

气孔形状对气垫带式输送机影响的数值模拟

李 旭¹, 曾学文², 黄晓明¹, 黄天健¹, 宋继坤³

(1. 国能九江发电有限公司, 江西 九江 332000; 2. 国家能源集团江西电力有限公司, 江西 南昌 330000; 3. 烟台龙源电力技术股份有限公司, 山东 烟台 264000)

摘 要:气垫带式输送机因其节能高效、安全稳定等特点在各行业中得到广泛应用。以往针对气垫带式输送机的研究大多集中于气室结构和气孔分布特征等处,对气孔形状研究较少。文中采用数值模拟方法,对比分析了四种不同气孔形状对气垫带式输送机性能的影响规律,获得输送机内流场和压流分布特征。研究分析发现,当采用缩放孔时,气垫带式输送机性能达到最优。该研究有助于指导气垫带式输送机优化设计。

关键词:气垫带式输送机;气孔形状;湍流;数值模拟

中图分类号:TH 222 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2025)05-0022-04

0 引言

带式输送机是一种广泛应用于采矿、电厂、港口、粮食等行业工业生产过程的机电设备^[1]。随着国家对节能减排设备及智能化要求的逐步提高,带式输送机的性能提升及机电一体化设计受到人们的广泛关注。传统带式输送机大多采用托辊式,即传送皮带由托辊承托,但也有研究者降低摩擦阻力开发了无接触带式输送机,如磁悬浮式或气垫带式等。气垫带式输送机由于其节能高效、安全稳定等特点在工程应用中逐步得到推广。

气垫带式输送机依靠气室支撑传送皮带,气室顶部开有气孔,当输送机工作时,传送皮带及物料被气孔中喷出的气流推升至悬浮状态,然后由驱动轮带动运转,可实现物料的长距离输送。由于传送皮带的运行状况受到气室与皮带之间气垫的直接影响,因此气室结构及气孔分布等影响着输送机的运行效果,研究人员也对此开展了大量研究。习妍锋利用数值模拟的方法,研究了不同气室结构和气孔分布对气膜内压力的影响,确定了较好的月牙弧形气室结构和气孔交错布置方式^[2];郝志杰对气垫带式输送机气室与卸料铲及清扫板的配合关系进行三

维建模,并模拟获得了气垫内压力的变化趋势^[3];杨秀峰对气垫带式输送机的气室和盘槽结构进行了优化,提出一种V形气室,并进行了气垫承载实验测试^[4];杨方明研究了气孔分布方式对气垫带式输送机能耗的影响,并进行了流固耦合分析^[5];徐成祥在气室内安装了导流片,研究了双圆弧梯形气室与箱型气室内的流动状况,并确定安装圆头导流片的双圆弧梯形气室,获得最优性能^[6];田利强利用数值模拟研究了气垫厚度、气垫压力和气垫承载力的关系^[7]。随着国家一系列节能减排政策的持续推出,气垫带式输送机的应用前景广阔,其研究广度和深度也必将进一步拓展。另外,从以往研究可以看出,数值模拟在气垫带式输送机的分析研究中得到了广泛的应用。数值模拟能够获得气垫带式输送机内部流场及压力分布状况,分析各工况条件的影响,从而有助于提升输送机性能,对气垫带式输送机的应用推广具有积极的作用。

然而,目前的研究大多关注气室结构和气孔分布对气垫带式输送机性能的影响,对气孔形状的研究较少,虽然有部分研究者开展了类似的研究,但气孔形状设计较少,且几何模型与气垫带式输送机实际结构相差较大,对气孔形状的影响分析不全面。因此,文中将针对气垫带式输送机气孔形状的影响开展数值

收稿日期:2024-10-21

作者简介:李旭(1992),男,本科,工程师,研究方向为燃料输煤。

模拟分析,对比平直、渐缩、渐扩和缩放四种形状的气孔对输送机气垫内压力和速度的影响,以及对其流量和承载能力的影响,从而获得最优的气孔形状设计。此研究对气垫带式输送机进一步提升性能、降低能耗具有重要意义。

1 数值方法

气垫带式输送机内空气进行了复杂的湍流流动过程,在压力入口到气室内区域,空气流速较低;在气孔附近及气膜,空气流速较高,且流速数值变化极快。因此,文中考虑了空气的压缩性,实现气孔内空气流动的准确捕捉。模拟求解控制方程包括连续性方程、动量守恒方程和理想气体状态方程,如式(1)-(3)所示。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

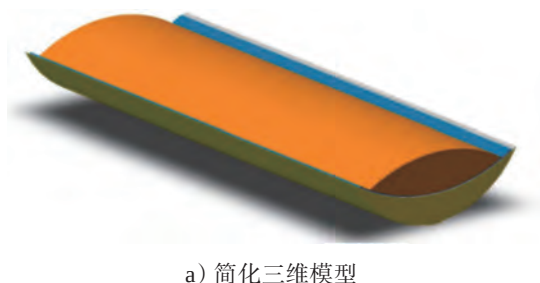
$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\tau) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$pV = mR_g T \quad (3)$$

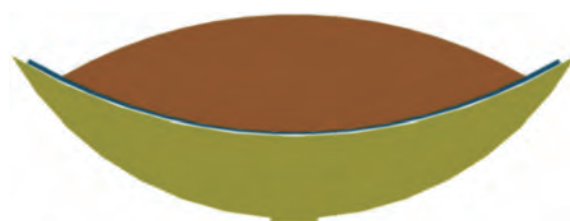
模拟分析采用有限体积法,对包括压力、动量和能量方程均采用了二阶精度进行离散,压力速度耦合采用了高精度PISO求解器,湍流模型选用了具备较高稳定性的可实现k-epsilon模型。为进一步保证计算精度,模拟收敛判定条件设置残差为 1×10^{-6} 。

2 几何模型及网格

气垫带式输送机在工程应用中的具体形式结构多样,其长度可达几百米到几千米,具备一定的可调节性。气垫带式输送机实际工作部分为承载物料段,主要部件包括气室和皮带,其横截面和简化三维模型如图1所示。可以看出,实际工作段为横截面沿轴向进行拉伸所得,而气室上的气孔分布则呈周期性规律变化。



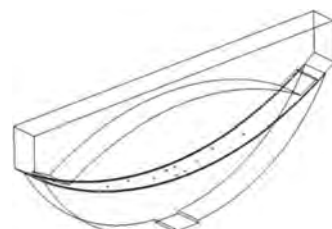
a) 简化三维模型



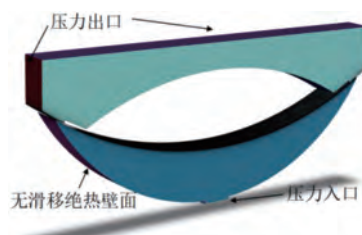
b) 横截面

图1 气垫带式输送机承载物料段

基于此,文中将数值模拟区域划分为气孔分布的一个变化周期,实现高精度的空间解析力,从而聚焦于气孔形状对气垫带式输送机性能的影响,得到的模拟流体区域三维结构透视图及其整体网格划分如图2所示。文中采用双圆弧气室,气孔进行交错排列。由于气垫带式输送机流场结构复杂,对整个模拟区域采用了灵活多面体网格划分技术,对关键壁面附近网格划分了边界层,从而精确捕捉气孔形状变化对壁面附近流动情况的影响。与此同时,在气孔和气膜附近进行了网格加密处理,除边界层外的最小网格尺寸达到0.5 mm,充分解析细微处流场及压力分布特征。



a) 透视图



b) 整体网格

图2 模拟区域

图3展示了气室中心两排气孔附近的网格划分情况,同时也展示了研究模拟的四种工况的气孔形状,即平直孔、渐缩孔、渐扩孔和缩放孔,四种气孔的最小直径保持一致。最终,四个工况的网格总数均为450万到500万个之间。文中进行了网格独立性验证,确保目前采用的网格划分策略兼顾计算稳定性与精确度。

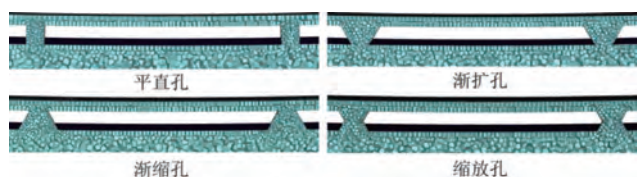


图3 局部细化网格

模拟区域底部矩形被设置为空气入口,采用了压力入口边界条件,四种气孔形状工况均设置为固定压力值 2000 Pa。模拟区域顶部和左右两侧采用压力出口边界条件,所有工况均设置为固定压力值 0,温度为 300 K,模拟大气环境。模拟区域前后两侧则为周期性边界,所有壁面均设置为不可滑移的绝热边界。

3 模拟结果

3.1 速度分布

图4展示了模拟所获得四种气孔形状工况下,气膜内的速度分布。所有工况均采用相同图例标尺,即最低速度值为 0,表示为蓝色,最高速度值为 40 m/s,表示为红色。此位置位于气膜内距离输送带底面 0.5 mm 处的弧形平面上,能够反映气膜内主要流场特征,从而分析不同气孔形状对气垫带式输送机工作性能的影响。从图中可以清晰地看出气孔所在位置,即交错排列的圆形高速区域。四种气孔形状工况下,模拟所获得整体流场分布特征类似,呈左右对称结构,且气膜中部区域速度较低。随着气膜向两侧延伸,空气不断从气孔喷出,气膜内速度值逐渐上升,图示颜色由蓝色逐渐变为绿色。可以看出,缩放孔工况下速度回升较快,这说明缩放孔工况下气膜内气流速度较快。

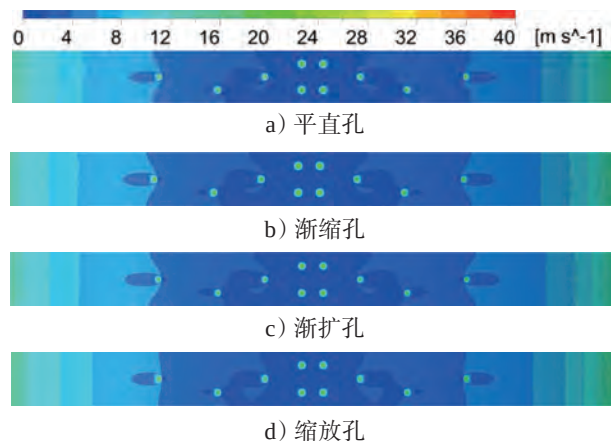


图4 气膜内速度分布

图5展示了四种气孔形状工况下模拟区域横截面

上的速度分布。由于气垫带式输送机整体尺寸较大,而气膜厚度相比小很多,因此,图中将展示区域进行放大,仅聚焦于气膜中心位置处附近,并将横截面设置于气孔中心位置,从而能够更清晰对比不同工况下的气孔周围的速度分布特征。可以看出,气孔形状对其内及其附近产生了显著的影响。平直孔与缩放孔工况下,气孔内速度分布较均匀,速度值均较高;其他工况下,由于狭小喉部的出现,高速区更集中。值得注意的是,渐扩孔工况下,气孔内速度分布极度不均匀,在气孔壁面附近同时存在橙色的高速区域和蓝色的低速区域。

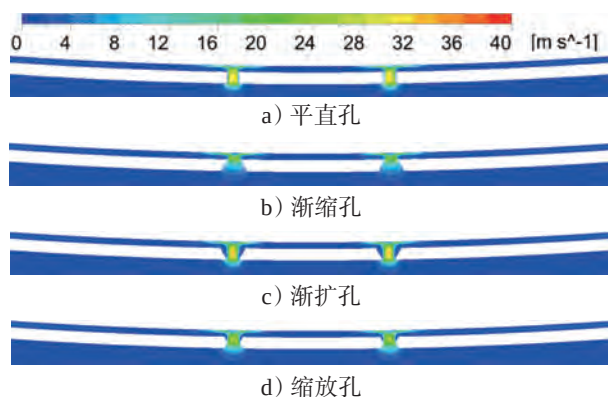


图5 气孔附近横截面速度分布

3.2 压力分布

气垫带式输送机工作时,依靠气膜内的高压气体对输送皮带产生推力,将输送皮带及物料推至悬浮状态,因此气膜施加于输送皮带上的压力分布特征对输送机性能研究至关重要。图6展示了气膜内的压力分布,所有工况均采用相同图例标尺,即最低压力值为 0,表示为蓝色,最高压力值为 2 000 Pa,表示为红色。从图6中可以看出,平直孔和渐缩孔工况下气膜压力分布情况类似,均呈现中部高、两侧低的特征。然而在另外两个工况(渐扩孔和缩放孔工况)下,气膜压力分布出现显著性差异。其中,渐扩孔工况下,气膜内压力值较小,表现为黄色的较高压区域面积较小,压力分布从中心向两侧衰减较快,对输送皮带的承载不足;缩放孔工况下,气膜压力分布则截然相反,出现橙色高压区域,且压力分布从中心向两侧衰减较慢,这种压力分布能够对输送皮带提供较大的承载能力。

为进一步分析气膜压力分布产生差异的原因,图7展示了模拟区域横截面上的压力分布情况,横截面位置与图5流场分析时保持一致。从图7中看出,气孔内压力沿气孔轴向的变化趋势与图5所展示的速度变化

情况相反。空气从下方的气室进入气孔时,速度升高,压力降低;而当空气抵达输送皮带壁面附近时,速度降低,压力则升高。这种变化趋势符合流体力学伯努利方程。在平直孔工况下,气孔内部压力变化不大,红色高压区域仅在空气抵达输送皮带壁面处附近才出现。渐缩孔工况下,虽然气孔内存在高压区,但空气从气孔流出后立刻到达输送皮带壁面,未能充分膨胀,故施加于壁面的压力相比平直孔虽然略高一些,但相差不大,这种现象从图6(a)和图6(b)的对比中也能发现。渐扩孔工况下,空气进入气孔内立刻膨胀,气孔内压力值较低,在图7(c)中表现为气孔内部的绿色低压区域,进而使得渐扩孔工况下气膜内压力较低,如图6(c)。在缩放孔工况下,空气进入气孔后,经历渐缩段进行加速,通过最窄喉部后则经历渐扩段进行膨胀,因此空气在气膜内有足够长的升压距离,能量得到充分释放,从而产生如图6(d)所示的气膜内较高压力值。

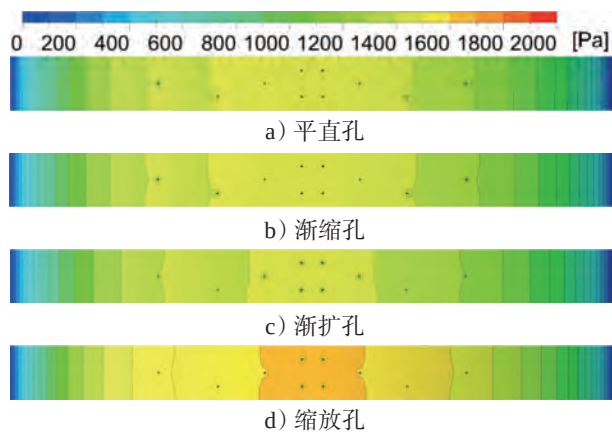


图6 气膜内压力分布

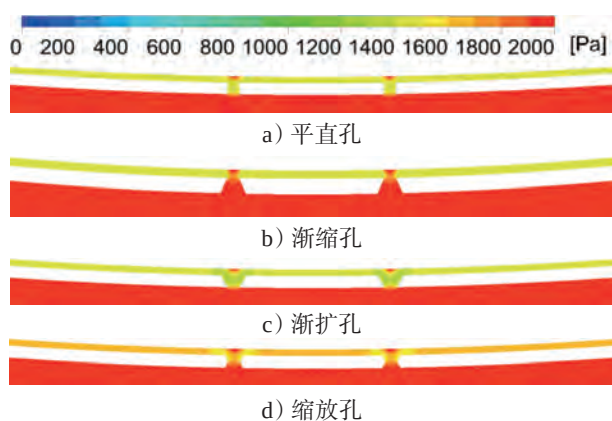


图7 气孔附近横截面压力分布

3.3 不同气孔形状对性能影响

为进一步分析气孔形状对气垫带式输送机的运行的整体性能影响,图8中以柱状图展示了不同工况下气膜内

最高流速和平均流速的统计值,并以点划线,在图中右坐标轴表示了气垫带式输送机的整体空气流量。从图8中可以看出,四种工况下的速度值与流量差距较小,但仍呈现出一定规律。在渐缩孔工况下,气膜中具有最大的最高流速和平均流速值,在渐扩孔工况下,具有最低值。另外,在缩放孔工况下,气垫带式输送机的空气流量最大。

图9展示了四种气孔形状工况下,气膜内压力值的统计数据。可以看出,缩放孔工况下具有最大的平均压力和最高压力值,而渐扩孔的平均压力和最高压力值最小,这种趋势与图7分析结果一致。另外,图9中以点线图的形式给出了四种工况下气膜内压力分布的不均匀度。缩放孔工况下,压力分布不均匀度最低,表明此工况下气膜对输送皮带及物料能够产生既均匀又稳定的强承载力。

由于在四种工况下,气膜压力和空气流量均发生变化。为控制变量,更深入地分析气孔形状对定量空气所能产生承载力的影响,文中研究计算了四种气孔形状工况下,气膜内单位质量流量的空气对整个输送皮带底面产生的推力,如图10所示。此数值根据输送皮带面积、输送皮带底面的平均压力以及输送机空气流量计算得到。单位空气流量产生推力由大到小依次是:缩放孔、渐缩孔、平直孔、渐扩孔。因此,缩放孔应用于气垫带式输送机的综合性能达到最优,渐扩孔综合性能最差。

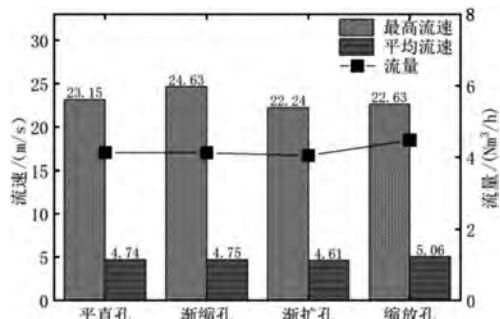


图8 不同工况下气膜速度统计数据

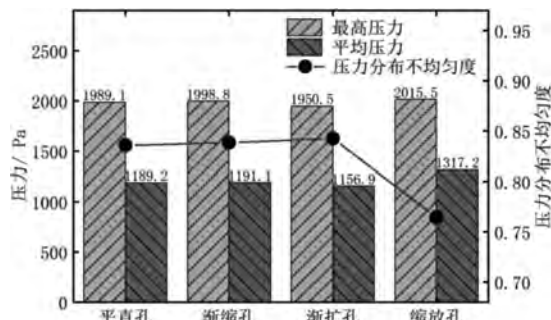


图9 不同工况下气膜压力统计数据

(下转第35页)

方式下线路分闸重燃相地过电压值较小方式高出0.04~0.13 p.u.,小方式变电站带出线的过电压水平与小方式基本相同。

5) 线路配置并联电抗器能够有效降低线路分闸重燃操作过电压水平,且补偿度越高降低效果越明显。在补偿度相同的情况下,线路首端配置并联电抗器与首末两端均配置并联电抗器效果接近。在并联电抗器补偿度为80%的情况下,可降低线路相地分闸重燃操作过电压约1.01~1.12 p.u。

