基于 ANSYS 的冷坩埚感应线圈设计及电磁分析

陈 楠,刘丽君,郄东生,周 慧,李宝军,李 扬,张 华

中国原子能科学研究院 放射化学研究所,北京 102413

摘要:冷坩埚玻璃固化技术是目前最新一代的高放废液玻璃固化工艺。感应线圈是冷坩埚熔炉的关键部件之一,其设计合理与否直接关系到冷坩埚能否顺利运行。目前世界各国的冷坩埚装置对感应线圈的截面形状、匝数、匝间距等参数采取过不同的设计,对这些设计参数进行计算分析对指导我国冷坩埚研制具有重要意义。本工作基于 ANSYS 软件对感应线圈的电磁场进行有限元分析,结果表明,加载高频交变电流的感应线圈的电磁场具有以下分布规律:高频电流表现出集肤效应和邻近效应,电流集中于线圈表面,电流密度峰值出现在线圈的 最上端和最下端;磁通密度轴向分量(B_y)在径向上由线圈内边缘附近向线圈包围的中心区衰减,纵向上与电流 密度的分布类似,B_y 在线圈上下两端处出现峰值,在线圈高度覆盖的范围之外,磁通密度迅速衰减。本工作进 一步结合法国阿海珐公司、美国爱达荷实验室和印度巴巴哈原子能中心的冷坩埚的感应线圈设计方式,建立了 不同截面形状、匝数和匝间距的感应线圈模型,经过计算发现矩形截面线圈的磁场分布均匀性要优于圆形截面 线圈;在感应线圈总高度相同的前提下,匝数的变化对线圈的磁场分布几乎没有影响;匝间距的增加会降低径向 和纵向的磁通密度及其均匀性。综上,建议感应线圈采用密绕型矩形截面设计,匝间距设计为 2.5~5 mm。 关键词:冷坩埚;感应线圈;ANSYS;电磁场;有限元分析

中图分类号:O441.4 文献标志码:A 文章编号:0253-9950(2014)S0-0021-06 doi:10.7538/hhx.2014.36.S0.0021

Design and Electromagnetic Analysis of Induction Coil of Cold Crucible by ANSYS

CHEN Nan, LIU Li-jun, QIE Dong-sheng, ZHOU Hui, LI Bao-jun, LI Yang, ZHANG Hua

China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(93), Beijing 102413, China

Abstract: Cold crucible induction melter (CCIM) is one of the most advanced technologies for high-level radio waste liquid vitrification. Induction coil is one of the key assembly of CCIM and its design is a critical factor affecting CCIM operation. Other countries in the world have adapted different designs on the cross-section shape, coil turns and winding space of induction coil. Calculation and analysis on these design parameters are important for the development of CCIM in China. The electromagnetic field of induction coil are analyzed by finite element method based on ANSYS software. Due to skin effect and proximity effect, high frequency current in the induction coil is restricted in the surface and the current density presents two peak values at both top and bottom ends of the coil. Along the radial direction, the axial magnetic flux density (B_y) decreases gradually from the inner edge of coil to the

收稿日期:2014-10-13;修订日期:2014-11-12

作者简介:陈 楠(1987—),男,福建莆田人,博士,助理研究员,放射性废物处理与处置专业

center region encircled by the coil. Along the vertical direction, similar with the distribution of current density, B_y also presents two peak values at the two ends of the coil and B_y decreases rapidly in the region beyond the coil height. Coil models with different crosssection shapes, turns and winding spaces are built and calculated in ANSYS. The results show that coil with rectangular cross-section has a more uniform distribution of magnetic field than coil with circular cross-section. Coils with the same height but different turns have little effect on the magnetic field distribution. B_y and its uniformity decrease with increasing winding space. According to these results, close-winding coils with rectangular cross-section are recommended for CCIM and the winding space should be 2. 5-5 mm.

