

高频电热杀菌腔内粉料食品测温传感器的电磁屏蔽研究

Study on electromagnetic shielding of temperature sensor which measures the temperature of powder food in high frequency electrothermal sterilization equipment

陶 意 蔡健荣 张世庆 孙 力 李 馨

TAO Yi CAI Jian-rong ZHANG Shi-qing SUN Li LI Xin

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

(Jiangsu University, School of Mechanical Engineering, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

摘要:设计了高频电加热粉料杀菌设备,将杀菌腔内粉料的螺旋推进器作为加热部件而接通高频电。高频电加热会在周围产生较强的磁场,干扰铂电阻对关键控制点的准确测温,需进行电磁屏蔽处理。从理论分析和虚拟仿真两方面入手,理论分析得到材料的相对磁导率、电导率及厚度影响材料的屏蔽效能,虚拟仿真得到几种材料以及材料不同厚度的屏蔽效能。找到了合适铂电阻的屏蔽材料为锰锌铁氧体,并确定圆柱形屏蔽罩厚度为 3 mm,屏蔽效能可达 40 dB 以上,经实验验证该种屏蔽罩的屏蔽效果符合屏蔽要求。

关键词:高频电热;杀菌;温度传感器;电磁屏蔽;交变磁场;铂电阻

Abstract: One kind of heat treatment machine for powder material was designed to use the metal screw impeller inside the sterilization chamber as the heating component connected to high frequency electricity. As strong magnetic field was generated during the process, the accuracy of temperature at critical control point (CCP) of the material measured by platinum resistor would be influenced, and this entailed the electromagnetic shielding (EM shielding). Based on both theoretical analysis and virtual simulation, our research was intended to design the shielding device. The relationships between the shielding effectiveness and the relative permeability, relative conductivity and thickness of different materials were analyzed. After narrowed down to several kinds of materials with various thickness, the shielding effectiveness of these materials was calculated by virtual

simulation. It was found that Mn-Zn ferrite would be the proper shielding material for platinum resistor and the effectiveness of a 3 mm thick Mn-Zn ferrite cylinder shield could be higher than 40 dB. The shielding effect of this device prototype was proved to be acceptable in this study.

Keywords: high frequency heating; sterilization; temperature sensor; electromagnetic shielding; alternating magnetic field; platinum resistance

高频电加热杀菌设备是利用高频电流施加于导体产生趋肤效应,促使其表面发热^[1]。将这种加热方式用于粉料食品杀菌,可更好地控制杀菌温度和杀菌时间。由于高频电流产生的电磁场会影响温度传感器的正常使用,研究^[2-3]表明:红外非接触式测温传感器、半导体测温传感器对电磁场抗干扰性好,但由于杀菌腔内香辛料粉料的扩散,红外探头容易黏上粉料而失去作用;半导体传感器由于在 90~150 °C 的温度环境下检测精度低(误差±5 °C),并不适合在本设备中应用。本研究采用测温范围为-60~500 °C,精度为±0.3 °C 的铂电阻温度传感器,但仍需解决交变电磁场对铂电阻测温探头的干扰问题。交变磁场对铂电阻的影响有两方面:① 在交变电磁场的作用下,测温探头和引线产生感应电流并与实际信号叠加,使信号产生锯齿状波纹;② 测温探头与引线的感应电流使传感器自身产生焦耳热而使所测温度偏高。

许多学者对铂电阻抗电磁干扰问题及电磁屏蔽进行了研究,刘华^[4]设计了一种通过软件数学建模来消除铂电阻测量中可能产生误差的铂电阻在线检测系统,构成的铂电阻在线检测系统具有一定的实用性和较高的社会推广价值;张传民等^[5]采用滤波电路滤除射频对铂电阻的干扰,可以满足大部分工业现场应用要求,定标后测量误差≤0.5 °C;丁世敬等^[6-7]介绍了电磁屏蔽材料的屏蔽原理、影响材料屏蔽效能的因素,并探讨了屏蔽材料未来的发展趋势;Wilson P F

基金项目:江苏省高校自然科学研究重大项目(编号:15KJA550001);江苏省 2015 年度普通高校研究生实践创新计划项目(编号: SJZZ15_0130);国家科技支撑计划(编号:2015BAD19B00)

