

基于旋转铜环的双 C 型超导感应加热装置研究

杨海思, 张文峰

南京邮电大学 江苏南京

【摘要】与加热效率低于 40%的传统感应加热技术相比,高温超导感应加热技术的加热效率高、市场竞争优势大,本文在已有高温超导感应加热装置的研究基础上提出了一种基于旋转铜环的双 C 型超导感应加热装置。高导电性的铜环在通电的超导线圈产生的直流磁场中旋转并切割磁感线,利用铜环中涡流效应致热并经气隙传导至铝锭,从而完成对铝锭的加热。该文使用有限元软件 COMSOL 对装置进行建模,通过设置边界层网格、绝热边界条件,对模型进行了磁-热多物理场耦合仿真和转矩计算,并且研究了铜环转速、厚度对其磁场分布、涡流密度分布的影响。研究证实旋转铜环结构的设计使涡流损耗提升了 33.2%,为高温超导感应加热设备的优化设计和性能提升提供了理论支持和参考依据。

【关键词】感应加热; 高温超导; 电磁热耦合; 多物理场耦合

【收稿日期】2025 年 3 月 9 日 **【出刊日期】**2025 年 4 月 8 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250108

Study on a double c-shaped superconducting induction heating device based on rotating copper ring

Haisi Yang, Wenfeng Zhang

Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu

【Abstract】 Compared to traditional induction heating technologies with efficiencies below 40%, high-temperature superconducting (HTS) induction heating technology demonstrates superior heating efficiency and significant market competitiveness. Building upon existing research on HTS induction heating devices, this paper proposes a double-C-shaped superconducting induction heating device based on a rotating copper ring. A highly conductive copper ring rotates within the DC magnetic field generated by energized superconducting coils, cutting magnetic flux lines. This induces eddy currents within the copper ring, generating heat which is then transferred across an air gap to heat aluminum ingots. Finite element modeling of the device were performed using COMSOL Multiphysics software. Employing boundary layer meshing and adiabatic boundary conditions, magneto-thermal multiphysics coupling simulations and torque calculations were conducted. The study specifically investigated the influence of copper ring rotational speed and thickness on magnetic field distribution and eddy current density distribution within the ring. The research confirms that the rotating copper ring design increases eddy current losses by 33.2%. These findings provide theoretical support and a reference framework for the optimized design and performance enhancement of high-temperature superconducting induction heating equipment.

【Keywords】 Induction heating; High temperature superconductivity; Electromagnetic thermal coupling; Multiphysics coupling

引言

感应加热是一种利用电磁感应原理将电能转化为热能的加热技术,一般通过交变磁场在导电材料中感应出涡流,从而产生焦耳热,达到使材料迅速升温的效果,多应用于金属热处理、焊接、熔炼和铸造等场景。传统的感应加热技术大多是采用交变磁

场在静止的金属工件中感应涡流,以实现加热。传统感应加热装置在加热铝、铜等非铁磁材料时,因存在较大漏磁损耗的影响,其加热效率低于 40%^[1]。高温超导感应加热技术利用超导线圈产生直流磁场,旋转坯料相对于静止磁场产生相对运动,进行磁感线切割,以实现加热,其加热效率能提高至约 80-

85%，在市场上具有明显的竞争优势^[2]。

目前的高温超导直流感应加热（High Temperature Superconducting Induction Heater, HTSIH）装置的结构主要分为 C 型单缝与 E 型双缝这两种，已有专利^[3]公布了两种铁芯结构的装置拓扑。2014 年，韩国的 J.Choi 团队研制了 10kW HTSIH 并进行了性能评估，该装置的磁体设计为 C 型单气隙结构，加热效率为 87.5%^[4]，2015 年，该团队又进行了采用有铁芯超导磁体的 300kW HTSIH 的可行性分析^[5]，并将 HTS 跑道型线圈应用于该装置^[6]。2014 年，中国上海交通大学与上海超导公司合作建造了一台基于 YBCO 带材的 1.2MW 大型 HTSIH，该装置采用可调气隙的 E 型有铁心结构^[7]。2018 年，中国科学院电工研究所研究小组采用分裂式铁心结构，单个超导线圈通过并行连接多个磁路来加热多组铝锭，更充分有效地利用高温超导磁体产生的强磁场，提高了加热效率^[8-9]。2019 年，江西联创光电公司和北京交通大学等单位采用 E 型双缝隙结构，建造了一台利用 YBCO 超导带材的兆瓦级直流感应加热装置^[10]。张文峰等^[11]提出了一种双 C 型 HTSIH，既保证了原磁路与超导带材用量不变，又减小了铁芯磁路长度，显著提升了感应加热的效率。王幸等^[12]研究了一种 C 型对极铁芯 HTSIH，并提出安装极靴以提高加热区域磁通密度的方法。

