

高温超导直流感应加热技术研究综述

张东^{1,2,3}, 肖立业^{1,2,3}, 林良真^{1,3}

(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: 高温超导直流感应加热技术相对于常规的交流感应加热技术,能够显著提升有色金属材料的透热处理加热效率,还具有工件加热速度快、工件加热均匀、工件加热过程重复性好等优势,在金属冶炼和压延成型加工行业具有广阔的应用前景。本文详细论述了国内外对于高温超导直流感应加热原理和主磁体新结构探索的研究现状,综述了高温超导直流感应加热示范样机的研制情况,对比分析了两种感应加热技术,总结出高温超导直流感应加热的优势及形成机理。探讨了高温超导直流感应加热技术发展趋势、关键技术及科学问题,本文相关分析结果将对高温超导直流感应加热技术的研究提供参考。

关键词: 高温超导; 直流感应加热技术; 主磁体新结构; 节能原理

DOI: 10.12067/ATEEE2004023 **文章编号:** 1003-3076(2020)07-0045-09 **中图分类号:** TM37

1 引言

我国是有色金属铜铝及其相关产品的生产大国,根据工信部发布的规划,十三五期间精炼铜的表观消费量年均增长率为3.3%,预计2020年表观消费量13 500 kt,十三五期间原铝表观消费量年均增长率为5.2%,预计2020年表观消费量40 000 kt。预计2020年我国工业铝挤压材消耗量将达到9 461 kt,在总量上将远超我国以外地区总量的50%以上。

感应加热技术在锻件穿透加热,淬火加热,焊接以及熔炼等工业生产中有着广泛应用。在透热处理方面的应用包括钢管扩径,钢坯热锻,铜铝等有色金属的热压延加工。感应加热在金属熔炼方面的应用包括黑色金属,有色金属熔炼,铸造等^[1]。感应加热技术应用相关领域黑色金属冶炼和压延加工业,有色金属冶炼和压延加工业被列入高耗能行业。2019年,我国黑色金属冶炼和压延加工业增长9.9%,有色金属增长2.2%^[2]。

目前大中型交流感应加热技术应用中,加热钢铁的有效电热转换效率在50%~60%之间^[3],铜铝

等非铁磁性材料的有效电热转换效率低于35%~45%^[4]。行业的发展对感应加热技术及其装备提出了效率提高的需求,近些年来随着高温超导材料制备技术和低温制冷技术的进步,高温超导应用技术已经在电力电工装备领域取得了很多进展^[5-15],高温超导直流感应加热技术是高温超导应用技术和感应加热技术的结合^[16],新型高温超导直流感应加热技术可以提高现有交流感应加热技术的效率,开发大功率高温超导直流感应加热系统以及进一步加速应用于感应加热领域,对于我国的节能减排有实际意义,同时对于推进高温超导应用技术在电力电工装备实用化进程,具有重要的科学意义。

2 高温超导直流感应加热与传统交流感应加热技术对比

传统感应加热技术的原理是法拉第电磁感应定律和焦耳-楞次定律,交变的电流产生交变磁场,交变的磁场在导体中感生涡流,利用涡流的焦耳热来加热导体。传统的感应加热系统主要包括交流电源,交流感应铜线圈及其水冷却系统等。

影响感应加热设备有效电热转换效率的因素为

收稿日期: 2020-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51721005; 51977203; 51477168)

作者简介: 张东(1977-),男,黑龙江籍,副研究员,硕士,研究方向为超导电力技术;

肖立业(1966-),男,湖南籍,研究员,博导,博士,研究方向为电工理论与新技术。

线圈中的焦耳热损以及加热工件和线圈的材料特性。在线圈的焦耳热损方面,感应线圈一般为铜线或铜管等常规金属导体绕制,高频、大电流导致导体自身焦耳热非常巨大,例如感应熔炼炉感应线圈自身的焦耳热占感应炉额定功率的 20% 以上,而像焊管等感应线圈匝数少的感应加热设备,导体自身的焦耳热所占的比重更大。例如在热锻、金属加工与深加生产线上的感应加热设备,线圈的焦耳热要通过铜管内或线圈冷却箱体内的强迫冷却水带走^[17]。加热效率与工件和线圈的电阻率、磁导率等材料特性关系为:

$$\eta = \frac{p_w}{p_w + p_c} = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{\rho_c}{\rho_w \mu_w}}} \tag{1}$$

式中,η 为电热转换效率;p_w、p_c 分别为工件和感应线圈中的电能消耗功率;ρ_c 为感应线圈电阻率;ρ_w、μ_w 分别为工件电阻率和相对磁导率,对于非铁磁性金属的相对磁导率为 1,其电热转换效率低于 50%^[18]。