作者简介:陶意,男,江苏大学在读硕士研究生。

通信作者:蔡健荣(1966—),男,江苏大学教授,博士。

E-mail: 1196186958@qq.com

收稿日期:2016-11-08

等^[8-9]对低频磁屏蔽理论、影响磁屏蔽效能的各种因素、并采用等效电路法导出了低频磁屏蔽效能的计算模型。Lee P C等^[10-11]研究了复合材料的屏蔽性能,并介绍了符合其应用的领域;Fugetsu B等^[12-14]研究了石墨烯纳米管的电子屏蔽机理,并实验验证了其屏蔽效能。Wu G H等^[15]利用数值计算方法及软件,对部分屏蔽材料的屏蔽效能进行了仿真模拟,对工程实际中磁屏蔽效能的估算有指导意义。

虽然相关铂电阻抗干扰的研究^[16-17]很多,但主要针对测控电路与软件滤波,对铂电阻的物理抗电磁干扰方法未做深入研究。现有对电磁屏蔽的研究^[18]多集中于新材料的研究与数值分析,对于本文涉及的高频电加热设备中铂电阻的电磁屏蔽问题研究未曾提及。本试验针对高频电加热设备中温度传感器遇到电磁干扰的问题,从理论分析入手,应用成熟的虚拟仿真技术,探讨不同材料、不同厚度的屏蔽效能,以寻找合适的屏蔽材料,并验证其屏蔽效果,以解决铂电阻温度探头的电磁干扰问题。

1 屏蔽效能与材料属性之间的关系

屏蔽效能(Shielding Effectiveness, SE)是评价屏蔽体对电磁辐射干扰的屏蔽能力,用 dB(分贝)表示^[19]。当电磁波入射到假设为无限大的平板屏蔽体时,会产生反射损耗(R_M)、吸收损耗(A)和再反射损耗(R_r)。根据传输线理论导出屏蔽效能 SE_H 经验公式^[20]:

$$SE_H = R_M + A + R_r \quad (1)$$

反射损耗可表示为:

$$R_M = 20 \lg \left\{ \frac{0.181}{r} \sqrt{\frac{\mu_r}{G_r f}} + 0.053 \times r \sqrt{\frac{G_r f}{\mu_r}} + 0.354 \right\} \quad (2)$$

吸收损耗可表示为:

$$A = 0.133 \times t \sqrt{f \mu_r G_r} \quad (3)$$

再反射损耗表示为:

$$R_r = 20 \lg \left\{ 1 - \left[\frac{Z_m - Z_w}{Z_m + Z_w} \right]^2 \times 10^{-0.1A} \times e^{-j0.227A} \right\} \quad (4)$$

式中:

SE_H ——屏蔽效能, dB;

R_M ——反射损耗, dB;

A——吸收损耗, dB;

R_r ——再反射损耗, dB;

f ——频率, Hz;

μ_r ——屏蔽体材料的相对磁导率;

G_r ——该屏蔽材料相对于铜的电导率;

r ——平板屏蔽体与源的距离, cm;

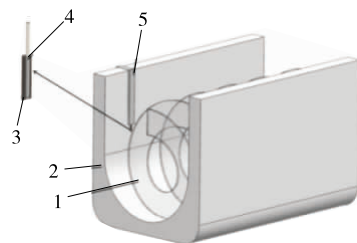
t ——平板屏蔽体的厚度, mm;

Z_m ——平板屏蔽体所采用金属导体的阻抗, Ω ;

Z_w ——波阻抗, Ω 。

再反射损耗始终为负数,计算总屏蔽效能时需要减去再反射损耗才能得到正确的屏蔽效能增益。一般当吸收损耗 A 大于 15 dB 时,再反射损耗可忽略不记。

采用的测温探头为圆柱形,包埋在如图 1 所示的圆柱管状屏蔽罩中,测温传感器的引线用特氟龙层隔热保护,并固



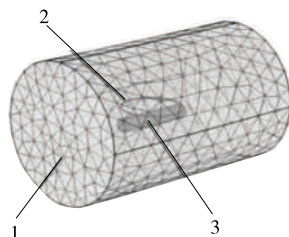
1. 无轴螺旋 2. 杀菌腔体 3. 屏蔽罩 4. 温度探头 5. 保持架

图 1 自制屏蔽装置示意及安装图

Figure 1 Self-made shielding device and installation diagram

定在不锈钢的保持架上,将带自制屏蔽罩的探头插入物料。

屏蔽罩的材料属性决定了该屏蔽罩的电磁屏蔽效果。由屏蔽效能经验公式可知,屏蔽罩的屏蔽效能由其相对磁导率、电导率、屏蔽体厚度共同决定。在 COMSOL 中进行屏蔽效能的仿真试验,仿真器采用电磁 AC 物理场模块,设置了边界条件和网格划分;观测对象为屏蔽罩内及其附近空气区域,因此该区域进行网格细化处理,其它区域随物理场设置自由网格划分。仿真模型如图 2 所示,其中发射线圈模型为单匝线圈,通过交变大电流作为交变磁场发射装置,线圈正下方为管状屏蔽罩。



