

基于数值模拟的悬浮式物料输送系统气孔设计方法研究^①

郭 盛^② 张东利^③ 雷 磊 刘 建 黄 伟

(北京交通大学机电学院 北京 100044)

摘 要 为了研究悬浮式物料输送系统气孔因素(气孔直径、气孔间距、孔组位置等)对系统气垫场形态的影响,提出了基于气体流场特性理论的研究模型。应用计算流体力学软件分析了气孔因素对气垫场形态的影响方式,对所得结果利用数值方法进行了处理分析,得出了气孔因素对气垫场的影响方式。结合模拟数据,开展了相应的对比实验,对数值仿真分析结果进行了验证。提出了基于气垫场理论的悬浮式物料输送系统气孔设计方法,给出了气孔直径、气孔间距和孔组位置的最佳设计参数,完善了悬浮式物料输送系统的设计方法。

关键词 悬浮式物料输送系统, 气垫场形态, 气孔因素, 数值仿真

0 引 言

悬浮式物料输送系统以气垫支撑代替传统的接触式滚动支撑进行物料输送,从而大大地减少皮带的磨损,克服了物料输送过程中的运行不平稳的问题,极大地提高了物料输送能力,同时降低了设备的能耗,减轻了设备的重量,减少了设备生产成本,使用寿命也有了很大的延长。鉴于悬浮式物料输送系统的众多优点,国内外逐步对其展开研究。Akira Rinoshika 等^[1]提出了一种全新的气动输送系统,并搭建了物料循环系统对其进行了实验研究,以降低系统运行阻力,提高系统的运量;Amromin^[2]提出,通过合理设计船体的底部结构可以在船与水之间形成稳定的气垫层,降低船的运行阻力,综合能耗降低 30%;Cadafalch 等^[3]对有限体积内的稳定流场和热交换进行了数值计算,得到了有限体积内的流场特性;Li 等^[4]提出了气垫场的楔形缝隙流动模型,对气孔的不同排列方式进行了理想状况下的数值模拟,得到了理想状况下最佳气孔布置方式;Meng 等^[5]对悬浮式物料输送系统所用风机进行了能耗分析,提出了悬浮式物料输送系统专用风机的设计方法,通过实验验证取得了良好的效果;庞明军

等^[6-8]对气垫场的压力和气膜厚度分布进行了理论分析,在此基础上基于 fluent 软件对气垫场进行了数值模拟,并与理论值进行对比分析;季新培等^[9]人研究了气垫带式输送机形成稳定气膜的布孔方式;李剑峰等^[10]对气垫流场进行了实验研究,得到了气垫流场的速度和压力的分布规律。

影响悬浮式物料输送系统气垫场形态的因素有很多,诸如供气系统的供气流量和供气压力、气室的结构、盘槽加工精度等因素都直接或间接地对气垫场的形态产生影响,其中气孔因素是与气垫场形态最直接相关的影响因素,气孔的直径、排布方式等都直接决定着气垫场的具体形态。但在目前的研究中关于气孔因素的研究却仍不充分,业内经常使用的《运输机械选型设计手册》中也只提到了流量和压力的设计计算方法,却忽略了气孔直径、气孔排布方式等因素的影响,而这些因素在一定程度上可以说是决定悬浮式物料输送系统整体性能的关键性因素,对系统设计有着至关重要的作用。本文使用数值仿真的方法对气孔直径、气孔间距和孔组位置关系对气垫场形态的具体影响方式进行研究,得出了各个因素对悬浮式物料输送系统气垫场的影响方式,并对结果进行了实验验证,通过对比分析,给出了基于气垫场理论的气孔设计要点。

① 国家自然科学基金(51075025)和教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0769)资助项目。

② 男,1972 年生,博士,副教授;研究方向:机构学;E-mail:shguo@bjtu.edu.cn

③ 通讯作者,E-mail:1125689@bjtu.edu.cn

(收稿日期:2012-08-15)

1 气孔直径对气垫层压力的影响

系统的工作原理是通过盘槽上的气孔供气,形成气垫支撑,从而实现物料的悬浮运输。因此,气孔的设计及优化对系统有着至关重要的作用。本文通过设定气室内气压和气垫层厚度改变气孔直径大小的方式来研究不同气孔直径条件下的气垫层内压力分布和流量大小,通过数值分析得出气孔直径对气垫场形态的影响。

由于气孔附近气膜厚度无明显变化,气体流动可视为平行圆盘间的径向缝隙源流动,为了充分研究气孔对气垫场形态的影响,假设气垫层厚度不随位置变化,由此得到了本文研究的基本模型,如图1所示。



图1 气孔附近气体流动模型

设定气垫层厚度4mm和气室内压力4000Pa为研究条件,利用fluent软件研究气孔直径由2mm增大到7mm的过程中,气垫层内压力的变化情况,研究气垫层压力随气孔直径变化的趋势。图2分别为孔径为2~7mm条件下气孔附近气垫层的压力分布云图。从云图中可以直观地看出不同孔径情况下气垫层形态有着较大的区别。

为了深入地揭示气孔直径对气垫场形态的影响,提取不同位置上的压力数值,应用数值方法进行

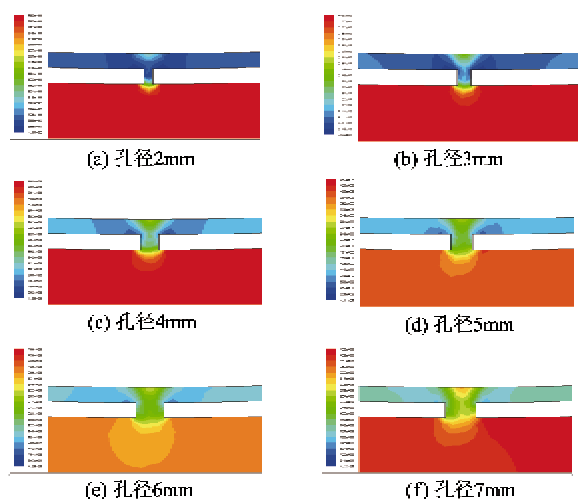


图2 不同孔径下气垫层压力分布云图

分析,得出了不同孔径情况下气垫层压力及其峰值的变化曲线(如图3所示),气垫层气压峰值的增长量如图4所示。

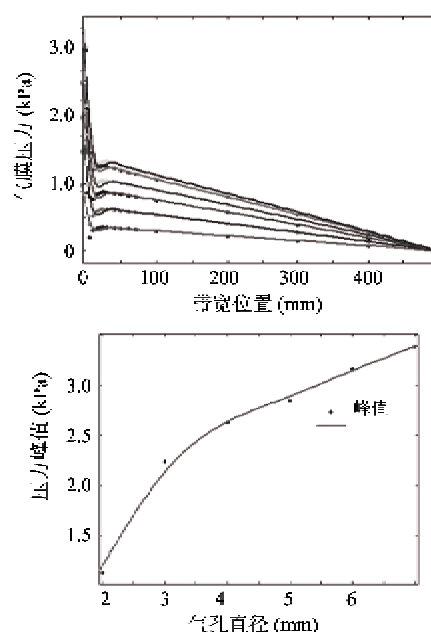


图3 不同孔径情况下气垫层压力及峰值变化曲线

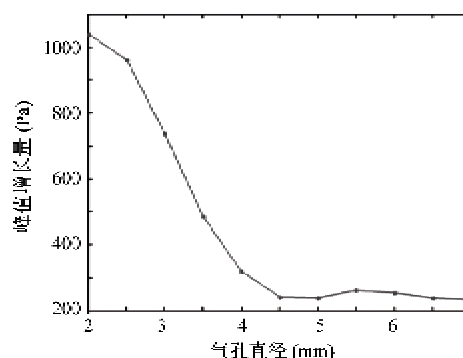


图4 不同孔径下气垫层压力峰值增长量

从图3及图4中可以看出,在气孔直径增大的过程中,峰值变化量在气孔直径2mm到5mm之间呈逐渐下降趋势,下降速度较快。从5mm处开始,峰值变化量逐渐趋于稳定。这种情况说明气孔直径在从2mm变化到5mm的过程中,气垫层压力峰值迅速增大,增大速度随气孔直径的增大而降低。当气孔直径增大到5mm以后,气垫层压力峰值增长率趋于稳定,增长缓慢。

由于气流马赫数较小,气体可视为处于不可压缩状态,因此在分析中可以忽略气体可压缩性带来的影响。表1为不同孔径条件下,气孔的质量流量 Q_m 和体积流量 Q_v 的变化数据, ε 为气体压缩比。由此得到了不同孔径情况下的质量流量和体积流量

的变化曲线,如图 5 所示。

表 1 孔径变化对风量的影响

孔径(mm)	2	3	4	5	6	7
Q_a	0.13	0.19	0.23	0.25	0.28	0.28
Q_v	0.11	0.15	0.18	0.20	0.23	0.23
ε	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22

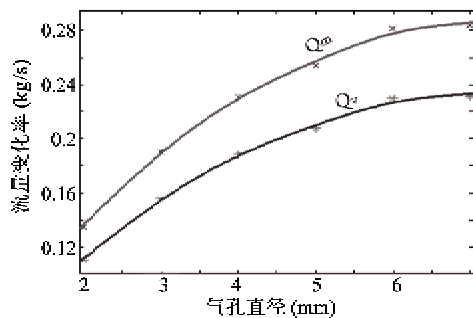


图 5 质量流量和体积流量的变化曲线

结合不同孔径条件下的压力和流量两方面的变化情况,可以发现在气孔直径增大的过程中,只需增加到压力峰值增量最大的气孔直径即可,即气垫层压力峰值曲线的导函数值降低到稳定值时的孔径,如图 4 所示,此时孔径最优。按照综合能耗最优理论,如果继续增大气孔直径,压力虽然会继续增大,但增量会逐渐减小,所需的供风量依然在继续线性增加,不利于综合能耗的降低。

2 孔间距对气垫场形态的影响

孔的排布方式一般包括孔间距和孔组之间的位置关系两个方面。孔间距主要是指相邻孔之间的距离,位置关系是指一组孔与另外一组孔之间的位置关系,本文的研究模型包括单排孔、双排孔、三排孔、梅花孔等几种方式,如图 6 所示。

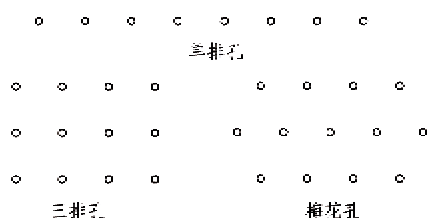


图 6 孔组位置关系示意图

选定气孔直径 4mm,进口压力 4000Pa 的单个孔周围气压分布曲线为研究基础,研究孔间距的变

化对气垫场形态的影响。经过曲线拟合后,可以发现气垫层压力的变化过程包括气流直射、产生涡流、均匀递减三个阶段,气垫层内的气压分布曲线如图 7 所示。

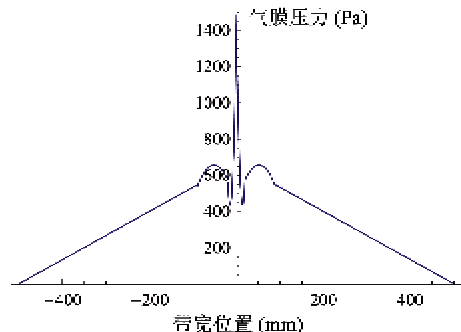


图 7 单气孔情况下气垫层压力分布曲线

以单气孔气垫压力分布函数为基础,进行函数耦合,便能得到两孔之间气压的分布情况。以此来研究在气室压力、气孔直径相同的情况下,气孔间距变化对气垫层形态的影响。

从图 7 可以看出气垫层压力分布函数应为分段函数,本文利用数值分析手段对气垫层压力的分布进行分段函数拟合,得到了表征气垫层压力变化的二次分段函数:

$$\begin{cases} 2096 - 387.5x + 25.42x^2, & 0 \leq x < 10 \\ 457 + 41x - 1.04x^2, & 10 \leq x < 20 \\ 761 + 8.2x - 0.16x^2, & 20 \leq x < 30 \\ 884 - 0.25x - 0.015x^2, & 30 \leq x < 50 \\ 931 - 1.845x, & 50 \leq x < 500 \\ 2096 + 387.5x + 25.42x^2, & -10 \leq x < 0 \\ 457 - 41x - 1.04x^2, & -20 \leq x < -10 \\ 761 - 8.2x - 0.16x^2, & -30 \leq x < -20 \\ 884 + 0.25x - 0.015x^2, & -50 \leq x < -30 \\ 931 + 1.845x, & -500 \leq x < -50 \end{cases} \quad (1)$$

结合函数曲线的分布规律,设定第一个孔中心为原点,取盘槽上表面位置为横轴,气垫层压力为纵轴,单个气孔的影响范围为 $2L$, 气孔直径 $2r$, 湍流区直径 $2R$, 两孔间距为 x , 则孔间距的分布情况可分为以下四种:

情况 1: $x < 2r$, 如图 8(a) 所示。两孔间距较小,开孔密度大,单位面积盘槽上气孔多,导致气室内气体射出速度过快,增加了整体综合能耗。

情况 2: $2r < x < 2R$, 如图 8(b) 所示。两孔之间形成一段平稳的气垫层,可以有效地改善气垫层

的平稳性。

情况3: $x > L$, 如图8(c)所示。两孔之间会形成一段平稳的气垫层, 由于两孔间距较大, 造成稳定区段较长, 整体压力偏小, 相应地降低了气垫层承载能力。

情况4: $x > 2L$, 如图8(d)所示。两孔间距过大, 气孔之间的影响降低, 形成了两个独立的影响区, 降低了气垫层的稳定性。

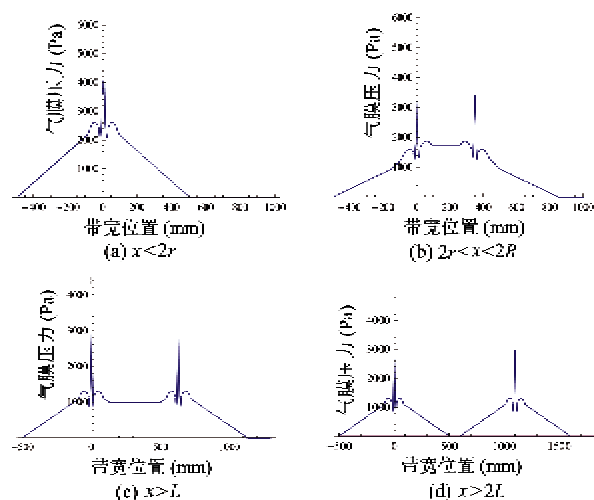


图8 不同孔间距情况下气垫层压力分布情况

经过上面的数学模型分析, 得出了孔间距对气垫场形态的影响结果。图9所示为利用 fluent 软件模拟所得到的不同孔间距时气垫场压力的分布曲线, 与理论结果一致。

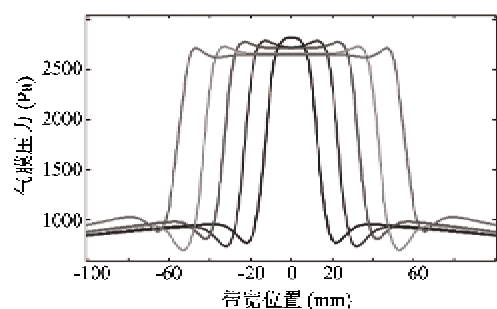


图9 不同孔距下两孔之间压力曲线

为了评判不同孔间距的优劣, 本文引入两孔之间的压力平均值 E , 压力标准差值 σ 两项指标对结果进行对比分析。得到如下结论:

两孔之间距离 $x_4 > x_3 > x_2 > x_1$; 两孔之间压力积分值相同, 因此 $E_1 > E_2 > E_3 > E_4$; 通过计算可得到 $\sigma_4 > \sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$ 。

从数值计算结果来讲第一种情况最为理想, 但在设计中考虑到气孔对风量的影响, 开孔距离不能

太小, 因此一般不采用该情况下的孔间距。

3 孔组位置关系对气垫场形态影响

基于孔间距的研究结果, 选取四种孔排布方式, 单排、双排、三排、梅花点式, 作为研究对象, 就孔组位置关系对气垫场形态的影响进行分析研究。设定孔距为 100mm, 行距为 200mm。以(1)式为理论依据进行计算仿真, 得出了如图10所示的不同孔组位置关系下气压分布的三维图像。

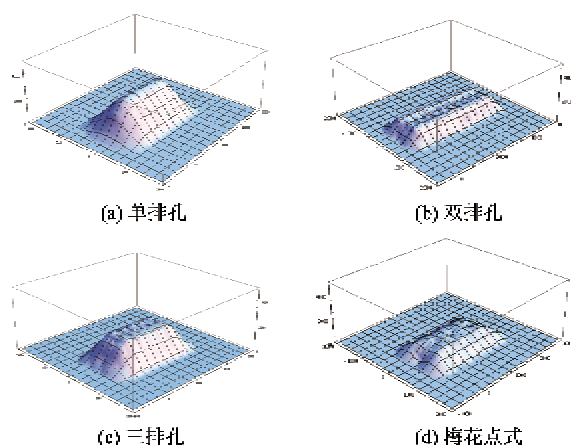


图10 不同孔组位置关系下的三维气压分布图像

对比四种孔组位置关系的影响结果可以发现, 单排孔排布方式下气垫层气压峰值较高, 平稳区较窄, 气压从中间向两侧迅速下降, 适用于带宽较窄的输送机。

双排排布方式下气垫层稳定性较单排的好, 峰值出现在稳定区边缘, 具体位置取决于孔组之间的距离, 气垫层中部气压较稳定, 由于气孔数是单排的两倍, 因此所需流量要相应加大。双排排布方式主要适用于载荷较小、平稳性要求高的输送机。

三排排布方式下气压分布相对合理, 所需流量较大, 适用于重载情况下的输送机。

梅花点式排布方式, 气孔数较少, 承载能力较差, 稳定性能较好, 适用于载荷轻但平稳性要求高的输送机。

4 实验及对比分析

综合多因素对悬浮式物料输送系统气垫场形态的影响方式, 以数值仿真结果为理论依据, 搭建了具有多参数采集功能的实验系统, 如图11所示。系统采用多传感器控制技术, 结合智能控制方法, 实现了对气垫层压力、流量、气垫层厚度、气室压力等重要



图 11 实验系统

参数的实时采集分析。通过对所得数据的分析研究,对前面的数值仿真结果进行实验验证。

4.1 孔径与孔间距影响的实验验证

本实验以能耗最优为目标函数,寻找单排孔的最佳气孔排列方式,将结果与前面的数值仿真结果进行对比。本实验中气孔直径由 3mm 增大至 7mm,间隔为 1mm,气孔间距由 25mm 增大至 150mm,间隔为 25mm。对于不同的气孔排列,边缘平均膜厚从 0.3mm 增大至 0.55mm,间隔为 0.05mm,采集系统的供气流量、气室压力、输送带的运行阻力等实验数据。

悬浮式物料输送系统的综合能耗由牵引电机功率和风机功率组成,可以表示为

$$P = P_f + P_g = 1.21QH + 3Fv \quad (2)$$

其中: P_f ——风机功率(W)

P_g ——牵引功率(W)

Q ——风机供气流量(kg/m^3)

H ——气室压力(Pa)

F ——输送带运行阻力(N)

v ——输送带运行速度(m/s)。

通过实验发现孔径为 3mm、孔距大于 100mm,孔径为 6mm 和 7mm、孔距为 25mm 时均难以形成稳定的气垫层,所测得的数据并不能很好地验证数值仿真结果。因此实验采集了形成稳定气垫层后的一系列数据,将实验数据带入式(2)即可得到系统运行总功耗。以功耗最低理论为评判依据对数值仿真结果进行验证。图 12 所示为不同孔径不同孔距下边缘平均膜厚与系统总能耗曲线。

从图 12 可以看出,相同孔径不同孔距的总功耗都是随着边缘平均膜厚的增大先减小后增大,可得到在稳定载荷不同孔径下的最小总有用功率,如表 2 所示。从表中可以看出,当孔径为 5mm 左右时系统有用功率最小,对比理论分析结果可以发现,实验所得的最佳气孔直径以及气孔间距与理论分析所得的结果是相同的。

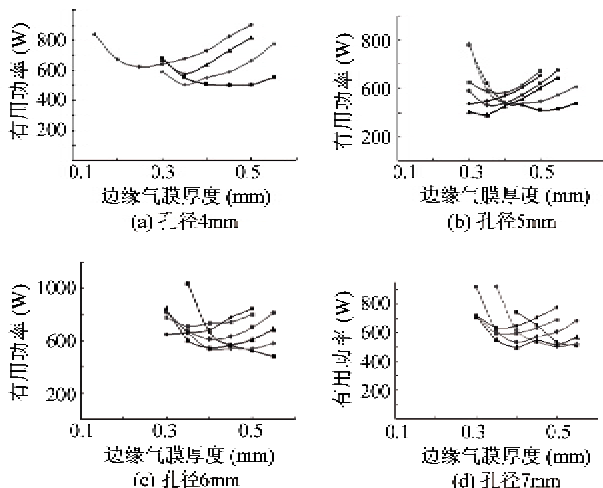


图 12 边缘平均膜厚与系统总功耗曲线

表 2 各孔径下的最小总有用功率数据

孔径(mm)	3	4	5	6	7
孔距(mm)	25	50	75	25	75
总功率(W)	403	504	381	476	499

4.2 孔组位置关系影响的实验验证

本实验在有用功率相等的条件下采集单排孔、三排孔和梅花孔排列方式下的不同位置上的气膜压力数据,利用数学方法对数据进行了处理分析,得到了图 13 所示的不同气孔排列方式下气垫层压力的分布曲线。对比实验与理论数据,结合实际运行效果,可以发现两者的结论是一致的。

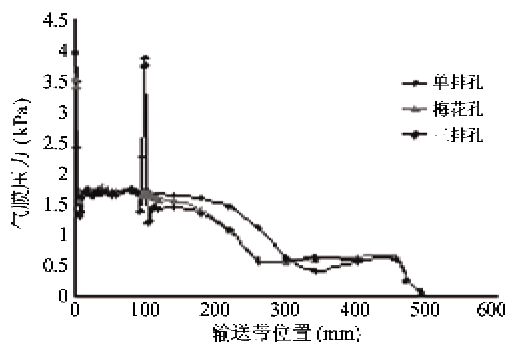


图 13 不同孔组位置关系下气垫层压力分布

5 结论

本文针对影响悬浮式物料输送系统气垫场形态的气孔直径、气孔间距和孔组位置关系三个因素进行了模拟仿真,利用数值分析方法得出了三个因素对气垫场形态的影响方式,通过实验验证,得出了以下结论:

(1)气孔直径对气垫层内压力分布有着较大影响,气垫层内压力随气孔直径的增大而增大;压力峰值增长率随着气孔直径的增大而减小,在气孔直径5mm左右时增长率降到最低,并基本保持稳定。

(2)气孔直径对气体流量影响具有线性特性,即流量随气孔直径的增大呈近似线性变化。综合气孔直径对气垫层压力和流量的影响以及实验数据可以判定,直径在5mm左右时整体能耗组成最优。

(3)气孔间距直接影响到相邻气孔压力场的耦合结果,决定了相邻气孔间气垫层压力的分布形态,从而间接影响了气垫层的稳定性能。本文给出了经过函数耦合后得到的气垫场压力分布情况,对悬浮式物料输送系统的设计具有较高的参考价值。

(4)孔组位置关系决定了气垫层的有效承载范围,直接影响到悬浮式物料输送系统的承载特性。本文通过数值仿真得出了不同孔组位置关系下气垫场压力的分布情况,给出了系统承载要求与孔组位置之间的对应关系,为系统的设计提供了理论依据。

参考文献

- [1] Rinoshika A, Yan F. An experimental study of horizontal self-excited pneumatic conveying. *ASME J Fluids Eng*, 2012,134: 041302-1
- [2] Amromin E L, Metcalf B, Karafiath G. Synergy of resistance reduction effects for a ship with bottom air cavity. *ASME J Fluids Eng*, 2011,131: 021302
- [3] Cadafalch J, Perez-Segarra C D, Consul R, et al. Verification of finite volume computations on steady-state fluid flow and heat transfer. *ASME J Fluids Eng*, 2002,124: 11-20
- [4] Li J F, Zhang S L. Optimization of groove-hole distribution with equidistant and unequal diameter on air cushion belt conveyor. In: *Proceedings of the International Conference on Advances in Product Development and Reliability*, Switzerland, 2008. 635-642
- [5] Meng W J, Wang Z L. Testing and optimum designing for special fan used by air cushion belt conveyor. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on Test and Measurement*, Shenzhen, China, 2003. 3163-3166
- [6] 庞明军,张锁龙. 气垫带式输送机气垫压力场研究与数值模拟. *起重运输机械*, 2006, (3): 59-62
- [7] 巢建伟,庞明军,张锁龙. 气垫带式输送机横向出流理论模型的研究. *起重运输机械*, 2007, (2): 41-44
- [8] 庞明军. 气垫带式输送机气膜厚度理论研究. *煤矿机械*, 2005, (6): 46-49
- [9] 季新培,黄松元. 气垫带式输送机形成均匀稳定气膜的布孔研究. *连续输送技术*, 1992, (3): 18-29
- [10] 李剑锋,张锁龙,周寒秋. 气垫带式输送机气垫流场实验研究. *煤矿机械*, 2009, (3): 71-73

Study on the air-hole design of air cushion belt conveyors based on numerical simulation

Guo Sheng, Zhang Dongli, Lei lei, Liu Jian, Huang Wei

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract

To investigate the influences of the air-hole factors (hole diameter, distance between holes, hole group position, etc.) of an air cushion belt conveyor on its air field form, a research model was built based on theory of gas flow field characteristics. The air-hole influences were comprehensive simulated by using the computational fluid dynamics software, and the results were processed and analyzed by using the numerical method. Thus the ways of the air-hole factors' impacting on the cushion field were revealed. According to simulated data, the comparative experiments are carried out. The simulation results are well verified by the experimental data. The air-hole design method for air cushion belt conveyors was put forward based on the theory of air field. The optimal air-hole design parameters were given. The design methodology for air cushion belt conveyors was improved.

Key words: air cushion belt conveyor, air field form, air-hole factor, numerical simulation