, M. A. Green²

(1. *Institute of Cryogenics and Superconductivity Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China*; 2. *Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley CA 94720, USA*)

Abstract: The superconducting solenoid magnet is one of the key equipment in the muon ionization cooling experiment (MICE). The coil has an inner diameter of 1 500 mm, length of 285 mm, and is made from copper matrix NbTi conductors with the insulated cross area of 1.65 mm \times 1.00 mm. The peak magnetic field is up to 7.4 T at a full current of 210 A. In order to reduce mechanical motion of conductors and avoid magnet quench during cooling and charging, the pre-stress is applied to conductor and banding during coil winding process. To solve the confirmation problem of winding pre-stress,

收稿日期: 2009-04-21; 修回日期: 2009-05-23

基金项目: 哈尔滨工业大学“985-2 期”低温与超导工程技术创新平台基金资助项目; 美国能源部资助项目 (DE-AC02-05CH11231)

作者简介: 潘 衡 (1982—), 男, 河北衡水人, 博士研究生, 制冷与低温工程专业

the relationship between pre-stress and stress components in cold mass assembly was proposed according to composed cylinder theory. By dynamic simulation of whole processes including winding, cooling and charging by finite element model, the analyses on the stress in cold mass assembly with different pre-stresses on conductor and banding were carried out, and the optimized results of winding pre-stresses for winding the MICE coupling magnet were got.

Key words: MICE superconducting solenoid magnet; pre-stress; finite element; stress analysis

离子化冷却 μ 介子实验装置 (MICE) 是世界上第 1 个用来研究 μ 介子离子化冷却过程的装置^[1]。单个的超导耦合磁体与 4 个 201.25 MHz 常規射頻腔构成耦合磁体-射頻腔 (RFCC) 模块, 用以恢复 μ 介子的轴向动量。超导耦合磁体的作用在于提供足够强的磁场来约束 μ 介子束在射頻腔内不至于偏离穿过 RF 腔的薄铍窗^[2]。

耦合磁体的冷质量包括超导线圈、绝缘板、滑移面、紧固带和骨架, 为增加磁体励磁后的机械稳定性, 尤其是在线圈与骨架间有滑移面时, 线圈与骨架间实质上为两个实体, 必须在绕制过程中对导线和紧固带分别施加合适的预应力来保证磁体结构的紧凑和避免线圈与骨架间产生间隙。较大的绕制预应力会使线圈承受过大的机械张力而退化或超出结构的安全限制, 而较小的预应力不足以使线圈对线轴保持压力状态甚至退绕。因此, 绕制预应力必须与电磁力和热收缩力在线圈上引起的最终应力相匹配^[3]。

本文根据组合筒理论, 推导预应力作用下的线圈径向应力和环向应力, 建立磁体的二维轴对称模型, 模拟磁体绕制、降温和励磁全过程, 分析并得出在 20~80 MPa 范围绕制预应力对磁体冷质量内部应力状态的影响规律, 给出 MICE 超导耦合磁体绕制时的预应力设置范围。

1 绕制预应力与应力分量的基本方程

超导螺线管磁体绕制时, 每层导线横截面内的预应力恒定且认为均匀分布。因此, 分析线圈在绕制过程中的受力时, 由于线圈内径远大于壁厚, 可将每层线圈假定为一薄壁筒, 绕完后的线圈和紧固带可看作为 n 层具有一定厚度的薄壁组合筒。在绕制时, 当 1 层线圈绕到上

1 层线圈时, 内层线圈由于受到外层线圈的径向压力而使得该层线圈环向应力减小, 从而又重新对线圈骨架产生新的压力。忽略线圈的轴向受力, 将线圈的绕制过程简化为平面应力问题, 在柱坐标下可得平衡方程:

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\theta = 0 \quad (1)$$

由应变本构方程推导出由应力表示的协调方程:

$$\frac{d\sigma_\theta}{dr} - \nu \frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{1+\nu}{r} (\sigma_r - \sigma_\theta) \quad (2)$$