1. 空气域 2. 发射线圈 3. 屏蔽罩

图 2 屏蔽罩试验模型及 COMSOL 网格划分

Figure 2 Experimental model of shielding cover & COMSOL mesh division

以相同材料的不同相对磁导率、电导率、厚度为变量,研究其对屏蔽效能的影响。通过 COMSOL 中的参数化扫描以及对仿真结果的后处理,分别得到了材料的相对磁导率、电导率以及厚度与屏蔽效能之间的关系。

由图 3(a)可知,交变电流频率在 10 kHz 下,相对磁导率在 1~1 000 时,屏蔽罩的屏蔽效能随着相对磁导率的增大而急剧上升;当相对磁导率大于 1 000 时,相对磁导率的增加对屏蔽效能提升不明显。屏蔽罩的电导率对屏蔽效能的影响见图 3(b)(设相对磁导率为 1,厚度为 1 mm),其屏蔽效能随着材料电导率的增加而增加,即屏蔽罩的电导率越高,涡流屏蔽效果越好。吸收损耗主要取决于屏蔽罩的厚度,其影响见图 3(c),可见屏蔽材料的厚度越大,屏蔽效果越好。为实现有效电磁屏蔽,屏蔽罩厚度一般 > 1 mm。

2 屏蔽材料的选择

选择了 304 不锈钢等 5 种材料,在 1~300 kHz 交变电流作用下进行屏蔽效能仿真实验。由图 4 可知,当交变电流频率 < 20 kHz 时,几种金属材料屏蔽罩屏蔽效能随着交变

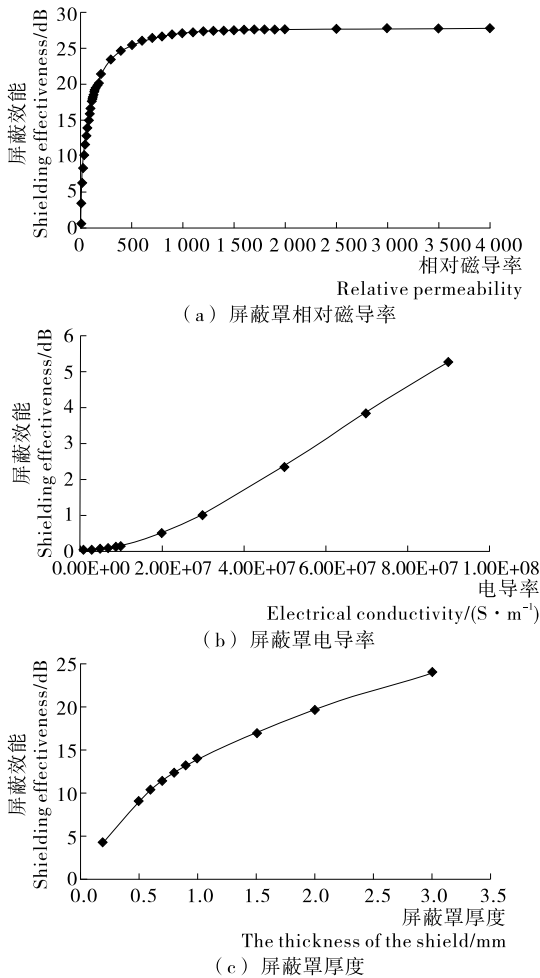


图 3 屏蔽罩在 10 kHz 下的屏蔽效能

Figure 3 Shielding effectiveness of shielding cover under 10 kHz

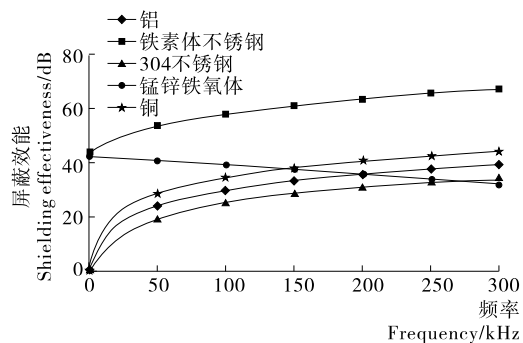


图 4 频率 1~300 kHz 交变电流下 5 种金属频率与屏蔽效能的关系

Figure 4 Relationship between four metal frequencies and shielding effectiveness under 1~300 kHz alternating current

