

基于涡流空气分级机的淀粉分级数值模拟与优化

Numerical simulation and optimization of starch classification in turbo air classifiers

楼 琦^{1,2} 赵介军² 俞建峰^{1,2}

LOU Qi^{1,2} ZHAO Jie-jun² YU Jian-feng^{1,2}

(1. 江南大学机械工程学院, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:采用 ICEM 软件对涡流空气分级机进行网格划分并用 Fluent 软件对分级机内马铃薯淀粉的分级过程进行数值模拟, 研究分级轮转速、进风速度和分级轮叶片数量对马铃薯淀粉分割粒径的影响及变化规律。运用响应面分析法对涡流空气分级机进行参数优化, 结果表明: 分级轮转速、进风速度和分级轮叶片数量对马铃薯淀粉分割粒径均有影响, 对分割粒径影响的大小顺序依次为: 分级轮转速 > 进风速度 > 分级轮叶片数量。通过响应面法优化得到的最佳参数条件为: 分级轮转速 3 378 r/min, 进风速度 19 m/s, 分级轮叶片数量 16, 该条件下涡流空气分级机的分割粒径为 11.2 μm 。

关键词: 涡流空气分级机; 数值模拟; 分割粒径; 参数优化

Abstract: The ICEM software was used to mesh the model of turbo air classifier and numerical simulation was performed by Fluent software to characterize separation process of potato starch. The effect of parameters such as rotational speed, inlet velocity and number of rotor blades on the cut size were studied. The response surface analysis method was used to optimize process parameters on turbo air classifier. The results indicated that the rotational speed, inlet velocity and number of rotor

blades all influenced the cut size of potato starch. The order of effect on cut size was as followed: rotational speed > inlet velocity > number of rotor blades. The optimal parameter condition obtained by response surface method was as followed: rotational speed was 3 378 r/min, inlet velocity was 19 m/s, and number of rotor blades was 16. Under the control of these conditions, the cut size of turbo air classifier was 11.2 μm .

Keywords: turbo air classifier; numerical simulation; cut size; parameter optimization

淀粉是粮食重要的组成部分, 因其具有来源广泛、可完全降解、可再生及价格低等优点备受关注^[1]。马铃薯淀粉是淀粉中常见的种类, 但是不同品种的马铃薯在不同的生长环境下, 其淀粉的颗粒粒径和形貌有很大差异。例如玉米、小麦、木薯等植物中淀粉粒径为 1~35 μm , 但马铃薯中原淀粉的粒径为 10~100 μm ^[2], 与其他种类的淀粉颗粒相比, 马铃薯淀粉颗粒的粒径较大、粒径分布范围更广。研究表明: 当马铃薯淀粉的颗粒粒径为 10~30 μm , 淀粉糊黏度呈现最小值^[3]; 淀粉颗粒的粒径越小, 其比表面积和表面活化能越大, 具有更好的分散性、吸附性、溶解性、流动性和易被人体吸收消化等特点^[4]。为获得粒径较小且粒径分布范围更为均匀的马铃薯淀粉颗粒, 可采用干法分级技术来实现。

涡流空气分级机作为一种粉体干法分级设备, 具有能耗小、处理量大及分级效率高等优点, 广泛应用于化工、医药、矿物加工与食品等行业^[5]。目前对于涡流空气分级机的研究主要集中于分级轮的结构参数(叶片的形状^[6-7]、分级轮的整体形状^[8]、叶片安装角度^[9]、叶片数量^[10])、操作参数(加料速度、分级轮转速及进风速度^[11-14])以及颗粒预分散对粉体分级的影响, 但是针对

基金项目: 国家食品科学与工程一流学科建设项目资助(编号: JUFSTR20180205); 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室自主研究课题资助项目(编号: FMZ201807); 2017 年江苏省研究生实践创新计划项目(编号: SJCX17_0484); 2017 年江苏省大学生创新创业训练计划项目(编号: 2017126Z); 2018 年江苏省研究生实践创新计划项目(编号: SJCX18_0627)

