

箱式格栅除铁器有限元分析及在奶粉生产中的应用

Finite element analysis of box grid magnetic iron-separator and its application in milk powder production

程健博^{1,2} 陈宝库² 李辉³ 郭林³ 王艳¹ 孙立瑞¹

CHENG Jian-bo^{1,2} CHEN Bao-ku² LI Hui³ GUO Lin³ WANG Yan¹ SUN Li-rui¹

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院食品科学与工程重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150076;

2. 黑龙江飞鹤乳业有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161005; 3. 德磁机电科技[上海]有限公司, 上海 200120)

(1. Key Laboratory for Food Science and Engineering, College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin, Heilongjiang 150076, China; 2. Heilongjiang Feihe Dairy Co., Ltd., Qiqihar, Heilongjiang 161005, China; 3. DeuMagnet Technology [Shanghai] Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

摘要:目的:将箱式格栅除铁器应用在奶粉生产中。方法:在完全模拟奶粉工厂真实生产条件下,基于有限元仿真分析,探究除铁器的有效工作原理,进而通过单因素试验及矩阵分析,探究物料的下落高度、金属异物种类、场强强度、磁棒净距对箱式格栅除铁器有效拦截率的影响及优选设计方案。结果:假设最低可接受标准为对铸铁、304 不锈钢、316 不锈钢有效拦截率 $\geq 80\%$,则临界设计条件为:①当磁棒强磁场场强为 1.0 T 时,下落高度 ≤ 100 mm,磁棒层数 ≥ 6 层,净距 25 mm。②当磁棒强磁场场强为 1.4 T 时,如物料下落高度 ≤ 100 mm,则磁棒层数 ≥ 4 层,净距 25 mm;如 $100 \text{ m} < \text{物料下落高度} \leq 300$ mm,则磁棒层数 ≥ 6 层,净距 25 mm。结论:该研究成果可应用于奶粉及其他粉末状食品物料,如蛋白类原料、粉末油脂、淀粉、食品添加剂等。

关键词:箱式格栅除铁器;奶粉;有限元分析;设计方案;拦截率

Abstract: Objective: The optimal design scheme of box grid magnetic iron-separator in milk powder production process was explored. **Methods:** In this study, the working principle of the box grid magnetic iron-separator was explored by using the finite

element simulation analysis method under real production conditions in a fully simulated milk powder plant. Through the single factor test, the effects of material drop height, the type of metal foreign matter, the field strength, and the net distance of the magnetic bar on the effective interception rate of the box grid magnetic iron-separator were explored, and the design solution was optimized by using matrix analysis. **Results:** Assuming that the minimum acceptable standard is an effective interception rate greater than 80% for cast iron, 304 stainless steel and 316 stainless steel, the critical design conditions are as follows: ① When the magnetic field strength of the magnetic bar is 1.0 T, the drop height should be less than 100 mm, the number of layers of the magnetic bar should be greater than or equal to 6, and the clearance of the bar magnet is 25 mm. ② When the magnetic field strength of the magnetic bar is 1.4 T, if the falling height of the material is less than 100 mm, the number of layers of the magnetic bar should be greater than or equal to 4, and the clearance of the bar magnet is 25 mm; If the falling height of the material is between 100 and 300 mm, then the number of magnetic rod layers should be greater than 6, and the clearance of the bar magnet is 25 mm. **Conclusion:** The research results have industrial application value for milk powder and other powdered food materials, such as protein-based raw materials, powdered fats and oils, starch, food additives, etc.

Keywords: box grid magnetic iron-separator; milk powder; finite element analysis; design scheme; interception rate

基金项目:黑龙江省自然科学基金(编号:LH2021C051);中央支持地方高校人才培养支持计划(高水平人才)项目(编号:304017)

作者简介:程健博,男,黑龙江飞鹤乳业有限公司中级工程师,硕士。

通信作者:孙立瑞(1993—),女,哈尔滨商业大学讲师,博士。

E-mail: fere_sun@163.com

收稿日期:2022-05-11 **改回日期:**2022-09-08

保证食品安全,保障公众身体健康和生命安全是所有食品行业从业人员需要始终秉承的原则。《中华人民

《中华人民共和国食品安全法》第十三条第四款明确规定禁止生产经营混有异物的食品。异物作为危害分析的关键控制点管理体系(HACCP)中典型的物理性危害^[1],尤其金属类异物可能严重威胁生命安全^[2],在食品生产加工中必须进行有效控制。但据公开资料显示,中国质量万里行消费投诉平台每年都会接到近百名消费者投诉奶粉中发现异物^[3],多家奶粉品牌也频频疑似不明金属类异物投诉事件^[4-7]。《食品生产通用卫生规范》中规定应采取设置筛网、捕集器、磁铁、金属检查器等有效措施降低金属或其他异物污染食品的风险,《婴幼儿配方乳粉生产许可审查细则(2013 版)》中明确规定婴配奶粉企业应对不小于 2 mm 球径金属进行有效控制。

