

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.12.015

吹膜挤出机的电磁感应加热系统建模与有限元模拟研究

王超¹, 柴雄²

(1. 中南民族大学计算机科学学院, 武汉 430074; 2. 武汉同创塑料机械有限公司, 武汉 430113)

摘要:为实现吹膜挤出机在电磁感应加热条件下能效的定量分析,对吹膜挤出机电磁感应加热的三维有限元模型进行了研究,导出了对应于指定机筒和螺杆材料的电流透入深度与电磁感应加热器的各设计参数之间的关系;分析了挤出机的机筒与螺杆等关键部件在电磁感应三段式分区加热条件下的磁场分布、电流密度场分布及焦耳热能分布的相对趋势。结果表明,感应磁场主要分布在机筒内表面,而相应的感应电流主要分布在机筒外层,且当机筒上缠绕的3组匝数相同的电磁感应加热线圈中加载有大小相等、方向相同的交变电流时,电流密度和产生的焦耳热能集中在机筒和螺杆的中部,而适当增加进料段与计量段加热区所对应的两组线圈匝数可获得较为均匀的电磁感应加热效果。相对于电阻式加热,电磁感应加热的能量损耗较小,是一种环保节能的吹膜挤出机加热方式。

关键词:电磁感应加热;挤出机;三维有限元模型;电流密度场分布;焦耳热能分布

中图分类号: TP391.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2014)12-0066-05

Modeling and Finite Element Simulation in Electromagnetic Induction Heating System of Blown Film Extruder

Wang Chao¹, Chai Xiong²

(1. College of Computer Science, South-central University for Nationalities, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan Plastics Machinery Co. Ltd., Wuhan 430113, China)

Abstract: In order to achieve quantitative analysis of energy efficiency of the blown film extruder in electromagnetic induction heating condition, three dimensional finite element model of the extruder in electromagnetic induction heating condition were studied. The relationships between the current penetration depth with specified barrel and screw material and various design parameters of the electromagnetic induction heater were exported, the relative tendency of magnetic field distribution, current density field distribution and Joule heat field distribution of key components in extruder such as extruder barrel and screw in the three section type electromagnetic induction heating condition was analyzed. The simulation data prove that the induced magnetic field is mainly distributed on inner surface of the barrel, the corresponding induced current is mainly distributed on external layer of the barrel, and when the three group wound electromagnetic induction heating coils with the same number of turns at the barrel are loaded with alternating current of equal size and same direction, the current density and the Joule heat energy are concentrated in the intermediate section of barrel and screw. Increasing the number of turns of the two coils corresponding to the feeding section and metering section properly can obtain more uniform electromagnetic induction heating effect. With respect to the resistor type heating, the electromagnetic induction heating has low energy loss, so it is an environmentally friendly and energy-saving heating method during the blown film extrusion process.

Keywords: electromagnetic induction heating; extruder; three-dimensional finite element model; current density field distribution; Joule heat field distribution

绿色化技术的推广与普及是塑料包装,结构战略性调整的重要一环,我国是塑料包装的生产大国与应用大国,但塑料包装绿色化技术的研发与应用仍落后于发达国家。塑料包装绿色化是从原材料、加工设备、成型工艺、产品检测、仓储、回收再生利用等各个环节实现绿色化的全套方案的系统工程。其中,电磁感应加热技术作为目前工业界普遍广泛应用的节能技术,在塑料包装行业的应用日益得到重

视。

吹膜挤出机是塑料包装行业常用的加工设备,其电磁感应加热塑化过程是综合熔化、增压及混合的复杂过程,集物理和化学反应为一体,在塑化加热过程中电流、磁密等物理量的分布将直接影响机筒

联系人:王超,博士,讲师,主要研究方向为金属及高分子材料成型与控制

收稿日期:2014-10-20

中的焦耳热与能量的分布。虽然国内外学者在电磁感应加热方面做了大量工作,但大多数电磁感应加热为某一方面的应用,且多用线性材料分析,建模大多采用二维模型,基于三维模型的挤出机电磁感应加热相关的研究还较少^[1-5],分析结果无法对实际生产应用起到参考或指导作用。笔者采用实际生产所使用的挤出机为建模原型,进行挤出机在电磁感应加热条件下加热能效的三维有限元数值模拟,意在对此加热方式进行定量研究,给出建模方法并分析各参数对加热能效的影响。

