

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.01.002

新型发生炉防煤气泄漏装置优化

冯美艳¹, 郑斌黎², 褚梦雅¹, 陈昌荣¹, 黄旭¹

(1. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福建鼎信科技有限公司, 福建 宁德 352000)

摘要: 发生炉生产煤气过程中, 炉内煤气经开启的加煤阀向上泄露至缓冲煤仓和储煤仓, 容易引起爆炸、人员中毒等事故, 造成能源浪费和环境污染。为了降低缓冲煤仓煤气含量, 并有效地封堵煤气进入储煤仓, 提高置换效率及能源利用率, 降低闪爆事故发生率, 针对某煤气发生炉建立缓冲煤仓三维模型, 采用 FLUENT 对缓冲煤仓吹扫 N_2 置换煤气的过程进行模拟, 探究一级进气管长和二级进气角度对缓冲煤仓内煤气置换时间的影响规律。试验结果表明, 缓冲煤仓内 N_2 浓度由初始 60% 急剧增加, 8 s 后达到 99%, 之后 N_2 浓度增长缓慢。CO 浓度由初始 30% 逐渐降低, 8 s 后接近于 0, 完成置换。0° 进气孔优于 90° 进气孔; 进气管长占缓冲煤仓总高度的比例约为 1/3 时为最优, 置换时间最短。该结构通过两级协同吹扫, 有效解决加煤时缓冲煤仓的煤气外泄问题和储煤仓闪爆问题。

关键词: 发生炉; 煤气泄漏; N_2 吹扫装置; 气体置换; 数值模拟

中图分类号: TQ545

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)01-0007-06

Optimization of new gas leakage prevention device for generators

FENG Meiyang¹, ZHENG Binli², CHU Mengya¹, CHEN Changrong¹, HUANG Xu¹

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Corporation of Fujian Dingxin Technology, Ningde 352000, China)

Abstract: In the process of furnace gas production, the gas in the furnace leaks upward through the open coal valve to the buffer coal bunker and coal storage bunker, which causes explosion, personnel poisoning, energy waste and environmental pollution. This research aims at reducing the gas content in the buffer bunker and effectively preventing gas from entering the coal storage bunker. Consequently, the replacement efficiency and energy utilization rate can be improved to reduce the incidence of flash explosions. A three-dimensional model of buffer bunker was established for a gas generator and the FLUENT was used to simulate the process of blowing N_2 to replace gas in buffer bunker. The influence of the length of primary intake pipe and the angle of secondary inlet on the time of gas replacement in buffer bunker was investigated. Experiment results show that the N_2 concentration in buffer bunker increases sharply from the initial 60% and reaches 99% after 8 seconds followed by a slow increase; while the CO concentration decreases gradually from the initial 30% and approximates 0 after 8 seconds, indicating that the replacement is completed. The 0-degree air inlet is better than the 90-degree one; the optimal proportion of the length of the intake pipe to the total height of the buffer coal bunker is about 1/3, and the replacement time is shorter. Through two-stage collaborative blowing, the structure effectively solves the problem of gas leakage from the buffer coal bunker and the flash explosion problem of the coal storage bunker when adding coal.

Keywords: generators; gas leakage; N_2 blowing device; gas replacement; numerical simulation

收稿日期: 2022-01-06

基金项目: 福建省青年教师教育科研项目(JAT190407)

第一作者简介: 冯美艳(1984—), 女, 山西忻州人, 副教授, 博士, 研究方向: 颗粒两相流研究。

煤气发生炉广泛应用于机械、化工、冶金、建筑材料等领域^[1-2],适用于气化焦煤和焦炭等燃料的生产,不受场合的限制,但可能发生煤气泄漏、发生炉爆炸事故^[3]。在煤气发生炉生产煤气过程中,需要使用加煤系统向炉体中不断加煤。当阀门打开时,炉内的煤气极易从煤块的空隙和阀门处泄漏,一部分通过储煤仓的开口逸散到大气中,另一部分在缓冲煤仓和储煤仓中停留。煤气泄露不仅造成资源浪费^[4],还会污染空气,可能导致人员一氧化碳中毒;停留在缓冲煤仓和储煤仓的煤气与空气混合成为可燃气体,与掉落进煤仓的煤矸石产生火花,引发闪爆事故,还可能造成大规模爆炸事故^[5]。

