

DOI: 10.11779/CJGE20230116

开口条件下高速离心机机室流场模拟及试验研究

杨 鑫¹, 陈红永^{*1,2}, 黎启胜¹, 龚志斌¹, 宋 琼¹, 李心耀¹, 尹益辉^{1,2}

(1. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999; 2. 工程材料与结构冲击振动四川省重点实验室 四川 绵阳 621999)

摘 要: 为研究离心机机室开口条件下机室内流场特性及开口对风阻功率的影响, 首先基于 CFD (计算流体力学) 方法建立了某离心机机室流场分析模型, 针对机室开口状态进行了模拟, 对比了风口竖直及倾斜对换热的影响; 其次在某高速离心机上开展了流场测试试验, 获得了机室内压力及风速的空间分布, 及随离心机转速的变化规律, 并对比了圆盘转子与转臂转子的风阻功率差异。研究表明滑移网格技术可用于计算离心机机室内旋转流场, 倾斜通风口更有利于机室通风换热, 并降低离心机运行的风阻功率; 对旋转部件上凹坑等进行整流可有效降低风阻功率; 圆盘转子的压差阻力远小于转臂转子。通过合理设计通风口可提高机室换热效率, 研究可为高速离心机机室及温控设计提供参考。

关键词: 开口机室; 流场; 风阻功率; 模拟; 试验

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)05-1112-07

作者简介: 杨 鑫(1988—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事大型环境试验装备流体动力学及温控研究方面的工作。

E-mail: 413yangx@caep.cn.

Simulations and tests on characteristics of flow field of high-speed centrifuge chamber with inlet and outlet

YANG Xin¹, CHEN Hongyong^{1,2}, LI Qisheng¹, GONG Zhibin¹, SONG Qiong¹, LI Xinyao¹, YIN Yihui^{1,2}

(1. Institute of Systems Engineering, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China; 2. Sichuan Key Laboratory of Impact and Vibration of Engineering Materials and Structures, Mianyang 621999, China)

Abstract: To investigate the characteristics of flow field in centrifuge chamber with opening and the effect of opening on wind resistance power, firstly, based on the computational fluid dynamics method, the model for the flow field of a centrifuge chamber is established, and the opening state of the chamber is simulated. Secondly, the tests on the flow field are carried out on a high-speed centrifuge, and the spatial distribution of the pressure and wind speed in the centrifuge room, as well as the change rules with the centrifuge speed, is obtained. The difference of the wind resistance power between the disc rotor and the rotor arm is compared. The results show that the sliding grid technology can be used to calculate the rotating flow field in the centrifuge chamber and the inclined vent is more conducive to the ventilation and heat transfer of the chamber, and reduces the wind resistance power of the centrifuge operation. The rectification of pits on rotating parts can effectively reduce the wind resistance power. The differential pressure resistance of the disc rotor is far less than that of the rotary arm rotor. The heat transfer efficiency of the machine room can be improved by reasonably designing the vent, and the research can provide reference for the design of the machine room and temperature control of the high-speed centrifuge.

Key words: chamber with inlet and outlet; flow field; wind resistance power; simulation; test

0 引 言

土工离心机在运行时需克服机室内空气阻力做功产生风阻功率^[1-2], 根据能量守恒原理, 机室内的热源功率可以认为主要是来源于离心机风阻功率。为保证试验温度条件, 需要通过温控措施将机室内空气摩擦产生的热量排放到外界环境中。

目前离心机风阻功率的计算主要采用工程估算法^[3-5]及 CFD 方法。工程估算法假设机室内流场是线性分布的, 当离心机稳定工作后, 认为机室内的空气

随离心机以稳定的角速度旋转, 旋转空气的速度定义为随流速度, 随流比 (旋转空气速度与吊篮旋转线速度之比) 是重要的计算参数, 通过引入随流速度以及离心机旋转机构风阻系数, 推导得到风阻功率的工程计算方法。近年来, 基于 CFD 的离心机机室流场模拟方法得以发展应用, 徐太栋^[6]发展了精密离心机空气流场的数值模拟方法, 对负载的减阻方案进行了优化

收稿日期: 2023-02-13

*通信作者 (E-mail: 404567617@qq.com)

设计;陈红永等^[7]将 CFD 方法用于土工模型箱温度分析, Hao 等^[8]基于 CFD 分析了某大型土工离心机风阻功率;郭轶楠等^[9]在 ZJU400 上开展了类似的工作,预测的风阻功率精度与试验相比差异小于 10%。以上研究表明,通过 CFD 模拟可以获得机室内流场结构特征信息,并计算旋转机构的风阻系数和随流空气速度,对机室内流场结构特性和规律的精细模拟有助于计算离心机风阻功率以及通风温控设计。

大型土工离心机温控设计一般有降低机室气压、侧壁水冷机自然换热等方式。受限于试验测试手段,目前通过试验方法也难以获得机室内流场的全部流动信息。郑传祥等^[10]开展了低气压下土工离心机产热缩比模型试验研究,林伟岸等^[11]开展了离心机温控缩比模型试验,研究结果均表明低真空度是降低机室温度的有效手段。但在机室内常压条件下,通过机室壁面开通风孔进行通风换热温控的方式,比机室低气压及侧壁面水冷换热等方式更加经济易行。机室内外换气效率受到通风孔的位置、大小以及通孔形状的影响。机室壁面通风孔附近由于机室内外压差作用产生的空气射流,会影响机室内流场特征并且导致风阻功率升高。研究开口条件下机室内流场特征有助于机室温控设计及优化。因此,需针对离心机机室流场采用精细 CFD 模拟技术,及流场实测开展机室开口状态下的风阻功率等特性研究。

采用 CFD 方法精细模拟开口条件下离心机机室内流场特性,建立适用于开口机室的内流场数值模拟方法。根据数值模拟结果分析通风孔对机室内流场的影响,讨论不同通风孔形式对通风换热效率的影响。并开展高速离心机开口机室试验,测量机室压力及空气流速空间分布随离心机 g 值变化,对比了圆盘转子与转臂转子的差异,可为机室温控设计提供重要参考依据。

1 离心机机室流场模拟

1.1 离心机机室流场模拟方法

离心机机室是典型的有限空间,一般为全封闭的圆柱形,仅在自然通气出入口处与外部大气想通。利用 CFD 方法能够计算离心机机室流场中任意点的速度、压力和温度等的分布信息,清晰显示流场的结构特征。流场控制方程组由连续性方程、动量方程和能量方程等组成,对流场控制方程在引入雷诺应力之后,方程组的未知数大于方程个数,方程组不能封闭,因此需要引入湍流模型来使方程组封闭。

根据对雷诺应力的处理方法不同,最常用的两种湍流模型是雷诺应力模型和涡黏模型。雷诺应力模型

是精度较高,它不采用边界速度的各项同性假设,可描述各项异性雷诺应力的流动现象。如果采用雷诺应力模型封闭控制方程组,虽然能够有效地解决方程中的雷诺应力项和耗散速率,但计算量会大大增加。离心机机室内流场问题主要关心离心机风阻功率及通气孔流量等宏观参数,且机室尺度较大,采用雷诺应力模型虽然能够得到较为精细的流场结构,但是带来的计算耗费十分巨大,不利于工程项目的快速迭代。因此本文选取较为简单的涡黏模型来描述湍流。

在涡黏模型中,对雷诺应力项不直接进行处理,而是引进湍流黏度,将雷诺应力用湍流黏度的函数表示。根据求解湍流黏度微分方程数量可以分为零方程模型、一方程模型和两方程模型。最常用的标准 $k-\varepsilon$ 模型就是最基本的两方程模型,基于湍动能 k 方程,引入湍动能耗散率方程, ε 定义为

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_k} \right) \\ \mu_t &= \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: C_μ 为经验常数; μ_t 为湍流黏度; k 为湍动能; ε 为湍动能耗散率。

针对离心机机室流场分析,需采用带旋流修正的 $k-\varepsilon$ 模型,其为湍流黏度增加了计算公式并且耗散率输运方程中是来源于层流速度脉动的精确方程。其对旋流流动、强逆压梯度的边界流动、流动分离和二次流动具有很好的精度。

CFD 求解器选取基于密度的耦合隐式求解器,湍流模型选取 RNG $k-\varepsilon$ 模型。由于涡黏模型是基于完全发展的各项同性湍流建立的近似模型,因此对于近壁面区域尤其是壁面边界层对数律区域内的流场,在无滑移壁面边界条件的作用下,流场速度较低,涡黏模型在此区域并不适用,因此需要在近壁区域采用相应的处理方法来进行计算。通量采用 Roe-FDS 格式,动量方程采用二阶迎风格式离散。湍流标量方程采用 Quick 格式离散。为了加速收敛,在计算开始阶段选取一阶迎风格式进行计算,待收敛趋势显现后,分别采用二阶迎风格式和 Quick 格式继续计算。

1.2 离心机机室流场模型

针对某典型带进/出风口的转臂式离心机机室模型进行建模,如图 1 所示。计算模型共分为 3 个区域,进气区域底部与进气孔相连平面为固壁边界条件,其余圆周边及顶部平面为压力入口条件,考虑常压条件,设置入口压力为 1 标准大气压。出气区域顶部与出气孔相连平面为固壁边界条件,其余圆周边及底部平面为压力出口条件,设置出口压力为 1 标准大气压。机

室内部区域中, 离心机转臂、机室壁面以及进出气孔道设置为固壁边界条件。

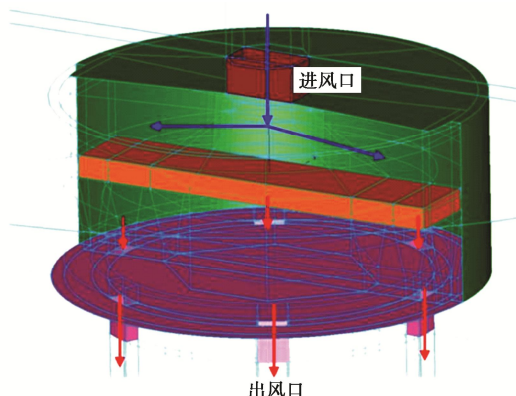


图1 离心机机室内部机室通风模型

Fig. 1 CAD model for centrifuge chamber with inlet and outlet

如图2所示为机室内部流场滑移网格计算区域示意图。采用滑移网格技术计算机室内旋转流场, 将机室内流场分为旋转区域和静止区域。旋转区域为与机室壁面同轴的圆柱体区域。离心机转臂包含在旋转区域中, 并跟随旋转区域以 21 rad/s 的旋转角速度运动。静止区域位于旋转区域外侧, 包围旋转区域, 机室四周壁面及上下壁面包含在静止区域内。旋转区域与静止区域之间设置为交界面, 两个区域流场参数通过交界面插值传递。

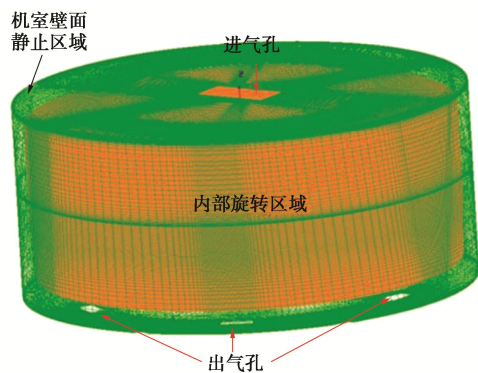


图2 开口离心机机室内部区域流场计算模型

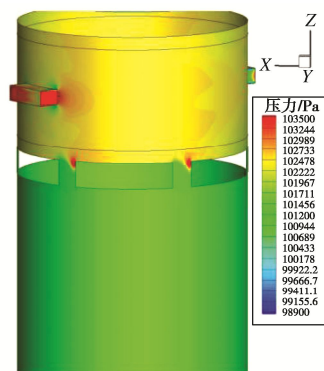
Fig. 2 CFD model for geotechnical centrifuge chamber with inlet and outlet

由于离心机转臂旋转带动机室内空气转动, 靠近转臂端部的机室壁面附近空气流速大, 形成高于标准大气压的高压区, 有利于排风; 靠近主轴处空气流速低, 附近区域形成低于标准大气压的低压区, 有利于吸气, 因此, 可以考虑在机室顶部中央区域开进气孔, 在机室内外压差的作用下外部冷空气通过进气孔进入机室内部; 在机室壁面开气孔, 机室内热空气可通过出气孔排放到外部区域, 起到降低机室温度的作用; 因此出风口和进风口分别设计在靠近机室侧壁和靠近主轴处。

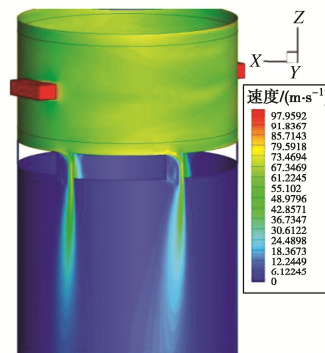
1.3 机室流场模拟结果

计算时采用两种方法模拟开口机室内旋转流场: 多重参考系法及滑移网格法。在机室开口条件下, 两种方法计算得到的离心机风阻功率存在较大差异, 滑移网格法结果大于多重参考系法。与密闭机室不同的是, 离心机稳定运行后, 机室壁面所受阻力矩与离心机转臂所受阻力矩并未达到平衡, 离心机转臂所受空气阻力矩高于机室壁面的黏性阻力矩。当机室存在开口时, 离心机做功可分为两部分: ①一部分通过机室内旋转流场与壁面摩擦耗散为热功率; ②另一部分将进气孔流入的空气加速至机室内空气旋转速度。在进气孔和出气孔气流的干扰下, 机室流场呈现出较强的时间相关性, 此时稳态解无法准确描述机室内的流场运动。因此, 本文在计算中均采用滑移网格法求解机室内瞬态流场。

图3为开口机室周向截面压力与速度分布云图。与密闭机室类似, 开口机室内流场压力、速度和温度分布也沿着机室径向呈升高趋势。当机室存在进、出气孔时, 计算发现当离心机稳定运行后, 进气口及出气口处质量流量保持一致。



(a) 压力



(b) 速度

图3 开口机室周向截面压力与速度幅值分布云图

Fig. 3 Contours of pressure and velocity amplitude along square cross-section of centrifuge chamber with inlet and outlet

出气孔的质量流量主要依赖于机室内外的压差, 同时也受到出气孔形状的影响。如图4所示为垂直出

气孔附近压力与速度分布云图。从图 4 中可以看到, 出气孔迎风侧角点压力升高, 机室内热空气在内外压差的作用下沿风道迎风侧壁面流出机室, 在风道背风侧出现涡卷起。因此, 对于垂直风道而言, 其有效出气截面仅有靠近迎风侧壁面, 不利于有效排出机室热量。

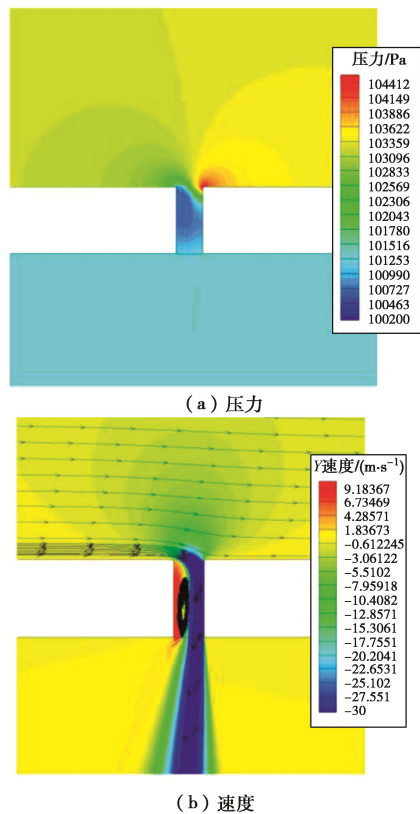


图 4 垂直出气孔附近压力及速度分布云图

Fig. 4 Contours of pressure and velocity near vertical outlet of centrifuge chamber

分析出气孔流场可以看到, 影响出气孔流量的两个重要物理量为机室内外压力差及机室内空气流速, 如表 1 所示。通过计算不同机室内外压差及机室内空气流速情况下出气孔流量, 发现随着机室内外压差增大, 出气孔流量呈递增趋势; 而机室空气流速越小, 则出气孔流量越大。通过分析流场发现, 机室热空气经由出气孔排出的物理本质是机室内外的压差驱动, 流动方向垂直于机室空气流动方向。机室内空气流速越小, 出气风道内由于剪切作用卷起的涡越弱, 从宏观角度看则是增大了有效出气截面, 因此流量更高。

表 1 不同压差及风速下出气风道流量对比

Table 1 Comparison of wind fluxes at outlet under differential pressure and velocity of wind

机室内外压差/ Pa	机室内随流空气速度/ (m·s ⁻¹)	风道质量流量/ (kg·s ⁻¹)
2000	50	13.98
3000	50	20.04
5000	50	28.55
5000	34	31.40
5000	34	31.40

为了减小机室内热空气经过出气孔带来的速度损失, 考虑出气风道沿机室内空气流动方向倾斜 30° 开口的方式。如图 5 所示为倾斜出气孔附近压力及速度分布云图。在倾斜出气风道中, 并未出现涡卷起现象, 其有效出气截面相较于垂直出气风道更大, 因此算得到倾斜风道流量大于垂直出气风道流量, 如表 2 所示。

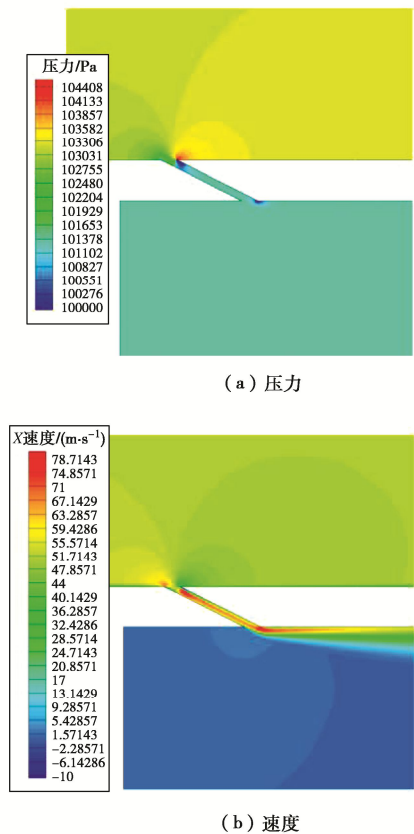


图 5 倾斜出气孔附近压力及速度分布云图

Fig. 5 Contours of pressure and velocity near slope outlet of centrifuge chamber

表 2 垂直及倾斜风道出气流量对比

Table 2 Comparison of wind fluxes at outlet between vertical and slope wind outlet tunnels

风道	机室内外 压差/Pa	机室内随流空气 速度/(m·s ⁻¹)	风道质量流 量/(kg·s ⁻¹)
垂直风道	2000	50	13.98
倾斜风道	2000	50	18.85

2 开口机室流场试验

2.1 高速离心机流场测试试验

为获得开口机室内的流场实测信息, 在某高速离心机上开展机室流场测试试验, 如图 6 所示。主轴靠近上壁面中部留有进风口, 在机室下壁面附近均匀分布有 6 个出风口。在机室内不同位置布置压力和温度传感器, 在离心机机座及主轴、上壁面附近布置 5 个

测点, 风速、温度测量传感器及布局如图 7 所示。风速测量系统设计如下:

- (1) 测量节点实时测量各测点动压、静压和温度。
- (2) 压力测量范围为 0~6.8 kPa, 压力测量误差
不大于 0.25%, 总误差带不大于 1%。
- (3) 温度测量范围为-10° ~85° ; 温度测量误
差不大于 0.5° 。
- (4) 采集终端数据存储频率 1000 Hz, 采用 CAN
总线通信, 需要各节点进行通信。

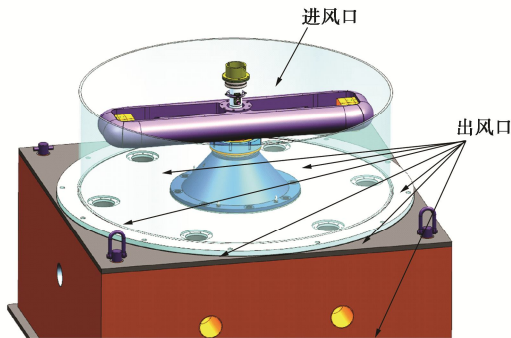


图 6 高速离心机机室流场测试模型

Fig. 6 Test model for air flow of high-velocity centrifuge chamber

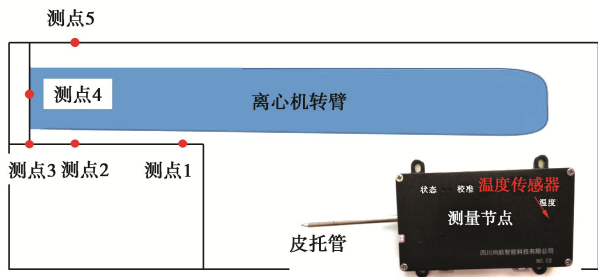


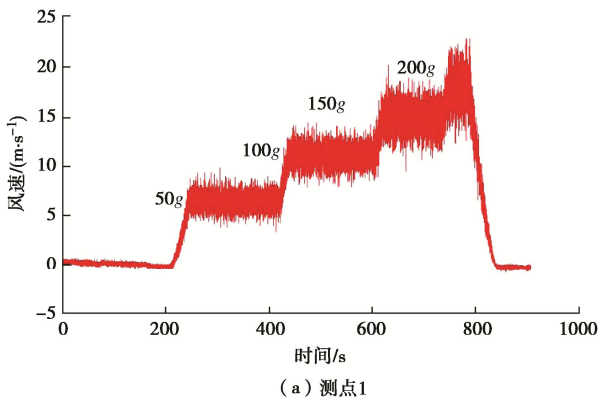
图 7 机室内测点布局及传感器

Fig. 7 Distribution of measuring points and sensors in chamber

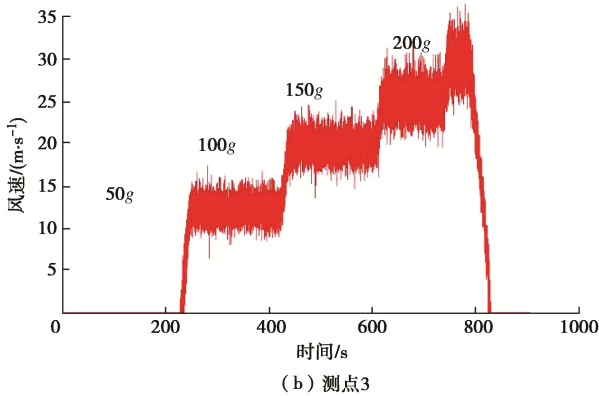
2.2 试验结果

测试离心机模型转臂上有凹腔, 同时为对比转臂与圆盘转子的差异, 开展了通风条件下转臂凹腔未封闭/封闭及圆盘转子等试验。

- (1) 通风、转臂凹腔未封闭条件下机室内流场
- 测点风速随离心机运行 g 值如图 8, 表 3 所示。
- 机室内测点静压沿半径方向的变化如图 9 所示。



(a) 测点1



(b) 测点3

图 8 不同测点风速随离心机 g 值变化

Fig. 8 Velocities of wind at different measuring points with g value of centrifuge

表 3 测点风速及风阻功率随离心机 g 值变化
Table 3 Wind resistance powers and velocities at different
measuring points with g value of centrifuge

g 值	风阻功率/kW	测点风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)				
		测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5
0g	1.05	6.40	14.7	12.3	13.30	13.6
100g	2.95	11.08	21.4	19.9	20.25	20.5
150g	5.30	15.06	26.6	25.4	25.90	25.5
200g	7.90	18.50	30.8	30.5	30.90	30.6

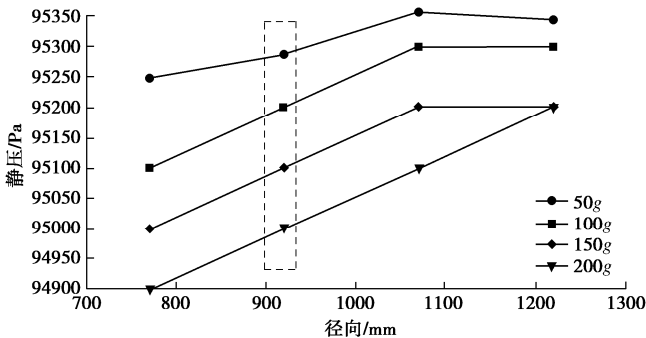


图 9 机室内测点 3 静压沿半径方向变化

Fig. 9 Variation of static pressure along radius direction at measuring point No. 3 in the centrifuge chamber

从测试结果可看出: 随着离心机转速升高, 风阻功率非线性升高, 各测点空气随流速度也非线性上升。由于机室扰动较大, 测点风速在会在定值附近一定范围内波动。从机室中心到壁面, 沿半径方向机室内静压逐渐升高; 由于测点布置原因, 在较低 g 值时会出现随 g 值增大, 测点处静压反而降低的现象, 初步判断造成此种现象的原因为随着转速升高, 机室空气旋转速度随之升高, 空气自身所受离心力增大, 导致靠近机室中心的空气向机室壁面处汇聚, 当地静压会随 g 值升高而降低; 但在高 g 值时该现象消失, 静压表现为随 g 值升高而升高的规律; 结合数值模拟及试验结果, 可看出在靠近机室壁面附近会形成一定范围的高压区, 并且随着 g 值升高, 高压区范围逐渐扩展。

(2) 通风、转臂凹腔封闭条件下机室内流场

为考察转臂表面结构形状对风阻及机室内流场特性的影响, 将转臂上的凹腔及孔结构采用胶带缠绕的方式进行封闭, 测量此情况下的机室内流动特性; 凹腔封闭前后离心机风阻功率对比如图 10 所示, 风阻功率及各测点流速随离心机运行 g 值变化如表 4 所示。

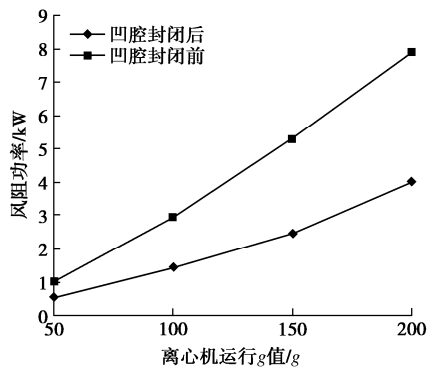


图 10 转臂凹腔结构封闭\未封闭情况下风阻功率对比
Fig. 10 Comparison of wind resistances between close and open hallow spaces on centrifuge arm

表 4 离心机转臂凹腔封闭风阻功率及测点风速随 g 值变化
Table 4 Wind resistance power and velocities at different measuring points with g value of the close hallow space on centrifuge arm

g 值	风阻功率/ kW	测点风速/($m \cdot s^{-1}$)				
		测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5
50g	0.55	2.5	4.3	3.9	4.80	4.5
100g	1.45	4.6	8.2	7.5	8.90	8.6
150g	2.45	7.2	13.1	12.3	13.65	13.5
200g	4.02	10.3	18.1	17.9	18.50	18.2

从图 10, 表 4 结果可看出, 对转臂上的凹腔、孔等结构封闭处理后, 离心机运行时风阻明显降低, 机室内随流空气速度也同样降低。

(3) 通风、转臂为圆盘时机室内流场

为进一步验证离心机风阻的组成因素, 分离风阻中的压差阻力部分和黏性阻力部分, 借助圆盘旋转试验, 测量圆盘旋转时的风阻功率及机室内流动特性。圆盘转子电机功率如图 11 所示, 测点风速随时间变化如图 12 所示。

从测量结果可以看到, 圆盘旋转时, 其风阻功率与机室内空气速度明显小于转臂转动时。圆盘旋转时其压差阻力可以忽略不计, 主要为黏性阻力。以 200g 工况为例, 转臂式转子风阻功率约为 7.9 kW, 其中包含了压差阻力及黏性阻力, 通过 CFD 数值仿真计算得到功率为 6.89 kW, 其中压差阻力所贡献的功率约为 6.41 kW, 黏性阻力功率约为 0.48 kW, 黏性功率占比约为 6.9%。而与其等直径的圆盘转子其风阻功率约为 0.8 kW, 几乎完全为黏性阻力。因此, 通过数值仿真

及试验结果也证明了转臂式离心机运行时主要阻力来源为压差阻力, 黏性阻力占总阻力比例小于 10%。

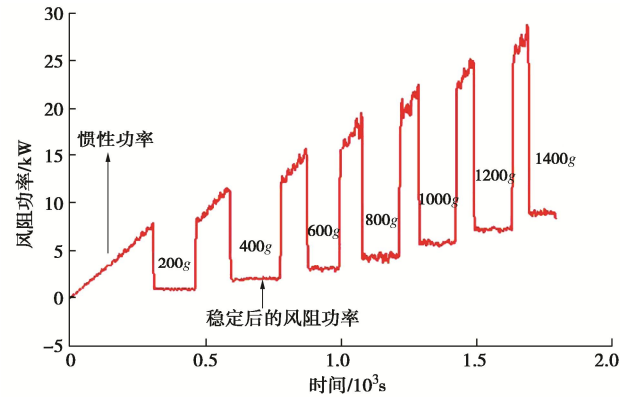


图 11 圆盘转子的电机功率随时间变化曲线
Fig. 11 Variation of motor driving power with time of disk rotor

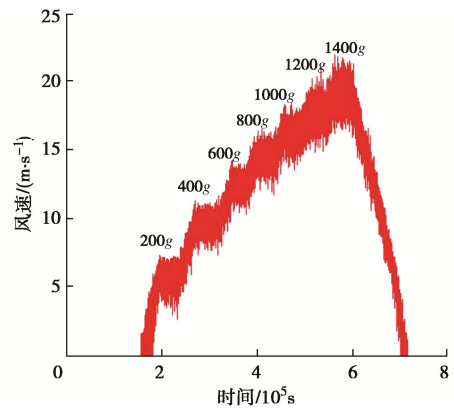


图 12 $R=0.98\text{ m}$ 处测点风速随时间变化曲线
Fig. 12 Variation of wind velocity with time at measuring point with $R=0.98\text{ m}$

3 结 论

基于 CFD 方法模拟了离心机机室内流场运动, 建立适用于开口机室的内流场数值模拟方法, 研究了开口机室内流场特征, 分析了通风孔对机室内流场的影响, 并开展了高速离心机机室流场测试试验, 研究获得 4 点结论。

(1) 室内流场速度、压力和温度沿机室径向逐渐升高, 机室内压力梯度及温度梯度随离心机转速而增大; 开口机室中离心机所受空气阻力矩要高于壁面所受黏性阻力矩。

(2) 机室壁面附近和离心机转臂末端附近由于流动剪切率较大, 温升较其它区域更为明显; 通风流量受通风孔大小和形状、机室内外压差、机室内旋流空气速度等因素影响; 通风孔沿机室内空气流动方向倾斜开口更有利于通风换热, 通风效率提升约 40%。

(3) 从机室中心到壁面, 沿半径方向机室内静压逐渐升高, 空气速度逐渐增大, 温度逐渐升高; 对转

臂上的凹腔、孔等结构封闭后,离心机风阻明显降低约 50%,机室内空气随流速度也降低。

(4)通过圆盘旋转试验,验证了转臂式离心机运行时主要阻力来源为压差阻力,黏性阻力占总阻力比例小于 10%。

参考文献:

- [1] 贾普照. 稳态加速度模拟试验设备: 离心机概论与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013. (JIA Puzhao. Steady-State Acceleration Simulation Test Equipment[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese))
- [2] 王永志, 陈卓识, 孙 锐. 土工离心机稳态风阻功率简化估算方法与冷却设计优化[J]. 地震工程与工程振动, 2014, **34**(增刊 1): 909-914. (WANG Yongzhi, CHEN Zhuoshi, SUN Rui. Simplified calculation technique of steady-state wind resistance power for geotechnical centrifuge and optimization cooling design[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, **34**(S1): 909-914. (in Chinese))
- [3] 尹益辉, 范志庚, 万 强, 等. 土工离心机稳定运行时机室的自然排风效应研究[J]. 绵阳师范学院学报, 2017, **36**(11): 1-7. (YIN Yihui, FAN Zhigeng, WAN Qiang, et al. On natural air exhaust of the chamber of A steady operating geotechnical centrifuge[J]. Journal of Mianyang Teachers' College, 2017, **36**(11): 1-7. (in Chinese))
- [4] 尹益辉, 余绍蓉, 冯晓军, 等. 机室开有通风口的土工离心机的风阻功率[J]. 绵阳师范学院学报, 2010, **29**(5): 1-5, 17. (YIN Yihui, YU Shaorong, FENG Xiaojun, et al. Aerodynamic power of geotechnical centrifuges with holed chamber[J]. Journal of Mianyang Normal University, 2010, **29**(5): 1-5, 17. (in Chinese))
- [5] YIN Y H, DOU L L. Aerodynamic power of geotechnical centrifuge[J]. Advanced Materials Research, 2011, **421**: 788-791.
- [6] 徐太栋. 精密离心机空气流场的数值模拟[D]. 成都: 电子科技大学, 2014. (XU Taidong. Numerical Simulation of Airflow Field for the Precision Centrifuge[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese))
- [7] 陈红永, 张 晨, 黎启胜, 等. 土工模型箱超重力场夹层空间温度传递特性研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(增刊 2): 83-86. (CHEN Hongyong, ZHANG Chen, LI Qisheng, et al. Temperature transfer characteristics of clearance space in hypergravity field of geotechnical model box[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(S2): 83-86. (in Chinese))
- [8] HAO Yu, YIN Yihui, WAN Qiang. Wind resistance and flow characteristic analysis of geotechnical centrifuges based on computational fluid dynamics[C]//19th International Conference on Finite Elements in Flow Problems. Rome, 2017.
- [9] 郭轶楠, 杨 毅, 王亚林, 等. 基于 ZJU400 土工离心机的 CFD 模拟方法[J]. 装备环境工程, 2020, **17**(11): 85-89. (GUO Yinan, YANG Yi, WANG Yalin, et al. CFD simulation method based on ZJU400 geotechnical centrifuge[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, **17**(11): 85-89. (in Chinese))
- [10] 郑传祥, 陈建阳, 蒋建群, 等. 低真空度下土工离心机产热机理试验研究[J]. 装备环境工程, 2020, **17**(3): 84-88. (ZHENG Chuanxiang, CHEN Jianyang, JIANG Jianqun, et al. Experiment of heat generation mechanism of geotechnical centrifuge under low vacuum degrees[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, **17**(3): 84-88. (in Chinese))
- [11] 林伟岸, 郑传祥, 蒋建群, 等. 大容量超重力离心机温控缩比模型试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, **54**(8): 1587-1592. (LIN Weian, ZHENG Chuanxiang, JIANG Jianqun, et al. Temperature control test of scaled model of high capacity hypergravity centrifuge[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, **54**(8): 1587-1592. (in Chinese))