1 理论及模型

1.1 电磁感应加热理论及建模分析

由法拉第电磁感应原理和焦耳定律可知感应加热的基本原理为:变换的电场能够产生变换的磁场,变化的磁场在导体内部会产生感生电动势,进而生成感生电流,电流在导体中左右生热,将电能转化为内能,使导体本身温度升高^[6]。由于电流热效应需要时间极短,生热过程快速,且磁场经过非磁性物质时不会被阻碍,因此耗损极少,没有能量损耗,热效率极高^[7]。

在电磁感应加热中,流经导体的电流的频率越高,电流密度降低的速度越快,集肤效应越显著,通常把电流密度大约降至表面电流密度值的1/3的深度称为“涡流透入深度”。随着频率的增加工件受热厚度越薄,相应的热量越集中。

挤出机的机筒与螺杆的材料多使用45号钢,内表面铸双金属或氮化钢(38CrMoAl)且经渗氮处理。为便于计算,笔者采用45号钢作为机筒及螺杆的材料用于建模分析。

感应加热器的匝数可基于以下系列公式计算的结果选取,并根据实验修正得到。为简化计算,将机筒所有的加热区看作一个整体,根据经验值将加热温度设为160℃。

所选的机筒与螺杆金属材料的相对磁导率 μ_r 为190,其160℃下的电阻率 ρ_{160} 为 $0.33 \times 10^{-6} \Omega \cdot m$ 。则根据加热要求,保留一定余量,设加热器功率 $P=15 \text{ kW}$,则加热器电流 I 计算公式为:

$$I = P / (V \cos \phi) \quad (1)$$

式中: V ——电源电压,取值为380 V;

$\cos \phi$ ——功率因素,取值为0.5。

则由式(1)可计算出 $I = 1.5 \times 10^3 / (380 \times 0.5) = 78.9 \text{ A}$ 。

电源频率 f 为2000 Hz,则涡流透入深度 σ 按

式(2)计算。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\rho_{160}}{\mu_r f}} \quad (2)$$

将相关数值代入式(2)可得 σ 为4.7 mm。被加热的机筒涡流透入层电阻 R_j 如式(3)所示:

$$R_j = \rho_{160} L / S \quad (3)$$

式中: L ——机筒长度;

S ——机筒涡流透入层截面积。

将相关数值代入式(3)可得 $R_j = 7.33 \times 10^{-4} \Omega$ 。

感应电流 I_j 计算公式如式(4)所示。

$$I_j = \sqrt{\frac{P}{R_j}} \quad (4)$$

考虑到能量损耗,则式(4)变为

$$I_j = \sqrt{\frac{0.8P}{R_j}} \quad (5)$$

将 P 和 R_j 的数据代入式(5)可得 $I_j = 4046 \text{ A}$ 。

将机筒涡流透入深度层看作无铁芯变压器的次级绕组,即为短路的一匝线圈,且感应电流 I_j 的方向与初级绕组电流方向相反,如忽略空间热辐射,则应满足关系:

$$IW = I_j W_j \quad (6)$$

式(6)中 I 和 W 分别为初级线圈绕组(即加热器线圈绕组)电流及匝数, I_j 和 W_j 分别为次级线圈绕组电流及匝数, W_j 取值为1,因此初级线圈绕组匝数 W 至少应为 $I_j W_j / W = 4046 / 78.9 \approx 51$ 匝。为保留余量,仿真时单组线圈采用60匝。

1.2 三维几何模型建立

电磁感应加热问题是空间的三维函数和时间的四维函数问题,因其计算过程的复杂性,可对一些影响因素较小的条件简化或去除。笔者讨论的是圆柱型机筒的电磁感应加热问题,因此采用三段式螺杆挤出机,感应线圈分3段安装在料筒上,并用风机冷却。图1为螺杆三维模型视图。