新型超导感应加热技术的原理是直流励磁的超导主磁体产生强直流磁场,铝质或铜质的工件在直流背景磁场中旋转切割磁力线,进而在工件中形成涡流并产生焦耳热将工件加热到工艺温度。新型超导感应加热设备主要包括直流励磁电源,超导主磁体系统和机械旋转系统等。

图 1 将超导感应加热与常规感应加热技术进行能耗分析,超导感应加热技术与常规感应加热技术进行综合对比,常规感应加热技术中,加热效率为 35%~40%,加热频率为 50~60 Hz,工件加热的透入深度为 15 mm,超导直流感应加热技术加热效率可以达到 80%~85%,加热频率为 4~12 Hz,工件加热的透入深度为 50 mm。新型超导感应加热设备运行过程中,工件中的感应电流产生阻碍旋转的制动反向转矩,机械能通过电磁感应的作用转变成了热能,超导主磁体系统中直流载流的超导线圈几乎不存在损耗,其主要损耗为低温冷却系统损耗和旋转电机损耗,而对于大功率的超导感应加热设备中,旋转工件的电机损耗占主导,电机的效率很高,因此新型超导感应加热设备的效率可以提升很多。此外由于主磁体具有良好的磁场梯度变化均匀性和稳定性,新型超导感应加热技术中还具有加热均匀,加热可重复性好,无需大功率无功补偿的优点。

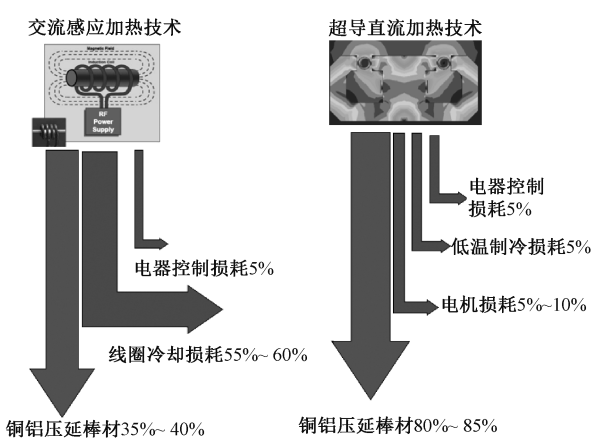


图 1 超导感应加热与常规技术耗能对比
Fig.1 Energy consumption comparison of IH technology

3 新型超导感应加热原理探索研究现状

2002 年,挪威 SINTEF 能源研究所和科技大学的研究者 M. Runde 和 N. Magnusson 尝试采用超导线圈来代替传统感应加热中的铜线圈,可以使加热过程的效率得到显著提升,在研究中指出,超导感应加热器的效率很大程度取决于高温超导带材的性能,尤其是超导带材交流损耗的幅值会对效率影响很大^[19]。通过用 Bi 带绕制超导线圈并通有交流电进行系列试验,如图 2 所示,线圈的设计值为 190 A/10 kW,测试中线圈仅达到 108 A/2 kW,此时的效率仅为 35%,未达到其设计效率 59%,并在结论中再次提及超导线圈中交流电产生的交流损耗成为影响效率的重要因素,更低交流损耗的超导带材绕制的线圈会提升效率^[20,21]。研究工作首次探索了通过采用超导线圈通交流电的方式来提高铝棒加热的效率的可行性,进行了 10 kW 的超导感应加热系统的初步设计,并在实验中未能实现满功率运行及设计效率,科研工作的启示是,高温超导带材的交流损耗成为交流背景磁场式超导感应加热的瓶颈,用于高温超导感应加热的超导磁体尚需进行科学合理的设计和构造以实现预期的电流及功率设计值。

2004 年,芬兰坦佩雷理工大学研究小组通过理论分析及优化设计对基于 Bi2223 高温超导带材的感应加热进行了可行性分析与概念设计^[22]。如图 3 所示,采用超导螺线管磁体直流载流产生直流背景磁场,在平行磁场中旋转两个工件切割磁力线产生涡流加热的结构,通过最大化平行磁场沿线圈径向的梯度变化来最大化输出功率的优化目标来设计超导磁体,采用了有限元电磁场算法耦合二次规划

法优化设计了超导磁体,基于传导冷却 Bi2223 超导磁体的稳定性分析来确定磁体的失超电流。文中指出,Bi2223 高温超导线圈可以用在新型感应加热中,并可以把感应加热总的电热转换效率提高到 90%以上。研究工作首次探索了在螺线管磁体的平行磁场中采用旋转工件于径向梯度变化的磁场中产生变化的磁通进而产生涡流加热。从科研工作中得到的启示是,Bi2223 可以用于高温超导感应加热主磁体中,同时本文主要旨在分析磁体的优化设计及分析平行磁场旋转工件式感应加热结构的可行性,其系统的功率分析和工件的效率计算仅为估算,需要进一步细化。