作者简介: 楼琦, 男, 江南大学在读硕士研究生。

通信作者: 俞建峰(1974—), 男, 江南大学教授, 博士。

E-mail: robotmecu@126.com

收稿日期: 2019-04-16

马铃薯淀粉颗粒的分级,如何进行涡流空气分级机的工作参数的优化尚未见相关研究报道。试验拟采用流体力学仿真软件 Fluent 17.0 对涡流空气分级机马铃薯淀粉的分级过程进行数值模拟,利用 RNG $k-\epsilon$ 双方程模型分析分级机内的湍流流动,用 DPM 模型模拟不同粒径的马铃薯淀粉颗粒的运动轨迹。试验研究涡流空气分级机工作参数(进风速度、分级轮转速和分级轮叶片数量)对分级机分割粒径的影响,并采用响应面法综合考虑各因素对马铃薯淀粉颗粒分割粒径的影响,以求得分级机最佳的参数条件。

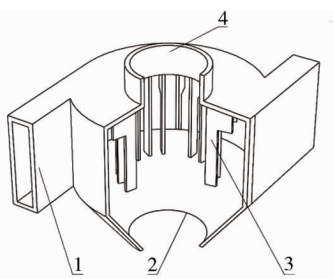
1 计算模型及优化方法

1.1 三维模型

涡流空气分级机模型及其分级轮叶片结构如图 1、2 所示。分级轮叶片上部分长、宽、厚度分别为 30, 27, 3 mm, 下部分长、宽、厚度分别为 12, 65, 3 mm。采用径向垂直安装的方式均匀分布在半径为 38 mm 的分级轮上,进风口的长、宽、高分别为 120, 30, 95 mm,进风口处蜗壳的开角为 15° ,粗粉出口和细粉出口的直径均为 60 mm。

1.2 网格模型

利用 Solidworks 软件建立三维几何模型,保存为 Step 格式,导入 ICEM 中进行网格划分,使用 Block 虚拟拓扑方法创建六面体结构化网格,并对分级轮叶片区域



1. 进风口 2. 粗粉收集口 3. 分级轮叶片 4. 细粉出口

图 1 涡流空气分级机模型

Figure 1 Model of turbo air classifier

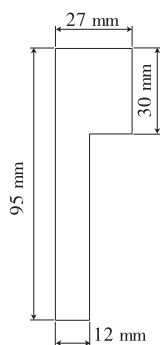


图 2 分级轮叶片结构图

Figure 2 Structure of the rotor blade

进行边界层网格加密,最终网格质量在 0.5 以上,确保了计算结果的准确性。涡轮空气分级机的网格划分如图 3 所示。

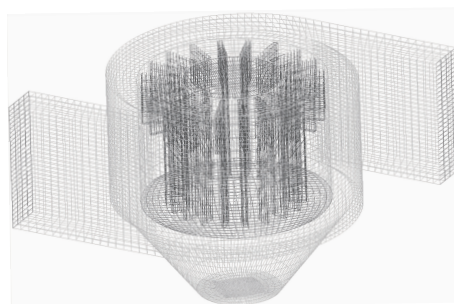


图 3 涡流空气分级机网格划分

Figure 3 Mesh generation of turbo air classifier

1.3 边界条件与求解器设置

采用 Fluent 17.0 软件进行数值模拟,由于 RNG $k-\epsilon$ 双方程模型适合于模拟应变率高和流线弯曲程度大的湍流流动^[15],因此连续相计算采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型。在 Boundary 中设置进风口为速度入口,并定义湍流强度和水力直径;细粉出口设置为自由出流边界;分级轮叶片设置为旋转壁面,并设置分级轮的旋转轴和转速;其余壁面为无滑移边界,默认 0.5 的粗糙度。