除铁器作为一种永磁设备,可将非磁性物料中的铁磁性金属类异物清除^[8]。近年来箱式格栅除铁器在制糖^[9]、粮食收储^[10]、固体饮料等食品深加工领域,尤其是在婴儿配方奶粉行业得到广泛应用,但使用过程中对金属异物的有效拦截率受各类因素影响,若无合理设计方案,很难达到预期拦截效果。目前关于除铁器的科学研究主要集中在电子元件^[11]、化工^[12]、建筑^[13]、矿石^[14]等工业领域,在奶粉生产中的实际应用研究鲜少有报道。

研究拟在完全模拟奶粉工厂真实生产条件下,基于有限元分析(finite element analysis, FEA)对除铁器的磁场环境进行模拟,进而对其几何和载荷工况进行模拟^[15]。同时,以生产线常见各类金属体作为目标测试物,通过单因素试验,探究不同物料下落高度、金属种类、场强强度、磁棒净距对除铁器有效拦截率的影响,以期对箱式格栅除铁器在奶粉行业中的实际选型、安装及制定有效的金属异物控制方案提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

配方奶粉:星飞帆 4 段,黑龙江飞鹤乳业有限公司;

铸铁、304 不锈钢、316 不锈钢:德磁机电科技(上海)有限公司;

二氧化硅干燥剂:分析纯,河南诺恒生物科技有限公司;

箱式格栅除铁器:GHS 型,德磁机电科技(上海)有限公司;

高斯计:6010 型,美国 SYPRIS 公司;

工业显微镜:ZQ-616 型,上海致旗实业有限公司;

精密天平:ME 型,梅特勒托利多科技(中国)有限公司;

恒温烘箱:HPG-280B 型,哈尔滨东联电子技术开发有限公司;

玻璃干燥器:350 型,成都典锐实验仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 除铁器单体有限元分析 为更直观了解除铁器单

体的磁通量及磁感线分布,基于磁场基本方程及已有关于永磁体的有限元分析模型^[16-18],利用 ANSYS 软件对除铁器中单根磁棒的最小完整单体(如图 1 所示)进行有限元仿真分析。

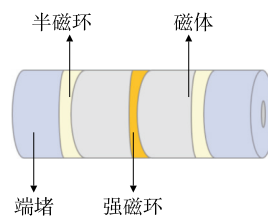


图 1 除铁器最小完整单体

Figure 1 Minimum complete monomer of the magnetic iron-separator

1.2.2 金属模拟测试物制备 对除铁器吸附的金属异物进行长时间收集,发现除铁器吸附的异物主要为铸铁(椭球状)、304 奥氏体不锈钢(扁片状)、316 奥氏体不锈钢(扁片状)三类。椭球状铸铁多为管道内壁焊接处脱落导致,扁片状奥氏体不锈钢多为螺旋输送机与管壁摩擦、管道焊接脱落导致。为最大限度模拟在真实生产条件下控制干扰因素,人为制作金属碎片,然后利用工业显微镜挑选出规格统一的金属模拟测试物(如图 2 所示)。根据企业正常生产过程中的异物收集数据及消费者相关投诉数据选取真实生产条件下占比最大的($\geq 87\%$)异物尺寸确定金属模拟测试物的大小。

1.2.3 除铁器测试平台搭建 搭建 6 层可调节箱式格栅除铁器(如图 3 所示),除铁器上端连接不同长度的物料管线,下端连接物料收集袋,磁棒直径 25 mm。试验时,将混有金属模拟测试物的奶粉物料由物料管线开口处倒入,收集袋对通过磁棒的物料进行收集。