目前针对气化炉燃气泄露及可燃物含量分布主要有 3 类研究。第 1 类是针对气化炉局部泄露的原因的研究,如石锐^[6]等通过案例,分析天然气气化炉烧嘴泄露原因,并提出有效的解决对策;杨振峰^[7]研究发出渣口长期堆积炉渣会引起夹套外筒壁厚减薄,喷涂有效的防腐涂料、加装防渣挡板、定期检查测厚等措施可以避免煤气泄漏。第 2 类是针对气化炉内流动状态的分析,预测气化炉内燃气的含量分布。如蒋少华^[8]建立最小二乘向量机 (LS-SVM) 的预测模型,预测发生炉的出口温度和 CO₂ 含量;冯美艳^[9]等采用 MP-PIC 方法模拟研究了反应器结构对气化炉内可燃物浓度在床内分布规律的影响。第 3 类通过统计从整体上分析预测事故的原因。如王有红^[5]采用事故树分析方法,分析了事故发生的原因,提出了加强发生炉安全生产的措施;付婷婷^[10]采用定量风险分析方法 (QRA) 分析封闭厂房内煤气工艺系统,采用 FLACS 软件预测事故的危害程度和影响范围。

煤气发生炉在加煤时煤气很容易从加煤口逃逸到厂房室内,如遇明火或高温极易造成爆炸。但是,目前针对煤气发生炉加煤时的煤气泄露问题研究不足,因此,为了最大限度封堵煤气进入储煤仓,同时有效地降低缓冲煤仓煤气含量,本研究采用 FLUENT 对新型发生炉防煤气泄漏的两级 N₂ 吹扫装置进行优化。

1 计算方法

物质输运方程采用守恒方程。FLUENT 通过第 i 种物质的对流扩散方程预估每种物质的质量分数, Y_i 。守恒方程采用以下的通用形式:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \vec{J}_i + S_i \quad (1)$$

其中, S_i 为离散相及用户定义的源项导致的额外产生速率。在系统中出现 N 种物质时,需解 $N-1$ 个这种形式的方程。由于质量分数的和必须为 1,第 N 种物质的分数通过 1 减去 $N-1$ 个已解得的质量分数得到。为了使数值误差最小,第 N 种物质必须选择质量分数最大的物质,比如氧化物是空气时的 N₂。 t 为时间, ρ 为密度, \vec{v} 为速度矢量。 \vec{J}_i 是物质 i 的扩散通量,由浓度梯度产生。

$$\vec{J}_i = -\rho D_{i,m} \nabla Y_i \quad (2)$$

其中, $D_{i,m}$ 是混合物中第 i 种物质的扩散系数。

2 物理模型和边界条件

2.1 物理模型

两级 N₂ 吹扫装置如图 1 所示,本研究建立三维缓冲煤仓模型,采用 FLUENT 模拟仓内煤气的置换情况^[11]。如图 2 所示,缓冲煤仓左侧为长度为 L 的 N₂ 进气管;顶端为环向均布的 N₂ 进气孔,其直径 3 mm;顶端右侧为直径 80 mm 的煤气出口。缓冲煤仓侧壁的进气管利用吹扫流速及压力将通过第二加煤阀进入缓冲煤仓并滞留的煤气吹至顶端煤气出口管道中,实现一级吹扫。缓冲煤仓进煤口侧壁上设置的环向均布的 N₂ 进气孔以一定吹扫流速和角度形成气墙,主要用于第一加煤阀开启时实现二级吹扫,封堵缓冲煤仓中的煤气,以免向上泄漏至储煤仓。环向均布的 N₂ 进气孔直径仅有 3.0 mm,因此进气孔的网格尺寸相应较小,设为 0.6 mm。为了提高运算的效率,仓体的网格尺寸设为 5.0 mm,总网格数为 247 364 个,网格划分后的模型如图 2(c) 所示。