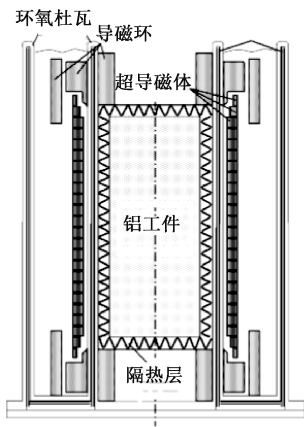


图 2 10 kW 超导感应加热原理样机

Fig.2 10 kW superconducting IH prototype

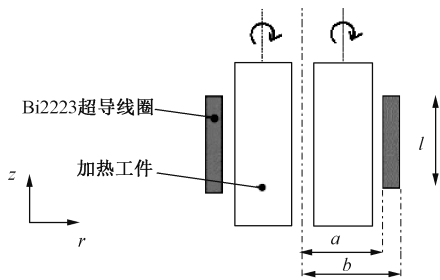


图 3 平行磁场原理的超导感应加热结构

Fig.3 Parallel magnetic superconducting IH

2005 年意大利研究小组开展了用于非铁磁性金属材料加热的超导直流感应加热技术的可行性研究。他们研究的整体思路为:驱动工件旋转于直流超导磁体产生的静态磁场中,由于超导磁体直流通电产生静态磁场,因此没有磁体交流损耗,系统的效率主要为驱动电机的效率。建立了等效热网络方法的数学模型并计算背景磁场下的工件的温度分布。研究发现:工件中的温度分布与磁场不均匀性、旋转

角速度无关,在工件轴向两端面以及径向透入深度位置处温度梯度有明显变化,在工件的中部的温度梯度变化很小^[23-25]。之后通过仿真平台,对铝锭转速、外磁场强度以及加热时长等参数之间的关系做了对比、分析,并研究其对加热功率、温度均匀性的影响。通过永磁磁体构造了等效背景磁场的实验平台,测试了转速、磁场以及温度之间的数据。提出了鞍形磁体(见图 4)超导磁体结构改善铝工件由端部效应引起的轴向温度分布不均匀的问题^[26,27]。

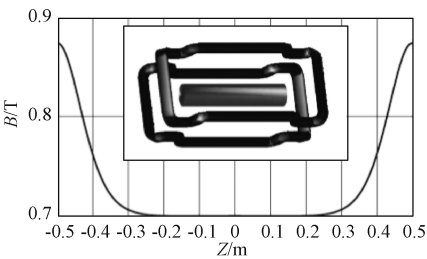


图 4 鞍形线圈的超导感应加热结构

Fig.4 Saddle coil for superconducting IH

2008 年,俄罗斯圣彼得堡国立电工技术大学和德国汉诺威大学的学者合作开发二维和三维数值仿真程序对螺线管磁体端部磁场感应加热的模型进行了电磁和热过程的仿真求解^[28, 29],分析了磁体的结构对于工件中温度分布的影响,可以通过采用合理的磁体构型来降低工件端部过热。研究的意义在于建立的数值模型为接下来研究加热过程的参数,优化铝压延过程,优化工件内部温度分布的研究做了前期工作,同时在三维求解模型中,考虑了通过导磁环技术调整磁场来提高工件温度的分布均匀性。研究中建立的数值计算模型仅适用于无铁磁的模型。

2011 年,阿尔及利亚的研究者提出了组合结构线圈中通过线性运动来对铝工件感应加热的线圈结构(见图 5),通过仿真计算得出了组合结构的优化设计^[30]。研究的意义在于首次提出通过直流背景磁场中工件线性运动的感应加热主磁体结构。计算为二维场分析,未能分析工件端部的加热情况,而且采用的直线运动的结构要求主磁体的长度很长,很大程度降低了这种结构的实用性。

2018 年中国科学院电工研究所研究小组提出了新型多磁路高温超导感应主磁体结构如图 6 所示,通过并行连接多个磁路,可更充分有效地利用高温超导磁体产生的强磁场。同时给出了新结构的适用范围与准则。研究工作还包括设计了图 7,图 8 和图 9 所示兆瓦级感应加热磁体系统。