Key words: cold crucible; induction coil; ANSYS; electromagnetic field; finite element analysis

玻璃固化是目前国际公认的高放废液较好的 处理方法[1]。冷坩埚是从高温冶金工业领域移 植、发展过来的玻璃固化技术,近年来在高放废液 处理领域得到了广泛重视和发展,法国、俄罗斯、 美国、韩国、印度等国家都在积极研究和发展冷坩 埚玻璃固化技术。冷坩埚的主体结构是由一系列 相邻但互相绝缘的金属管围成笼状组成,管内通 有冷却循环水。感应线圈内加载高频交变电流 (30~13 000 kHz),产生的高频电磁场直接对坩 埚内的物料进行感应加热并熔融。由于埚壁一直 被循环水冷却,埚内玻璃物料熔融时靠近埚壁处 会形成一薄层固态玻璃壳体(冷壁),保护坩埚壁 免受熔融物的腐蚀,熔融的玻璃则被包容在固态 玻璃薄层内[1-2]。因此,冷坩埚具有受到的腐蚀和 污染少、使用寿命长、退役简单等显著优点[2-3]。 我国也在积极开展冷坩埚玻璃固化技术的相关研 究,中国原子能科学研究院已独立建成直径 300 mm 的冷坩埚玻璃固化原理样机装置,目前正在进一 步调试和工艺实验阶段[4]。

感应线圈作为高频电磁场的发生装置,是冷坩 埚熔炉的核心部件之一。感应线圈设计合理与否, 直接关系到冷坩埚能否正常运行。感应线圈的设 计参数主要有以下几个:总高度、截面形状、匝数及 匝间距。从目前各个国家冷坩埚的实际设计经验 来看,感应线圈可以采取多种不同设计。例如,法 国 AREVA 公司的冷坩埚装置,其感应线圈采用的 是多匝密绕型矩形截面线圈^[5];美国爱达荷实验室 的冷坩埚采用多匝疏绕型圆形截面线圈^[6];而印度 巴巴哈原子能研究中心的冷坩埚装置采用单匝矩 形截面线圈^[7]。通过对各种感应线圈的电磁场进 行分析和比较,对我国冷坩埚装置的优化和未来的 放大设计具有重要的参考价值和指导意义。然而, 实际制作多种不同的感应线圈再比较选择显然是 非常费时费力的,而利用有限元方法建模仿真对感 应线圈电磁场进行分析,在设计阶段就使感应线圈 的效果得到优化是更高效的手段。

ANSYS 软件是融合结构、流体、电场、磁场、 声场分析于一体的大型通用有限元分析软件^[8], 其中的电磁分析模块可以用于磁通量密度、电场 分布、磁力线分布、涡流等问题的分析。分析对象 可以是二维或三维模型,并可求解静态、交流及瞬 态电磁场等各种问题。本工作拟基于 ANSYS 软 件建立多种不同设计的感应线圈三维模型进行电 磁场分析,研究不同的截面形状、匝数、匝间距条 件下感应线圈的电磁场分布规律,为冷坩埚感应 线圈的设计提供参考。

1 电磁计算原理

电磁分析问题实际上是求解给定边界条件下的麦克斯韦(Maxwell)方程组^[9]。Maxwell 方程 组是支配所有宏观电磁现象的一组基本方程,其 微分形式如式(1)-(4)所示^[10],以它们为基础可 以导出有限元方法处理电磁问题的微分方程。

安培全电流定律:

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \boldsymbol{J} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t} \tag{1}$$

法拉第电磁感应定律:

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

磁通连续性原理:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{B} = 0 \tag{3}$$

高斯定律:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{D} = \rho \tag{4}$$

式中,H为磁场强度, ρ 为电阻率,D为电荷密度。 给定场源J和电阻率 ρ 时,磁通密度B和电场强 度E即可解出。在实际计算时,可利用模型的对 称性设定合适的边界条件,可以取 1/2 或 1/4 模型,减少计算量和计算时间。