求解器的设置为:压力与速度的耦合采用 SIMPLE 算法,模拟出来的结果收敛性较好^[16],压力梯度采用 Gauss Cell Based,压力采用 Standard,湍动能和湍动能耗散率均采用二阶迎风格式,设置各项收敛残差为 1×10^{-5} ,流场初始化后进行求解。

上述计算收敛后,即为连续相计算完成,接下来进行离散相模型的计算。在 Models 选项中激活离散相模型(DPM),设置最大计算步数 50 000 步,颗粒的发射平面为进风入口平面,并设置马铃薯淀粉颗粒粒径和密度;在 Boundary 中将细粉出口的 DPM 边界类型设为 escape,颗粒通过该平面后会被捕获;最后在 Results 的 Particle Tracks 中,对不同粒径的马铃薯淀粉颗粒进行计算。

2 结果与分析

2.1 工作参数对马铃薯淀粉分割粒径的影响

分割粒径为分级效率为 50% 时的颗粒粒径,是衡量涡流空气分级机分级性能的重要指标^[17]。

分级效率公式:

$$G(d_j) = \frac{(n_{\text{escape}})_{d_j}}{(n_{\text{tracked}})_{d_j}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

$G(d_j)$ —— 颗粒直径为 d_j 的分级效率, %;

$(n_{\text{escape}})_{d_j}$ —— 颗粒直径为 d_j 的逃脱颗粒总数;

$(n_{\text{tracked}})_{d_j}$ —— 颗粒直径为 d_j 的发射颗粒总数。

通过发射不同粒径的颗粒进行模拟,计算求得 $G(d_j)$ 为 50% 的颗粒直径即分割粒径。

2.1.1 分级轮转速对马铃薯淀粉分割粒径的影响 由图 4 可知,在分级轮叶片数量 20,进风速度 16 m/s 时,随着分级轮转速的增加,分割粒径呈先减小后增大的趋势,当转速为 3 200 r/min 时,分割粒径达到最小值,随后开始增大。这是由于分级轮转速会对涡流空气分级机内部的流场产生影响,从而影响马铃薯淀粉的分级。分级轮转速较小时,分级轮转速的增大会使颗粒受到更大的离心力,粗颗粒更容易被甩出,有利于提高分级效率^[18],减小分割粒径;但是分级轮转速过大时,分级区域内气体的湍流速度增大,增大了颗粒与叶片间的碰撞力度,造成粗颗粒由于与叶片发生弹跳进入分级轮内部^[19],分割粒径增大。

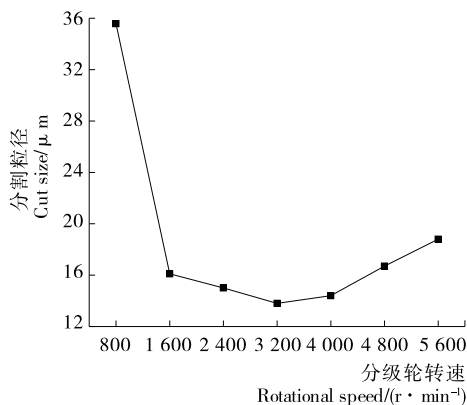


图 4 转速对分割粒径的影响

Figure 4 Effect of rotational speed on cut size

2.1.2 进风速度对马铃薯淀粉分割粒径的影响 由图 5 可知,在分级轮叶片数量 20,分级轮转速 1 600 r/min 时,随着进风速度的增大,分割粒径呈先减小后增大的趋势,当进风速度为 20 m/s 时,分割粒径达到最小值。可能是进风速度较小时,风量的适当增大会使颗粒更好地分散,减少细粉中粗颗粒的混入量,分割粒径减小;随着进风速