电流频率的增加而变大。本设备的工作频率为 10~20 kHz,铁素体不锈钢和锰锌铁氧体在此区间屏蔽效果好于其他材料。但鉴于 10~20 kHz 低频电磁场下以磁屏蔽为主^[21],铁素体不锈钢在该频段会产生焦耳热,不利于准确测温,故选择锰锌铁氧体作为屏蔽材料。

由于测温探头及屏蔽罩为圆柱体,建立如图 5 所示柱坐标系,空心屏蔽罩垂直于磁场 H ,屏蔽罩内外径分别为 a 和 b ,屏蔽罩材料的相对磁导率为 μ_r 。

由于锰锌铁氧体电导率极低,因此屏蔽罩内的磁压 V_m 的表达式可用柱坐标系拉普拉斯方程解出:

$$\nabla^2 V_m = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_m}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_m}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_m}{\partial z^2} = 0, \quad (5)$$

$$\nabla^2 V_m = 0. \quad (6)$$

屏蔽罩及传感器垂直于磁场方向,因此屏蔽管的轴向(z 向)磁压分量为 0,式(5)和式(6)可简化为:

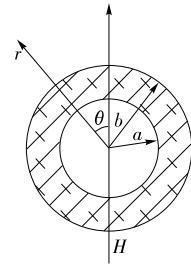


图 5 屏蔽罩空间参数示意图

Figure 5 The diagram of space parameters of shield

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_m}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 V_m}{\partial \theta^2} = 0. \quad (7)$$

此时的边界条件:

- ① 距离屏蔽罩较远处的磁场均匀;
- ② 在 $r=b$ 和 $r=a$ 界面处的磁压近似为常数;
- ③ 穿越屏蔽体内外壁的磁场在垂直于壁面的分量连续。

根据边界条件,可以得到磁屏蔽的屏蔽效能表达式^[22]:

$$SE = 20 \lg \left(\frac{H_0}{H_1} \right) = 20 \lg \left[\frac{(\mu_r + 1)(k - 1) + 2\mu_r(k + 1)}{4\mu_r k} \right], \quad (8)$$

式中:

SE ——屏蔽效能, dB;

$$k = b^2/a^2;$$

H_0, H_1 ——分别为屏蔽管外部和内部的磁场强度, T。

选取的铂电阻传感器直径为 4 mm,因此采用外径为 10 mm、内径为 4 mm 的锰锌铁氧体屏蔽管作为屏蔽装置。经计算 k 值为 25。由式(8)可知,当屏蔽材料的相对磁导率为 1 时,屏蔽效能 SE 为 0,即没有磁屏蔽效果。随着屏蔽罩相对磁导率的增加,其磁屏蔽效果越好。为了更直观地了解相对磁导率对磁屏蔽效能的影响,可由式(8)得到如图 6 所示相对磁导率与屏蔽效能的曲线图,当材料的相对磁导率在 0~100 时,屏蔽效能上升速度较快,当相对磁导率从 100 增加至 2 000 时,屏蔽效能的增速减缓。

3 屏蔽效果验证

为了验证锰锌铁氧体的屏蔽性能,选用初始相对磁导率为 1 196 的屏蔽罩,根据式(8)计算可知,其磁屏蔽效能为 49.17 dB。在 1~20 kHz 交变电流下进行验证,图 7 为验证实验示意图。由信号发生器发出交变信号,经放大器连接发

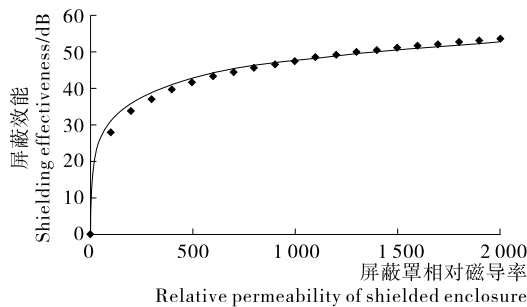


图6 锰锌铁氧体相对磁导率与磁屏蔽屏蔽效能的关系

Figure 6 The relationship between the relative permeability and the shielding effectiveness of magnetic shielding

