

感应加热用传导冷却 YBCO 高温超导磁体的热稳定性实验研究

王晓勇^{1,2,3}, 张东^{1,2,3}, 马韬^{1,3}, 靖立伟^{1,3}, 梁爽^{1,2,3}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院应用超导重点实验室, 北京 100190)

摘要:与传统的高频交流感应加热技术相比,高温超导直流感应加热技术能够大幅度提升低电阻率、非铁磁性金属材料的透热处理加工效率。在高温超导感应加热系统中,超导磁体的热稳定性是保证系统安全稳定运行的关键。本文对传导冷却 YBCO 高温超导磁体进行通流实验,通过布置在磁体不同位置的多个温度传感器来监测各部分的温度情况,以温度能否在安全范围内趋于平稳作为判定条件研究超导磁体的热稳定性。同时,本文还研究了磁体载流的幅值与上升速率对磁体温升的影响。结果表明,高温超导磁体在传导冷却条件下,其长期安全稳定运行电流值的安全裕度因子选择通常比浸泡冷却式磁体略低,对于运行的实验磁体,安全裕度因子可取为 0.65;传导冷却磁体远端导热性能差,可通过增加导冷点以及改善传热的方式来弥补冷却不均的缺陷;在磁体能够稳定运行的一定范围内,电流不同的上升速率对最终温升无明显影响。本文的研究成果将为今后大型传导冷却超导磁体的热稳定性分析与安全运行提供有价值的参考。

关键词:传导冷却;高温超导;YBCO 磁体;热稳定性

中图分类号: TM26

文献标识码: A

文章编号: 1003-3076(2017)04-0016-08

1 引言

在低电阻率、非铁磁性金属材料的透热处理加工领域,采用传统的交流高频感应加热技术的加热效率只有 50% 左右。文献[1]首次提出将高温超导 (HTS) 带材应用于感应加热技术,可使其效率得到显著提升,但其提升幅度受制于 HTS 带材的性能。近年来,随着超导材料及低温制冷技术的进步与发展,高温超导技术已经在电缆、飞轮储能、限流器、发电机等电力设备^[2-10]应用方面进行了示范运行。因此,在这种技术背景下,基于直流的新型高温超导感应加热技术的提出和实现具备了可行性。由于高温超导直流感应加热技术可以充分发挥超导材料直流无阻载流、传输电流密度大的优势,并具有工件加热快速、均匀,透热处理过程可重复性好、清洁无污染,设备安装维护方便等特点,渐渐成为研究的热点并

已经取得了工程上的应用^[11-13]。超导磁体作为感应加热系统中的核心组成部分,需运行于低温环境,通常采用传导冷却或浸泡冷却两种方式。传导冷却超导磁体具有无需补液、运行维护方便、结构紧凑、安全性好等优点,目前正在很多应用领域逐步取代浸泡冷却磁体^[14]。与低温超导磁体相比,高温超导磁体具有更高的运行温区以及更优良的抵抗瞬态热扰动的能力,但由于高温超导磁体在励磁、退磁过程以及接头处产生热损耗,如果这些热量不能够被及时地移除,磁体会因本身热量积累而持续升温最终引起失超,甚至会对磁体造成永久性损坏。尤其是在传导冷却条件下,一些高温超导磁体在运行电流低于临界电流时出现热失控现象,更易造成磁体的不稳定。因此,超导磁体的热稳定性问题是决定高温超导磁体系统能否安全运行和实用化的关键。

目前,在传导冷却超导磁体热稳定性研究方面,

收稿日期: 2016-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(51477168)资助项目

作者简介: 王晓勇(1991-),女,辽宁籍,硕士研究生,研究方向为高温超导电力应用技术;

张东(1977-),男,黑龙江籍,副研究员,硕导,研究方向为高温超导电力应用。

已有国内外的众多学者进行了一系列工作,包括高温超导磁体在暂态^[15,16]、过流^[17]状态下的热特性研究,提出基于热失控电流及电流分流温度^[18,19]的稳定性判定标准等。但现有的研究主题大多为高温超导储能(SMES)磁体,而感应加热磁体运行的稳定性直接关系到磁场分布,进而影响被加热工件的加工质量,所以更关注于其产生的背景磁场分布以及磁场稳定性。相比较而言,实际上是对感应加热磁体的稳定性提出了更高的要求,因而本文实验从温度以及电压变化的角度分析探究感应加热磁体的热稳定性问题。