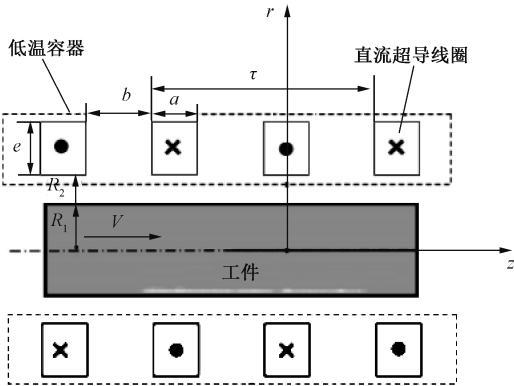


图 5 直线运动超导感应加热结构

Fig.5 Linear motion superconducting IH structure



图 6 多磁路新型感应加热结构

Fig.6 IH structure with multi magnetic circuit

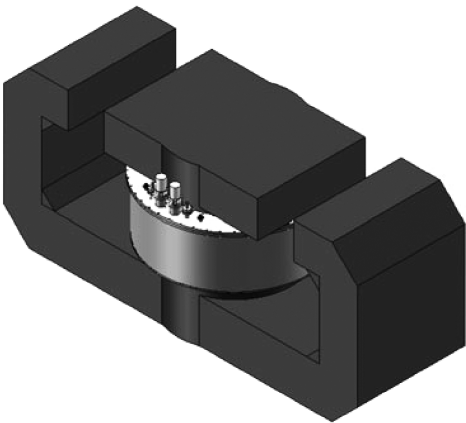


图 7 MW 级高温超导感应加热主磁体系统

Fig.7 Main magnet system for MW class HTS IH

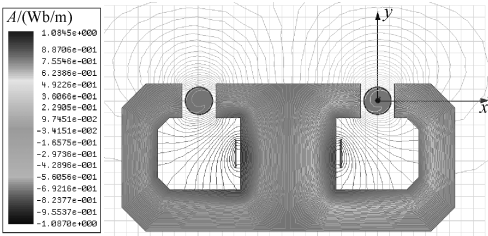


图 8 MW 级高温超导感应加热主磁体电磁分布

Fig.8 Electromagnetic field distribution of main magnet system used for MW class HTS IH

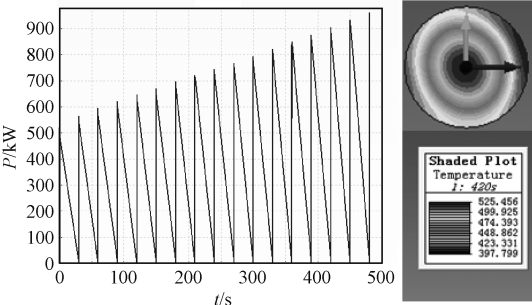


图 9 MW 级高温超导感应加热系统功率和加热周期

Fig.9 Output power and heat cycle of the MW HTS IH

主磁体由铁心和 YBCO 高温超导材料绕制的高温超导线圈组成。磁体系统由两台 AL325 通用制冷机冷却,工作温度为 20~30 K,加热工件的转速为 240~720 r/min,对于 $\Phi 446, 1.5\text{ m}$ 加热工件 7 min 以内可以达到 500℃ 加热温度,系统效率可以达到 80%^[31]。

4 高温超导感应加热示范项目发展现状

2005 年,欧洲开展了超导感应加热项目 AL-HEATER 的研究^[32, 33],目标是设计并研制一台 200 kW 的 MgB_2 超导感应加热原理样机(见图 10),计划 2007 年进行样机的制造,2008 年进行系统的实验测试工作。其研究团队来自于挪威 SINTEF Energy Research 研究所,德国 Fraunhofer Gesellschaft,芬兰 Tampere 理工大学,波兰有色金属研究所,意大利 Columbus 超导公司,波兰 GK Kety,德国 SMS Elotherm, Hannover 大学,以及捷克共和国 Skoda Vyzkum。芬兰坦佩雷理工大学、挪威 SINTEF 能源研究所、德国弗劳恩霍夫协会,开展了低温系统设计项目研究,低温系统定位为制冷机传导冷却的低温系统,研究工作包括低温系统中涉及的热损耗计算,机械性能评估,电流引线优化等关键技术^[34]。挪威科技大学研究了 MgB_2 超导材料的接头以及磁体设计工作^[35]。芬兰坦佩雷理工大学开展了 MgB_2 超导磁体的稳定性研究^[36-42]。ALHEATER 项目研究工作的意义在于首次系统地研究了基于空心螺线管 DC 磁场下旋转铝棒工件的新型超导感应加热技术,其主磁体为外径 1.16 m 的大口径 MgB_2 磁体,磁体的接头和稳定性都进行了系统地研究,但是能够检索的研究工作仅为部件的集成及低温测试,后期的系统级的测试未见报道。

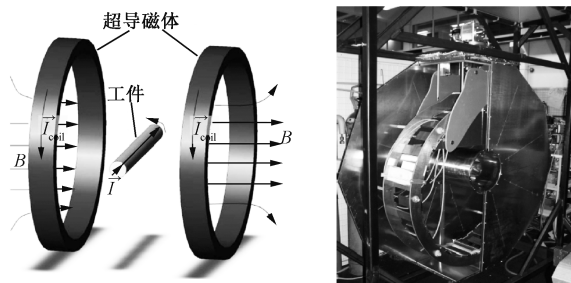


图 10 ALHEATER 超导感应加热项目

Fig.10 ALHEATER superconducting IH project

2007 年 5 月,德国 Bültmann 公司与 Zenergy Power 公司合作开展超导感应加热技术研究,于 2008 年成功研制了可用于加热铝锭、铜锭的新型感应加热设备(见图 11),其电热转换效率得到了大幅度的提升,并能够通过改善金属锭的透热深度获得更加均匀的温度分布、更短的加热时间和更高的生产效率。系统包括两套电机拖动系统,每台功率 360 kW,总效率达到 85%^[43]。研究工作的意义在于首次研发 750 kW 量级的有铁心的超导感应加热装置并成功在企业的生产线上示范运行。

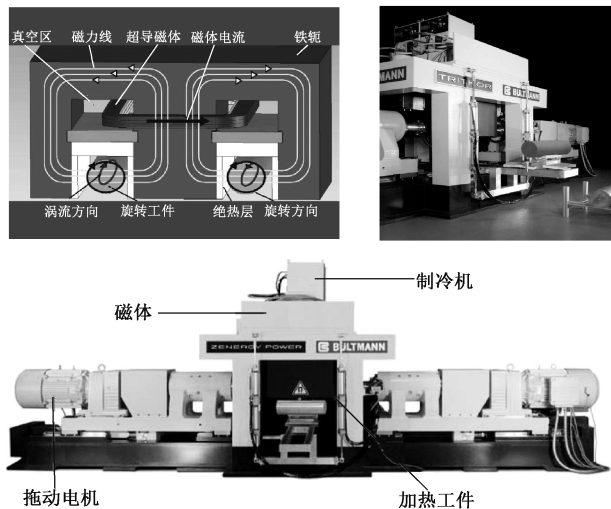


图 11 750 kW 高温超导感应加热项目示范运行

Fig.11 750 kW HTS IH demonstration

韩国的 J. Choi 团队开展高温超导感应加热的研究。2014 年研制了 10 kW 高温超导直流感应加热系统,高温超导磁体中采用了无绝缘技术,磁体运行温区为 45.9 K,运行电流为 100 A,两个铁心之间中心磁场为 0.2 T。系统在转速 1 760 r/min 下对 4.1 kg 铝工件进行了旋转加热测试,工件在 480 s 后加热温度为 500 ℃^[44]。接下来的研究为 10 kW 级高温超导直流感应加热系统的性能评估,并对铝、

铜、铁等多种金属加热工况下进行了效率分析,同时,应用有限元方法对多种材料的加热特性进行了仿真分析。研究结果证明了超导直流感应加热系统在黑色金属,有色金属中应用的可行性和优势,技术适用于大规模工业应用^[45]。2018 年提出了两种低温恒温器设计应用于传导冷却高温超导磁体,研究了高温超导磁体的损耗、温升以及失超过程的超导磁体稳定性。采用有限元法对单级和二级制冷机的冷却特性进行了分析和比较。研究结果将应用于 300 kW 级超导感应加热器的制造^[46]。300 kW 超导感应加热用磁体和低温系统已经完成了研制,如图 12 所示。小组的研究工作还包括跑道线圈磁体结构以及直线运动的感应加热方式^[47]。

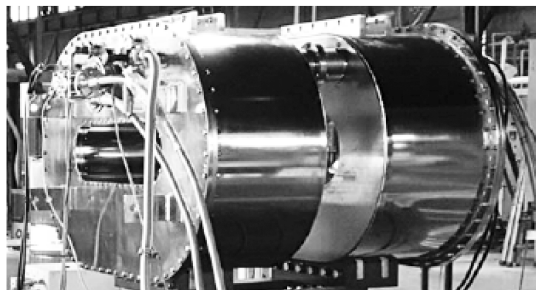


图 12 300 kW 超导感应加热项目磁体系统

Fig.12 Magnet system for 300 kW superconducting IH

国内江西联创光电科技股份有限公司协同北京交通大学、上海超导科技股份有限公司、上海交通大学的团队共同开展了高温超导感应加热技术的研究以及 MW 级示范样机的研制。研究工作将无绝缘磁体技术、变铁心气隙结构应用于超导感应加热系统中,这种变气隙结构可以获得可调节的加热梯度^[48-50],2018 年完成了 MW 级高温超导直流感应加热样机的研制。主磁体气隙磁场为 0.5 T。为克服启动时的低转矩特性,提出了 FES 启动方式应对电机拖动系统的低转矩特性。系统中采用了可调气隙技术获得了轴向 100 ℃范围内的可调温度梯度^[51]。如图 13 所示,2019 年 1 MW 高温超导感应加热通过了满负荷的测试。

5 新型超导感应加热技术发展趋势、科学问题和关键技术

从前面所述的文献可以看出,新型感应加热技术未来将在金属材料透热处理领域发挥重要的作用。高温超导感应加热技术沿着大功率高效率的方向发展。高温超导感应加热技术在原理性探索,示



图13 1 MW 超导感应加热装置

Fig.13 1 MW superconducting IH device

范样机运行方面已经展开了一些研究工作。但是在高温超导感应加热新结构、高温超导主磁体系统、大功率超导感应加热设计等方面尚有很多的基础问题和关键技术有待深入研究。

(1)在新型感应加热新结构方面:探索更能体现高效率、大容量、高稳定性并能展示超导技术优势的高温超导感应加热新拓扑结构,形成优势机理以及系统级的相关设计和工程实践等研究仍需要进一步深入。

(2)开展新型高温超导感应加热主磁体的基础问题研究:基于 Bi2223、YBCO、 MgB_2 等实用化超导材料的面向高温超导感应加热主磁体应用的特性研究,探索多种超导材料构造大口径超导主磁体的可行性并明确适用范围,研究机械应力效应引起的高温超导磁体性能退降的机理及解决方法,研究高温超导磁体的热失控以及磁体稳定性。

(3)大容量高温超导感应加热系统的瞬态过程研究,如结合输出特性的瞬态调功过程研究,在系统故障状态下的瞬态过程研究,在瞬态变化的过程中系统部件尤其是高温超导磁体系统的稳定性及其保护策略都值得深入研究。

(4)开展高温超导感应加热系统面向工程化应用的技术经济分析是一个重要的研究内容。针对高温超导直流感应加热主磁体结构,不同低温制冷方式和优化运行方式,从技术经济的角度探索未来高温超导感应加热系统的研发及产业化具有重要意义。

6 结论

感应加热技术在诸多工业生产中有着广泛应用。高温超导感应加热技术依据直流背场下旋转工

件涡流加热这种高效率的直流感应加热新原理,结合了产生背景磁场的低损耗高温超导磁体技术以及旋转工件高效率的电动机旋转拖动技术,实现了电能为主的加热方式替代以及大功率高效率新的电加热技术革新。新型超导感应加热设备的效率有望达到 80%~85%。相比目前 40% 的效率,提升感应加热的效率对于我国的经济发展有重要意义。金属冶炼和压延加工等高耗能行业中金属热处理领域,能源转型提出了以电能为主、电加热替代燃气加热以及采用更高效率感应加热技术的需求。新型高温超导感应加热技术预期未来将在金属材料透热处理领域发挥重要的作用。

参考文献 (References):

- [1] John Davies, Peter Simpson. Induction heating handbook [M]. UK: Mcgraw-hill Book Company, 1979.
- [2] 国家统计局 (National Bureau of Statistics). 2019 年国民经济和社会发展统计公报 (Statistical bulletin on national economic and social development in 2019) [R]. 2020.
- [3] 沈庆通, 梁文林 (Shen Qingtong, Liang Wenlin). 现代感应热处理技术 (Modern induction heat treatment technology) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2008.
- [4] 王晓勇 (Wang Xiaoyong). 高温超导感应加热用主磁体的电磁优化设计及热稳定性研究 (Electromagnetic optimization design and thermal stability of high temperature superconducting magnet for induction heating) [D]. 北京: 中国科学院大学 (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [5] 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.
- [6] 丘明 (Qiu Ming). 超导输电技术在电网中的应用 (Applications of superconducting power transmission in power grid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (10): 55-62.
- [7] 陈中, 肖立业, 王海风 (Chen Zhong, Xiao Liye, Wang Haifeng). 超导电力技术在未来智能电网应用研究 (Study of applications based on superconducting power technology in smart grid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2010, 29 (1): 49-53.
- [8] 梁爽, 张东, 陈彪, 等 (Liang Shuang, Zhang Dong,

- Chen Biao, et al.). 500 kW 高温超导发电机负载三相短路故障运行分析 (Three-phase load breaking fault analysis of 500 kW high-temperature superconducting generator) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (1): 76-81.
- [9] 高晓晶, 胡元潮, 段志强, 等 (Gao Xiaojing, Hu Yuanchao, Duan Zhiqiang, et al.). 连续脉冲电源用超导脉冲变压器设计与试验研究 (Design and test research of HTS pulsed power transformer for repetitive pulse power supply) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (3): 82-88.
- [10] 宋文峰, 王倩, 李亚楠, 等 (Song Wenfeng, Wang Qian, Li Yanan, et al.). 基于电阻型高温超导故障限流器的双馈风电场故障穿越策略研究 (Research on fault ride-through of DFIG wind farm based on resistive type high temperature superconducting fault current limiter) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (1): 39-46.
- [11] Hui D, Wang Z K, Zhang J Y, et al. Field test and demonstrated operation of 10.5 kV/1.5 kA HTS fault current limiter [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17 (2): 2055-2058.
- [12] Xiao Liye, Wang Zikai, Dai Shaotao, et al. Fabrication and tests of a 1 MJ HTS magnet for SMES [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, 18 (2): 770-773.
- [13] Xiao Liye, Dai Shaotao, Lin Liangzhen, et al. Development of the World's first HTS power substation [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22 (3): 5000104.
- [14] Zhang Dong, Dai Shaotao, Teng Yuping, et al. Testing results for the cable core of a 360 m/10 kA HTS DC power cable used in the electrolytic aluminum industry [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2013, 23 (3): 5400504.
- [15] Zhang Dong, Xiao Liye, Song Naihao, et al. Research on the conduction-cooled YBCO magnet for an MW class induction heating system [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28 (3): 1-5.
- [16] 王晓勇, 张东, 马韬, 等 (Wang Xiaoyong, Zhang Dong, Ma Tao, et al.). 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 (Experimental research on thermal stability of conduction-cooled YBCO magnet for induction heating) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (4): 16-23.
- [17] 唱鹤鸣 (Chang Heming). 感应炉熔炼与特种铸造技术 (Induction furnace melting and special casting technology) [M]. 北京: 冶金工业出版社 (Beijing: Metallurgical Industry Press), 2002.
- [18] Davies E J. Conduction and induction heating [M]. London, UK, 1990.
- [19] Runde M, Magnusson N. Induction heating of aluminium billets using superconducting coils [J]. Physica C, 2002, 372 (376): 1339-1341.
- [20] Runde M, Magnusson N. Design, building and testing of a 10 kW superconducting induction heater [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2003, 13 (2): 1612-1615.
- [21] Magnusson N, Runde M. Efficiency analysis of a high-temperature superconducting induction heater [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2003, 13 (2): 1616-1619.
- [22] Iiro Hiltunen, Aki Korpela, Risto Mikkonen. Solenoidal Bi-2223/Ag induction heater for aluminum and copper billets [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15 (2): 2356-2359.
- [23] Fabbri M, Morandi A, Negrini F. Temperature distribution in aluminum billets heated by rotation in static magnetic field produced by superconducting magnets [J]. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2005, 24 (1): 281-290.
- [24] Araneo R, Dughiero F, Fabbri M, et al. Electromagnetic and thermal analysis of the induction heating of aluminum billets rotating in DC magnetic field [J]. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2008, 27 (2): 467-479.
- [25] Fabbri M, Forzan M, Lupi S, et al. Experimental and numerical analysis of DC induction heating of aluminum billets [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (1): 192-200.
- [26] Fabbri M, Morandi A, Ribani P L. DC induction heating of aluminum billets using superconducting magnets [J]. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2008, 27 (2): 480-490.
- [27] Morandi A, Fabbri M, Ribani P L. Design of a superconducting saddle magnet for DC induction heating of aluminum billets [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2008, 18 (2): 816-819.
- [28] Zlobina M, Nacke B, Nikanorov A, et al. Numerical modelling of an innovative induction heating technique for aluminium extrusion process [A]. 3rd International Fo-

- rum on Strategic Technologies, IFOST 2008: IEEE [C]. 2008. 487-491.
- [29] Zlobina M, Nacke B, Nikanorov A. Adaptive induction system for heating of aluminium billet by rotation in DC magnetic field [A]. Hannover: International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing [C]. 2008.
- [30] Hakim Bensaidane, Youcef Ouazir, Thierry Lubin, et al. Induction heating of aluminum billets with linear motion in a strong DC magnetic field: Magnetothermal analysis in two-dimensional [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21 (4): 3479-3487.
- [31] Zhang Dong, Xiao Liye, Song Naihao, et al. Research on the conduction-cooled YBCO magnet for an MW class induction heating system [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28 (3): 4602305.
- [32] Magnusson N, Runde M. A 200 kW MgB₂ induction heater project [A]. Proceedings of the 7th European Conference on Applied Superconductivity [C]. Vienna, Austria, 2006. 1019-1022.
- [33] Stenvall A, Magnusson N, Jelinek Z, et al. Electromagnetic viewpoints on a 200 kW MgB₂ induction heater [J]. Physica C, 2008, 468: 487-491.
- [34] Hiltunen I, Stenvall A, Korpela A, et al. Cryogenic design of the ALUHEAT project [J]. Advances in Cryogenic Engineering: Transactions of the Cryogenic Engineering Conference Proceedings, 2008, 53: 1015-1022.
- [35] Frode Sætre. Splicing and coil winding of MgB₂ superconductors [D]. Norwegian: Norwegian University of Science and Technology, 2008.
- [36] Stenvall Antti. An electrical engineering approach to the stability of MgB₂ superconductor [D]. Tampere: Tampere University of Technology, 2006.
- [37] Stenvall A, Hiltunen I, Korpela A, et al. A checklist for designers of cryogen-free MgB₂ coils [J]. Superconductor Science and Technology, 2007, 20: 386-391.
- [38] Stenvall A, Korpela A, Mikkonen R, et al. Critical current of an MgB₂ coil with a ferromagnetic matrix [J]. Superconductor Science and Technology, 2006, 19 (1): 32-38.
- [39] Stenvall A, Korpela A, Mikkonen R, et al. Stability considerations of multifilamentary MgB₂ tape [J]. Superconductor Science and Technology, 2006, 19 (2): 184-189.
- [40] Stenvall A, Korpela A, Mikkonen R, et al. Quench analysis of MgB₂ coils with a ferromagnetic matrix [J]. Superconductor Science and Technology, 2006, 19 (6): 184-187.
- [41] Stenvall A, Korpela A, Lehtonen J, et al. Current transfer length revisited [J]. Superconductor Science and Technology, 2007, 20 (12): 92-99.
- [42] Stenvall Antti, Korpela Aki, Mikkonen Risto, et al. Discrepancies in modeling magnets utilizing MgB₂ conductor with ferro- and non-magnetic matrix configurations [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2007, 17 (2): 2369-2372.
- [43] Magne Runde, Niklas Magnusson, Christoph Fulbier, et al. Commercial induction heaters with high temperature superconductor coils [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21 (3): 1379-1383.
- [44] Choi J, Kim K, Park M, et al. Practical design and operating characteristic analysis of a 10 kW HTS DC induction heating machine [J]. Physica C: Superconductivity, 2014, 504: 120-126.
- [45] Choi J, Kim S, Kim K, et al. Design and performance evaluation of a multi-purpose HTS DC induction heating machine for industrial applications [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25 (3): 3700105.
- [46] Choi J, Kim S, Kim K, et al. Characteristic analysis of a sample HTS magnet for design of a 300 kW HTS DC induction furnace [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (3): 3700405.
- [47] Kim J, Hahn S, Choi J, et al. A design study on a multi-billet HTS induction heater with REBCO racetrack coils [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29 (5): 4603205.
- [48] Yang J, Gao H, Wang Y W, et al. Design and experimental results of a DC induction heater prototype for aluminum billets [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24 (3): 0500704.
- [49] Wang Y W, Ping Y, Li K, et al. Analysis and comparison between no-insulation and metallic insulation REBCO magnet for the engineering design of a 1-MW DC induction heater [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2017, 27 (4): 3700105.
- [50] Yang P, Wang Y W, Qiu D R, et al. Design and fabrication of a 1-MW high-temperature superconductor DC induction heater [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28 (4): 3700305.
- [51] Hu Lei, Ma Tao, Dai Shaotao, et al. Experimental investigation on conduction cooling of large diameter superconducting induction heating magnet [A]. 2nd International Symposium on Application of Materials Science and Energy Materials [C]. Shanghai, China, 2018. 072028.

Review of HTS DC induction heating technologies

ZHANG Dong^{1, 2, 3}, XIAO Li-ye^{1, 2, 3}, LIN Liang-zhen^{1, 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: Compared with the conventional AC induction heating technology, high temperature superconducting (HTS) DC induction heating (IH) technology can greatly improve the heating efficiency of metal materials through heat treatment. It also has the advantages of fast heating speed, uniform heating and good repeatability of heating process. It has wide application prospects in metal smelting and calendaring processing industry. In this paper, the research status of high temperature superconducting DC induction heating principle and new structure of main magnet are introduced in detail. The development of demonstration prototype of high temperature superconducting DC induction heating is introduced. The advantages and formation mechanism of high temperature superconducting DC induction heating are summarized. The development trend, key technologies and scientific problems of high temperature superconducting DC induction heating technology are discussed. The results of this paper will provide reference for the research of HTS DC induction heating technology.

Key words: HTS; DC induction heater technology; novel structure of main magnet; energy saving principle