6) 系统运行电压对操作过电压影响较小。电源电压提高5%,线路相地过电压值提高约1%~3%;电缆排列方式对分闸重燃过电压值影响很小。

4.2 建议

1) 为控制线路操作过电压水平,保证设备运行绝缘裕度,考虑到国内曾发生多起因操作过电压导致220 kV电缆故障的实际案例,建议220 kV电缆线路电源侧母线和电缆线路首末两端均配置避雷器。

2) 从抑制操作过电压角度,220 kV电缆线路没有配置并联电抗器的要求,须结合系统无功平衡决定是否配置并联电抗器。

3) 操作过电压产生机理较为复杂,影响因素也

很多,不确定性较高,在实际工程应用中应根据具体条件开展详细分析计算。

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局.交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范:GB/T 50064—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [2] 齐伟强,任志刚,陈平,等.220 kV城市长电缆芯线及护层中操作过电压研究[J].电瓷避雷器,2020(06):95-101,108.
- [3] 郑一鸣,刘石,刘浩军,等.220 kV电力电缆线路合闸操作过电压分析[J].高压电器,2020(04):153-158.
- [4] 解广润.电力系统过电压[M].北京:中国电力出版社,2018.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.绝缘配合 第1部分:定义、原则和规则:GB 311.1—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [6] 电力工业部.交流电气装置的过电压保护和绝缘配合:DL/T 620—1997[S].北京:中国电力出版社,1997.
- [7] 金作林,陈小月,文习山,等.海上风电场220 kV海底长电缆送出线工频及操作过电压研究[J].电瓷避雷器,2020(01):47-53.
- [8] 水利电力部西北电力设计院.电力工程电气设计手册(电气一次部分)[M].北京:中国电力出版社,1989.

(上接25页)

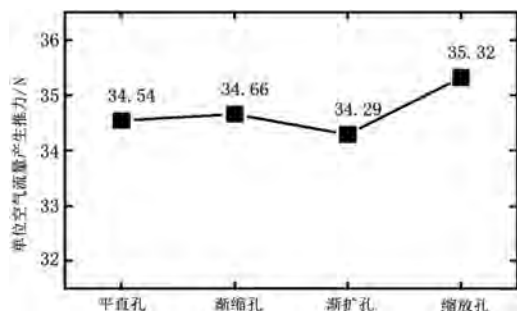


图10 不同气孔形状工况下气膜推力统计数据

4 结语

气垫带式输送机采用不同气孔形状时,气孔和气膜内流场与压力分布出现差异,会进一步影响气垫带式输送机整体性能。文中实施了四个具有不同气孔形状工况的数值模拟,采用相同的入口条件和出口条件,获得如下结论:

- 1) 气孔形状对气膜内速度值影响较小,采用缩放孔时,气垫带式输送机空气流量达到最大。
- 2) 在缩放孔工况下,气膜内平均压力和最高压

力值均达到最大,压力分布不均匀度最低。

3) 缩放孔应用于气垫带式输送机时,单位质量流量的空气在输送皮带壁面处施加的推力达到最大,此时,气垫带式输送机综合性能达到最优。

参考文献:

- [1] 张克亮.基于分布式光纤的矿用带式输送机温度监测系统设计与应用[J].机械制造与自动化,2023,52(02):228-232.
- [2] 习妍锋.气垫带式输送机标准节动态特性仿真分析与设计[D].宜昌:三峡大学,2023.
- [3] 郝志杰,姚艳萍,徐成祥.基于EDEM的气垫机中间卸料装置设计[J].太原科技大学学报,2023,44(06):551-554.
- [4] 杨秀峰.长距离气垫带式输送机关键技术研究[D].太原:太原科技大学,2022.
- [5] 杨方明.气垫带式输送机支撑机理与布孔方式研究[D].沈阳:东北大学,2022.
- [6] 徐成祥.气垫带式输送机气室结构改进及仿真分析[D].太原:太原科技大学,2022.
- [7] 田利强,寇子明,吴娟,等.气垫带式输送机的气垫流场特性研究[J].机电工程,2022,39(07):1004-1009,1016.