为了研究 YBCO 高温超导磁体在稳态运行过程中的热稳定性问题,本文在 18.5K 传导冷却条件下对 YBCO 高温超导磁体进行通流实验,改变通流的电流值,从而确定其安全稳定运行电流,并将该电流值与磁体临界电流的比值确定为磁体的安全裕度因子;通过布置于磁体不同位置的温度传感器的温度变化,监测磁体的运行情况,进而确定磁体性能;并通过实验研究了电流不同幅值和上升速率对磁体温升的影响。本实验的研究与分析,将为今后大型传导冷却高温超导磁体的热稳定分析与安全运行提供有价值的参考。

2 实验装置

YBCO 高温超导磁体的参数如表 1 所示。为了研究该磁体在传导冷却条件下的热稳定性,在该磁体内部的不同部位布置了 6 个温度传感器,其位置分布如表 2 所示。其中,T1 与 T3 相对,T2 与 T4、T5 相对,T4、T5 因处于磁体端部而受到较强的垂直磁场,T6 位于磁体的电流引线附近。

表 1 磁体参数

Tab. 1 Parameters of superconducting magnet	
参数	数值
带材用量/m	760
高度/mm	104
内径/mm	512
外径/mm	680
总匝数	451
临界电流 I_c (18.5K)/A	185

传导冷却磁体总体结构示意图如图 1 所示。利用真空泵使得磁体系统在杜瓦内接近真空(5.6×10^{-2} Pa)环境,采用两台 G-M 制冷机 AL600 和 AL325 进行冷却。采用数字电压表配合多通道数据采集系统

等进行温度、电压测量,实验测试平台如图 2 所示。

表 2 温度传感器位置

Tab. 2 Arrangement of temperature sensors	
温度传感器编号	位置
T1	55 匝/5 层
T2	82 匝/8 层
T3	280 匝/25 层
T4	319 匝/29 层
T5	429 匝/39 层
T6	电流引线

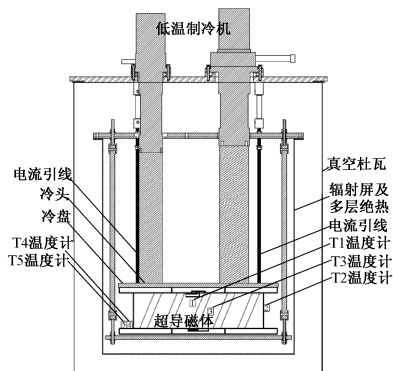


图 1 传导冷却超导磁体示意图

Fig. 1 Schematic of conduction-cooled magnet

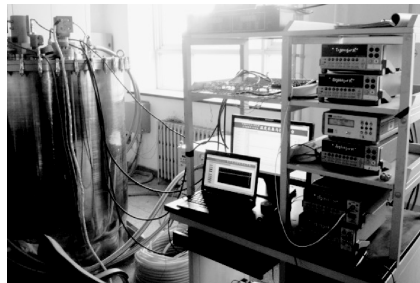


图 2 实验测试平台

Fig. 2 Experimental platform

3 热稳定性分析

高温超导磁体的热稳定性取决于其焦耳热损耗与系统漏热等产热总量以及冷却总量之间的平衡。高温超导磁体的焦耳热损耗主要有 HTS 带材的交流损耗及接头电阻损耗等。当产热总量低于冷却能力时,高温超导磁体的温度会随着电流可逆地上升;而当产热总量超过冷却能力时,磁体的温度随电流上升的过程将不再可逆,并会引起热失控现象^[20]。

在磁体产热方面,高温超导磁体励磁和退磁过程中会产生交流损耗。此外,由于磁体外部空间的

温度比磁体温度要高,因此还存在着杜瓦内部的对流漏热、杜瓦内壁对磁体的辐射漏热以及电流引线的漏热。由于实验前杜瓦内真空度达 10^{-2} Pa 量级,此状态下剩余气体足够稀薄,可忽略对流漏热;对于辐射漏热与电流引线的漏热均有实用的经验计算方法。所以,制冷机传导冷却的超导磁体其热传导方程可概括表示为^[21-23]:

$$C(T) \frac{dT}{dt} = \nabla(\lambda(T) \nabla T) + Q_e + Q_f - Q_c \quad (1)$$

$$Q_f = Q_J + Q_{cp} + Q_v \quad (2)$$

$$Q_J = I_{op} E \Delta l / V \quad (3)$$

$$E = E_c \left(\frac{I_{op}}{I_c(B, T)} \right)^{n(B, T)} \quad (4)$$

式中, T 为高温超导磁体温度; t 为运行的某一时刻; C 为高温超导材料及环氧板等的比热; λ 为导热系数; Q_e 为接头电阻损耗、辐射漏热、电流引线漏热等; Q_f 为高温超导体的交流损耗; Q_c 为制冷机的制冷量; Q_J 为磁体通流状态下磁体的 n 指数损耗量; Q_{cp} 为耦合损耗; Q_v 为涡流损耗; I_{op} 为磁体运行电流; E 为磁体通流状态下的电势; Δl 为磁体的超导带长度; V 为热干扰点区域的体积; n 为高温超导带材的指数; E_c 为高温超导带材的失超判定标准,通常取为 $1 \mu V/cm$; I_c 为磁体的临界电流。

制冷机的冷却特性曲线如图3所示。可见制冷机冷头的制冷功率是冷头温度的函数,而冷头温度又是在制冷机冷却功率和磁体发热功率平衡后稳定运行时的温度值。

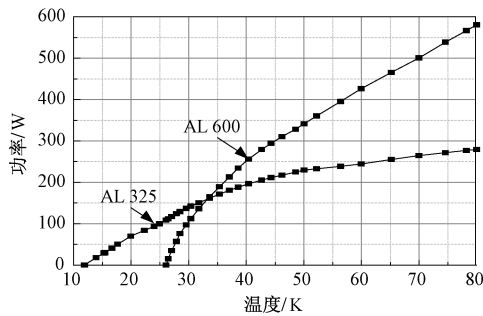


图3 制冷机冷却特性曲线

Fig. 3 Cooling characteristic curve of cooler

在高温超导磁体稳定运行时,由式(3)、式(4)可知,当运行电流 I_{op} 接近临界电流 I_c 时,会引起高温超导体的较大电压降,进而产生较大的指数损耗。高温超导磁体的指数损耗使得其热稳定性研究不能简单地应用低温超导磁体基于分流温度的稳定性判定方法,需要更进一步的理论及实验研究。

下文将通过实验研究感应加热用高温超导磁体的产热总量及传导冷却能力之间的平衡关系,分析超导磁体的热稳定性。

4 实验方法

4.1 超导磁体稳态通流实验

开启两台制冷机(AL600和AL325),经过约90h将实验平台冷却至最低温度约为18.5K,此时系统处于热平衡状态。降温过程中各温度传感器显示的温度变化如图4所示。

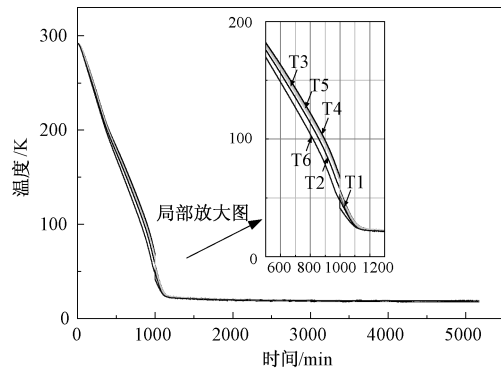


图4 降温过程温度变化

Fig. 4 Temperature variations during cooling process

以0.5A/s的速率向磁体通入幅值为5A的电流,保持30min,记录通流前后各温度传感器的读数变化;通入幅值为10A、15A的电流,重复实验;通入幅值为20A的电流,由于幅值增加,将保持时间延长至2h,记录通流前后各温度传感器的读数变化。

变温实验平台采样时间间隔为5s,从电流幅值达到25A时开始,以加载电流后4h过程中温度的变化作为判断磁体能否在稳态过程安全运行的依据。通入电流由25A逐渐增加至75A进行实验,每次增幅为5A。

随后,又进行了加载电流80A、85A、90A(端电压0.2 $\mu V/cm$)、95A、100A(端电压0.25 $\mu V/cm$)、105A、110A(端电压0.3 $\mu V/cm$)、115A(端电压0.35 $\mu V/cm$)、120A(端电压0.4 $\mu V/cm$)、135A(起始端电压0.43 $\mu V/cm$)的实验。研究超导磁体在稳态运行时各处温度变化。