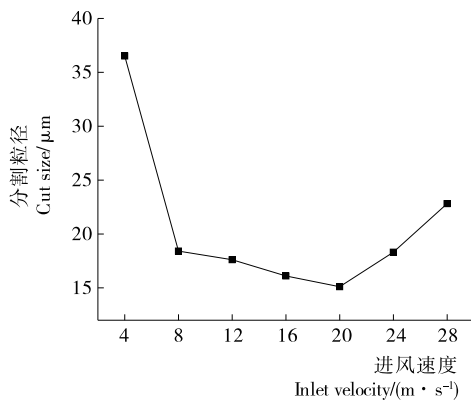


图 5 进风速度对分割粒径的影响

Figure 5 Effect of inlet velocity on cut size

度增大,过大的空气拽力会造成粗颗粒进入分级轮内部^[20],分割粒径增大。

2.1.3 分级轮叶片数量对马铃薯淀粉分割粒径的影响

由图 6 可知,在进风速度 16 m/s,分级轮转速 2 800 r/min 时,随着分级轮叶片数量的增大,分割粒径呈先减小后增大的趋势,当分级轮叶片数量为 16 时,分割粒径达到最小值。叶片通道是颗粒进入到分级轮内的必经之路,叶片间距的大小会对叶片通道内的流场产生影响^[21],从而影响马铃薯淀粉颗粒的分级。分级轮叶片数量较少时,适当增大叶片数量会减小叶片间距,增加叶片间的径向速度,减小切向速度,从而减小颗粒与分级轮叶片间的碰撞,分割粒径减小^[22];但是分级轮叶片数量过多时会导致叶片间流通面积过小,造成粉体颗粒长时间停留在叶片间不利于分级^[23]。

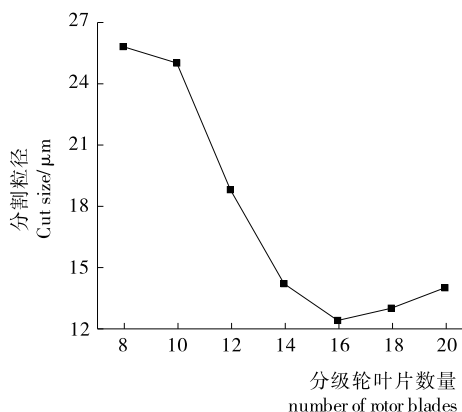


图 6 分级轮叶片数量对分割粒径的影响

Figure 6 Effect of number of rotor blades on cut size

2.2 响应面优化

2.2.1 响应面优化模拟试验 以分级轮转速、进风速度和分级轮叶片数量为自变量,以分割粒度为响应值,采用 Box-Behnken 中心组合试验设计原理,用 Design-Expert 8.0.5b 软件进行三因素三水平响应面分析,试验因素及水平见表 1,设计方案及结果处理见表 2。

2.2.2 二次回归方程和方差分析 对表 2 数据进行多元二次方程回归拟合与方差分析,得到的二次回归方程:

$$Y = 11.66 - 2.22A + 1.06B - 0.84C - 0.73AB - 0.27AC - 0.05BC + 1.79A^2 - 2.52B^2 + 3.37C^2. \quad (2)$$

表 1 响应面试验因素分析

Table 1 Factors and levels of response surface experience

编码	A 转速/ (r · min ⁻¹)	B 进风速度/ (m · s ⁻¹)	C 分级轮 叶片数量
-1	2 400	16	14
0	3 200	20	16
1	4 000	24	18

表 2 响应面试验设计与结果

Table 2 Design and results of response surface experiments

试验号	A	B	C	Y 分割粒径/ μm
1	-1	-1	0	16.5
2	1	-1	0	13.7
3	-1	1	0	19.7
4	1	1	0	14.0
5	-1	0	-1	19.6
6	1	0	-1	15.5
7	-1	0	1	18.7
8	1	0	1	13.5
9	0	-1	-1	17.3
10	0	1	-1	19.7
11	0	-1	1	15.3
12	0	1	1	17.9
13	0	0	0	11.6
14	0	0	0	12.1
15	0	0	0	11.5
16	0	0	0	11.3
17	0	0	0	11.8