2 模型参数

采用的模型中,感应线圈材质按实际采用的 T2级紫铜(铜质量分数大于 99.90%)设定,其电 阻率 ρ =1.71×10⁻⁶ Ω · cm,相对磁导率 μ_r =1; 线圈加载的交变电流幅值 $I = \sqrt{2} \times 1000$ A,频率 f=300 kHz。以矩形截面线圈为例,其线圈尺寸 参数设定示于图 1:线圈总高度 265 mm,宽度 20 mm,壁厚 5 mm,绕制内径 178 mm。



图 1 矩形截面感应线圈 3 维模型图 Fig. 1 3D model of induction coil with rectangular cross-section

3 计算结果与讨论

冷坩埚玻璃固化装置在运行过程中,一要保 证对玻璃熔体具有足够高的加热效率,二要保证 产品玻璃性能的均匀性。从电磁场分布的角度上 看,要实现上述目标,既要使冷坩埚内的磁通密度 足够大以提高感应加热效率,同时又要充分考虑 其均匀性。这也是后续计算的优化目标。

3.1 感应线圈的电流和磁场分布规律

采用 ANSYS 计算得到的感应线圈中电流密 度(j)和磁力线的分布示于图 2。由图 2 可知:由 于高频电流的集肤效应,电流集中分布在线圈表 面,线圈表面的电流密度最大,越接近线圈内部, 电流密度越小,同时最上端和最下端线圈表面的 电流密度要显著大于中部线圈的电流密度,这体 现出高频电流的邻近效应;磁力线的方向遵循右 手定则,线圈内侧和外侧的磁力线方向相反,同 时,越靠近感应线圈,磁力线分布越密集,磁通密 度越大,反之磁通密度越小。与电流密度的分布 类似,线圈上下两端的磁通密度较大。除去靠近 线圈上下两端的边缘区,其余区域磁通密度的最 大值出现在线圈的中部。

3.2 线圈截面形状对磁场分布的影响

在各国实际运行的冷坩埚玻璃固化装置中, 法国和印度的冷坩埚采用矩形截面的感应线圈, 而美国的冷坩埚则是采用圆形截面的感应线圈。 为比较这两种线圈的磁场分布,在 ANSYS 中建 立了矩形和圆形两种截面的感应线圈的 1/4 模型 示于图 3。由图 3 可知,线圈部分采用六面体网 格划分,空气部分(未画出)采用四面体网格划分。 为比较截面形状对磁场分布的影响,线圈匝数都 设定为 6 匝,总高度 265 mm,壁厚 5 mm。为保证 相同的截面积,设定每匝矩形线圈截面高 40 mm, 宽 20 mm,每匝圆形截面外径 36.8 mm,每匝线圈 的截面积均为 500 mm²。

对于冷坩埚而言,感应线圈产生的磁场,磁通 密度只有轴向分量对冷坩埚内玻璃的感应加热起 到贡献,其径向分量没有贡献。因此,在考察感应 线圈的磁场分布时,从计算得到的磁通密度结果 中提取轴向分量(B_y)进行比较。矩形和圆形截







图 3 矩形(a)和圆形(b)截面感应线圈的有限元模型 Fig. 3 Finite element model of induction coil with different cross-section; rectangular(a) and circular(b)

面感应线圈的 B, 云图示于图 4。由图 4 可知,矩 形线圈和圆形线圈都在上下两端边缘处 B, 最 大,在 5×10⁻³ T 以上(红色区),但仅占局部很小 一块区域,剩下大部分区域为浅绿色,这部分区域 的高度与感应线圈的高度相对应,也就是说有效 的感应加热区域在整个线圈覆盖的高度范围内。 矩形和圆形截面感应线圈在径向和纵向的 B, 分 布曲线示于图 5。图 5(a)为线圈高度中心的 B, 沿径向的变化曲线,图5(b)为径向距离线圈

10 mm 处的 B, 沿纵向的变化曲线。在图 5(a)中 可以看到,线圈表面(径向位置 r=178 mm)的轴 向磁通密度 B, 很小,这是由于相邻两匝线圈中 电流方向相同产生的邻近效应导致。矩形截面线圈 $B_y = 1 \times 10^{-3}$ T,圆形截面线圈 $B_y = 1.3 \times 10^{-3}$ T。 在距离线圈表面 10~20 mm 的一小段范围内 B, 迅速增加,随后向 r=0 的中心处逐渐衰减。这部 分区域是高频电磁场作用于玻璃熔体发生感应加 热的区域(对应于图 4 中的浅绿区),在这个区域 内,越靠近线圈 B, 越大。矩形线圈和圆形线圈 的 B, 在径向上的变化规律一致,大小几乎相同。 两种感应线圈的 B, 在纵向上的分布规律也基本 类似,每条曲线上有两个最大值(约3.5×10⁻³T), 对应线圈上下两端边缘处的磁通密度,两个最大 值之间的区域对应线圈覆盖的高度范围,这个高 度范围是玻璃固化过程中熔融、加热的有效区域, 在线圈高度范围之外,磁通密度急剧降低,加热效 率也将迅速下降。因此感应线圈高度应与冷坩埚 内玻璃熔体高度设计值相匹配。另外值得注意的 是,圆形线圈由于其几何形状特点,磁通密度在线









3.3 线圈匝数对磁场分布的影响

各国的冷坩埚感应线圈采取多匝和单匝设 计,本工作通过 ANSYS 软件计算比较了不同匝 数的感应线圈的磁场分布情况。不同匝数感应线 圈的有限元模型示于图 6。模型中线圈总高度均 设定为 265 mm,线圈宽 20 mm。在线圈总高度均 设定为 265 mm,线圈宽 20 mm。在线圈总高度和 宽度相同的条件下,不同匝数感应圈在径向和纵 向的 *B*_y 分布曲线示于图 7。由图 7 可知,线圈匝 数从单匝增加到 10 匝时,除了靠近线圈的区域 *B*_y 略有不同外,感应线圈沿径向和纵向上 *B*_y 的 分布几乎没有变化,因此,匝数对感应线圈的磁场 分布没有影响。然而需要注意的是,虽然匝数对 磁场分布没有影响,但不同匝数的感应线圈在谐 振电路中的电感显然不同,因此设计匝数时,可在 线圈总高度确定的前提下,结合高频谐振电路的 电感、电容值灵活设计匝数,满足谐振频率的 要求。



图 6 不同匝数感应线圈的有限元模型





Fig. 7 B_{y} distribution of induction coil with different turns on radial(a) and vertical(b) direction

3.4 线圈匝间距对磁场分布的影响

从目前其他国家的冷坩埚感应线圈的实际设 计上来看,感应线圈在匝间距的设计上可采用密 绕型和疏绕型,二者的代表性设计分别来自法国 AREVA 和美国 INEEL^[5-6],它们的冷坩埚实物 照片示于图 8。为考察匝间距对磁场分布的影 响,同样采用 ANSYS 对相同匝数和截面的矩形 线圈在不同匝间距(l)的情况(分别为 2.5、5、10、 20 mm)进行磁场分布的分析。ANSYS 计算得到 的结果示于图 9。在图 9(a)中可以看出,随着匝 间距从 2.5 mm 增加到 20 mm,径向上的磁通密 度 B_y 显著减小,整体减小约 7.5×10⁻⁴ T。因为 径向上任意一处的磁通密度都是每匝线圈产生的 磁场相互叠加的结果,当匝间距增大时,相同位置 处距离其它线圈变远,叠加的总磁通密度相应减 小,因此径向上的 B_y 随匝间距的增大而减小。 另外,考察纵向上的 B_y (图 9(b))可以发现,当匝 间距从 2.5 mm 增加到 20 mm 时,由于单匝线圈 截面相同,线圈总高度增加,磁场所覆盖的范围



图 8 法国 AREVA 公司(a)和 美国 INEEL(b)的冷坩埚实物照片^[5-6] Fig. 8 Photograph of cold crucible from AREVA, France(a) and INEEL, USA(b)^[5-6]