4.2 电流上升速率对温升影响实验

待磁体重新冷却至18.5K,达到热平衡状态。以120A为磁体能够长期稳定运行的安全电流 I_s ,选取50% I_s 和90% I_s ,研究通入电流为以下情况时的磁体温度变化:

(1) 幅值 60A, 上升速率为 0.05A/s 和 5A/s。

(2) 幅值 110A, 上升速率为 0.05A/s、0.5A/s、5A/s 和 50A/s。

5 实验结果及分析

5.1 磁体稳态运行的稳定性

在磁体稳态运行研究中, 磁体交流损耗的主要部分为指数损耗, 产生的热量主要体现在温度变化上, 电压的变化反映出磁体的电磁性能, 两者共同表征出磁体的热稳定性。

磁体通入 5A、10A、15A、20A 电流时, 在整个通流过程中, 温度读数几乎不变, 上下浮动不超过 0.05K, 磁体能够稳定运行。

磁体通入 25 ~ 75A 电流时, 磁体的温度略有上升, 与前一次通流后的稳定温度相比, 上升幅度基本都在 0.5K 以内, 通常在通入电流后 1h 左右温度开始趋于稳定, 磁体能够稳定运行。其中, 在加载 75A 电流时, 磁体两端电压达到了 0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$, 如图 5 所示; 与加载 70A 电流时的稳定温度相比, 温度约上升 0.3K, 如图 6 所示。

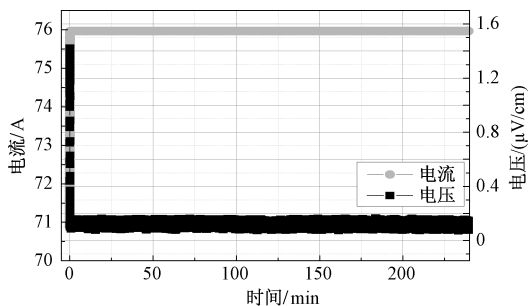


图 5 加载 75A 电流时电压变化

Fig. 5 Results of voltage when loading 75A current

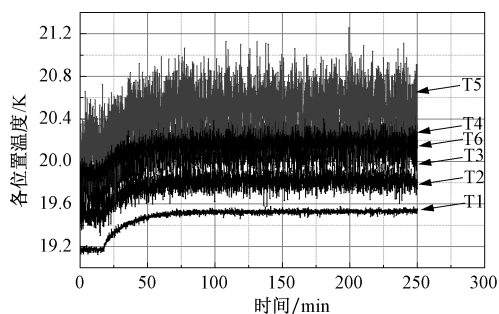


图 6 加载 70A 电流时温度变化

Fig. 6 Results of temperature when loading 70A current

在加载电流 80 ~ 135A 过程中, 加载电流 120A 及以下时, 磁体温度均能够在 4h 内逐渐稳定, 每次增加 5A 电流后的温升基本在 2K 以内; 为了保持结

果的可靠性, 通入 115A 与 120A 电流后的稳定运行时长均延长至 6.5h, 结果表明, 磁体能够稳定运行。

加载 135A 电流时, 在 1h 之内, 观察到磁体温度不断上升 (如图 7 所示), 且端电压从 0.43 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 上升至 0.57 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 并仍有上升趋势 (如图 8 所示), 考虑到电压和温度持续上升, 说明超导磁体内部产热总功率已大于传导冷却功率, 系统内形成正反馈。为保护磁体, 切断电流。

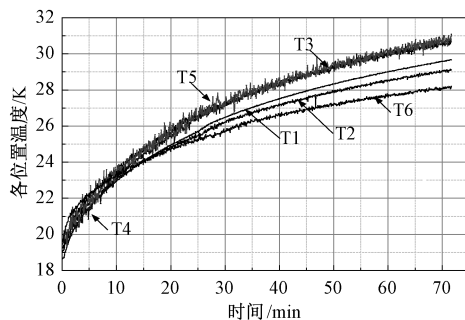


图 7 加载 135A 电流时温度变化

Fig. 7 Results of temperature when loading 135A current

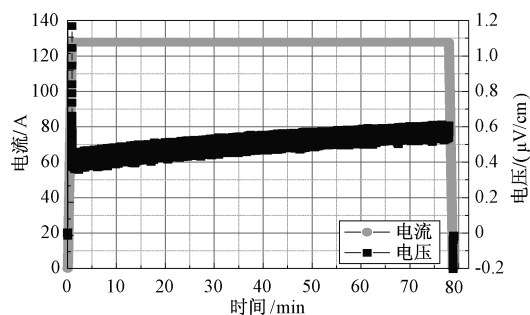


图 8 加载 135A 电流时电压变化

Fig. 8 Results of voltage when loading 135A current

在这一过程中, 研究磁体不同部位的温升情况, 选取各个温度传感器 5 个最高和最低温度的平均值作为磁体各个位置点的最高和最低温度, 对应的差值即为其温升, 如表 3 所示。结果显示, T5 温度传感器温升最高, 为 11.48K; T3 和 T4 温度传感器次之, 分别为 11.43K 和 11.42K; T6 温度传感器温度最先开始上升且开始阶段上升最快, 表明此处距热点位置近且电流引线处传热效果明显, 但温升为 8.42K, 说明发热量相对较小。从温度的分布及冷却传导路径综合考虑, 可以看出在磁体偏下的位置附近, 磁体发热较多、冷却效果欠佳, 需通过增加导热冷点或改善传热等措施来提高磁体的稳定性。

除了温度方面, 从电磁角度考察磁体两端电压变化, 通入电流 75A、115A、120A 和 135A 时磁体两

表3 磁体不同位置温升

Tab.3 Temperature rises at different positions

温度传感器	最高温度/K	最低温度/K	温升/K
T1	29.69	18.72	10.97
T2	29.64	19.14	10.49
T3	30.75	19.32	11.43
T4	30.95	19.52	11.42
T5	31.01	19.53	11.48
T6	28.23	19.80	8.42

端电压变化如图9所示。对通入135A电流时电压曲线进行拟合,得到曲线拟合方程: $U = -3.66 \times 10^{-9}t^2 + 5.14 \times 10^{-5}t + 0.433$,拟合度 R^2 为0.871,残差平方和RSS为0.638,可以明显看出电压上升的趋势。

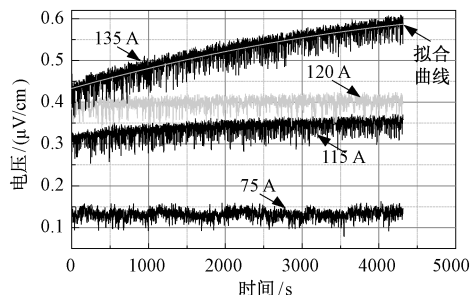


图9 通入电流75A、115A、120A、135A时电压变化

Fig.9 Results of voltage when loading 75A, 115A, 120A, 135A current

结果表明,随着载流幅值的增大,磁体指数损耗与各部分漏热也随之增加,因而磁体温度逐渐升高,实验结果与理论分析相符。从温度及电压变化情况得知,磁体在传导冷却18.5K条件下能够长期安全稳定运行电流为120A,此时对应的安全裕度因子为0.65;而当通入135A电流时不能够长期稳定运行,但运行时长在1h之内的温升尚在磁体可承受的安全范围,实际应用中应在这段时间内及时采取措施以保护磁体不受损坏。

5.2 电流上升速率对磁体稳定性的影响

由于在电流上升过程中幅值一直在变化,如第3节热稳定性分析所述,磁体的交流损耗增加了涡流损耗及耦合损耗部分,磁体的产热及制冷机的功率也随之改变,实际上是一个复杂的动态过程。因而本实验侧重于从最终温度这一宏观指标来探究电流不同幅值与上升速率对磁体稳定性的影响。

通入60A的电流时,温度变化情况如图10所

示。磁体各位置上的温度分布及趋势基本一致。对于电流上升速率为0.05A/s的情况,温度随时间而上升,曲线形状先为凹曲线后为凸曲线,经过大约3400s达到稳定,温升约为0.8K;对于电流上升速率为5A/s的情况,温度随时间上升的形状为凸曲线,经过大约3760s达到稳定,从温度开始上升到趋于平稳的时间比0.05A/s情况下要长6min左右,温升约为0.9K。

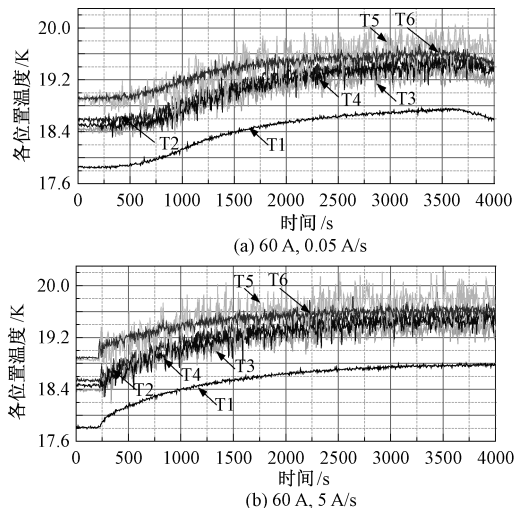


图10 电流幅值为60A时不同上升速率对温升影响

Fig.10 Impacts of different current ramp rates on temperature rises when loading 60A current

通入110A的电流时,温度变化情况如图11所示。磁体各位置上的温度分布及趋势也基本一致。对于电流上升速率为0.05A/s的情况,温度随时间而上升,曲线形状先为凹曲线后为凸曲线,经过大约6500s达到稳定,最大温升约为5.6K;对于电流上升速率为0.5A/s、5A/s和50A/s的情况,温度随时间上升的形状为凸曲线,经过大约7200s达到稳定,从温度开始上升到趋于平稳的时间比0.05A/s情况下要长约10min,最大温升约为6K。

实验结果表明,在磁体能够稳定运行的一定范围内,电流不同的上升速率对于磁体最终温度的影响仅为0.488%和2.02%,只有在电流变化非常缓慢的情况下(比如0.05A/s),出现温度升高先慢后快再变慢的情况,而且温度趋于稳定的时间也比电流变化较快的情况稍短。根据式(1)~式(4),这种现象的原因可以解释为,由于电流变化非常缓慢,因外场引起的磁滞损耗、涡流损耗和耦合损耗部分大幅减少,同时超导磁体载流时产生的热量能够比较及时地散发出来,不会过多地积累,在传热情况不是

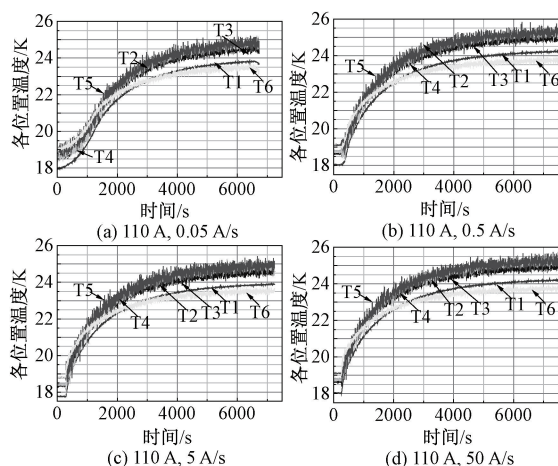


图 11 电流幅值为 110A 时不同上升速率对温升影响

Fig. 11 Impacts of different current ramp rates on temperature rises when loading 110A current

很理想的传导冷却方式下更有利于使各部分较快地达到热平衡。

6 结论

本文通过实验研究了传导冷却 YBCO 高温超导磁体稳态运行特性,通过加载电流从 5A 逐步升高至 135A 过程中的温度变化,确定该磁体的最大稳定运行电流;并通过磁体各位置的温升情况推断磁体性能特点。此外还研究了电流不同幅值和上升速率对磁体温升的影响。该定量实验将为传导冷却高温超导磁体热稳定性研究提供数据基础,进而对其安全稳定运行及应用提供一定的指导。本文研究的结论概括如下:

(1) 传导冷却高温超导磁体的长期安全运行电流除了受到临界电流和分流温度的影响,在达到导体分流温度之前,为了避免磁体的温度持续上升,对于长期稳态运行于 18.5K 温区的磁体,本文将安全因子选择为 0.65。由于实际运行磁体的安全因子选择与冷却周长、传热效率、磁体体积等因素相关,该结论可作为相似传导冷却条件下的同类磁体安全因子值选择的参考。

(2) 通过温度传感器显示的温升及相应位置可以确定磁体内的热点在磁体下端、稍靠外的位置 (T4、T5 附近),应注意加强对此部分的冷却。T4、T5 位置为磁体距冷头较远处,导热性能差,可通过增加导冷点以及改善传热的方式来弥补冷却不均的缺陷,进而提升磁体的热稳定性。

(3) 当电流幅值在小于长期安全运行电流的一

定范围内,以不同上升速率施加相同幅值的电流对磁体最终温升几乎没有影响 (小于 2%),只有在电流变化非常缓慢的情况 (比如 0.05 A/s) 下温度上升的过程略有不同。

参考文献 (References):

- [1] M Runde, N Magnusson. Induction heating of aluminum billets using superconducting coils [J]. Physica C: Superconductivity, 2002, 372-376 (2): 1339-1341.
- [2] Dong Zhang, Shaotao Dai, Yuping Teng, et al. Testing results for the cable core of a 360m/10kA HTS DC power cable used in the electrolytic aluminum industry [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23 (3): 5400504.
- [3] 余志强, 张国民, 邱清泉, 等 (Yu Zhiqiang, Zhang Guomin, Qiu Qingquan, et al.). 高温超导磁悬浮轴承的研究进展 (Research progress of high-temperature superconducting bearing) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (7): 55-61.
- [4] Li Ren, Ying Xu, Wenping Zuo, et al. Development of a movable HTS SMES system [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25 (4): 5701109.
- [5] 党存禄, 林国富 (Dang Cunlu, Lin Guofu). 超导储能并网直驱风电系统中的应用研究 (Application research of superconducting magnetic energy storage in grid-connected directly-driven wind power generator) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2013, 41 (16): 48-53.
- [6] 张晚英, 胡雪峰, 周辉, 等 (Zhang Wanying, Hu Xuefeng, Zhou Hui, et al.). 改进型饱和铁心高温超导限流器的实验研究 (Experimental research on an improved saturated core high temperature superconducting fault current limiter) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (11): 169-176.
- [7] Qian Chen, Guohai Liu, Zhengmeng Liu, et al. Design and analysis of a new fully stator-HTS motor [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24 (3): 5202005.
- [8] 洪天琪, 余海涛, 胡敏强 (Hong Tianqi, Yu Haitao, Hu Minqiang). MgB₂ 高温超导发电机设计及转子结构优化 (Design of MgB₂ HTS generator and its rotor structure optimization) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (2): 39-43.
- [9] H Moon, Y Kim, H Park, et al. Development of a MW-

- class 2G HTS ship propulsion motor [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (4): 5203805.
- [10] 肖立业, 林良真 (Xiao Liye, Lin Liangzhen). 超导技术在未来直流输电中的应用 (Superconducting applications for DC power transmission in future) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (5): 1-4.
- [11] N Magnusson, M Runde. A 200kW MgB₂ induction heater project [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2006, 43 (1): 1019-1022.
- [12] A Stenvall, N Magnusson, Z Jelinek, et al. Electromagnetic viewpoints on a 200kW MgB₂ induction heater [J]. Physica C: Superconductivity, 2008, 468 (6): 487-491.
- [13] J Kellers, C Bühner, H Hagemann, et al. Magnetic billet heating rivals conventional furnaces [J]. Heat Processing, 2009, 7 (3): 205-210.
- [14] 张楷浩, 邱利民, 甘智华, 等 (Zhang Kaihao, Qiu Limin, Gan Zhihua, et al.). 制冷机传导冷却的超导磁体冷却系统研究进展 (Advance in cryogenic system of cryocooled superconducting magnet) [J]. 浙江大学学报: 工学版 (Journal of Zhejiang University: Engineering Science), 2012, 46 (7): 1213-1226.
- [15] A Ishiyama, H Asai. A stability criterion for cryocooler-cooled HTS coils [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, 11 (1): 1832-1835.
- [16] L Ren, Y Xu, H Liu, et al. The experimental research and analysis of a HTS SMES hybrid magnet [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25 (3): 1-5.
- [17] J Kim, H Kim, J Lee, et al. Experimental study on thermal behavior of HTS coils with quasi-insulation winding method at overcurrent operation [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (4): 4601105.
- [18] K Tasaki, T Kuriyama, K Marukawa, et al. Study on thermal stability of conduction-cooled HTS coil [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17 (2): 2258-2261.
- [19] 刘宏伟, 余运佳, 王秋良 (Liu Hongwei, Yu Yunjia, Wang Qiuliang). 制冷机冷却的超导磁体在励磁时的稳定性分析 (Stability study on cryocooler-cooled superconducting magnets during current excitation) [J]. 低温物理学报 (Chinese Journal of Low Temperature Physics), 2005, 27 (4): 375-379.
- [20] V S Vysotsky, Y A Ilyin, A L Rakhmanov, et al. Quench development analysis in HTSC coils by use of the universal scaling theory [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2001, 11 (1): 1824 - 1827.
- [21] 戴陶珍 (Dai Taozhen). 传导冷却高温超导储能磁体的电磁热综合分析 (Electromagnetic and thermal analysis on conduction-cooled high temperature superconducting energy storage magnet) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science & Technology), 2006.
- [22] 吴钢, 王惠龄, 谢江波, 等 (Wu Gang, Wang Huiling, Xie Jiangbo, et al.). 直接冷却超导磁储能磁体加载实验与热分析 (Loading experiment and thermal analysis of directly cooled magnet of SMES system) [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版 (Journal of Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition), 2007, 35 (4): 85-88.
- [23] 丁立晴, 张京业, 辛昭昭, 等 (Ding Liqing, Zhang Jingye, Xin Zhaozhao, et al.). 1MJ/0.5MW 传导冷却高温超导储能-限流磁体的传热分析 (Thermal analysis on conduction-cooled HTS magnet for a 1MJ/0.5MW SMES-FCL) [J]. 低温与超导 (Cryogenics & Superconductivity), 2015, 43 (6): 46-49.