为了分析二次回归方程的有效性,进一步对回归模型进行方差分析,结果如表 3 所示。由表 3 可知,分割粒径的模型极显著($P<0.01$),且 2 个模型的失拟项不显著($P>0.05$),表明非试验因素影响较小,模型较合理。分割粒径的相关系数 $R^2=0.987\ 7>0.8$,表明各因素和分割粒径之间的线性关系好,校正系数 $R_{Adj}^2=0.948\ 5$,表明此

模型可用于解释响应值中 94.85% 的变化;试验所得的变异系数 CV 值为 $2.26\%<10\%$;信噪比为 $31.447>4$ 。综上所述,模型可用于分析涡流空气分级机分割粒径的预测和模拟。

模型中 A、B 和 C 对 Y 的影响极显著($P<0.01$);交互项 AB 对 Y 的影响极显著($P<0.01$),AC 和 BC 对 Y 的影响不显著($P>0.05$);二次项 A^2 、 B^2 和 C^2 对 Y 的影响极显著($P<0.01$)。对 F 值分析可知,对分割粒径影响的大小顺序为 $A>B>C$,即分级轮转速>进风速度>分级轮叶片数量。

2.2.3 响应面交互作用分析 由图 7 可知,分级轮转速和进风速度都对分割粒径有较大的影响,两者交互作用的响应面图陡峭,交互作用明显。由图 8 可知,分级轮转速对分割粒径的影响大于分级轮叶片数量,两者交互作用的响应面图较陡峭,说明两者存在一定交互作用,但由方差分析可知交互作用不明显。由图 9 可知,进风速度对分割粒径的影响大于分级轮叶片数量,两者交互作用的等高线图趋向于椭圆,说明有一定交互作用,但由方差分析可知交互作用不明显。

2.2.4 响应面分析和参数优化 通过对分割粒径回归模型进行分析,得出涡流空气分级机最佳参数条件为:分级轮转速 3 378 r/min,进风速度 19 m/s,分级轮叶片数 16,该条件下涡流空气分级机的分割粒径预测值为 $11.1\ \mu\text{m}$ 。在上述最佳条件下设计 3 组平行模拟实验进行验证,求得涡流空气分级机的分割粒径为 $11.2\ \mu\text{m}$,与预测值的相对偏差为 0.9%,表明该模型对马铃薯淀粉切割粒径有较好的预测效果。

表 3 回归模型方差分析[†]

Table 3 Variance analysis of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	154.28	9	17.14	143.79	$<0.000\ 1^{**}$
A	39.60	1	39.60	332.22	$<0.000\ 1^{**}$
B	9.03	1	9.03	75.76	$<0.000\ 1^{**}$
C	5.61	1	5.61	47.07	$0.000\ 2^{**}$
AB	2.10	1	2.10	17.64	$0.004\ 0^{**}$
AC	0.30	1	0.30	2.54	0.155 2
BC	$1.00\text{E}-002$	1	$1.00\text{E}-002$	0.08	0.780 5
A^2	13.57	1	13.57	113.80	$<0.000\ 1^{**}$
B^2	26.74	1	26.71	224.29	$<0.000\ 1^{**}$
C^2	47.82	1	47.82	401.11	$<0.000\ 1^{**}$
残差	0.83	7	0.12		
失拟项	0.46	3	0.15	1.66	0.311 5
纯误差	0.37	4	0.41		
总变异	155.11	16	0.09		