式中: r 为线圈微元距线圈轴心的距离; σ_r 为径向应力; σ_θ 为环向应力; ν 为泊松比。对式 (1) 和 (2) 联立求解微分方程, 考虑到每层导线受到外层导线的压力, 因此, 在每层导线等效为受到均匀外压的薄壁圆筒, 同时, 在圆筒的环向界面内叠加上绕制预应力, 此时, 该层导线在只受外压时的应力为:

$$\sigma_\theta = -\frac{R_i^2 p_{i+1}}{R_i^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_i^2}{r_{\text{ave}}^2}\right) + \sigma_{\text{pre}} \quad (3)$$

$$\sigma_r = -\frac{R_i^2 p_{i+1}}{R_i^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r_{\text{ave}}^2}\right) \quad (4)$$

式中: R_i 为该层导线绕制后的外径; r_i 为该层导线的内径; p_{i+1} 为下 1 层导线对该层导线的压力; r_{ave} 为该层平均半径; σ_{pre} 为绕制预应力。

绕完 n 层导线后, 第 k 层导线的应力为第 k 层之上各层导线对其应力的叠加:

$$\sigma_\theta^w = \sum_{i=k}^{n-1} \left(\frac{-p_{i+1} R_i^2}{R_i^2 - r_{\text{bobbin}}^2} \cdot \left(1 + \frac{r_{\text{bobbin}}^2}{(R_i - \frac{1}{2}\delta)^2}\right) \right) + \sigma_{\text{pre}} \quad (5)$$

其中绕制结束的 n 层导线对线圈骨架的压应力为:

$$\sigma_r^w = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{-p_{i+1} R_i^2}{R_i^2 - r_{\text{bobbin}}^2} \left(1 - \frac{r_{\text{bobbin}}^2}{R_{\text{bobbin}}^2}\right) \quad (6)$$

式中: r_{bobbin} 为线圈骨架内径; R_{bobbin} 为线圈骨架外径; δ 为每层导线的厚度。

在降温过程中,线圈各层绕组和骨架、绝缘板之间会由于材料的热膨胀系数差异而产生附加加热应力;励磁结束后,在上述应力基础上叠加电磁力影响,因此,线圈内的应力^[4]为:

$$\sigma_{\theta} = \sum_{i=k}^n (\sigma_{\theta,i}^W + \sigma_{\theta,i}^T + \sigma_{\theta,i}^M) \quad (7)$$

$$\sigma_r = \sum_{i=k}^n (\sigma_{r,i}^W + \sigma_{r,i}^T + \sigma_{r,i}^M) \quad (8)$$

式中: $\sigma_{\theta,i}^T$ 和 $\sigma_{r,i}^T$ 为第*i*层由于附加加热应力产生的环向和径向应力; $\sigma_{\theta,i}^M$ 和 $\sigma_{r,i}^M$ 为第*i*层由于洛伦兹力产生的环向和径向应力。

对于紧固带内的绕制预应力,则不考虑电磁力产生的影响。

2 MICE 耦合磁体的冷质量结构

MICE 超导耦合磁体为绕制在 6061T6 铝骨架上的单一螺线管线圈,表 1 为耦合磁体的基本参数。线圈采用矩形截面 1.65 mm×1.00 mm 的 NbTi 复合超导导线绕制。在 210 A 励磁电流下,磁体的峰值磁场可达 7.4 T^[5]。

图 1 为 MICE 超导耦合磁体冷质量三维截面图,线圈绕组由玻璃纤维布、环氧胶和超导导线组成。铝骨架包括线轴、侧板和盖板,线轴厚 20 mm,侧板厚 18 mm,盖板由于需将氦冷却管镶嵌其中,其厚度为 40 mm。冷质量内的 G-10 绝缘板有 3 种厚度:位于线圈底部与线轴之间的 G-10 绝缘板厚度为 1 mm;线圈与骨架侧板和线圈与紧固带之间的 G-10 绝缘板分别厚 3.5 mm 和 1 mm,3.5 mm 厚的 G-10 侧板实为厚 0.5 mm 和 3 mm 的可相对滑移的两块组成。滑移面允许线圈相对骨架移动,以释放因洛伦兹力引起的线圈与骨架间的相互作用力,同时也减小了线圈与骨架间由于环氧破裂引起失超的可能性。线圈底部与 G-10 板间有 4 层 Kapton 薄膜作为线圈与线轴间的滑移面;厚 0.5 mm 和 3 mm 的 G-10 侧板可相对滑动,该结构起到滑移面的作用。紧固带的作用为增加线圈对骨架的紧固力和减小盖板焊接时对线圈导线的影响,同时要求有较好的导热能力,紧固带采用线径小于超导导线宽度的 $\phi 1.3$ mm 5356 铝丝绕制在超导磁体的外层,绕制厚度为 27 mm。