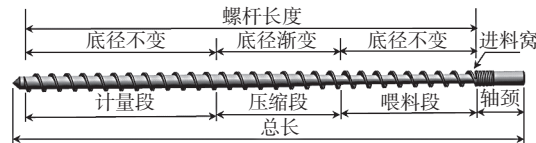


图1 螺杆仿真模型

图中仿真模型采用UG绘制的三段渐变式螺杆^[8],其中进料段螺槽深度固定,负责预热与塑料固体输送,长约280 mm,设为加热1区;压缩段为渐缩螺杆螺槽深度渐变,为塑料原料熔融、压缩与加压排气,长约260 mm,设为加热2区;计量段螺杆螺槽深度固定,为混炼、熔胶输送、计量,并提供足

够的压力,长约 300 mm,设为加热 3 区。螺杆直径 40 mm,长径比为 30 / 1。螺槽尺寸变化为等距不等深,它的优点是加工制造容易,物料与机筒接触面积大,传热效果好。

与螺杆配套的机筒仿真模型如图 2 所示,为简化模型,省去了驱动电机,冷却风机,滤网及模具部分。将该挤出机模型导入到 Ansoft Maxwell 有限元仿真软件中进一步建模分析电磁感应加热现象。

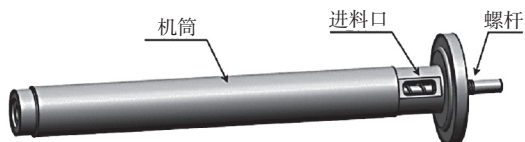


图2 螺杆挤出机仿真模型

原有模型导入 Maxwell 后加入电磁感应线圈,原机筒螺杆加热方式为三段式加热,因此采用 3 段线圈包裹围绕机筒。如图 3 所示,3 段线圈长度分别为进料段 260 mm,压缩段 240 mm,计量段 300 mm。线圈外径 85 mm,内径 65 mm,与机筒间隔 5 mm,将其考虑为绝缘层厚度。

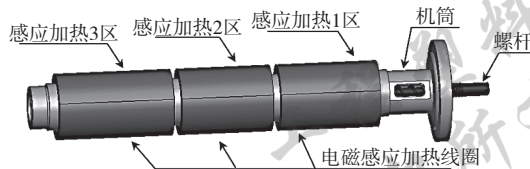


图3 挤出机三维电磁感应加热仿真模型

螺杆与机筒材料均为 45 号钢,电磁感应加热线圈材料为铜。通过包裹实体模型的圆柱形真空区域建立求解域。

2 边界条件网格划分

3 组感应线圈激励源均使用频率 2000 Hz, 80 A 电流作为激励,初始设定每组线圈匝数为 60 匝。选取求解域远场边界处磁势为零,激励条件为加载到线圈横截面积上的交变电流。

因为需分析涡流场中电磁感应现象,对物体边界内指定剖分规则及对物体内部指定剖分规则。设定所要剖分的单元的最大边长数为 10 mm。设定网格三角单元的最大个数,以免过大的剖分单元无节制的占用内存资源。采用系统默认的 1000。

考虑物体的集肤效应,需在集肤效应层进行加密剖分,而集肤效应层之下的网格剖分可相对较为稀疏。在三维剖分中,剖分层设置尤为重要,将涡流透入深度区域剖分几层可更好地模拟透入深度区域内磁场的变化趋势。在此,需给出材料的基本属性,磁导率,电导率和剖分物体所工作的电流频率。软

件可由给出的这 3 个物理属性,按照式 (7) 自动计算集肤效应的涡流透入深度 σ 。

$$\sigma = \sqrt{\frac{2}{\omega \delta \mu}} \quad (7)$$

式中: ω ——角频率, $\omega = 2\pi f$;

δ ——材料电导率, $\delta = 1/\rho$;

μ ——磁导率, $\mu = \mu_0 \times \mu_r$, 其中 μ_0 为空气的磁导率。

软件计算的涡流透入深度为 4.7 mm,与前述理论计算一致。设置透入深度层的剖分层数为 5 层。

3 结果与讨论

3.1 磁场分布情况

机筒轴向磁场强度矢量分布如图 4 所示。由图 4 看出,在电磁感应作用下,由于机筒有一定厚度,磁场几乎仅存在于缠绕线圈对应的机筒内表面附近。仿真结果进一步验证了此处的集肤效应。即由感应磁场产生,靠近导体表面穿透的磁通较导体中心穿透的磁通大得多,因此机筒中心的感应电势小到可忽略不计,感应电流分布主要趋于机筒表面。

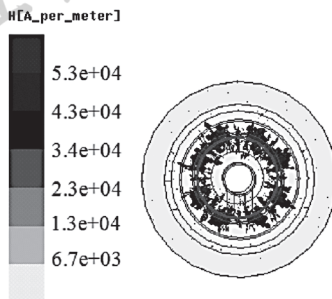


图4 机筒磁场强度矢量轴向分布图

3.2 电流密度分布情况

图 5 为机筒电流密度矢量分布,总传导电流密度矢量可视作感应涡流密度矢量与施加的源电流密度矢量之和。由图 5 分析可知,如 3 组电磁加热感应线圈采用相同的匝数,则机筒表面电流密度主要集中在靠近机筒外表面薄层上,且靠近中间区域的电流密度矢量较为集中,涡流产生的热效应也应较大。

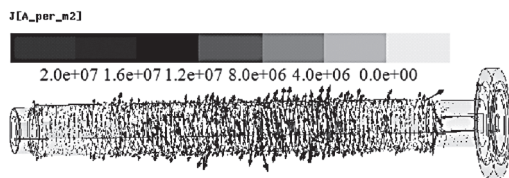


图5 机筒电流密度矢量分布仿真图

该现象产生的本质为电磁感应加热的邻近效应。即相邻两线圈加载大小相等、方向相同的高频

交变电流时,大部分电流仅在线圈外层流过。邻近效应与导体间距成反比,与交变电流频率成正比。利用邻近效应有助于提高电磁感应加热的效率。

在环形线圈中通以交变电流时产生的邻近效应称为圆环效应。其特点为磁通量大部分集中在环内。在此处挤出机电磁感应加热实际应用中,圆环效应使感应加热器上的电流大部分集中在靠近机筒外表面的薄层上,可大大加快金属机筒的温升速度,提高加热效率。此外,仿真结果分析可知,3组线圈中加载有大小相等、方向相同的交变电流时,中间一组线圈与左右两组线圈均产生邻近效应及圆环效应,电磁感应热效应得以加强,因此电流密度矢量更密集。

3.3 焦耳热能量分布情况

电磁感应加热方式通过电磁感应金属内部将电能转变为焦耳热能,以满足加热要求。因此分析焦耳热能的产生及分布对于感应加热热效应的研究具有重要意义。图6为3组线圈均加载2000 Hz, 80 A的交变电流时,机筒表面焦耳热能的分布。从图6分析可知,焦耳热集中的区域与前述电流密度在中间区域集中的现象完全吻合,因邻近效应及圆环效应导致3组线圈虽加载相同频率相同大小的电流及采用相同的匝数,但中间区域的热能更集中、温度更高。缠绕线圈部分的焦耳热能密度为 $9.6 \times 10^3 \sim 6.6 \times 10^4 \text{ J/m}^3$ 。机筒内部由于涡流透入深度无法达到,因此靠热传导产生的焦耳热能较低。

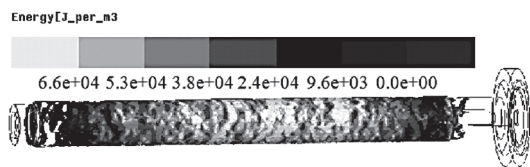


图6 机筒焦耳热能分布图

因邻近效应及圆环效应导致机筒表面焦耳热能分布不均,而挤出机实际工作中,设定的挤出机1区至3区的理想加热温度为 $140 \sim 160^\circ\text{C}$ 。其温度分布应较为平均,因此在仿真中分别调整靠近进料段与计量段加热区的2组线圈匝数,将每组线圈匝数改为80匝,得到图7与图8所示调整后的机筒焦耳热分布仿真图。由图7和图8分析可知,如同时增加1区与3区线圈匝数将提升进料段与计量段附近对应加热线圈包裹区域的焦耳热能与温度,不会出现机筒中间区域加热效应强于两端的现象,可得到较为均匀的电磁感应加热效果。