现有方法中，对铝锭的加热均基于对铝锭的旋转，这造成了一些问题，如铝锭起动转矩过大、高温旋转铝锭带来的应力损伤及安全隐患、铝锭电阻率低导致的加热功率低等问题。本文在现有研究的基础上提出了一种基于旋转铜环的具有弧形气隙的双 C 型 HTSIH。通过设置包围在铝锭外的旋转铜环及弧形气隙，既保证了原磁路与超导带材用量的不变及铁芯磁路长度的减小，又大大提高了 HTSIH 的加热效率。本文在有限元分析软件 COMSOL 中建立了耦合物理场，分析了铜环及铝锭内的磁场密度、电流密度分布以及温度分布，还根据该装置的结构特点探讨了电磁场及磁热的影响因素，为新型 HTSIH 的设计与建造提供一些参考。

1 基于旋转铜环的双 C 型 HTSIH 的工作原理

传统的交流感应加热装置在金属热处理方面的效率约为 50~60%，能效较低，大量能量损耗为铜损。在 HTSIH 中，超导线圈电阻几乎为 0，降低了铜损，并且在超导线圈中通入的是直流电，有效避

免了超导线圈的交流损耗，显著提高了感应加热装置的加热效率。

基于旋转铜环的双 C 型 HTSIH 主要由四部分构成：两个对向排列的 C 型铁芯、两组超导线圈、置于 C 型铁芯气隙中的两个待加热圆柱形铝锭、两个位于铝锭外层的铜环，其结构如图 1.1 所示。

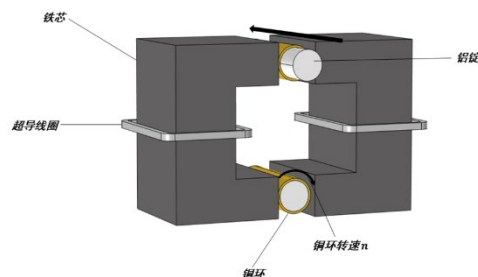


图 1.1 基于旋转铜环的双 C 型 HTSIH 结构图

感应加热的过程中，在超导线圈中通入直流电，分离铁芯形成的气隙中就会产生平行磁场。置于气隙中的旋转铜环包裹着静止的铝锭，铜环在磁场中旋转并进行磁场切割，得到感应涡流，从而进行感应加热。

另外，可以通过调制磁场，来提高气隙中垂直于铜环表面的磁场含量，这将有利于增大涡流强度、提升装置的加热效率^[13-14]。调制磁场，改善气隙间的磁场分布可以通过采用弧形气隙的设计来实现。本文在 COMSOL 中建立了具有弧形气隙结构的基于旋转铜环的双 C 型 HTSIH 模型，其示意图如图 1.2 所示。

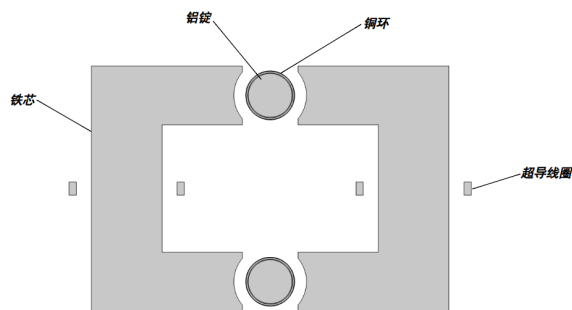


图 1.2 具有弧形气隙结构的基于旋转铜环的双 C 型 HTSIH 模型示意图

本文中的装置模型利用双 C 型的对称结构通过磁场在铜环中形成闭合涡流回路，能够显著提高感应加热的效率。与使用常规铜线圈的传统设计相比，超导线圈凭借其超导带材的零电阻特性，焦耳热损