表 1 MICE 超导耦合磁体基本参数
Table 1 Basic parameters for coupling magnet

参数	数值	
	梯度模式	螺线管模式
线圈长度, mm	285	285
线圈内半径, mm	750	750
线圈厚度, mm	110.4	110.4
层数	96	96
每层匝数	166	166
电流密度, A/mm ²	110.8	104.6
峰值磁场, T	7.4	7.12

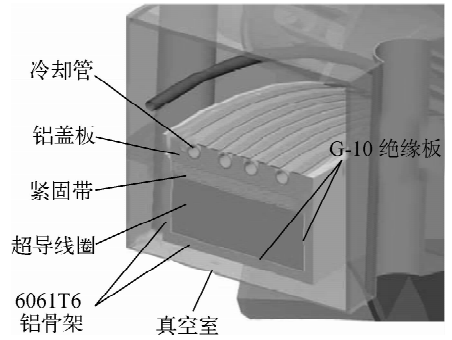


图 1 MICE 超导耦合磁体冷质量三维截面图
Fig. 1 Cross-section of MICE coupling coil assembly

采用通用有限元软件对线圈冷质量建立二维轴对称模型,将线圈绕组和紧固带沿径向方向分别划分为 96 层和 10 层,并采用单元生死技术和多载荷步方法以模拟绕制过程以及降温和励磁过程中每层导体弹性变形的传播;采用接触分析来模拟滑移面的影响。在所有计算中,假设降温后冷质量温度均为 4.2 K;在励磁过程中,忽略磁体冷质量支撑的影响。线圈在模型中视为各向异性弹性体,计算中材料的物性参数列于表 2。

表 2 冷质量材料性能参数
Table 2 Material properties

材料	杨氏模量/ GPa	泊松比	10 ⁵ 平均线膨胀 系数/K ⁻¹
6061T6 铝	70	0.34	1.418 9
5356 铝	71	0.3	1.42
G-10	22	0.2	0.97
线圈环向	90	0.3	
线圈径向	50	0.3	1.148 6
线圈轴向	70	0.3	

3 绕制预应力对冷质量内部应力状态的影响

因超导导线与紧固带为两种材料,所以,分别分析加载到超导导线和紧固带上的预应力影响。首先分析在 60 MPa 紧固带预应力下,线圈绕制预应力对冷质量应力状态的影响,然后对紧固带预应力的影响进行分析。

3.1 绕制结束时预应力的影响

绕制预应力使冷质量内部产生了初始应力分布,线圈在降温前已处于受压状态。图 2 所示为导线的绕制预应力为 60 MPa 时冷质量中心面的应力状态。

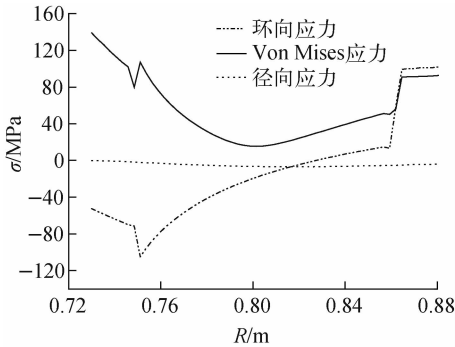


图 2 绕制结束时 60 MPa 预应力下冷质量内部应力分布

Fig. 2 Stress distributions in cold mass assembly with 60 MPa pre-stress on conductor after winding