Experimental research on thermal stability of conduction-cooled YBCO magnet for induction heating

WANG Xiao-yong^{1,2,3}, ZHANG Dong^{1,2,3}, MA Tao^{1,3}, JING Li-wei^{1,3}, LIANG Shuang^{1,2,3}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Applied Superconductivity, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: DC superconducting induction heating method can be much more efficient in metal preheating process when billets are made of low-resistivity and non-magnetic materials as compared with the traditional AC induction

heating techniques. In a high temperature superconducting (HTS) induction heating system, the stability of the HTS magnet is crucial to ensure its safe operation. In this paper, a HTS YBCO magnet has been tested under conduction-cooled circumstances. It is chosen as a stability criterion that whether the temperature rises can tend to be steady within the safety margin. The temperature distributions were evaluated by sensors located at different positions of the magnet. Furthermore, the effects of different current ramp rates on temperature rises were investigated. It is found that for the safe operating current of a conduction-cooled YBCO magnet, the safety factor value usually smaller than that of an immersion cooled HTS magnet. For the operating magnet in this paper, the safety factor can be chosen as 0.65. Because the remote terminal of a conduction-cooled magnet has poor ability of heat transmission, it can be helpful to cover the shortage of uneven cooling by adding cooling points and improving heat transfer methods. It is also presented that different current ramp rates have little influence on the final temperature rises within the given range in which the magnet can operate stably. The tested and analyzed results in this paper are of great significance for studies on thermal stability analysis and safe operation of large-scale HTS magnets.

Key words: conduction-cooled; HTS; YBCO magnet; thermal stability

《电工电能新技术》期刊在线投稿系统上线通知

尊敬的作者和读者:

感谢您长期以来对本刊的支持! 为适应当前网络出版信息化的需求,更好地为广大作者和读者服务,促进期刊出版的规范化和科学化,《电工电能新技术》在线投稿系统已于2016年3月1日正式上线,投入使用。《电工电能新技术》期刊网站是集编辑部信息,期刊采编系统,网刊发布系统、知识交流平台等为一体的综合管理系统,旨在为读者、作者、审稿专家及编辑提供交流互动平台。期刊采编系统包括作者在线投稿、专家在线审稿、编辑在线办公等功能,能够实现投稿-审稿-编辑-编审整个过程的全在线处理,提供全流程的邮件自动发送及自动提醒功能。作者可通过网站投稿并查询稿件实时处理情况,审稿专家可实现网上审稿并查询稿件审理情况,广大读者可通过网站在线期刊模块阅读并下载已出版的期刊,并根据需求进行检索与个性化订阅,了解行业领域的最近技术进展,促进技术交流与传播。

网站目前处于初运行阶段,欢迎广大作者、审稿专家、读者及时向编辑部反映使用时遇到的问题,提出改进建议,以便我刊不断完善服务工作。

联系人:朱龙琴;**联系电话:**010-82547228,82547196;**电子邮箱:**dgdndedit@mail.iee.ac.cn

使用说明:

- (1) 可点击期刊网址 http://159.226.64.23/Jwk_dgdn/CN/volumn/home.shtml,直接进入网站。
- (2) 既是作者又是专家的用户无需重复登陆,登录后可通过身份切换按钮完成界面切换。
- (3) 期刊历史数据正逐步建设与完善中,敬请关注。

《电工电能新技术》编辑部