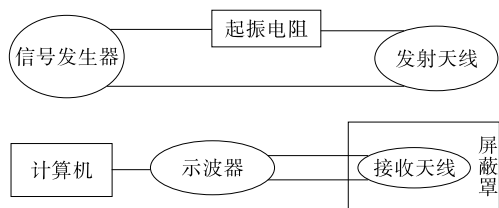


图7 屏蔽效能验证实验

Figure 7 Electromagnetic shielding effectiveness test

射天线产生 1~20 kHz 交变电磁场,接收线圈连接示波器与电脑。

以无交变电流干扰为基准,对比了在交变电流作用下有无屏蔽罩对测温传感器电压的影响,试验时间为 1 000 ms。表 1 的统计结果显示,无电磁干扰和加屏蔽罩的条件下,电压变化较小,而未加屏蔽罩的传感器电压变化较大,从而证明锰锌铁氧体可滤除绝大部分低频电磁干扰。

表1 传感器在不同磁场条件下电压变化

Table 1 Voltage change across the sensor under different magnetic field conditions

| 试验条件 | 传感器电压变化累加值/V |
|------------|--------------|
| 无干扰电磁场 | 0.034 |
| 交变电磁场 | 33.208 |
| 交变电磁场+加屏蔽罩 | 0.329 |

将加装锰锌铁氧体屏蔽罩的测温传感器安装于杀菌设备进行连续升温试验,其实际测温曲线见图 8。结果表明,未加屏蔽罩的测温探头升温曲线有明显锯齿波且温飘严重,而加装屏蔽罩后所测升温曲线平滑且与实际温度吻合。

4 结论

本试验就高频电加热杀菌设备中测温的工程实际问题,从电磁屏蔽原理出发,分析影响材料屏蔽效能的因素,结合 COMSOL 多物理场仿真模拟,筛选了 5 种材料,最终确定锰锌铁氧体为铂电阻温度探头合适的屏蔽材料,并确定圆柱形的屏蔽罩厚度为 3 mm,通过实际实验验证这种屏蔽罩满足要求。本研究仅针对特定设备中静态电磁场的电磁屏蔽,对

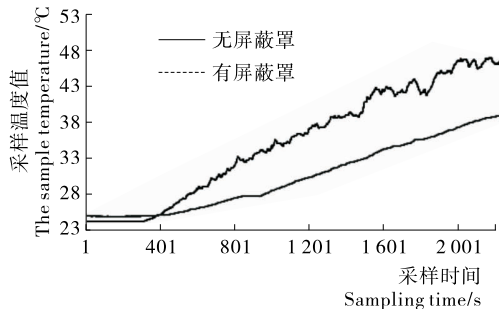


图8 温度传感器实际测量温度曲线

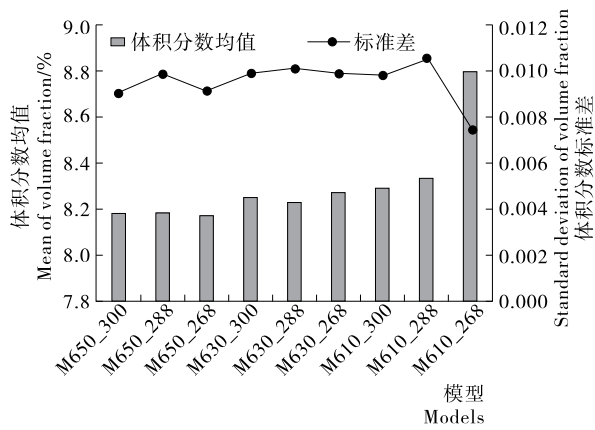
Figure 8 Temperature sensor actual measured temperature curve