图 2 中最大应力发生在铝线轴中心面最内侧,线圈最大应力发生在最内层,为 76 MPa;线圈对铝骨架的径向应力为 -4.8 MPa,表示在此预应力下线圈与骨架未分离;最大环向压缩应力 -75 MPa 发生在线圈最内侧,最外侧的拉伸环向应力等于施加的预应力 60 MPa。最大剪应力发生在线圈横截面内侧底面与侧面的端角处,有限元模拟结果为 60 MPa 预应力时最大剪应力为 7.85 MPa。图中两个应力突变归因于底层 G-10 板与线圈和紧固带间 G-10 板导致的结构不连续。图 3 所示为导线预应力在 20~80 MPa 变化时对上述应力峰值的影响。

绕制结束时的应力峰值与绕制预应力呈近似线性关系,减小预应力可明显降低冷质量内环向应力和 Von Mises 应力的水平,但在预应力达 40 MPa 以下时,线圈对骨架的径向应力

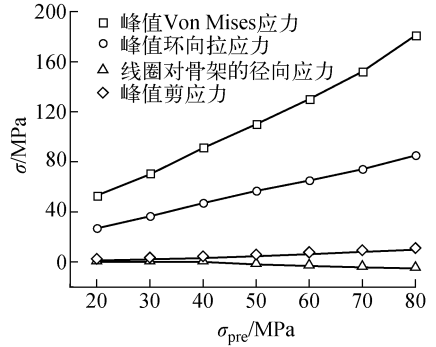


图 3 绕制结束时预应力与冷质量内部峰值应力的关系
Fig. 3 Relationship between pre-tress on conductors and peak stress in cold mass assembly after winding

已变得小于 2 MPa,继续减小预应力会使线圈发生退绕。增加预应力会增加线圈刚性,但预应力超过 70 MPa,最大 Von Mises 应力已达 158 MPa 以上,而常温时 6061T6 铝的屈服强度为 275 MPa,许用应力为屈服强度的 1/2,因此,70 MPa 以上的预应力对结构安全已偏高。

3.2 降温时预应力的影响

在磁体的二维轴对称模型中,其降温过程的热应力为自由边界问题,因此,热应力主要由材料间热膨胀系数差异而产生。图 4 所示为热应力与绕制结束后冷质量内部应力状态叠加后的结果。

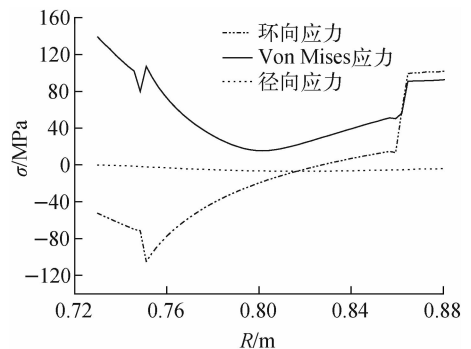


图 4 60 MPa 预应力下降温时冷质量内部应力分布
Fig. 4 Stress distributions in cold mass assembly with 60 MPa pre-stress on conductor after cooling

降温后骨架与线圈内的最大应力仍发生在铝线轴中心面最内侧和线圈最内层,但因紧固带的热膨胀系数比线圈的大,线圈外层应力明显增加,紧固带内应力水平较降温前明显升高;线圈对铝骨架的径向应力减小为 -3.1 MPa;

线圈横截面内侧底面与侧面端角处的剪应力明显升高,60 MPa 预应力下的最大剪应力为 27.8 MPa。图 5 所示为降温时预应力与冷质量内部峰值应力的关系。

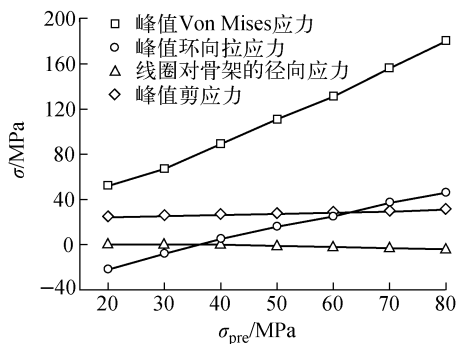


图 5 降温时预应力与冷质量内部峰值应力的关系
Fig. 5 Relationship between pre-tress on conductors and peak stress in cold mass assembly after cooling