图 9 不同匝间距的感应线圈在径向(a)和纵向(b)的 B, 分布曲线

Fig. 9 B_y distribution of induction coil with different winding space on radial(a) and vertical(b) direction

(曲线上两个极大值之间的区域)增大,然而匝 间距的增大同时导致邻近效应减弱,B,值显著 下降,而且在纵向上的分布变得不均匀,呈现波 动分布。由此可见,在匝数和截面形状相同的 条件下,增加匝间距使得磁场在纵向上覆盖的 区域增大,但同时降低了径向和纵向的磁通密 度及其均匀性。因此,在感应线圈的设计上,减 小匝间距对于优化磁场分布有利,而磁场的覆 盖范围可以通过增加匝数来弥补。此外,感应 线圈在制作过程中表面需要涂覆、包裹绝缘材 料^[11],防止相邻线圈发生击穿,因此匝间距的设 计要给绝缘层预留空间,结合计算结果,建议匝 间距设计为 2.5~5 mm。

4 结 论

基于 ANSYS 软件对冷坩埚的关键部件感应 线圈进行了有限元分析,研究了感应线圈电磁场 特性及分布规律,并比较了法国、美国和印度的冷 坩埚感应线圈设计,分别计算了感应线圈截面形 状、匝数、匝间距这几个设计参数对电磁场分布的 影响,得到以下结论:

(1)由于集肤效应,高频电流在线圈截面上 非均匀分布,集中于线圈表面;由于邻近效应,电 流密度峰值出现在线圈上下两端;

(2)磁通密度在径向上由感应线圈附近向中 心区衰减,纵向上在线圈上下两端处出现峰值,峰 值之间为感应加热的有效区域,在线圈高度覆盖 的范围之外,磁通密度迅速衰减;

(3)感应线圈总高度的设计应与冷坩埚内玻 璃熔体的高度匹配;矩形截面线圈的磁场分布均 匀性要优于圆形截面线圈;

(4) 感应线圈总高度相同时, 匝数对线圈的

磁场分布几乎没有影响;而匝间距的增加会降低 径向和纵向的磁通密度及其均匀性。

综合以上几点考虑,建议冷坩埚采取密绕型矩 形截面的感应线圈,匝间距为2.5~5 mm。

参考文献:

- [1] 顾忠茂.核废物处理技术[M].北京:原子能出版社, 2009:369-377.
- [2] 罗上庚.放射性废物概论[M].北京:原子能出版社, 2003:136-140.
- [3] 胡唐华,冯孝贵,鲍卫民,等. 冷坩埚技术在核废物 处理中的应用[J]. 核技术,2001,24(6):521-528.
- [4] 徐建华.冷坩埚玻璃固化熔融装置中高频电源感应 系统的设计研究[D].北京:中国原子能科学研究 院,2009.
- [5] Perez J M, Bickford D F, Day D E, et al. High-level waste melter study report[M]. Richland, WA : Pacific Northwest National Laboratory, 2001; 58-60.
- [6] Gombert D, Richardson J R, Roach J A, et al. Cold crucible induction melter prototype at the Idaho national engineering and environmental laboratory[C]. Proceedings of the Waste Management 2004 Symposium, Tucson, USA, 2004.
- [7] Sugilal G. Experimental study of natural convection in a glass pool inside a cold crucible induction melter[J]. Int J Therm Sci, 2008, 47(7): 918-925.
- [8] 谢龙汉,耿煜,邱婉. ANSYS 电磁场分析[M].北京: 电子工业出版社,2012:1-3.
- [9] 路宏敏.电磁场与电磁波基础[M].北京:科学出版 社,2006:154-159.
- [10] 金建铭.电磁场有限元方法[M].西安:西安电子科 技大学出版社,1998:1-21.
- [11] 韩至成,杨院生.电磁冶金技术及装备[M].北京:冶 金工业出版社,2008:384-385.