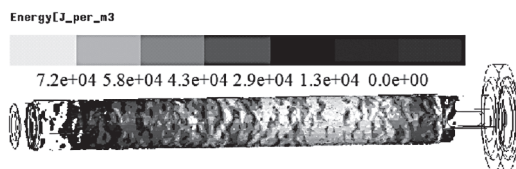


图7 调整进料段线圈匝数后机筒焦耳热能分布图

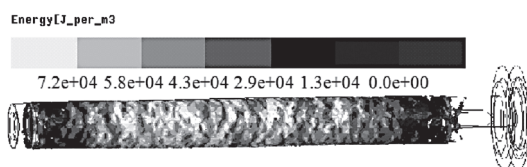


图8 调整计量段线圈匝数后机筒焦耳热能分布图

图9和图10为1区与3区线圈匝数调整前后螺杆表面的焦耳热能分布图。由图9可知,电磁感应加热可使机筒内部的螺杆直接产生热能。同样由于邻近效应及圆环效应,线圈采用相同的匝数及加载相同的交变电流时,螺杆中间区域焦耳热能较强。由图10可知,与机筒类似,适当调整1区与3区线圈的匝数可改善螺杆热能分布不均现象。

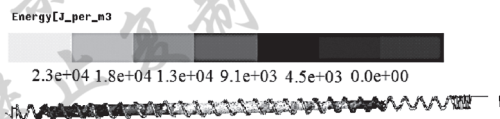


图9 线圈匝数调整前螺杆焦耳热能分布图

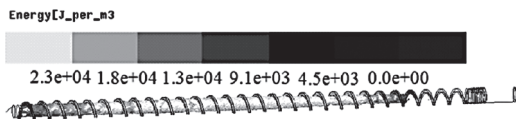


图10 线圈匝数调整后螺杆焦耳热能分布图

考虑电磁感应加热向空间辐射的能量损耗,电磁感应加热向空间辐射的热能密度最大约 $3.0 \times 10^2 \text{ J/m}^3$,与在金属表面产生的焦耳热相差约两个数量级。因此,电磁感应加热的能量损耗较低。

如上所述,电磁感应加热可使金属直接产生热能。因此电磁感应加热生成总的热量可由机筒热传导,以及机筒内部产生的热能与螺杆产生的热能叠加得到,相对电阻式加热圈仅靠热传导且因向空间辐射损耗较大而产生的热能损失相比,电磁感应加热方式大大提高了加热效率,可视为绿色、环保、节能型的吹膜挤出机加热方式。

4 结论

(1) 在吹膜挤出机电磁感应加热与集肤效应的作用下,由感应磁场产生的磁通在机筒内表面分布较多,机筒中心磁通则分布较少,致使感应电流分布趋于机筒外层。

(2) 电磁感应三段式分区加热方式中,当3组匝数相同的线圈中加载有大小相等、方向相同的交变

电流时,中间一组线圈与左右两组线圈均产生邻近效应及圆环效应,电磁感应热效应得以加强,因此机筒及螺杆中间区域的电流密度矢量更密集,产生的焦耳热能也更大。适当增加进料段与计量段加热区所对应的两组线圈匝数可获得较为均匀的电磁感应加热效果。

(3) 电磁感应加热总热量由机筒热传导,机筒内部产生的热能与螺杆产生的热能叠加得到,相对电阻式加热圈仅靠热传导且因向空间辐射损耗较大而产生的热能损失相比,电磁感应加热方式大大提高了加热效率,且易于实现精确控制,是一种环保、节能型的吹膜挤出机加热方式。