耗几乎不存在, 能量转换效率可达 95% 以上。对向排列的双 C 型磁体可以产生强度更高、分布更加均匀的磁场, 极大改善了传统感应加热装置中工件局部过热的现象, 对于温度均匀性要求高的材料加工场合适应性更高。高电导率的铜相较于铝, 在相同转速下可以形成更强的趋肤效应, 提高涡流损耗。铜环旋转升温, 并通过热传导实现铝锭的加热, 提高了装置整体的加热效率, 而且铝锭静止避免了其因为旋转导致的温度分布不均匀, 更容易控制温度的分布, 避免局部过热。铜环代替铝锭进行旋转也避免了铝锭因旋转的机械应力更易损坏的问题, 能够使装置结构更稳定。本文装置中的铜环作为次级感应体, 能够进一步降低系统的总能耗, 符合绿色制造趋势。

装置在进行感应加热的过程中, 向超导线圈中通入直流电流, 双 C 型铁芯形成的磁路就会在气隙中形成平行磁场, 同时铁芯气隙中的铜环在外部电机的驱动下进行旋转, 并对超导线圈产生的直流均匀磁场进行切割。继而旋转铜环中会感应出涡流, 涡流通过焦耳效应使铜环升温, 升温的铜环凭借热传导来加热铝锭。装置可以通过改变通入线圈中的直流电流值, 来改变铁芯气隙空间磁通的值, 从而改变加热节奏, 通入的电流值越大, 加热速度就越快。装置还可以通过改变旋转铜环的转速来实现调节加热速率的目的, 铜环的转速越大, 加热速度越快。

2 电磁场仿真计算分析

在电磁场环境中的铜环因电机驱动而旋转, 切割电磁场并感应产生涡流, 因铜环材料的自身电阻产生电阻热。麦克斯韦方程组是其数学模型的抽象, 可用来描述电磁场的传播及空间分布。感应加热装置的电磁场计算可等效成对麦克斯韦方程组的计算, 分析探讨电磁场本质上是对麦克斯韦方程组的分析。

麦克斯韦方程组的微分形式为:

$$\begin{cases} \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \times D = \rho \\ \nabla \times B = 0 \end{cases} \quad (2-1)$$

电场和磁场的关系为:

$$\begin{cases} D = \varepsilon E \\ J = \sigma E = \frac{E}{\rho} \\ B = \mu H \end{cases} \quad (2-2)$$

其中 H 是磁场强度 (A/m), J 是电流密度 (A/m²), D 电位移矢量 (C/m²), $\partial D / \partial t$ 是位移电流密度 (A/m²), ρ 是电荷密度 (C/m³), E 是电场强度 (V/m), B 是磁场强度 (T), μ 是磁导率 (H/m), σ 是电导率 (S), ε 是介电常数 (F/m)。

对式 2-1、2-2 进一步分析可得涡流密度相关方程。

在铜环的电磁感应加热过程中, 位移电流会远小于其中的传导电流, 所以可以忽略位移电流项 $\partial D / \partial t$ 的影响, 进一步简化麦克斯韦方程组为:

$$\begin{cases} \nabla \times H = J \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot B = 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

将 $B = \nabla \times A$ 和 $B = \mu_0 H$ 代入式 2-3, 可以得到电流密度 J 和电场 E 的方程:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times A \right) = J \quad (2-4)$$

$$E = -\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla \varphi \quad (2-5)$$

其中 φ 是电标势。

根据欧姆定律可得电流密度 J 和电场 E 的关系:

$$J = \sigma E \quad (2-6)$$

将式 2-4、2-5、2-6 联立可得:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times A \right) = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla \varphi \quad (2-7)$$

式 2-7 表示了电流密度 J 由涡流密度 $J_w = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t}$ 和外部输入电流密度 $J_e = \sigma \nabla \varphi$ 这两部分组成, 而 J_e 的值一般由外加电标势的梯度决定。

则有以磁场矢势 A 和电标势 φ 为状态变量的偏微分方程组:

$$\begin{cases} \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0} \nabla \times A \right) = -\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \nabla \varphi \\ \nabla \cdot J = 0 \end{cases} \quad (2-8)$$

对式 2-8 的方程组进行求解, 可得感应加热中待加热工件的电流密度分布和气隙间的磁场分布, 这是电磁场计算中广泛使用的一种计算方法^[15]。

为探讨铜环的转速对感应加热过程的影响, 控制铜环厚度、弧形气隙、线圈内通入电流值等保持不变, 只改变铜环转速, 在 COMSOL 中对具有弧形气隙的基于旋转铜环的双 C 型 HTSIH 二维模型进行仿真, 得到如图 2.1 和图 2.2 所示的分布云图。