1.2.4 搭桥试验方法 将奶粉倒入一个内壁光滑的容器中,轻轻向下震荡,将垫片置于容器上方,然后连同容器

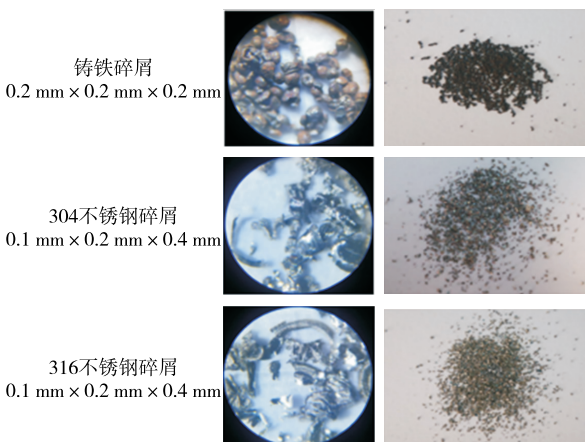


图 2 金属模拟测试物

Figure 2 Metal simulation test object



图3 箱式格栅除铁器

Figure 3 Box grid magnetic iron-separator

一起倒扣至磁棒表面(如图4所示),快速抽出垫片,观察奶粉状态。如奶粉整体停留在两根磁棒之间,则出现搭桥现象,表示生产过程中存在潜在堵料风险;如奶粉瞬间垮塌,从磁棒之间快速通过,则不存在堵料风险。

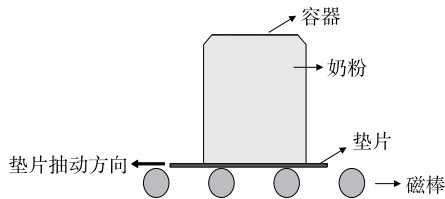


图4 搭桥试验示意图

Figure 4 Schematic diagram of bridging test

1.2.5 拦截率测定 采用重量法。首先将金属模拟测试物冲洗干净后置于 60 °C 烘箱内烘干,然后置于放有二氧化硅干燥剂的玻璃干燥器内备用。投料试验结束后,用软毛刷将磁棒表面的奶粉去除,用擦镜纸轻轻擦下金属模拟测试物并收集,冲洗干净后置于 60 °C 烘箱内烘干。投料试验收集到的金属模拟测试物重量与测试初始添加量的比值即为拦截率。

1.2.6 单因素试验设计

(1) 下落高度对拦截率的影响:分别将 0.02 kg 铸铁金属模拟测试物与 9.98 kg 奶粉充分混合,分别安装 100, 300, 500, 700 mm 高度的物料管线,统一使用 6 层磁棒,磁棒净距(净距 = 中心距 - 磁棒直径,如图 5 所示) 30 mm,强磁环场强 1.4 T,依次将混有金属模拟测试物的奶粉物料由物料管线开口处匀速倒入,记录每层除铁器拦截率。

(2) 金属种类对拦截率的影响:分别将 0.02 kg 铸铁、304 不锈钢、316 不锈钢金属模拟测试物与 9.98 kg 奶粉充分混合,安装 500 mm 高度的物料管线,统一使用 6 层

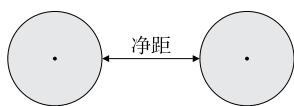


图5 磁棒净距示意图

Figure 5 Schematic diagram of magnetic bar clear distance

磁棒,磁棒净距 30 mm,磁棒强磁环场强 1.4 T,依次将混有金属模拟测试物的奶粉物料由物料管线开口处匀速倒入,记录每层除铁器拦截率。

(3) 场强对拦截率的影响:分别将 0.02 kg 铸铁金属模拟测试物与 9.98 kg 奶粉充分混合,安装 500 mm 高度的物料管线,统一使用 6 层磁棒,磁棒净距 30 mm,分别换装强磁环场强 0.8, 1.0, 1.2, 1.4 T 磁棒,依次将混有金属模拟测试物的奶粉物料由物料管线开口处匀速倒入,记录每层除铁器拦截率。

(4) 磁棒净距对拦截率的影响:分别将 0.02 kg 铸铁金属模拟测试物与 9.98 kg 奶粉充分混合,安装 500 mm 高度的物料管线,统一使用 6 层磁棒,强磁环场强 1.4 T 磁棒,分别换装磁棒净距 20, 25, 30, 35 mm,依次将混有金属模拟测试物的奶粉物料由物料管线开口处匀速倒入,记录每层除铁器拦截率,每组同时进行搭桥试验。

2 结果与分析

2.1 除铁器单体有限元分析结果

除铁器是由数根规律穿插排列的磁棒组成,而每根磁棒最小完整单体由端堵、半磁环、磁体、强磁环构成,且磁体采用同极相对排列方式,其中磁体与强磁环可根据实际设计需求适当增加数量。在 ANSYS 的 Workbench 模块中,选用几何结构及 Fluent(带 Fluent 网格剖分)组件系统^[19-21],设置磁棒规格为磁体长度 26 mm、磁环厚 2 mm、端堵厚 2 mm、直径 25 mm,以强磁环中心为坐标原点进行模拟分析。最小完整单体有限元分析模型见图 6,模型整体网格划分见图 7。