[†] ** 表示差异极显著, $P<0.01$; * 表示差异显著, $P<0.05$ 。

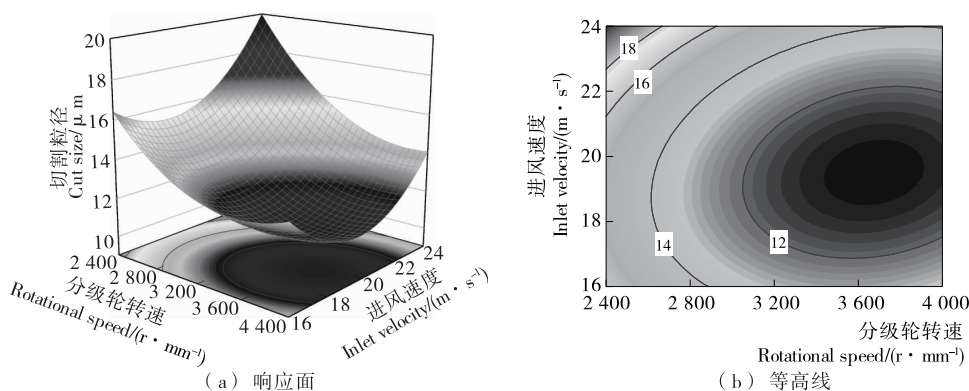


图 7 转速和进风速度对分割粒度交互作用的响应面图和等高线

Figure 7 Response surface and contour plots for the interaction effects of rotational speed and inlet velocity on cut size

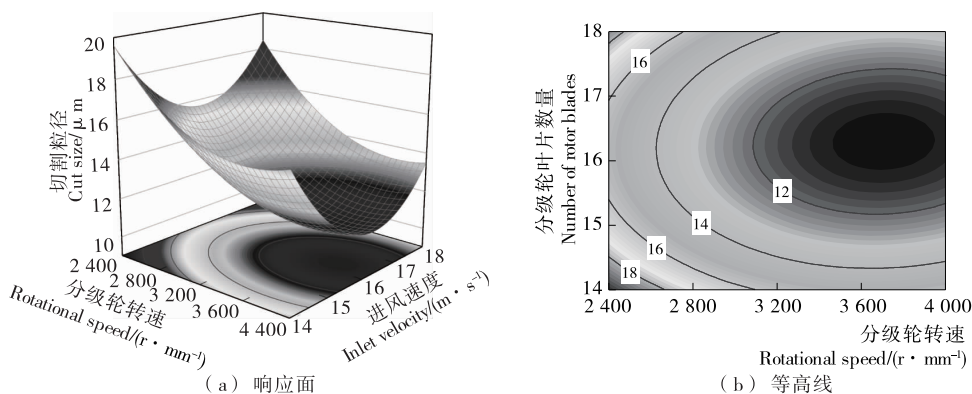


图 8 转速和叶片数量对分割粒度交互作用的响应面图和等高线

Figure 8 Response surface and contour plots for the interaction effects of rotational speed and number of rotor blades on cut size

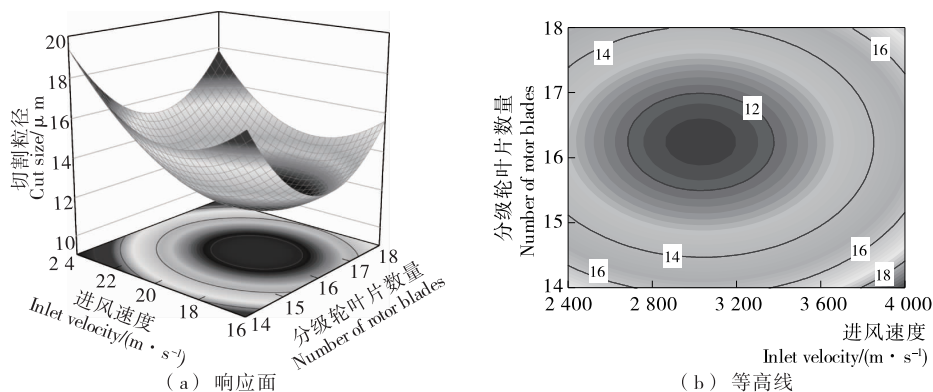


图 9 进风速度和叶片数量对分割粒度交互作用的响应面图和等高线

Figure 9 Response surface and contour plots for the interaction effects of inlet velocity and number of rotor blades on cut size

3 结论

研究了分级轮转速、进风速度和分级轮叶片数量对涡流空气分级机分割粒径的影响,并运用 Design-Expert 8.0.5b 软件设计三因素三水平响应面模拟试验,根据结果确定各项参数的最佳条件。结果表明:分级轮转速、进风速度和分级轮叶片数量对涡流空气分级机分割粒径均有较大的影响,对分割粒径影响的大小顺序为分级轮转速>

进风速度>分级轮叶片数量。此外,通过响应面法得知分级轮转速和进风速度的交互作用明显,通过响应面法优化得到的最佳参数条件为:分级轮转速 3 378 r/min,进风速度 19 m/s,分级轮叶片数 16,该条件下涡流空气分级机的分割粒径为 11.2 μm 。

试验仅考虑了分级轮叶片数量对分级机分割粒径的影响,未考虑分级机腔体结构、进风口位置、卸料口锥角等结构参数对分割粒径的影响,将在后续的研究中进行探讨。

参考文献

- [1] 陈启杰, 郑学铭, 周丽玲, 等. 纳米淀粉的研究及其在食品工业中的应用[J]. 食品与机械, 2017, 33(7): 210-214, 220.
- [2] WANG Chan, TANG Chuan-he, FU Xiong, et al. Granular size of potato starch affects structural properties, octenylsuccinic anhydride modification and flowability[J]. Food Chemistry, 2016, 212: 453-459.
- [3] 李晓文, 熊兴耀. 颗粒粒径对马铃薯淀粉糊黏弹性的影响[J]. 中国粮油学报, 2008, 23(2): 59-61.
- [4] 刘成梅, 王振兴, 刘伟. 机械法制备超微大米淀粉的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(10): 243-246.
- [5] 刘蓉蓉, 刘家祥, 于源. 涡流空气分级机进口风速和转笼转速匹配研究[J]. 化学工程, 2015, 43(3): 41-45.
- [6] REN Wen-jin, LIU Jia-xiang, YU Yuan. Design of a rotor cage with non-radial arc blades for turbo air classifiers[J]. Powder Technology, 2016, 292: 46-53.
- [7] 陈以威, 夏必忠, 陈波. 分级轮叶片结构和转速对分级性能影响的仿真[J]. 中国粉体技术, 2015, 21(4): 6-9.
- [8] HUANG Qiang, LIU Jia-xiang, YU Yuan. Turbo air classifier guide vane improvement and inner flow field numerical simulation[J]. Powder Technology, 2012, 226(8): 10-15.
- [9] 陈海焱, 张明星, 颜翠平. 涡轮分级机分级轮流场的数值模拟与分析[J]. 中国粉体技术, 2008, 14(5): 1-4.
- [10] 刘丹, 宋杨. 涡流分级机的分级轮研究[J]. 化工装备技术, 2013, 34(3): 6-9.
- [11] 何福军, 方莹, 江浪. 涡流分级机分级精度的影响因素分析[J]. 矿山机械, 2016, 44(8): 1-4.
- [12] 何福军, 方莹, 秦键波. 新型涡流分级机分级区流场特性数值模拟研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(12): 4 128-4 132.
- [13] YU Yuan, LIU Jia-xiang, ZHANG Kai. Establishment of a prediction model for the cut size of turbo air classifiers[J]. Powder Technology, 2014, 254: 274-280.
- [14] ZHANG Guang-wen, TAN Zhi-hai, HOU Hao, et al. Lignite upgrading using a pulsing air classifier[J]. Energy Sources Part A Recovery Utilization & Environmental Effects, 2018, 40(1): 33-38.
- [15] SANG Shi-hua, ZHANG Xiao. Solubility investigations in the systems $\text{Li}_2\text{SO}_4 + \text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{H}_2\text{O}$ and $\text{K}_2\text{SO}_4 + \text{K}_2\text{B}_4\text{O}_7 + \text{H}_2\text{O}$ at 288 K[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2009, 55(2): 808-812.
- [16] 焦渤, 沈志刚, 赵小虎. 气流分级机流场的数值模拟与优化[J]. 中国粉体技术, 2009, 15(5): 1-6.
- [17] 袁惠新, 方勇, 付双成, 等. 旋流器的微米级颗粒分级性能分析[J]. 化工进展, 2017, 36(12): 4 371-4 377.
- [18] 赵雪珍, 石九菊, 周全. 通道式微型分级机理论模型的研究[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(3): 745-749.
- [19] 赵雪珍, 周勇敏. 涡流分级机分级精度影响因素的研究进展[J]. 中国矿业, 2010, 19(6): 92-94.
- [20] 侯志强, 侯书军, 彭伟, 等. 操作参数对超细气流分级机内流场影响规律的数值模拟[J]. 矿山机械, 2010, 38(21): 101-105.
- [21] 陈杰, 黄国平, 梁德旺. 叶片数对微型斜流叶轮性能的影响[J]. 航空动力学报, 2008, 23(9): 1 007-1 011.
- [22] 龚翠平, 杨威, 刘静. 涡流空气分级机的分级效率与分级精度[J]. 中国粉体技术, 2014, 20(4): 80-82.
- [23] 侯志强, 侯书军, 彭伟, 等. 转子结构对超细气流分级机内部流场影响规律的数值模拟[J]. 矿山机械, 2010(19): 102-107.