从分布云图中可以看出, 在直流电的作用下,

线圈产生的恒定磁场通过铁芯闭合, 铁芯气隙中的磁感线被旋转铜环切割, 铜环中因此感应出涡流。图 2.1 中, 铜环转速的变化对磁场值的影响不大, 但随着转速的增大, 铜环的磁场分布越来越趋于边界处。图 2.2 中, 当铜环在旋转时, 因为受趋肤效应的影响, 铜环感应出的涡流随转速的变化而变化, 铜环转速越大, 感应出的涡流越强。同时, 铜环的涡流分布也与趋肤效应有关, 铜环转速越大, 趋肤效应越显著, 涡流越趋于分布在铜环表面。

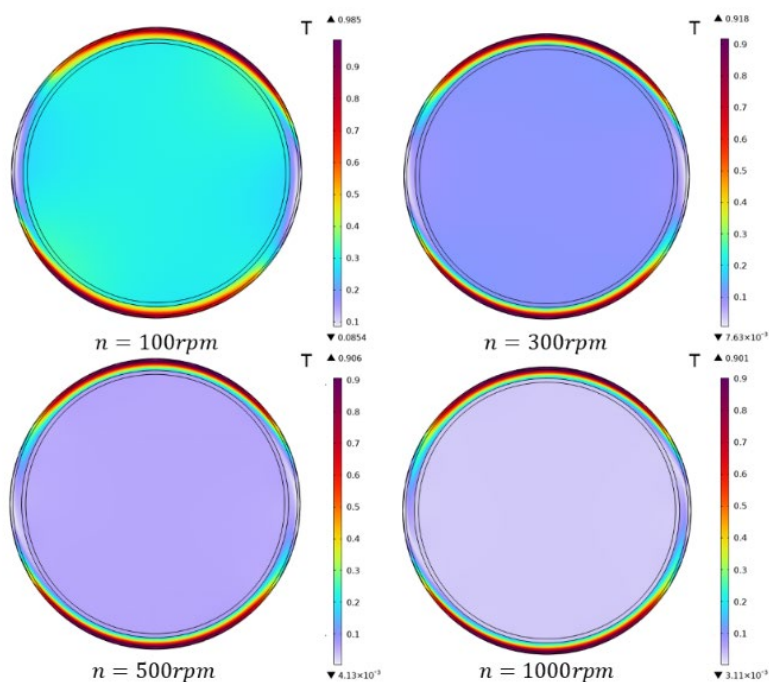


图 2.1 不同转速下的磁通分布图

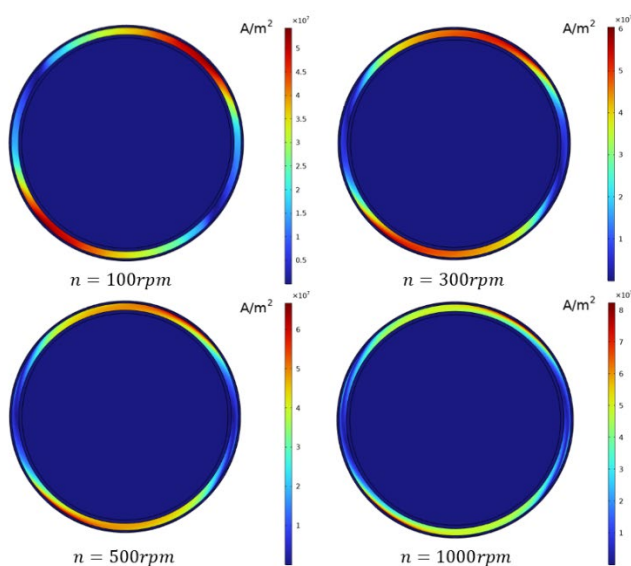


图 2.2 不同转速下的涡流分布图

铜环内产生的涡流损耗是旋转铜环升温的主要热源, 升温后的铜环是通过热传递来实现对铝锭的加热, 铜环上的涡流损耗越大, 升温越大, 对铝锭的加热效果也越好。图 2.3 是铜环上的涡流损耗随铜环转速的变化图。随着铜环转速的增大, 铜环上的涡流损耗也不断增大, 在铜环旋转低速区, 涡流损耗的增率较大。