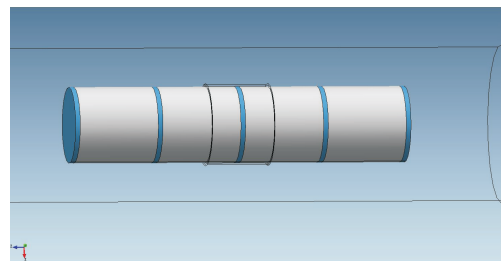


图6 有限元分析模型

Figure 6 Finite element analysis model

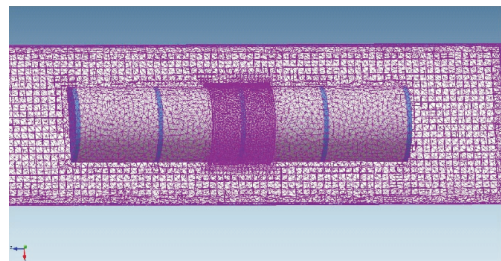


图7 模型整体网格划分

Figure 7 Overall grid division diagram of the model

由图 8 可知,迭代数值设置为 300,施加载荷后,强磁环处磁通量明显增高(如图 8 所示),而与磁体平行的磁感线位置,磁通量非常弱(如图 9 所示)。饱和吸附试验也验证了载荷下强磁环处磁通量增加的结果(如图 10 所示),说明在奶粉实际生产加工过程中,磁棒的强磁环位置为最有效吸附位置。单因素试验中选取强磁环出场强进行各因素影响分析。

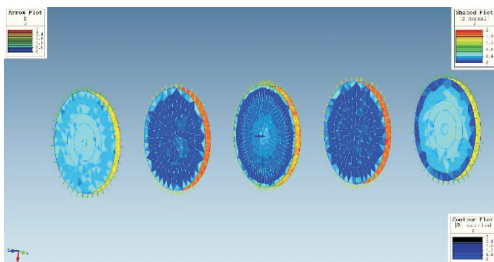


图 8 磁棒内部磁通量分布图

Figure 8 Magnetic flux distribution inside the magnetic rod

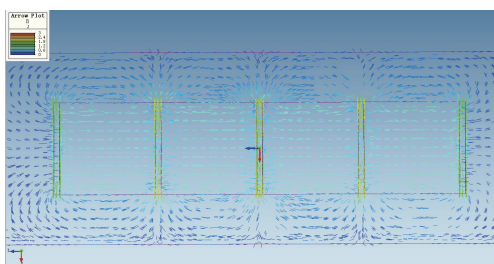


图 9 磁通量分布矢量图

Figure 9 Magnetic flux distribution vector diagram



图 10 单侧饱和吸附图

Figure 10 Unilateral saturated adsorption diagram

2.2 单因素试验分析

2.2.1 下落高度对拦截率的影响 由图 11 可知,随着物料下落高度的增加,拦截率逐渐降低,100 mm 与 300 mm 下落高度下的拦截率无明显差异,但下落高度为 500~700 mm 时,拦截率下降,这是由于奶粉和金属异物在重力的作用下不断加速,动能增加,当某些颗粒下落路径处于磁棒间的磁场相对薄弱位置时,不足以被磁场吸力捕获,出现了吸附逃逸现象,与 Karban 等^[22]的结论一致。由于格栅除铁器每层磁棒之间为交叉式排列,即上一层

磁场最薄弱位置正好是下一层磁场最强位置,同时穿过磁场时会受到切向吸力作用,动能衰减,上一层逃逸的颗粒存在一定概率被下一层磁棒拦截。当下落高度在 500 mm 时,第 1~2 层拦截率为 97.5%,第 3~4 层拦截率为 1.0%,第 5~6 层拦截率为 0.5%。当下落高度达到 700 mm 时,由于颗粒动能增大,逃逸增加,拦截率明显降低。试验表明,随着物料下落高度的增加,拦截率逐渐降低,下落高度 ≥ 700 mm 时,拦截率降低尤为明显。综上,格栅除铁器有较好的金属类异物拦截效果。

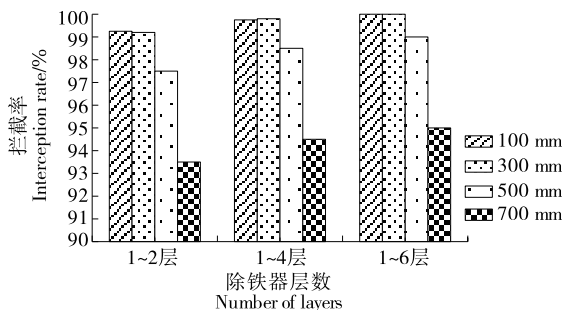


图 11 下落高度对拦截率的影响

Figure 11 The effects of drop height on interception rate

2.2.2 金属种类对拦截率的影响 由图 12 可知,金属种类对于 1~2 层拦截率影响较大,铸铁颗粒几乎可以被完全捕获,而 304、316 不锈钢颗粒拦截率仅为 57.0%,39.7%,但随着除铁器拦截层数的增加,拦截率差异明显缩小,层数达到 6 时 304、316 不锈钢颗粒拦截率分别提升至 85.5%,76.9%。试验表明,不同金属种类对于拦截率的影响非常显著,304、316 不锈钢颗粒相比于铸铁颗粒更难被吸附,增加除铁器拦截层数是有效提升拦截率的方法。