如图 5 所示,增加绕制预应力,可使线圈中环向拉应力和径向压力增大,用以抵消因冷质量收缩而产生的环向和径向应力的减小。由于 Von Mises 峰值应力在降温前后变化不大,因此,预应力对 Von Mises 应力的影响与绕制结束后相近。减小预应力使得降温时环向拉应力逐渐向压应力转变,此时的线圈实际上已退绕或松开;同时,当预应力小于 40 MPa 时,径向应力已趋于零,由于有滑移面的影响,此时的线圈与骨架底部的热接触已变得很小,从而恶化冷量到线圈的传导。最大剪应力在 80 MPa 预应力下超过环氧的剪切许用应力,有可能在降温时就发生环氧破裂。

3.3 励磁时预应力的影响

洛伦兹力使线圈试图脱离线轴,因此,励磁后线轴上的应力水平下降。洛伦兹力同时抵消一部分线圈的径向应力,并增加了线圈外层环向应力(图 6)。

在不考虑预应力或预应力很小的情况下,线圈仅靠外层紧固带来抵消洛伦兹力作用,但紧固带对线圈的径向压力在厚壁线圈时无法传递到线圈内侧,而预应力不足会引起线圈内部径向应力不足以约束导线在磁场中的位移;如果足够的预应力使得线圈内,尤其是线圈对骨架的径向应力达到 -3 MPa,则将较为有效地

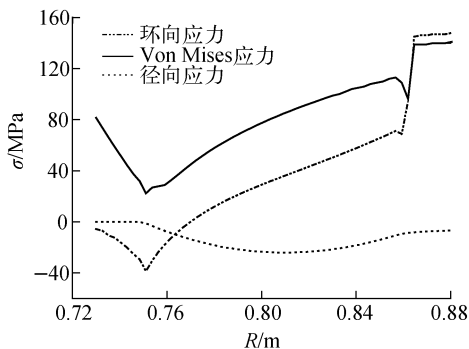


图 6 60 MPa 预应力下励磁时冷质量内部应力分布
Fig. 6 Stress distributions in cold mass assembly after charging with 60 MPa pre-stress on conductor

抑制引起失超的导线移动行为^[6-7]。图 7 中预应力小于 50 MPa 时线圈对骨架的径向应力已接近 0 MPa,此时的线圈各层间的紧密程度很小,导线间的约束力不足以抑制导线在磁场下的微小位移,从而无法减小失超的可能性。所以,预应力应大于 50 MPa。

尽管洛伦兹力减小了剪应力水平,但增加预应力至 80 MPa 时,最大剪应力仍接近环氧的剪切许用应力,环氧更易发生破碎而引发失超。同时,增加预应力使线圈内的应力水平较降温前后增大,图 7 中的峰值 Von Mises 应力发生在线圈最外层,在增加预应力至 80 MPa 时,Von Mises 应力为 148 MPa,已超过超导线的许用应力 130 MPa。因此,预应力不应大于 80 MPa。

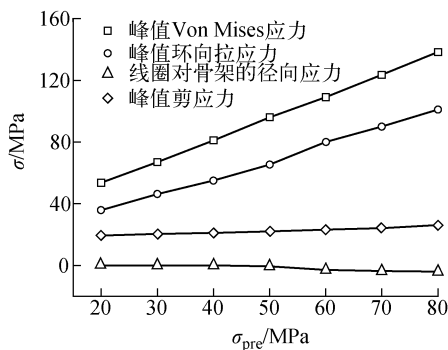


图 7 励磁时预应力与冷质量内部峰值应力的关系
Fig. 7 Relationship between pre-tress on conductors and peak stress in cold mass assembly after charging

4 紧固带预应力对冷质量内部应力状态的影响

为使紧固带对线圈有更好的箍紧作用,选择

比线圈有更大热膨胀系数的铝丝作为紧固带材料,同时考虑到励磁时紧固带受到很大的环向拉应力,因此,选择强度较高的 5356 铝丝。但紧固带的厚度与线圈厚度比仅为 0.245,紧固带对线圈内层的机械影响很小;同时,紧固带与冷质量综合应力的关系更受关注,因此,着重分析紧固带预应力对冷质量 Von Mises 应力的影响。