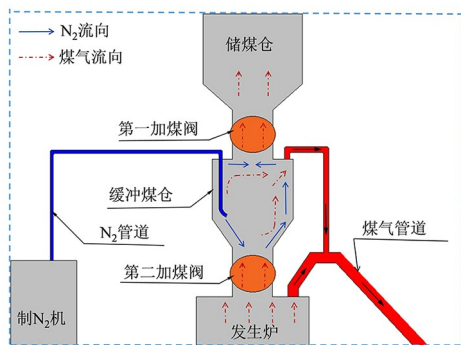


图 1 两级氮气吹扫装置

Fig.1 Two-stage nitrogen blow-off device

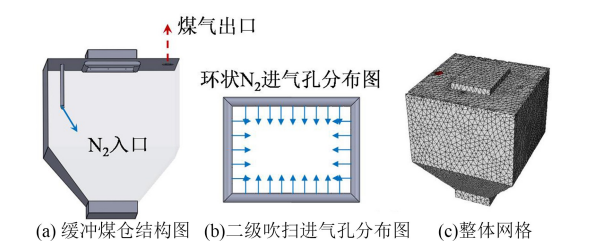


图 2 缓冲煤仓模型

Fig.2 Model of buffer bunker

2.2 边界条件及初始条件

模型设置了两部分 N₂ 入口, 分别是缓冲煤仓侧壁下方的进气管和缓冲煤仓进煤口侧壁上环向均布的进气孔, 如图 2(a)、图 2(b) 所示。顶部出口边界条件设置为压力出口, 其余部分设置为壁面, 初场温度设置为 300 K。初始时煤气各组分及含量如表 1 所示。所有 N₂ 入口总的流量为 1 000 m³/h, 进气压力为 450 000 Pa, y 方向重力为 -9.81 m/s², 设置时间步长为 0.01 s。

表 1 储煤仓煤气组分及含量

Tab.1 Composition and content of coal storage gas		
成分	质量分数/%	
CO ₂	4.2	
O ₂	0.3	
CO	33.6	
CH ₄	1.0	
H ₂	0.9	
N ₂	60.0	

3 模拟结果与讨论

通过改变与水平方向进气夹角和进气管长进行单因素模拟, 监测缓冲煤仓内 N₂ 和 CO 浓度, 模拟工况如表 2 所示。

3.1 基本工况

基本工况 1(0°进气孔、进气管长 665 mm) 模拟所得仓内流场分布情况如图 3 所示。0.2 s 以后缓冲煤仓内流场形成, 且流速稳定。缓冲煤仓侧壁下方的 N₂ 进气管实现一级吹扫, 在吹扫流速及压力作用下, 缓冲煤仓滞留的煤气从仓底不断向上直至顶部煤气出口。缓冲煤仓的环向均布

N₂ 进气孔实现二级吹扫, 以一定的流速和角度形成气墙, 在第一加煤阀开启时, 防止缓冲煤仓内的煤气向上泄漏至储煤仓, 实现煤气封堵目的。

表 2 模拟工况表

Tab.2 Simulation scheme

工况	进气角度/(°)	进气管长 L/mm
1	0	665
2	0	330
3	0	140
4	90	665
5	90	330
6	90	140

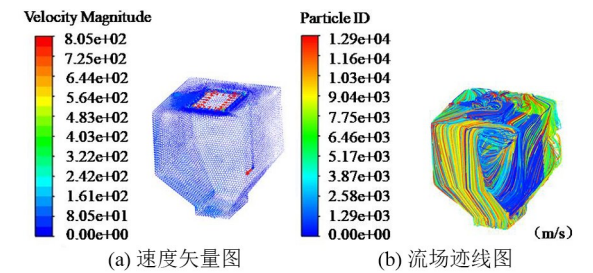


图 3 2 s 时仓内流场分布情况

Fig.3 Distribution of flow field in the buffer bunker at 2 s

缓冲煤仓内 N₂ 浓度随置换时间的变化如图 4(a) 所示。0.2 s 时仓内 N₂ 浓度仅有 65.82%, 随着置换时间的不断增加, N₂ 进气管和顶端进气孔进行两级协同吹扫, 随着 N₂ 的吹入, 仓内 N₂ 浓度逐渐增大, 8 s 后仓内 N₂ 浓度超过 99%。