2.2.3 场强对拦截率的影响 由图 13 可知,随着磁棒强磁环场强增加,拦截率增加,其中 1~2 层时均达到比较理想的水平,但 0.8 T 场强下,1~6 层拦截率仅为 92.7%,这主要由于磁场对金属颗粒的切向吸力较小,格栅除铁器虽然采用交叉式排列,但速度损失较小,奶粉颗粒对于金属颗粒的夹带作用凸显,逃逸率增加,与 Ciosk^[23]的

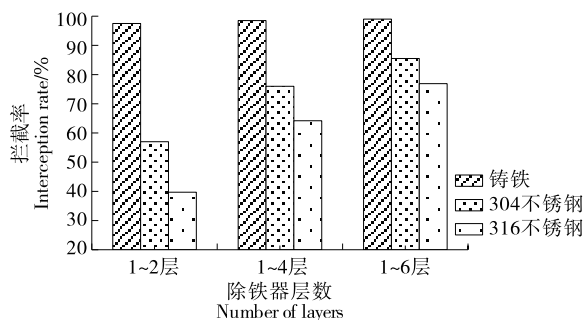


图 12 金属种类对拦截率的影响

Figure 12 The effects of metal type on interception rate

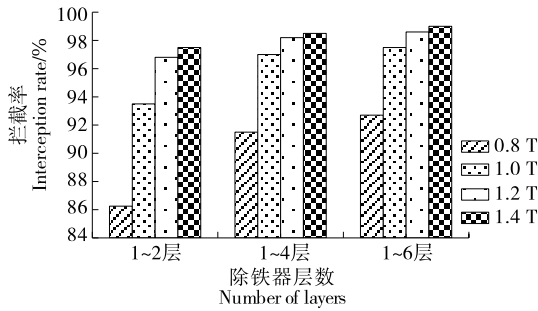


图 13 场强对拦截率的影响

Figure 13 The effects of magnetic field strength on interception rate

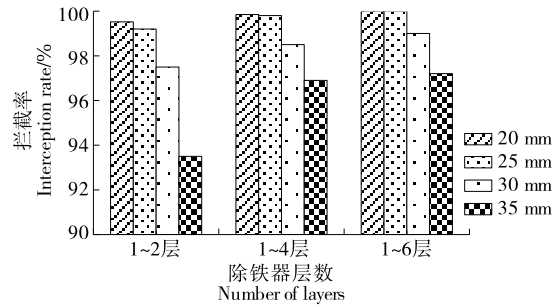


图 14 磁棒净距对拦截率的影响

Figure 14 The effects of clearance of the bar magnet on interception rate

结论一致。试验表明,场强对于拦截率的影响显著,当场强增强时,拦截率增加。

2.2.4 磁棒净距对拦截率的影响 如图 14 所示,随着磁棒净距增加,拦截率呈下降趋势,其中净距 20 mm 与净距 25 mm 的拦截率无明显差异,此时增加拦截层数改善意义不大,这主要由于磁棒间净距增加,磁场薄弱区域增大,磁场对金属颗粒的切向吸附力减小,导致拦截率降低。

但净距过小可能会导致搭桥堵塞现象^[24]发生。通过对每组进行搭桥试验发现,当净距为 20 mm 时,奶粉出现搭桥现象(如图 15 所示)。综上,虽然随着磁棒净距减小,拦截率明显增加,但过小时会产生搭桥堵料风险。当出现搭桥现象时,需要在合理范围内适当放大磁棒净距以保证物料良好的通过性。

2.3 设计方案综合分析

在单因素试验的基础上,对不同设计方案进行综合



图 15 奶粉搭桥图

Figure 15 Milk powder bridge diagram

矩阵分析^[25]。基于目视化可接受水平及历史消费者反馈数据,设奶粉质量控制的最低标准为铸铁、304 不锈钢、316 不锈钢有效拦截率 $\geq 80\%$,净距 25 mm(避免搭桥堵料),结合单因素试验结果选择最低可接受强磁场强度 1.0 T 及设备合理制造上限 1.4 T 进行矩阵分析(如表 1 所示)。临界条件为当磁棒强磁场强度为 1.0 T 时,物料下落高度 ≤ 100 mm,磁棒层数 ≥ 6 层。当磁棒强磁场环