于动态或旋转电磁场的屏蔽机理及措施未做进一步研究,这也是该领域继续研究的方向。

参考文献

- [1] 蔡健荣, 杨军义, 庄晓波, 等. 一种基于趋肤效应的香辛料热杀菌技术装备[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(5): 63-67.
- [2] 杨武, 王小华, 荣命哲, 等. 基于红外测温技术的高压电力设备温度在线监测传感器的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 113-117.
- [3] ZHANG Xun, JIN Dong-ming, LIU Li-tian. Review of semiconductor temperature sensors development[J]. Transducer & Microsystems Technologies, 2006, 25(3): 1-3.
- [4] 刘华. 铂电阻在线检测方法的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005: 1.
- [5] 张传民, 甄国涌, 齐蕾, 等. 铂电阻线性化和抗干扰测温模块的研究[J]. 自动化与仪表, 2014, 29(10): 72-76.
- [6] 丁世敬, 赵跃智, 葛德彪. 电磁屏蔽材料研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(4): 30-33.
- [7] GUAN Hong-tao, LIU Shun-hua, DUAN Yu-ping, et al. Cement based electromagnetic shielding and absorbing building materials[J]. Cement & Concrete Composites, 2006, 28(5): 468-474.
- [8] WILSON P F, MA M T. Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials. I. Far-field source simulation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1988, 30(3): 239-250.
- [9] DU Ya-ping, XIA Neng-hong, CHEN Ming-li. Joint Modeling for Conductive Plates in Low-Frequency Magnetic Shielding[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2013, 49(5): 2 005-2 008.
- [10] LEE P C, KIM B R, SUN K J, et al. Electromagnetic interference shielding effectiveness of polypropylene/conducting fiber composites [J]. Aip Conference Proceedings, 2016, 1 713(1): 922-925.
- [11] YANG Shu-ying, LOZANO K, LOMELI A, et al. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon nanofiber/LCP composites[J]. Composites Part A Applied Science & Manufacturing, 2005, 36(5): 691-697.
- [12] FUGETSU B, SANO E, SUNADA M, et al. Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding efficiency of carbon nanotube/cellulose composite paper[J]. Carbon, 2008, 46(9): 1 256-1 258.

(下转第 79 页)

图 11 L₂ 体积分数均值及标准差Figure 11 Volume fraction mean and standard deviation along L₂

268 mm 时均有更好的搅拌效果;在 Y 方向,固体颗粒的体积分数分布对于搅拌桨叶片的间距 d 并没有很明显的关联性,即相比于 Z 方向,Y 方向的搅拌作用对叶片间距的改变并不是很敏感。针对本文 9 个不同的搅拌机模型,搅拌臂 $l=630$ mm,搅拌叶片间距 $d=268$ mm 时搅拌混合效果最好。

4 结论

(1) 搅拌槽的入料口处空间较大,且搅拌壁面之间有着大角度的过度连接,搅拌浆带动的射流在此处会有明显的减速,形成了若干低速度场,导致此处的搅拌效果较差。

(2) 搅拌槽内的 Z 方向和 Y 方向的固体颗粒体积分数表明,在螺旋叶片的作用下沿着 Z 方向类似“W”形的混合效果,即中间和两端的分数较高;在离心力以及密度的影响下,沿着 Y 方向类似“C”形分布,即搅拌槽的上下区域体积分数比中间区域高。

(3) 搅拌槽内固体颗粒相的体积分数表明搅拌臂长度的减小有利于搅拌混合效果的加强,而搅拌叶片的安装间距并没有类似的对应线性关系,叶片间距 $d=288$ mm 并不是最合适的选择,给出了最佳间距值或选择方向。

本试验讨论了不同参数的搅拌浆对固-液两相流搅拌效果的影响,通过固体颗粒体积分数的对比给出了搅拌浆进一步优化的可行性以及优化方向,但是由于搅拌设备尺度较

大,离散模型的单元较多,只能选取有代表性的几个参数进行比较,选择何种搅拌浆结构参数组合才能使搅拌效果达到最佳还有待于进一步研究。

参考文献

- [1] OCHIENG A, KIRIAMITIK. Experimental measurement and computational fluid dynamics simulation of mixing in a stirred tank; a review[J]. South African Journal of Science, 2009, 105 (11/12): 421-426.
- [2] 宋永鑫,王卫国. 2011—2013 年饲料粉碎技术研究新进展[J]. 饲料工业, 2014(5): 7-11.
- [3] MICALE G, MONTANTE G, GRISAFI F, et al. CFD Simulation of Particle Distribution in Stirred Vessels[J]. Chemical Engineering Research & Design, 2000, 78(3): 435-444.
- [4] MONTANTE G, MAGELLI F. Modelling of solids distribution in stirred tanks: analysis of simulation strategies and comparison with experimental data [J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2005, 19(3): 253-262.
- [5] KASAT G R, KHOPKAR A R, RANADE V V, et al. CFD simulation of liquid-phase mixing in solid-liquid stirred reactor [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(15): 3 877-3 885.
- [6] 张少坤,尹侠. 双层桨搅拌槽内流场的数值模拟[J]. 食品与机械, 2011, 27(1): 71-73.
- [7] 袁场, 曾程, 李璐, 等. 高剪切混合罐内物料流场的可视化与结构改进[J]. 食品与机械, 2009, 25(3): 69-73.
- [8] 严宏志, 李新明, 吴波, 等. 卧式双轴搅拌槽的液固两相流数值分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(2): 532-539.
- [9] ZHAO Xiang, GLENN C, XIAO Zhi-gang, et al. CFD development for macro particle simulations[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2014, 28(5): 232-249.
- [10] 赵小英, 杜飞龙, 向贤礼. 基于 Fluent 的搅拌槽内多相流数值仿真及研究[J]. 制造业自动化, 2015(13): 109-112.
- [11] 杜飞龙, 李少波, 何玲. 卧式组合搅拌槽内固液混合物多相流模拟分析[J]. 食品与机械, 2013, 29(5): 111-114.
- [12] 王春娥, 刘丽, 韩婵娟. 面粉粘度特性与面条品质的相关研究 [J]. 现代面粉工业, 2012, 26(2): 36-39.
- [13] 李锦雄. 面粉品质评定及粘度值的简易测定方法[J]. 广东饲料, 2001(4): 38-39.
- [14] 黎文航, 朱志愿, 芦笙, 等. 基于 LabVIEW 的高精度铂电阻测温系统开发[J]. 微计算机信息, 2009, 25(31): 50-51.
- [15] MAITI S, SHRIVASTAVA N K, SUIN S, et al. Polystyrene/MWCNT/Graphite Nanoplate Nanocomposites: Efficient Electromagnetic Interference Shielding Material through Graphite Nanoplate-MWCNT-Graphite Nanoplate Networking [J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(11): 4 712-4 724.
- [16] ZHAO Yu-tong, WU Bian, ZHANG Yu, et al. Transparent electromagnetic shielding enclosure with CVD graphene[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(10): 103 507.
- [17] WANG Xiao-wei, REN Shi-yan, YANG Hua-yun, et al. FEM Analysis of Magnetic Shielding Effectiveness[J]. Acta Metrologica Sinica, 2006, 27(4): 376-379.
- [18] 黎文航, 朱志愿, 芦笙, 等. 基于 LabVIEW 的高精度铂电阻测温系统开发[J]. 微计算机信息, 2009, 25(31): 50-51.
- [19] 朱杰, 徐香菊, 钱爱颖, 等. 基于铂电阻的高精度温度采集系统校准研究[J]. 化工自动化及仪表, 2012, 39(4): 525-527.
- [20] 王婵媛, 王希晰, 曹茂盛. 轻质石墨烯基电磁屏蔽材料的研究进展[J]. 材料工程, 2016, 44(10): 109-118.
- [21] 切洛齐. 电磁屏蔽原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 65-68.
- [22] WESTON D. Electromagnetic Compatibility: Principles and Applications[M]. 2th ed. Boca Raton: CRC Press, 2001: 61-62.
- [23] 李安金, 赵仁涛. 低频磁场屏蔽问题简述[J]. 科技信息, 2013 (3): 211-212.
- [24] 杨士元. 电磁屏蔽理论与实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 134-135.

(上接第 74 页)

- [13] MAITI S, SHRIVASTAVA N K, SUIN S, et al. Polystyrene/MWCNT/Graphite Nanoplate Nanocomposites: Efficient Electromagnetic Interference Shielding Material through Graphite Nanoplate-MWCNT-Graphite Nanoplate Networking [J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2013, 5(11): 4 712-4 724.
- [14] ZHAO Yu-tong, WU Bian, ZHANG Yu, et al. Transparent electromagnetic shielding enclosure with CVD graphene[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(10): 103 507.
- [15] WANG Xiao-wei, REN Shi-yan, YANG Hua-yun, et al. FEM Analysis of Magnetic Shielding Effectiveness[J]. Acta Metrologica Sinica, 2006, 27(4): 376-379.
- [16] 黎文航, 朱志愿, 芦笙, 等. 基于 LabVIEW 的高精度铂电阻测