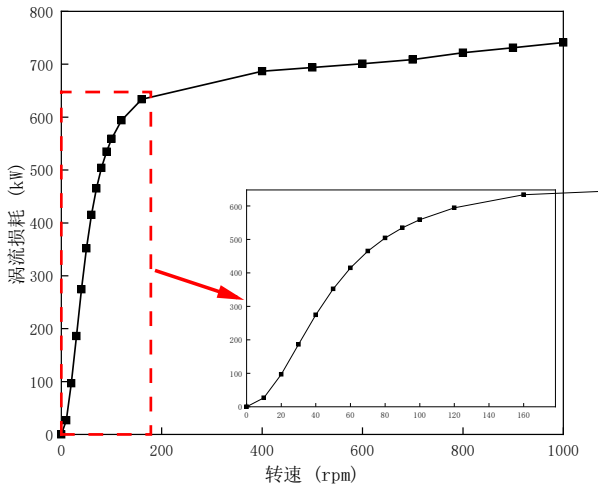


图 2.3 铜环损耗随转速变化图

除了铜环转速, 铜环厚度也是感应加热效率的影响因素之一。为探讨铜环的厚度对感应加热过程的影响, 保持铜环转速、弧形气隙大小及线圈内通入电流值等保持不变, 依次改变铜环的厚度, 得到如图 2.4 所示的铜环涡流损耗随铜环厚度的变化图。从图 2.4 中可以看出, 当铜环厚度改变时, 产生的涡流损耗也会变化, 铜环越薄, 产生的涡流损耗越大。

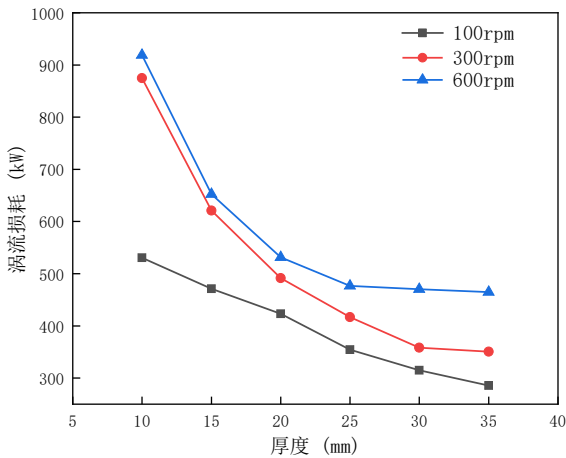


图 2.4 铜环涡流损耗随铜环厚度变化图

除了铜环转速和铜环厚度, 铁芯有无弧形气隙也会影响产生的涡流损耗的大小。弧形气隙使磁场得到调制, 磁力线更加向中心聚集, 铜环表面的磁场垂直分量也会更大, 这使得铜环在同样的磁场强度下, 可以感应出更大的涡流, 升温效果更好。将铁芯有弧形气隙和无弧形气隙的仿真结果进行对比, 对比结果如图 2.5 所示, 在铁芯有弧形气隙的情况下, 铜环上产生的涡流损耗明显要高于铁芯无弧形气隙时, 铜环升温效果更显著。

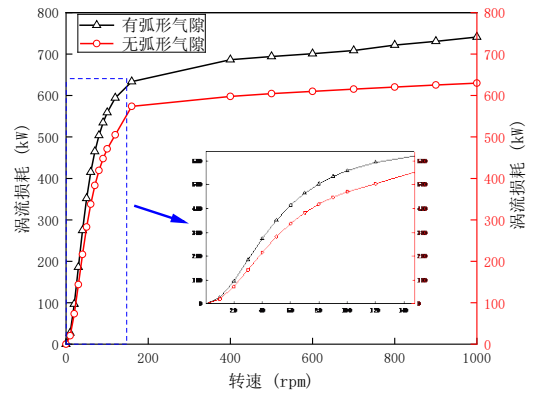


图 2.5 铁芯有无弧形气隙时铜环上损耗对比

本文提出的装置中是铜环进行旋转, 感应出涡流进而加热铝锭。相较于直接旋转铝锭来进行感应加热的模型, 这样的机械结构更简单, 不需要旋转大型的铝锭, 只需要旋转外层的铜环, 减少了能耗。相较于铝, 铜环的电导率也更高, 在相同的转速下能产生更大的涡流损耗, 如图 2.6 所示。使用旋转铜环的模型产生的涡流损耗要显著高于使用旋转铝锭的模型。