参考文献

- [1] Chaboudez C, Clain S, Glardon R, et al. Numerical modeling of induction heating for axisymmetric geometries[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(1): 739-745.
- [2] Fireteanu V, Tudorache T. Electromagnetic forces in transverse flux induction heating[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2000, 36(4): 1792-1795.
- [3] Bloul F, Dupret F. Application of asymptotic expansions to model two-dimensional induction of heating systems. Part I: Calculation of electromagnetic field distribution[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(9): 2496-2505.
- [4] Mitchell A. Solidification in remelting processes[J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 413: 10-18.
- [5] 常世家,何学涛. 电磁感应加热技术在注射机温度控制系统上的应用[J]. 塑料科技, 2009, 37(5): 1-3.
Chang Shijia, He Xuetao. Application of electromagnetic induction heating technology in temperature control system of injection molding machine[J]. Plastics Science and Technology, 2009, 37(5): 1-3.
- [6] 赵宗彬,朱斌祥. 基于电磁感应加热原理的挤塑机加热系统节能改造[J]. 现代化工, 2014, 34(3): 1-3.
Zhao Zongbin, Zhu Binxiang. Energy-saving re-construction of extruder heating system based on electromagnetic heating theory[J]. Modern Chemical Industry, 2014, 34(3): 1-3.
- [7] 赵宗彬,朱斌祥. 电磁加热节能技术在挤塑机加热系统中的应用研究[J]. 塑料工业, 2014, 42(2): 1-3.
Zhao Zongbin, Zhu Binxiang. Application research of electromagnetic heating technology in the heating system of extruder[J]. China Plastics industry, 2014, 42(2): 1-3.
- [8] 李峰,樊耀. 螺杆几何参数对强剪切应力挤出机流场的影响[J]. 工程塑料应用, 2013, 41(12): 1-5.
Li Feng, Fan Yao. Effects of screw geometric parameters on flow fields of strong shear stress extruder[J]. Engineering Plastics Application, 2013, 41(12): 1-5.

东南亚和中东生产商下调 12 月 PP 和 PE 出口价

根据 Chem Orbis 消息,在上游成本走低,需求有限的情况下,东南亚和中东生产商已开始宣布下调在东南亚市场中 PP 和 PE 的报价。

一家区域性主要生产商说道,他们决定 PP 降价 30~40 美元/t,高密度聚乙烯(PE-HD)和低密度聚乙烯(PE-LD)降价 40 美元/t。“我们觉得价格很可能仍将面临下滑压力,因为石脑油、乙烯和丙烯价格全部处于低位,对于需求前景,我们觉得并不乐观。从国内市场来看,PP 需求也不佳。我们目前正在努力去达成交易。”该生产商评论道。

马来西亚一家贸易商收到另一家区域性大型生产商的 12 月船货最新报价,其中 PE-LD 下降 60 美元/t, PP 共聚物下降 20~50 美元/t, PP 均聚物下降 50 美元/t。“我们的供应商同意对 12 月货物做出大幅价格让步,但我们担心销售可能比较困难,因为市场上存在很多极具吸引力的报价。”该贸易商说道。

一家越南贸易商在近期收到来自沙特生产商 12 月拉丝级 PP 最新报价,经过协商,该供应商同意进一步降价 30 美元/t。“在供应商再次下调价格后,我们采购了一些原料,但我们并不打算大量采购,因为价格还有下行的空间。”该贸易商解释道。另一家贸易商称其与东南亚一家供应商达成了几笔 PP 均聚物交易,价格比供应商最初提供的报价低 50 美元/t。同时,一家泰国生产商据称已下调出口至越南的

PP 均聚物价格,降幅为 10 美元/t,但其薄膜级、注塑级和吹塑级 PE-HD 报价未变。

“因中东材料的报价很具竞争力,我们在达成交易上面面临一些困难。”一家生产商评论道。(Chem Orbis)

发泡片材 IXPP 实现产业化

北京思维浩特新材料有限公司研发的具有自主知识产权的高倍率电子辐照交联聚丙烯(PP)发泡片材(IXPP),经过工业化中试、大试后,日前实现产业化生产,并已成功应用于军工企业和电子行业。

据介绍,IXPP 是以 PP 为主要原材料,配以辅料经混合挤塑成型,通过辐照加工技术产生交联,改变基料原有结构形成的网状独立闭孔泡沫材料。这种材料发泡过程简单易行,辐照交联可控性强,交联效果好,对环境污染少。

在产品研发过程中,该公司突破了 PP 在高温下熔体强度迅速下降的难题,运用电子束辐照技术使基料改变原有结构发生交联,并在高温下形成气泡。目前该公司可以生产发泡倍率为 8~22、厚度 0.8~5 mm、宽度 600~1400 mm 的 IXPP,相关技术已获国家发明专利,产品通过了国际 SGS 认证。

据悉,PP 发泡材料广泛应用于汽车、建筑、食品包装材料、家用电器等领域。但长期以来,国内 PP 发泡片材主要依靠进口,IXPP 的工业化生产有望改变这一局面。

(慧聪塑料网)