(上接第 115 页)

冷系数下降最快为 1.7%。且蒸发温度下降 1℃比冷凝温度上升 1℃对系统性能系数影响更大。因此,在复叠式制冷系统的实际应用中,有效控制蒸发温度不仅能提高制冷系统效率,而且对提高制冷系统运行稳定性极其重要。

(2) 因为该系统装有回热器,当蒸发温度为 -55℃,冷凝温度从 34℃升至 36℃时,压缩机吸气压力升高较缓,但压缩机排气温度最高达 90℃,通过对该组重复性试验所得数据进行分析,发现这种现象的出现和制冷剂蒸气进入压缩机前过热度的变化有关,因此回热器过热度对压缩机排气温度的具体影响规律,之后可进行深入研究。

参考文献

- [1] 沈九兵, 胡斌, 邱建伟, 等. R134a/CO₂复叠制冷系统的实验研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(4): 59-63.
- [2] 汪磊, 谢晶, 王金锋. R404A 单机双级与 R404A/R23 复叠式制冷系统对比分析[J]. 低温工程, 2017(6): 15-19.
- [3] AMINYAVARI M, NAJAFI B, SHIRAZI A, et al. Exergetic, economic and environmental (3E) analyses, and multi-objective optimization of a CO₂/NH₃ cascade refrigeration system[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 65(1/2): 42-50.

- [4] 王炳明, 于志强, 姜韶明. NH₃/CO₂复叠制冷系统实验研究[C]// 全国冷冻、冷藏行业制冷安全技术、节能、环保新技术发展研讨会. 大连: 中国制冷学会, 2009: 63-66.
- [5] 刘洋潭. “绿色”制冷剂 R600a 特性及维修工艺探讨[J]. 科学中国人, 2015(11): 52-56.
- [6] 陈伟, 祁影霞, 张华. HCFCs 制冷剂替代物研究进展及性能分析[J]. 低温与超导, 2011, 39(12): 41-44.
- [7] ZINK F, VIPPERMAN J S, SCHAEFER L A. Environmental motivation to switch to thermoacoustic refrigeration[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(2): 119-126.
- [8] CHOK J, PARK J, CHOK H. Performance of the cascade systemu-singalter native refrigerantes[C]// National Heat Transfer Conference, Proceeding of ASMENTC135th. Anaheim: IIR, 2001: 595-600.
- [9] 郭耀君, 谢晶, 朱世新. 超低温制冷装置的研究现状和进展[J]. 食品与机械, 2015, 31(1): 238-243.
- [10] 王维, 吴兆林, 周志钢. 低温复叠系统制冷工质替代研究[J]. 流体机械, 2009, 37(7): 52-55.
- [11] 陈光明, 陈国邦. 制冷与低温原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 129.