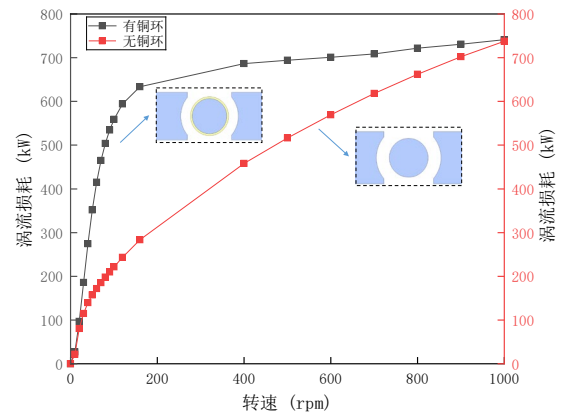


图 2.6 有旋转铜环的损耗对比

3 磁热仿真计算

在本文装置中, 铜环由电机带动在磁场中进行旋转和切割磁感线, 铜环上感应出相应的电流, 作用在旋转铜环上的电流会产生焦耳热, 铜环通过热传导对铝锭进行加热。在分析装置感应加热的过程中, 可以通过坐标变换将铜环旋转、磁场静止等效成磁场旋转、铜环静止来分析磁热, 该等效变换不会影响感应加热的最终结果。

通过等效变换模型, 可以将铜环的空间磁场表示出来:

$$\begin{cases} B_x = B_0 \cos(\omega t) \\ B_y = -B_0 \sin(\omega t) \end{cases} \quad (3-1)$$

其中 ω 是铜环的角速度, 也是等效变换后旋转磁场的角速度; B_0 是均匀磁场的幅值; t 是时间。在均匀磁场中旋转的铜环和在旋转外加磁场下静止的铜环切割磁感线的过程是一样的。

由法拉第电磁感应定律:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3-2)$$

其中 E 是感生电场; B 是磁场。

通过安培定律, 得到电场在空间中的分布方程:

$$\begin{cases} \nabla \times H = J \\ J = \sigma(T)E \end{cases} \quad (3-3)$$

其中 $\sigma(T)$ 是电导率, 随温度而变化; J 是感应电流。

以矢量磁势 A 为自变量, 则磁感应强度为:

$$B = \nabla \times A \quad (3-4)$$

将上述各式联立, 可得到装置模型的求解方程:

$$\sigma(T) \frac{\partial A}{\partial t} = -\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A \quad (3-5)$$

根据式 3-5 可以求得铜环的电流密度分布、气隙间的磁场分布, 进一步得到铜环单位体积内的感应加热功率:

$$Q = J^2 / \sigma(T) \quad (3-6)$$

热能传递的三种基本方式为: 热传导、热对流、热辐射。热辐射对感应加热过程仅有微小的影响, 故在本文的装置感应加热过程中只考虑热传导和热对流这两种方式。

固体传热的方程为:

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot q = Q \\ q = -k \nabla T \end{cases} \quad (3-7)$$

其中 ρ 是铜环密度; C_p 是比热容; k 是导热率。

热交换系数 h 的经验表达式为:

$$h = 20 \times v^{0.54} \quad (3-8)$$

其中 v 是线速度。

铜环在旋转时的换热边界为:

$$\begin{cases} -n \cdot q = q_0 \\ q_0 = h(T_{ext} - T) \end{cases} \quad (3-9)$$

其中 T_{ext} 是外部环境温度。

将式 3-7、3-9 联立可求得铜环的温度变化。铜环通过热传导加热铝锭, 实现对静止铝锭的加热。

使用软件 COMSOL 对建立的二维的基于旋转铜环的双 C 型 HTSIH 模型进行电磁-热耦合仿真。在该仿真模型中, 设置铜环转速为 300rpm, 加热时间为 13min, 仿真结果如图 3.1 所示。仿真结果表明, 铝锭经过 13 分钟的连续加热后呈现显著的非均匀温度分布, 铝锭从初始温度 20°C 上升了大约二百多度, 其表面的最高温度可加热到 272°C。该仿真结果与上述电磁加热理论相符, 验证了该装置仿真模型的可靠性。

4 转矩仿真计算

该双 C 型仿真模型的铜环在旋转时, 其电磁转矩随转速变化如图 4.1 所示, 铜环转速范围为 0~1000rpm。

从图 4.1 所示的铜环电磁转矩曲线不难看出, 当铜环开始旋转, 在低转速范围内, 其电磁转矩有一个急剧上升的阶段, 随转速的增大而增大。在转速为 20rpm 时, 达到电磁转矩峰值 24.71 kN·m, 较直接旋转铝锭的双 C 型结构的 46.78 kN·m, 旋转铜环的结构设计让起动转矩降低了 47.1%。之后随着转速的增大, 转矩在逐渐减小, 当运行到高转速 1000rpm 时, 铜环的电磁转矩减小为 3.8713 kN·m。铜环的起动转矩要远大于高转速运行时的转矩。