表 1 设计方案矩阵分析表[†]

Table 1 The matrix analysis table of design reference

模拟测试物	下落高度/mm	拦截率/%					
		1.0 T			1.4 T		
		1~2层	1~4层	1~6层	1~2层	1~4层	1~6层
铸铁碎屑	100	98.5±0.25	99.3±0.24	99.5±0.25	99.3±0.22	99.8±0.14	100.0±0.00
	300	94.0±0.17	97.5±0.21	98.0±0.26	99.2±0.13	99.8±0.19	100.0±0.00
	500	93.5±0.23	97.0±0.39	97.5±0.42	97.5±0.19	98.5±0.13	99.0±0.19
	700	93.0±0.34	97.0±0.31	97.5±0.46	93.5±0.11	94.5±0.17	95.0±0.19
304 不锈钢碎屑	100	59.9±0.28	82.5±0.24	91.4±0.31	72.5±0.09	85.0±0.25	89.6±0.27
	300	51.0±0.29	77.0±0.30	89.0±0.34	68.0±0.32	88.9±0.41	96.8±0.47
	500	44.0±0.34	75.0±0.42	86.5±0.56	57.0±0.33	76.0±0.49	85.5±0.52
	700	42.9±0.41	66.7±0.47	78.4±0.51	43.2±0.26	68.6±0.39	82.2±0.46
316 不锈钢碎屑	100	44.0±0.37	68.5±0.39	80.5±0.43	56.5±0.29	80.1±0.37	81.9±0.41
	300	40.0±0.55	65.1±0.61	78.1±0.66	43.0±0.34	71.0±0.51	80.2±0.48
	500	37.5±0.64	62.6±0.68	75.1±0.64	39.7±0.41	64.2±0.49	76.9±0.59
	700	36.2±0.81	61.4±0.86	74.1±0.62	33.5±0.54	63.0±0.68	76.0±0.71

† 铸铁碎屑 0.2 mm×0.2 mm×0.2 mm;304 不锈钢碎屑 0.1 mm×0.2 mm×0.4 mm;316 不锈钢碎屑 0.1 mm×0.2 mm×0.4 mm。

强 1.4 T 时,如下落高度 ≤ 100 mm,则磁棒层数 ≥ 4 层;如 100 m<物料下落高度 ≤ 300 mm,则磁棒层数 ≥ 6 层。

3 结论

基于有限元仿真分析,从理论上证明了所设计的除铁器工作原理的有效性,在完全模拟奶粉工厂真实生产条件下,通过单因素试验及矩阵分析,结果表明:假设最低可接受标准为对铸铁、304 不锈钢、316 不锈钢有效拦截率 $\geq 80\%$,则临界设计条件为:① 当磁棒强磁场强为 1.0 T 时,下落高度 ≤ 100 mm,磁棒层数 ≥ 6 层,净距 25 mm。② 当磁棒强磁场强为 1.4 T 时,如物料下落高度 ≤ 100 mm,则磁棒层数 ≥ 4 层,净距 25 mm;如 100 m<物料下落高度 ≤ 300 mm,则磁棒层数 ≥ 6 层,净距 25 mm。

该研究成果所输出的试验数据,对箱式格栅除铁器在奶粉行业中的实际选型、安装及制定有效的金属异物控制方案提供了依据,同时对其他粉末状食品物料,例如蛋白类原料、粉末油脂、淀粉、食品添加剂等,均具有工业应用价值。

后期可结合马尔文激光粒度仪、DSC 差热扫描仪等设备继续探索不同粉体形状、粒径、成分及玻璃转化状态等对除铁器拦截效果。

参考文献

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. 危害分析与关键控制点 (HACCP)体系乳制品生产企业要求: GB/T 27342—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 2.
General Administration of Quality Supervision. Hazard analysis and critical control point (HACCP) system requirements for dairy producers: GB/T 27342—2009[S]. Beijing: China Standard Press, 2009: 2.
- [2] 周意和. 食品生产过程中金属异物检测系统设计[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2014: 22-25.
ZHOU Y H. Design of metal detector system applied on food production[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2014: 22-25.
- [3] 李颖. 百名消费者投诉奶粉中现黑色颗粒异物[J]. 中国质量万里行, 2018(9): 76-77.
LI Y. Hundreds of consumers complained about black particles in milk powder[J]. China Quality Miles, 2018(9): 76-77.
- [4] 陈妮希. 雅培屡屡被曝奶粉中疑似异物市场销售仍叫好[J]. 食品界, 2016(1): 36-38.
CHEN N X. Abbott has been repeatedly exposed to the market sales of suspected foreign bodies in milk powder, but it is still applauded[J]. Food Industry, 2016(1): 36-38.
- [5] 宿希强. 美赞臣奶粉遭密集投诉疑存重大隐患[J]. 中国质量万里行, 2013(8): 42.
SU X Q. Intensive complaints about Mead Johnson's milk powder are suspected of having major hidden dangers[J]. China Quality Miles, 2013(8): 42.
- [6] 中国质量万里行投诉部. 奶粉投诉上升涉多品牌[J]. 中国质量万里行, 2013(5): 38-39.
China Quality Miles Complaint Department. Rising milk powder complaints involve multiple brands[J]. China Quality Miles, 2013(5): 38-39.
- [7] 中国质量万里行投诉部. 进口奶粉“美素佳儿”多地现不明问题[J]. 中国质量万里行, 2013(3): 36-37.
China Quality Miles Complaint Department. The imported milk powder "MeisuJiaer" has unknown problems in many places[J]. China Quality Miles, 2013(3): 36-37.
- [8] 李佳. 除铁器的分类、应用情况以及发展方向[J]. 陶瓷, 2010(11): 40-41.
LI J. Classification, application and development direction of ironremovers[J]. Ceramics, 2010(11): 40-41.
- [9] 玉华焱, 谢远忠. 自卸式除铁器在糖厂的应用和探讨[J]. 广西糖业, 2021(4): 31-36.
YU H L, XIE Y Z. Application and discussion of self-unloading iron remover in sugar factory[J]. Guangxi Sugar Industry, 2021(4): 31-36.
- [10] 罗斌, 吴平, 黄庭峰, 等. 除铁器在散粮输送工艺中的应用[J]. 现代食品, 2020(20): 20-21.
LUO B, WU P, HUANG T F, et al. Application of iron remover in bulk grain conveying process[J]. Modern Food, 2020(20): 20-21.
- [11] 张朋立, 宋顺林, 刘亚飞, 等. 永磁除铁器在多元材料前驱体制备中的应用[J]. 山东化工, 2021, 50(18): 159-160.
ZHANG P L, SONG S L, LIU Y F, et al. Application of permanent magnet iron remover in the preparation of multi-material precursors[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(18): 159-160.
- [12] 白小利, 郭志强, 张征国, 等. PVC 树脂生产过程中除铁技术的应用[J]. 聚氯乙烯, 2021, 49(6): 11-13.
BAI X L, GUO Z Q, ZHANG Z G, et al. Application of iron removal technology in PVC resin production process[J]. Polyvinyl Chloride, 2021, 49(6): 11-13.
- [13] 李文科. 建筑垃圾资源化利用中除铁设备的选择与使用技巧[J]. 砖瓦, 2021(2): 25.
LI W K. Selection and use skills of iron removal equipment in the recycling of construction waste[J]. Bricks and Tiles, 2021(2): 25.
- [14] 赵会兰. 金属探测仪在选煤厂的应用[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(S1): 66-69.
ZHAO H L. Application of metal detector in coal preparation plant[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(S1): 66-69.
- [15] 胡志栋. 基于有限元分析的移动回转压头框式液压机主油缸结构设计[J]. 机械设计, 2021, 38(10): 152.
HU Z D. Structural design of main cylinder of mobile slewing head frame hydraulic press based on finite element analysis[J]. Mechanical Design, 2021, 38(10): 152.

(下转第 145 页)

- [7] WAN S, GOUDOS S. Faster R-CNN for multi-class fruit detection using a robotic vision system [J]. *Computer Networks*, 2020, 168: 107036.
- [8] 周雨帆, 李胜旺, 杨奎河, 等. 基于轻量级卷积神经网络的苹果表面缺陷检测方法[J]. *河北工业科技*, 2021, 38(5): 388-394.
ZHOU Y F, LI S W, YANG K H, et al. A lightweight convolutional neural network-based method for apple surface defect detection[J]. *Hebei Industrial Science and Technology*, 2021, 38(5): 388-394.
- [9] ZHANG Z, LU Y, LU R. Development and evaluation of an apple infield grading and sorting system [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 180: 111588.
- [10] BARGOTI S, UNDERWOOD J. Deep fruit detection in orchards [C]// 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore: Nstitute of Electrical and Electronics Engineering, 2017: 3 626-3 633.
- [11] 梁鸿, 王庆玮, 张千, 等. 小目标检测技术研究综述[J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(1): 17-28.
LIANG H, WANG Q W, ZHANG Q, et al. A review of small target detection techniques[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(1): 17-28.
- [12] LIU Z, WANG S. Broken corn detection based on an adjusted YOLO with focal loss[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 68 281-68 289.
- [13] GE Z, LIU S, WANG F, et al. Yolox: Exceeding yolo series in 2021 [J]. *arXiv preprint arXiv*, 2021: 2107.08430.
- [14] FU H, SONG G, WANG Y. Improved YOLOv4 marine target detection combined with CBAM[J]. *Symmetry*, 2021, 13(4): 623.
- [15] 魏冉, 裴悦琨, 姜艳超, 等. 基于改进 Faster R-CNN 模型的樱桃缺陷检测[J]. *食品与机械*, 2021, 37(10): 98-105, 201.
- WEI R, PEI Y K, JIANG Y C, et al. Cherry defect detection based on improved Faster R-CNN model[J]. *Food & Machinery*, 2021, 37(10): 98-105, 201.
- [16] LIN T Y, DOLLÁR P, GIRSHICK R, et al. Feature pyramid networks for object detection [C]// *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Honolulu: Institute of Electrical and Electronics Engineering, 2017: 2 117-2 125.
- [17] 刘博文. 基于深度学习的复杂场景中行人检测研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020: 33-36.
LIU B W. Research on pedestrian detection in complex scenes based on deep learning[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020: 33-36.
- [18] GONG Y, YU X, DING Y, et al. Effective fusion factor in FPN for tiny object detection [C]// *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision*. Waikoloa: Institute of Electrical and Electronics Engineering, 2021: 1 160-1 168.
- [19] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection [J]. *arXiv preprint arXiv*, 2020: 2004.10934.
- [20] REN S Q, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks [J]. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2015, 28: 1506.01497.
- [21] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: Single shot multibox detector [C]// *European Conference on Computer Vision*. [s.l.]: Springer Cham, 2016: 21-37.
- (上接第 110 页)
- [16] 刘滨, 刘志珍, 刘凤亮. 基于 ANSYS 的永磁除铁器的磁场计算与分析[J]. *矿山机械*, 2010, 38(1): 100-101, 111.
LIU B, LIU Z Z, LIU F L. Calculation and analysis of magnetic field of permanent magnetic separator based on ANSYS[J]. *Mining Machinery*, 2010, 38(1): 100-101, 111.
- [17] 金欣, 林鹤云. 基于等效面电流模型的 AMS 永磁体磁场解析分析[J]. *中国科技信息*, 2009(2): 39-41.
JIN X, LIN H Y. Analytical analysis of AMS permanent magnet magnetic field based on equivalent surface current model[J]. *China Science and Technology Information*, 2009(2): 39-41.
- [18] 曲庆文, 付雷杰, 万继祥. 基于磁场有限元分析的永磁除铁设备[J]. *机械工程师*, 2008(3): 70-71.
QU Q W, FU L J, WAN J X. Permanent magnet iron removal equipment based on magnetic field finite element analysis [J]. *Mechanical Engineer*, 2008(3): 70-71.
- [19] MOHANRAJ G T, RAHMAN M R, JOLADARASHI S, et al. Design and fabrication of optimized magnetic roller for permanent roll magnetic separator (PRMS): Finite element method magnetics (FEMM) approach[J]. *Advanced Powder Technology*, 2021, 32(2): 31-36.
- [20] 杨志军, 曲鹏, 李云辉, 等. 基于有限元分析的压力管道外漏磁检测[J]. *无损检测*, 2021, 43(9): 7-12.
YANG Z J, QU P, LI Y H, et al. Magnetic leakage detection outside pressure pipeline based on finite element analysis [J]. *Nondestructive Testing*, 2021, 43(9): 7-12.
- [21] SINGH V, NAG S, TRIPATHY S K. Particle flow modeling of dry induced roll magnetic separator[J]. *Powder Technology*, 2013, 244: 85-92.
- [22] KARBAN P, ULRYCH B, DOLEZEL I. Design of power magnetic chute separator and minimization of its external magnetic field [C]. 2005 IEEE Russia Power Tech. [s.l.]: IEEE, 2008: 213-214.
- [23] CIOSK K. Magnetic field and forces in a magnetic separator gap[J]. *Przeglad Elektrotechniczny*, 2012, 88(12B): 47-49.
- [24] BHANDARI B. Introduction to food powders[M]. [s.l.]: Woodhead Publishing, 2013: 1-25.
- [25] BHATIA R. Matrix analysis[M]. [s.l.]: World Book Publishing Company, 2011: 152-193.