图 8 所示为紧固带预应力与冷质量内部峰值 Von Mises 应力的关系。在计算时,导线的预应力设为 60 MPa,随着紧固带预应力的增加,冷质量内的应力水平与预应力呈近似线性规律,但应力随紧固带预应力的变化量仅为每增加 10 MPa 预应力,冷质量内的峰值 Von Mises 应力增加 1.2 MPa,因此,紧固带预应力对冷质量内部应力状态的影响在设计中可忽略。

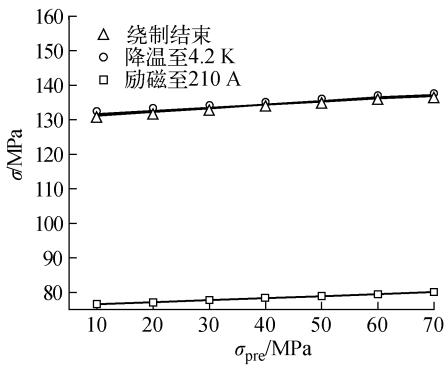


图 8 紧固带预应力与冷质量内部峰值 Von Mises 应力的关系

Fig. 8 Relationship between pre-tress on banding and peak Von Mises stress in cold mass assembly

5 结论

冷质量各组成部分始终处于弹性变形范围,冷质量的应力水平与预应力呈近似线性关系,增加导线的预应力可明显增加冷质量内部的应力水平。但预应力超过 70 MPa 时,线圈和骨架上应力超过材料的许用应力,而超过 80 MPa 时,最大剪应力在励磁过程中达到或超过环氧的剪切许用应力,从而可能导致环氧破裂而引起失超;小于 50 MPa 预应力时,降温尤其是励磁后则会导致线圈与骨架热接触变差甚至产生缝隙;同时,要使线圈对骨架的径向压应力大于 3 MPa,预应力不得小于 60 MPa。综合考虑结构安全和磁体机械稳定性,导线预应力

优化结果为 60~70 MPa。

紧固带的预应力对冷质量应力分布影响很小,因此,紧固带在厚壁超导磁体中的紧固作用是有限的。但在 MICE 超导耦合磁体中,紧固带的主要作用是焊接盖板时保护超导导线和冷却时从盖板为线圈传导冷量。为简化绕线机设置,紧固带预应力与导线选择相同的预应力值。

本文的研究对象为采用湿绕工艺绕制的大尺寸螺线管超导磁体。由于螺线管磁体导线的绕制结构类似,且密绕螺线管磁体内部的应力分布趋势与导线自身结构关系很小,所以,本文的分析也同样适用于采用干绕工艺或圆形截面导线的螺线管线圈。

参考文献:

- [1] GREGOIRE G, RYCKEWAERT G, CHEVALIER L, et al. MICE and international muon ionization cooling experiment technical reference document [EB/OL]. (2004). <http://hep04.phys.itt.edu/cooldemo>.
- [2] LI D, GREEN M A, VIROSTEK S P, et al. Progress on the RF coupling module for the MICE channel [C]//Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference. Knoxville, Tennessee: Institute of Electrical and Electronics Engineers Incorporated, 2005: 3 417-3 421.
- [3] 布雷克纳. 超导磁体系统[M]. 金德昌,李树棠,黄友朋,等,译. 北京:科学出版社,1986:180-207.
- [4] BOBROV E S, WILLIAMS J E C. Direct optimization of the winding process for superconducting solenoid magnets (linear programming approach) [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1981, 17(1): 447-448.
- [5] WANG L, GREEN M A, XU F Y, et al. The engineering design of the 1.5 m diameter solenoid for the MICE RFCC modules[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, 18(2): 937-940.
- [6] MASANORI A, HAMAJIMA T, OHSAKI O, et al. Internal stress influence on high current density superconducting magnet performance [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 1995, 5(2): 365-368.
- [7] MASANORI A, HAMAJIMA T, OHSAKI O, et al. Radial stress influence on high current density superconducting magnet performance with large and small bore[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(4): 3 109-3 112.