出现该现象的原因是感应涡流受趋肤效应的影响, 在铜环中的分布随转速的变化而变化, 铜环转速不断增大时, 其感应出的涡流越来越趋于铜环表面, 影响了铜环的等效电阻。当铜环低速旋转时, 铜

环中的趋肤深度较大, 可认为其等效电阻为常值, 随着铜环转速的增大, 铜环中的趋肤深度减小, 其等效电阻值受铜环厚度和转速的影响, 铜环转速越大, 其等效电阻值越大。在磁场值不变的情况下, 铜

环等效电阻值的改变会影响铜环的电磁转矩, 因此铜环在低速旋转时的起动转矩比高速旋转时的电磁转矩要大。为改善起动转矩过大的现象, 在设计模型尺寸时, 可以选择合适的铜环厚度及铜环转速。

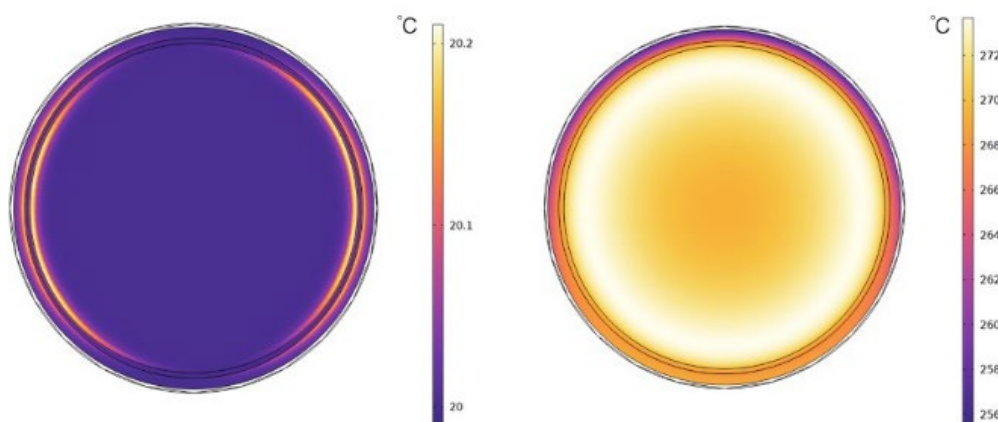


图 3.1 转速 300rpm、加热 13min 前后铜环及铝锭的温度分布变化

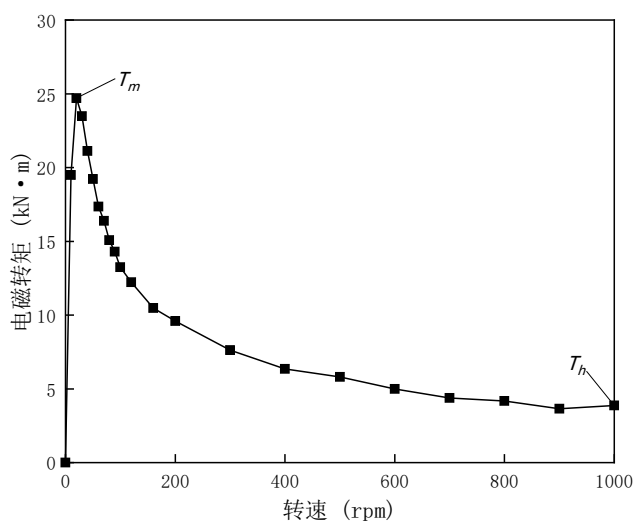


图 4.1 铜环电磁转矩曲线

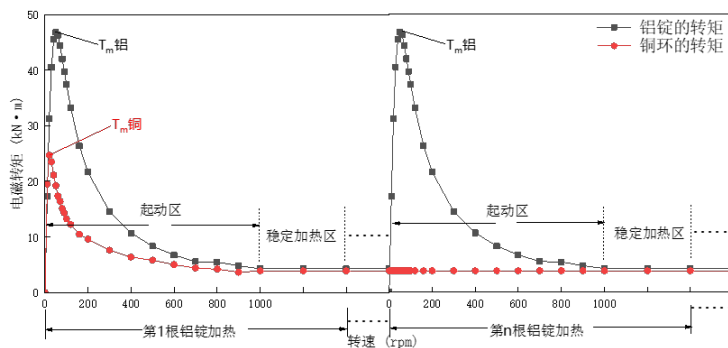


图 4.2 铜环与铝锭的电磁转矩曲线对比图

相比传统直接旋转铝锭的 HTSIH, 采用旋转铜环后的装置可以改善起动转矩并降低拖动电机功耗。图 4.2 以 1000 rpm 为最终稳定转速, 对比了两种感应加热装置的转矩特性。可以看到, 使用旋转铜环的 HTSIH 最大起动转矩更小, 因此可以选用更低功率等级的拖动电机。在加热多个铝锭时, 铜环一直处于旋转状态, 相较于直接加热铝锭的感应加热装置, 只存在一个起动过程, 而直接加热铝锭的装置每完成一次加热, 铝锭都要重新起动一次, 起动区域多。因此, 具有低起动转矩且不必频繁起动的基于旋转铜环的 HTSIH 可以有效降低拖动电机的功率等级及电能消耗。

5 总结

本文的基于旋转铜环的双 C 型 HTSIH 与传统 C 型 HTSIH 相比, 其双 C 型的铁芯结构和弧形气隙增加了感应涡流的大小, 提升了装置的感应加热效率。通过在 COMSOL 中建立二维仿真模型, 得到了不同转速下, 铜环的磁通密度分布云图和涡流密度分布云图。除此之外, 本文还进行了多物理场的磁热耦合仿真, 验证了该设计装置的可行性。本文探讨了铜环转速与铜环厚度对加热过程的影响, 得出铜环转速越大, 感应出的涡流越大和铜环厚度越薄, 感应涡流越大, 加热效果越好这两个结论, 所得结论将为进一步优化所设计的装置的参数设置提供参考依据。

此外, 本文还分析了该装置出现起动转矩过大现象的原因, 通过采用旋转铜环的 HTSIH, 相较传统旋转铝锭的 HTSIH, 有效降低了起动转矩及拖动电机能耗。为之后感应加热装置参数设计的进一步优化提供了参考方向。

参考文献

- [1] 金之俭, 洪智勇, 赵跃, 等. 二代高温超导材料的应用技术与发展综述[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(10): 1155-1165.
- [2] 杨平. 兆瓦级高温超导直流感应加热装置的关键技术研究[D]. 上海交通大学, 2017.
- [3] GMBHT. Induction heater: DE202007014930U1[P]. 2008-03-20.
- [4] CHOI J, KIM K, PARK M, et al. Practical design and operating characteristic analysis of a 10kW HTS DC induction heating machine[J]. Physica C: Superconductivity and Its Applications, 2014, 504: 120-126.