图 4(b)、图 4(c) 分别为 N₂ 和 CO 浓度随置换时间的变化曲线。观察图 4(b) 可知, 0 至 8 s 内, 仓内 N₂ 浓度随置换时间增加急剧增加, 8 s 后变化趋于平缓。这主要因为 8 s 后仓内 N₂ 浓度超过 99%, 随置换时间的变化不再明显。如图 4(c) 可知, 随置换时间的增加, 缓冲煤仓内 CO 浓度由初始值 30% 急剧下降, 8 s 后趋于平缓。这主要因为随着两级吹扫装置的开启, 仓内的 CO 在吹扫流速和压力作用下被吹至顶部煤气出口, CO 浓度逐渐降低, 8 s 后缓冲煤仓内剩余 CO 浓度较小, 模拟测得的 CO 质量分数仅有 0.005 9。

本模型成功实现两级吹扫, 通过环形进气孔和进气管的两级协同吹扫, 既能避免缓冲煤仓中

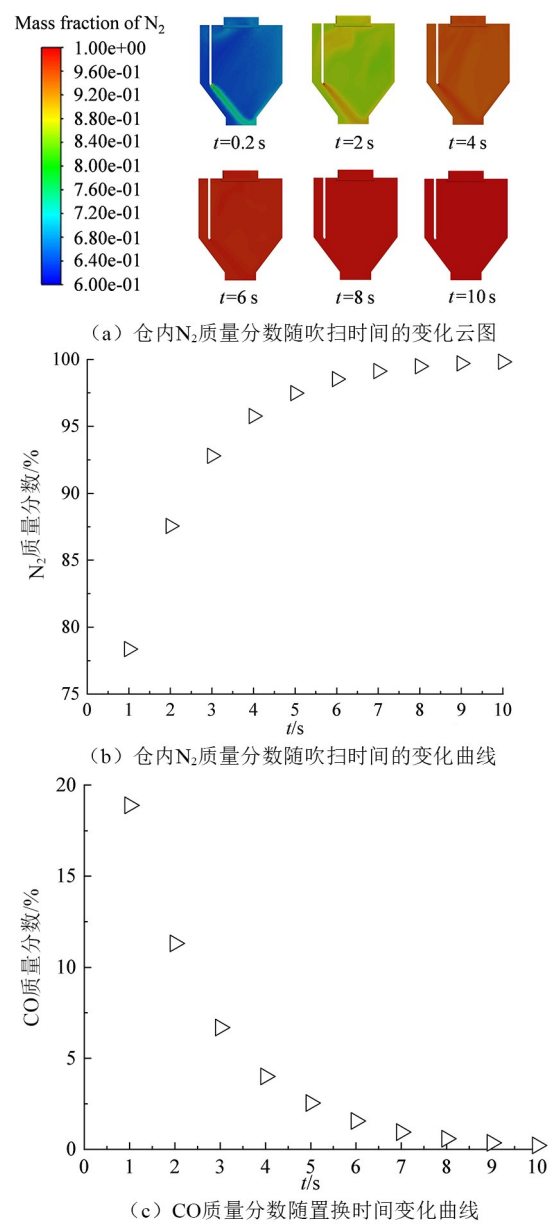


图 4 仓内气体浓度随置换时间变化
Fig.4 Variation of gas concentration in the buffer bunker with the replacement time

的煤气向上泄漏至储煤仓,又能将腔内煤气吹至顶部煤气出口,实现向缓冲煤仓吹扫 N_2 置换煤气的目的。为了减少置换时间,降低仓内煤气浓度,提高煤气发生炉生产时的安全性,针对缓冲煤仓腔体结构,以及 N_2 、煤气的特性,采用 FLUENT 软件,对缓冲煤仓内部流场进一步优化,探究进气孔角度和进气管的长度对置换时间的影响。

3.2 进气角度对置换时间的影响

为了探究进气角度对煤气置换时间的影响,

设置 0° 和 90° 两种角度的进气孔,以进气管长 330 mm 进行模拟,如图 5 所示。由 N_2 浓度随置换时间变化曲线所知,随着置换时间的增加,腔内 N_2 浓度由初始时 60% 显著升高,8 s 后趋近平缓。由 CO 浓度随置换时间变化曲线所知,仓内 CO 浓度随置换时间的增加急剧降低,8 s 后浓度变化变缓,仓内剩余 CO 浓度接近于 0。8 s 时设置 0° 进气孔的仓内 N_2 浓度更高,为 99.54%,因此 0° 进气孔比 90° 更快完成置换。流场速度如图 5(b) 和 (c) 所示,相同吹扫时间下,对比流场内的最大速度,明显进气孔为 0° 时的气速大于 90° 时的气速。因此, 0° 进气孔的吹扫速度明显高于 90° 进气孔,且 0° 分布的进气孔更有利于在顶端对缓冲煤仓内的滞留煤气形成封堵,所以 0° 分布进气孔优于 90° 进气孔,与气体浓度随置换时间变化曲线所示规律一致,后续模拟均采用 0° 进气孔。

3.3 进气管长度对置换时间的影响

为了探究 N_2 进气管长对置换时间的影响,分别模拟了 L 为 140、330 mm 和 665 mm 三种管长,其中二级进气孔采用 0° 分布。如图 6 所示,对于 3 种不同长度的进气管,仓内 N_2 浓度都随置换时间的延长而增大。当置换时间为 10 s 时,进气管长为 140 mm 的仓内 N_2 浓度为 99.82%,进气管长为 330 mm 时仓内 N_2 浓度为 99.84%,进气管长为 665 mm 时仓内 N_2 浓度为 99.73%。330 mm 的进气管长明显更有利于减小置换时间,提高工作效率,降低煤气泄漏事故的发生率。

不同进气管长时缓冲煤仓的内部流场如图 7 所示。相同吹扫时间下,进气管管长 660 mm 时流场速度最小。从图 7(d) 看出,虽然进气管长 140 mm 时 N_2 入射速度高于 330 mm 的进气管,但由于进气管管长过短, N_2 从进口流入后,在缓冲煤仓侧壁中部分成两束分别向上和下形成环流,向上环流的一部分 N_2 只能吹出仓内中上部的煤气,不利于仓内煤气的置换。同时,仓底速度减小,利用进气管 N_2 将缓冲煤仓底部煤气吹至顶部煤气管道的效果减弱,所以置换效率低于 330 mm 进气管。因此 330 mm 的进气管的吹扫位置和 N_2 入射速度都更有利于缓冲煤仓内煤气的置换,优于 140、665 mm 的进气管,此时进气管 L 的长度占缓冲煤仓总高度的比例约为 1/3。

3.4 试验验证

由 3.2 和 3.3 可知,工况 2 为最佳工况。与水

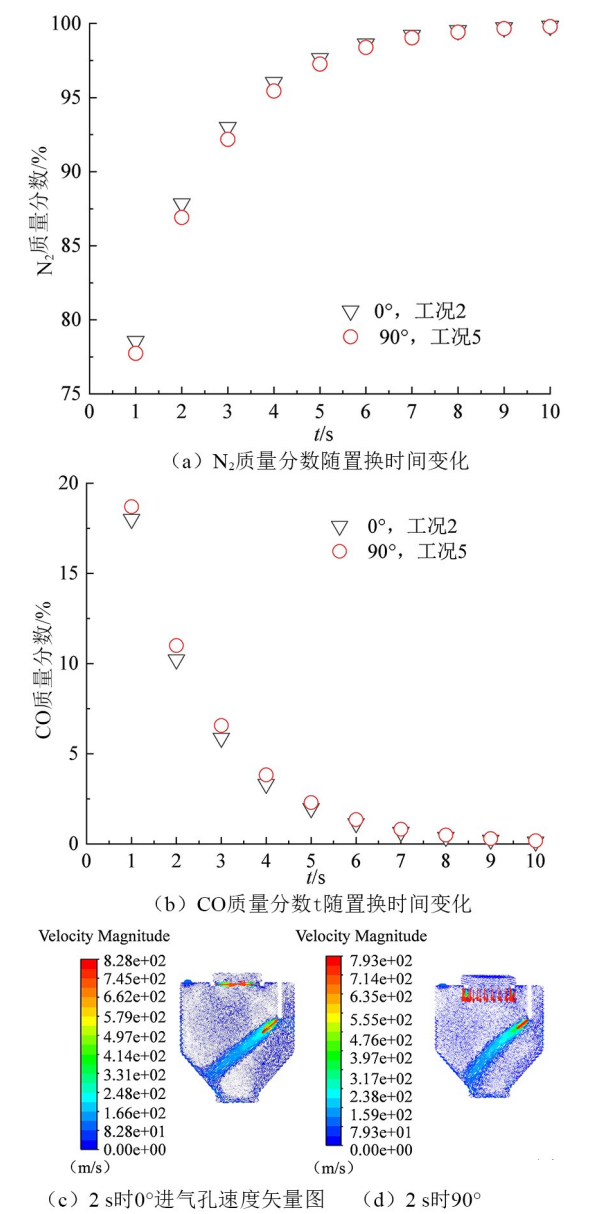


图 5 不同进气角度的置换情况

Fig.5 Replacement with different air intake angles

平方向成 0° 的环向进气孔更有利于在顶部形成气墙,在第一加煤阀开启时,封堵缓冲煤仓中的煤气,避免向上泄漏至储煤仓。330 mm 长的进气管吹扫位置和 N₂ 入射速度更有利于缓冲煤仓内煤气的置换,提高吹扫效率及安全生产的可行性。按工况 2 设计试验,使用优化后的两级 N₂ 吹扫装置对煤气发生炉进行煤气置换测试。首先按照指定进气管长和进气孔角度完成装置安装,分别在缓冲煤仓内和操作平台处各设置 1 只 CO 浓度测量仪,通过操作系统中“开氮气延时”和“关氮气延时”两个参数控制吹扫时间。分别测量在无吹

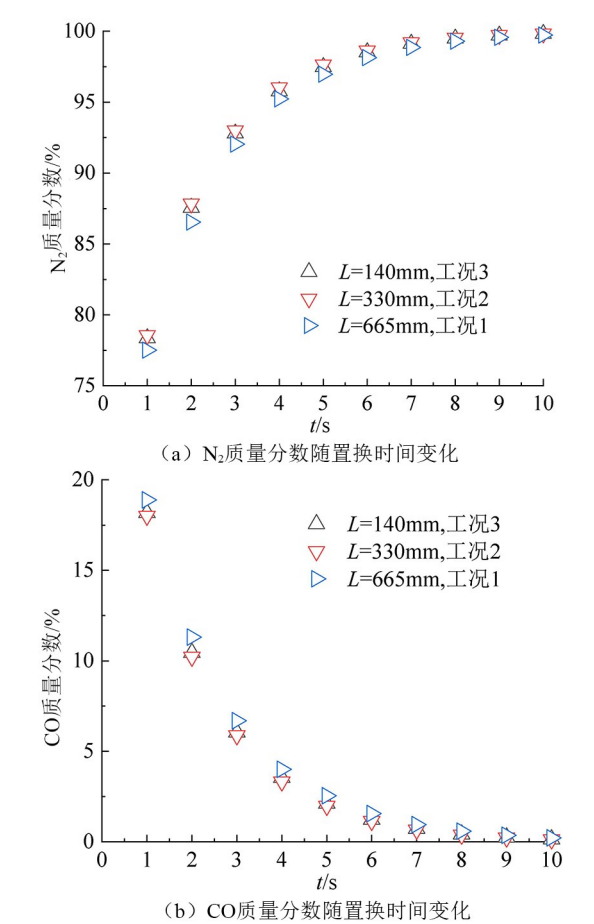


图 6 进气管长度对置换时间的影响
Fig.6 The effect of intake pipe length on the replacement time

扫条件下加煤时和二级吹扫加煤时缓冲煤仓内和操作平台处的 CO 浓度。CO 测试结果如表 3 所示。

表 3 测试结果			
Tab.3 Test results			
CO 测试位置	改造前 CO 质量分数/%	改造后 CO 质量分数/%	降低率/%
储煤仓内	30	0.30	99.0
操作平台上风向	20	0	100.0
操作平台下风向	28	0.05	99.8

实验和模拟结果对比如图 8 所示,N₂ 吹扫时长设置为 8 s,0° 进气孔和 330 mm 进气管的缓冲煤仓模拟所得仓内 CO 质量分数为 0.003 9,实际试验测得 CO 质量分数为 0.003 0,说明本模型对

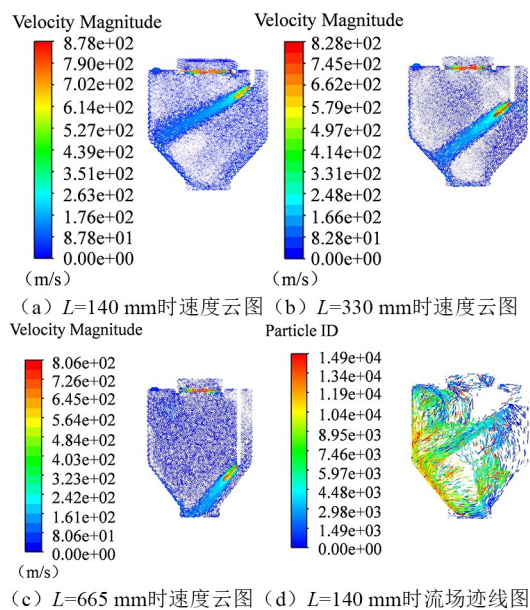


图 7 不同进气管长 2 s 时速度云图

Fig.7 Cloud diagram of velocity at 2 s for different intake pipe lengths

实际生产起到指导意义。

4 结论

本研究通过两级协同吹扫,有效解决缓冲煤仓的煤气外泄问题和储煤仓闪爆问题。利用 FLUENT 对缓冲仓进气管长和环孔进气方向进行优化,得

参考文献:

[1] DAI J X, NI Y Y, LIAO F R, et al. The significance of coal-derived gas in major gas producing countries[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 435-450.

[2] 薛知宜, 李洪枚, 王新春, 等. 建筑陶瓷行业发生炉煤气站污染防治措施研究[J]. 佛山陶瓷, 2020, 30(9): 46-52,36.

[3] 杨凯, 丁志江, 肖立春, 等. 发生炉煤气在电除尘器中爆炸与泄爆过程的数值模拟[J]. 燕山大学学报, 2015, 39(2): 182-188.

[4] 刘臻, 次东辉, 方薪晖, 等. 基于含碳废弃物与煤共气化的碳循环概念及碳减排潜力分析[J/OL]. 洁净煤技术: 1-9 [2022-03-03]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20210830.1627.002.html>.

[5] 王有红. 基于 ANSYS 的煤气发生炉爆炸事故分析及对策研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.

[6] 石锐, 王峰, 李侠. 天然气气化炉烧嘴泄漏原因及解决方法[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(12): 111.

[7] 杨振峰. 煤气发生炉炉体夹套外筒体腐蚀减薄分析[J]. 广东化工, 2019, 46(15): 154-155.

[8] 蒋少华. 基于 LS-SVM 的煤气发生炉关键参数预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(6): 1873-1878.

[9] 冯美艳, 李飞. 反应器结构对多段气化炉内颗粒分布的影响[J]. 过程工程学报, 2019, 19(2): 297-308.

[10] 付婷婷. 封闭煤气化厂房内气体泄漏扩散及爆炸事故危害模拟[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.

[11] 郑斌黎. 一种防止加煤料时煤气泄漏的煤气发生炉: CN210711422U[P]. 2020-06-09.

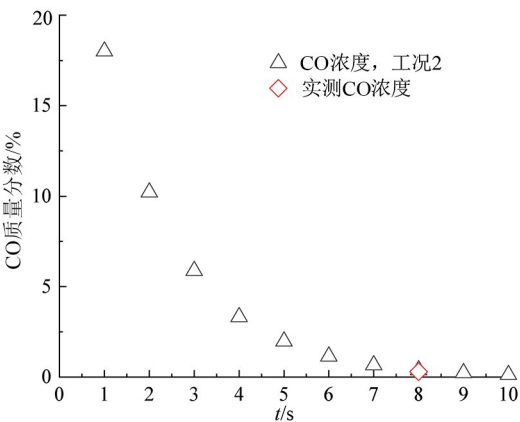


图 8 CO 质量分数随置换时间变化(工况 2)

Fig.8 Variation of CO concentration with the replacement time (case 2)

到最优工况并进行试验验证。结果表明:

1) 相同进气管长度下,在缓冲煤仓进煤口侧壁上呈 0°环向均布的进气孔置换效果优于 90°进气孔。相同置换时间下,设置 0°进气孔的缓冲煤仓内 N_2 含量更高,封堵效果更好。

2) 采用与水平方向成 0°角的环向均布的进气孔,相同吹扫时间下,长度为 330 mm 的进气管优于 140 mm 及 665 mm 的进气管,不仅能利用吹扫流速和压力将缓冲仓内滞留煤气吹至顶部煤气出口管道中,且 N_2 的入射速度更快,置换时间更短,更有利于提高生产的安全性。