- [5] 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.
- [6] CHOI J, KIM S K, KIM S, 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): 1-5.
- [7] Yang Ping, Wang Yawei, Qiu Derong, et al. Design and fabrication of a 1MW high-temperature superconductor DC induction heater[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(4): 3700305.
- [8] 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.
- [9] 张东, 肖立业, 林良真. 高温超导直流感应加热技术研究综述[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(07): 45-53.
- [10] DAI S T, YAN X F, HONG Z Y, et al. Development and test of one commercial megawatt superconducting DC induction heater with extra high energy efficiency[J]. IEEE Access, 2020, 9: 3301-3314.
- [11] 张文峰, 姜永将, 张晓红, 等. 一种双 C 型高温超导直流感应加热装置及其性能分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S2): 444-450.
- [12] 王幸, 戴少涛, 马韬, 等. 对极型高温超导直流感应加热装置电磁优化[J]. 北京交通大学学报, 2023, 47(04): 154-161.
- [13] 程明, 文宏辉, 曾煜, 等. 电机气隙磁场调制行为及其转矩分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 921-930. Cheng Ming, Wen Honghui, Zeng Yu, et al. Analysis of airgap field modulation behavior and torque component in electric machines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 921-930.
- [14] 刘家琦, 白金刚, 郑萍, 等. 基于磁场调制原理的齿槽转矩研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(5): 931-941. Liu Jiaqi, Bai Jingang, Zheng Ping, et al. Investigation of cogging torque based on magnetic field modulation principle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(5): 931-941.
- [15] 王春雨. 高温超导直流感应加热铝棒的数值模拟[D]. 兰州大学, 2021.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS