

文章编号: 1671-6612 (2019) 05-471-07

白鹤滩水电站夹墙风管流动特性的 模型试验研究 (一)

梁艳梅¹ 郭敏¹ 肖益民¹ 徐蒯东² 盘晓红²

(1. 重庆大学城市建设与环境工程学院 重庆 400030;

2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司 杭州 311100)

【摘要】 为满足地下水电站厂房的通风组织要求, 需在厂房墙体和硐室岩体壁面之间的夹墙空间设置大量风管。为使风管安装适应岩壁锚索, 提出了风管在锚索对应位置“穿孔”的解决方案。建立几何比例为1:2的夹墙风管通风流动相似试验模型, 研究“穿孔”对夹墙风管通风道影响, 通过试验证明了方案的可行性, 并对比了风机的不同安装位置对系统风量的影响, 结果表明, 不同安装位置下的系统风量无明显差异。该结论可为类似工程建设提供理论支撑和设计参考。

【关键词】 水电站地下厂房; 夹墙风管; 岩壁锚索; 相似模型试验

中图分类号 TU834 文献标识码 A

Model Test Study on Flow Characteristics of Clamped Wall Duct of Baihetan Hydropower Station (one)

Liang Yanmei¹ Guo Min¹ Xiao Yimin¹ Xu Kuaidong² Pan Xiaohong²

(1. Chongqing University, College of Construction and Environmental Engineering, Chongqing, 400030;

2. Huadong Engineering Co., Ltd, Hangzhou, 311100)

【Abstract】 In order to meet the ventilation requirements of each part of the underground hydropower station, a large number of air ducts should be installed in the clamped wall space between the wall of the workshop and the wall surface of the cave rock. In order to adapt the installation of the air duct to the anchor cable of rock wall, a solution for the "perforation" of the air duct at the corresponding position of the anchor cable is proposed. A similar test model for the ventilation flow of the wall duct with a geometric ratio of 1:2 was established to study the influence of "perforation" on the air duct of the wall duct. The feasibility of the scheme was proved by experiments, and the influence of different installation positions of the fan on the air volume of the system was compared. The results show that there is no significant difference in system air volume at different installation positions. This conclusion can provide theoretical support and design reference for similar projects.

【Keywords】 underground power station; clamped wall duct; anchor rope; similarity model test

0 引言

地下水电站的生产工艺流程基本相同, 厂房布

置和通风流程也具有很多共性。主厂房和主变洞的内部功能各层功能房间, 多利用墙体与硐室岩体壁

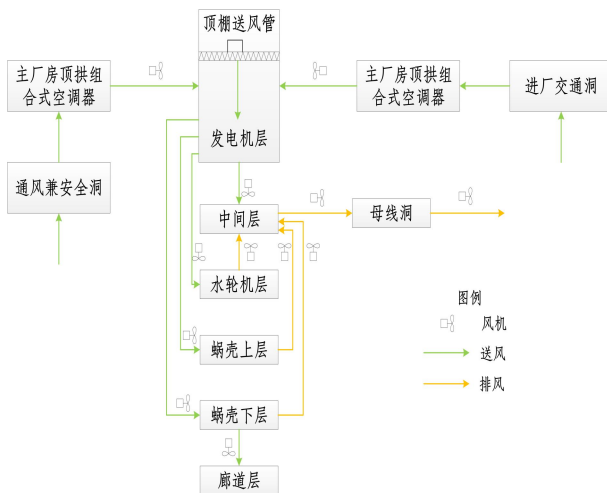
基金项目: 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司科研项目“白鹤滩水电站超大型复杂通风空调系统气流交互及网络平衡优化研究”资助; 国家自然科学基金项目(51678088)资助

作者简介: 梁艳梅(1994.8-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 99211449@qq.com

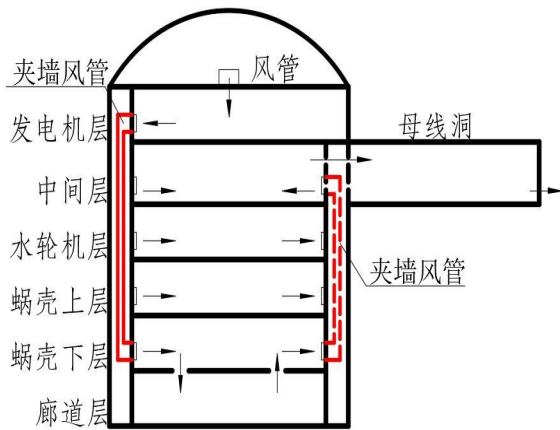
通讯作者: 肖益民(1974.2-), 男, 教授, 博导, E-mail: xiaoyimin1974@126.com

收稿日期: 2019-03-15

面之间的夹墙空间设置风管来组织通风^[1-3]。白鹤滩水电站位于我国西南,装机容量 16000MW,为当今世界上规模最大的地下厂房水电站,其主厂房的通风流程如图 1 所示,空气由发电机层经夹墙风管并列送入中间层、水轮机层、蜗壳层,水轮机层及蜗壳层的排风经夹墙风管回到中间层,统一排入母线洞。



(a) 白鹤滩水电站主厂房通风流程图



(b) 白鹤滩水电站主厂房剖面通风流程图

图 1 白鹤滩水电站主厂房通风流程图

Fig.1 Ventilation flow chart of the main plant of Baihetan Hydropower Station

在夹墙空间内,对岩壁起支护作用的锚索^[4]头部和岩壁在施工时的超挖、欠挖情况,使夹墙空间中岩壁一侧凹凸不平,特别是锚索头部和锚杆,会在岩体壁面凸起一定高度,使得在原本就很狭窄的空间内设置风管更加困难,其中空间岩壁和锚索的现场施工图见图 2。为在这样的夹墙空间内顺利安

装风管并保证其完整性,需要对风管结构进行一定的处理。基于此,本文提出了风管在锚索对应位置“穿孔”的解决方案,通过相似模型试验研究采取一定处理措施后的夹墙风管的流动特性,并验证其可行性,以供类似工程建设和设计提供参考。

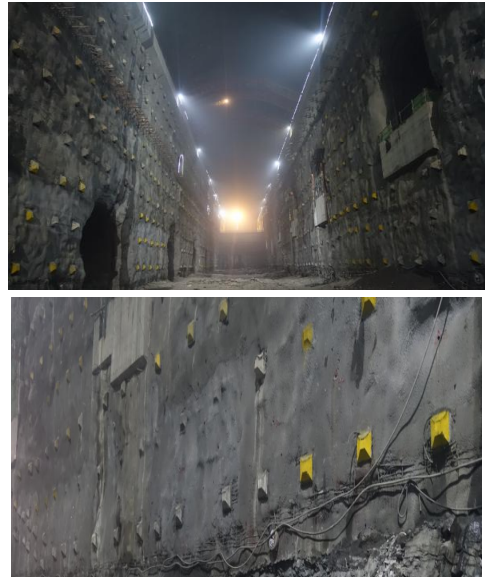
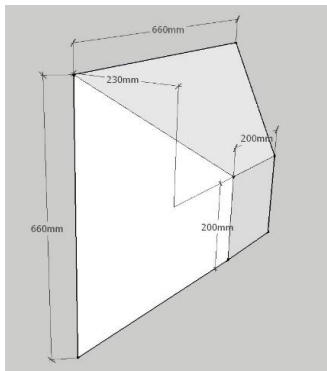


图 2 白鹤滩水电站主厂房锚索索头现场施工图

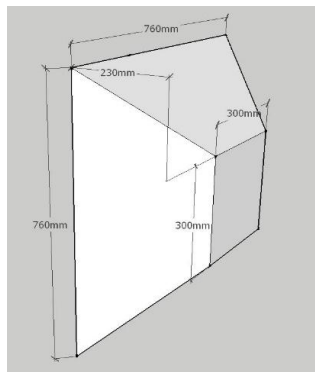
Fig.2 Site construction drawing of anchor cable head of main plant of Baihetan Hydropower Station

1 解决方案的提出

白鹤滩水电站主厂房与主变洞共设计有 40 种不同尺寸的夹墙风管系统,它们均由两个风口、两个弯头和一段竖直管段,以及设置在出风口附近的轴流风机组成。其中竖直管段的长度由风管连接的两个空间的垂直距离决定,两风口分别安装在需要输送空气的两个空间,进出口安装蛋格式风口,整个风管完全安装在厂房的墙壁与岩体之间的夹墙空间中。支护岩体的锚索,其索头裸露在夹墙空间中^[5],整个水电站中共存在两种索头形式见图 3。考虑风管最大宽度尺寸为 4m,锚索布置情况呈 3.8m×3.6m 矩形布置,因此锚索与夹墙风管的投影位置关系可分为以下三种情况:(1) 锚索投影在夹墙风管内(横向不可能出现两个索头的情况);(2) 锚索投影在夹墙风管边界上;(3) 锚索投影在夹墙风管外。正向投影位置关系见图 4。可以发现三种投影关系中第一种情况中,锚索对风管的影响最大,因此本文主要研究第一种情况下,锚索对风管影响的解决方案。



(a) 2000kN 锚索索头



(b) 2500kN 锚索索头

图 3 水电站内索头形式

Fig.3 Cable head form in Hydroelectric power station

以发电机层至中间层的夹墙送风管为例,并参考土建专业锚索布置资料图,夹墙风管的结构形式及风管与锚索的侧向投影位置关系如图 5 所示。

如果忽略岩壁锚索凸起的实际影响,安装夹墙风管可能无法实施,或发生变形破坏。现提出一种解决方案,使夹墙风管避开锚索。根据锚索与风管的投影位置关系,现拟采取改变风管结构的方案,即保持夹墙风管的 b_0 , b_1 , W (见图 4、图 5) 不

变,将夹墙风管上锚索投影对应位置挖空,将可能出现挤压变形的位置完全避开,由图 3 可知,外露索头的最大尺寸为 $760\text{mm} \times 760\text{mm}$,因此采用挖空尺寸宽度 $800\text{mm} \times 800\text{mm}$,考虑两种不同挖空方案见图 6,这样改变风管结构势必会改变风管内部的流通尺寸和形状,可能对通风造成影响。

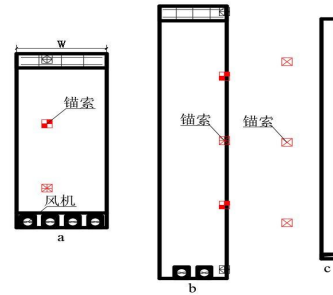


图 4 白鹤滩水电站锚索与夹墙风管投影关系图

Fig.4 Projection diagram of the anchorage cable and the air pipe of the baihetan hydropower station

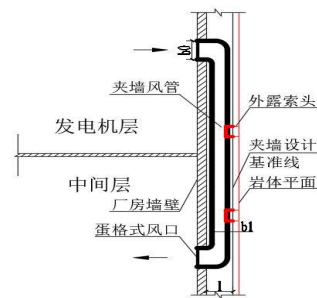


图 5 夹墙风管安装布置与锚杆的相对位置投影关系图

Fig.5 Projection relationship diagram between the installation position of the wall duct and the relative position of the anchor

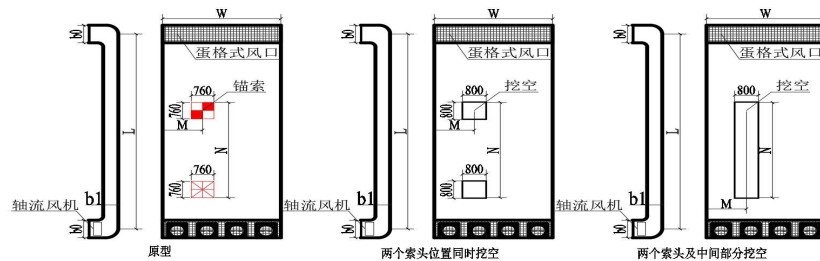


图 6 对应原型的模型风管和试验模型风管图 (单位: mm)

Fig.6 Model duct and test model duct diagram corresponding to the prototype

2 试验系统的设计和测试方法

2.1 相似设计

在几何相似的前提下,动力相似是运动相似的表现。待研究的问题为水电站夹墙通风时风管的流动特性,属于压差作用下粘性力控制的流动问题,

重力对流动没有显著的影响,压力是粘性力和惯性力的合成,欧拉数是被动的,故应采用雷诺模型律作为相似判别的依据进行相似模型试验设计。局部流动阻力系数主要取决于系统的几何形状、 Re 数、边界粗糙度和边界对流动的干扰,紊流条件下 Re 数的影响甚微,当流动状态变为紊流后,很快就进入紊流粗糙区^[6,7]。由于局部几何变形对流动的影响,当 $Re > 4000$ 时,试验风管内的流动已进入紊流粗糙区。经计算,原型风管流动 Re 数远大于模型,因此,可以采用“自模型区”的概念开展试验,即保证模型和原型的几何相似,并且使模型风管流动处于紊流粗糙区,即可实现流动相似。

2.2 模型试验系统和试验方法

2.2.1 模型试验系统设计

水电站地下厂房中夹墙风管的形式一致,但尺

寸大小繁多,综合考虑到时间、人力和各种成本等因素,考虑到挖空后方便安装与测试,现选取位于主厂房发电机层至中间层的一种尺寸的夹墙风管作为原型进行试验系统的设计,其主要尺寸为 $W=4000\text{mm}$, $b_1=500\text{mm}$, $b_0=800\text{mm}$, $L=8.9\text{m}$ 。其中,根据风管与锚索的投影图,可以知道在该风管的竖直管段的位置存在两根锚索,其锚索索头形状见图 2 (b)。根据试验场地的限制和可选择的风机尺寸,采用的几何比例尺为 1:2。挖空方案中,考虑到风管模型的制作和实际工程中风管截面的长宽比,将竖直方向上锚索索头对应处挖空,避开索头位置。共考虑三种试验模型:两个索头位置同时挖空;两个索头及中间部分挖空;两个索头及中间部分挖空,同时竖直管段压扁 40%。各方案挖空的风管模型图见图 7。

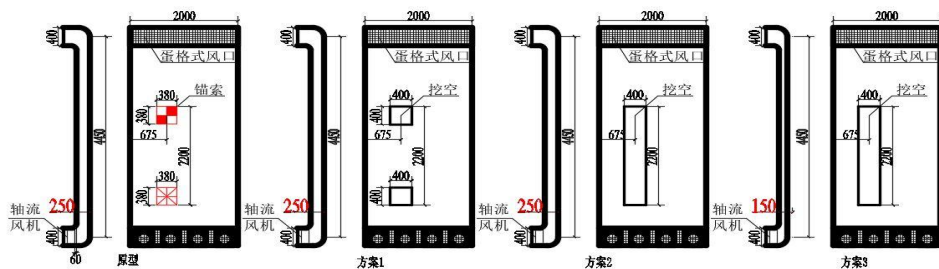


图 7 对应原型的模型风管和挖空后的模型风管图 (单位: mm)

Fig.7 Model duct and hollowed out model duct diagram corresponding to the prototype

至于风机安装位置对夹墙风管系统流动特性的影响,通过在出风口处加长直管段来改变风机的安装位置。原型风管中风机安装位置离出风口的弯头比较近,为了使管内流动流出局部构件——弯头具有均匀的流速分布与脉动强度,现试验加长的直管段长度分别为 $2de=0.9\text{m}$ 和 $7.2de=3.2\text{m}$ 两种情况,其中 de 为夹墙风管竖直段的当量直径。加长后的试验系统见图 8。

采用 1.0mm 厚的镀锌铁皮作为风管材料。蛋格式风口按照水电站中蛋格风口的格栅间距进行定做。在出风口安装与原型设计类型和数量相同的风机,为了使风机工况可以调节,以便在多种工况下对比验证挖空及挖空加压扁方案和改变风机位置对系统造成的影响,出风口的四台风机并联安装并可单独控制,同时安装一台调压器对风机的运行工况进行调节,其中风机运行工况考虑五种,分别是工况一:电压为 220V,风机全开;工况二:电压 220V,风机开 3 台;工况三:电压 220V,风机

开 2 台;工况四:电压为 160V,风机全开;工况五:电压为 125V,风机全开。由前文分析可知,夹墙风管是地下厂房内部通风网络中的主要通风路径,主要作用是输送厂房内的空气从而确保设备运行环境的安全,因此对挖空及挖空加压扁方案的可行性以及风机安装位置造成的影响的论证是通过夹墙风管系统风量来衡量的。

模型试验系统现场图见图 9。

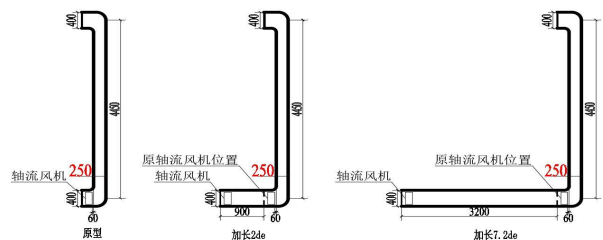


图 8 改变风机安装位置的模型图 (单位: mm)

Fig.8 Model diagram for changing the installation position of the fan



图 9 模型试验系统现场图

Fig.9 Model test site

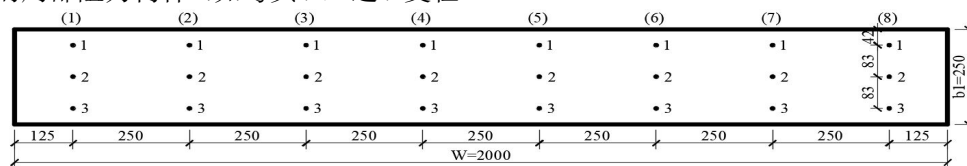
2.2.2 试验方法与仪器

本试验采用测试断面风速的方法来计算系统风量。试验要求尽量减少气流扰动对测量结果的影响, 应尽可能选在气流分布均匀稳定的直管段, 避开产生涡流的局部阻力构件 (如弯头、三通、变径

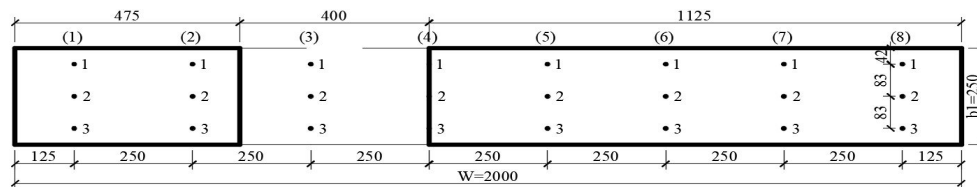
管及阀门等), 模型风管中将测量断面选择在两个弯头之间的直管段上, 距离弯头 2.65m (6de) 处^[8]。

为了确保准确性, 本试验采用两种不同的仪器 (仪器 1: 多点风速仪; 仪器 2: 热球风速仪探头和 testo480 多功能测试仪结合) 来测量风管断面风速, 数据采集时间间隔为 1s, 每个测点的测试值为采集两分钟测试数据的平均值, 最后取各测点的平均速度作为该断面的气流速度。测试断面上的测点分布如图 10 (a), 但在同时挖空的情况下, 距离 6de 断面处于挖空处, 因此会有 (3) (4) 位置两个测点处于空缺状态下, 详细测点布置图见图 10 (b)。

在测试过程中, 四种试验模型中方案 3 为最不利的一种, 这种工况用两种不同的测速仪器对系统同一断面风速的测试结果如图 11 所示, 其中测试断面的尺寸为 1600mm×150mm。



(a) 对应原型的模型风管测量断面测点布置图 (单位: mm)



(b) 对应同时挖空的模型风管测量断面测点布置图 (单位: mm)

图 10 模型风管测量断面测点布置图 (单位: mm)

Fig.10 Model duct survey point layout

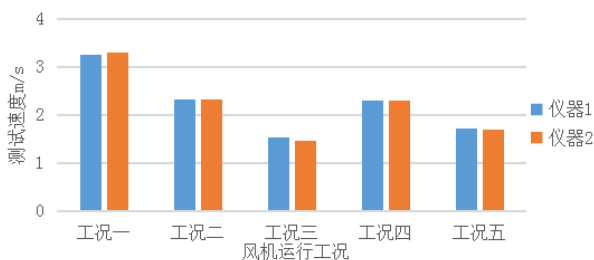


图 11 风机在弯头处不同工况下两种仪器测试结果

Fig.11 Test results of two instruments under different working conditions of the fan at the elbow

注: 图中测量温度变化范围为 19℃~20℃, 大气压力为 988hPa 空气密度为 1.17539kg/m³。

多点风速仪可以多个测试点同时测试, 以保证

测出的数据是同一时刻的速度, 且从图 11 可以看出, 仪器 1 和仪器 2 测出的数据偏差都在 5% 以内。因此后文系统风量均为仪器 1 多点风速仪测出的速度计算获得, 为了减小随机误差, 对同一种工况重复测试 3 次。下文的系统风量为:

$$Q = v \times W \times b_1 \quad (1)$$

式中, v 为断面风速, m/s, 是多点风速仪三次测试的平均值; W 和 b_1 为测试断面长和宽的实际尺寸, m。

2.2.3 试验误差分析

多点风速仪精度为 ± 0.15 m/s (0~5 m/s), 测量卷尺的精度 ± 0.5 mm。风量的误差可根据相对误差

传递公式^[9]计算。取 2.2.2 节中, 方案 3 中 220V 情况下开四台风机的速度和尺寸计算综合误差, 其中 $W=1600\text{mm}$, $b_1=150\text{mm}$, $v=3.27\text{m/s}$, 则绝对误差 $\sigma_q=0.036\text{m}^3/\text{s}$, 计算方案 3 中测试风量为 $Q=0.785\text{m}^3/\text{s}$, 则相对误差 $\delta_Q=\sigma_q/Q\times 100\%=4.6\%$ 。

3 试验结果及分析

3.1 挖空前系统风量对比

风机安装位置与工程中相同, 即在弯头处时, 分别测试对应原型的模型风管: 方案 1、方案 2、方案 3。不同方案风量与原型风管的流量对比的风量系数 (风量系数=方案 i 风量/原型风量) 的结果如图 12 所示。

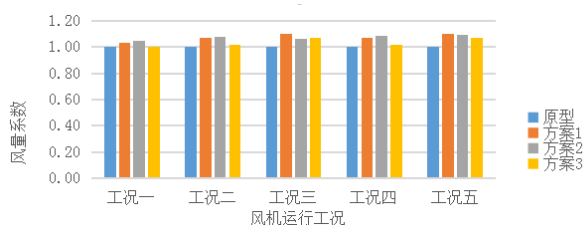


图 12 压扁前后系统风量对比图

Fig.12 Comparison of air volume before and after flattening

以原型风管的风量为基准, 对比变形之后风管的风量变化率 (风量变化量=|方案 i 风量-原型风量|/原型风量), 其变化率见表 1。

表 1 压扁后的模型风管系统风量变化率 (%)

Table 1 Air volume change rate of model duct system after flattening (%)

试验模型	风机运行工况				
	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五
方案 1	3.53	7.20	9.85	6.82	10.0
方案 2	4.98	7.92	6.47	8.70	9.17
方案 3	0.58	2.03	7.46	1.59	7.12

从表 2 中风量变化率可以看出, 与原型风量对比, 这五种工况下任意一种工况的变化率均在 10% 以内, 在工程允许误差范围内。同时也可以发现, 相同模型中, 工况三和工况五的变化率相对偏大, 但偏差也在 10% 以内, 因此可以认为挖空压扁之后的风管对系统风量影响不大, 则可以认为该方案可行。

3.2 风机在不同位置处对系统风量的影响

考虑挖空和压扁两种变形同时存在的情况可

能是对风机最不利的情况, 因此方案 3 的情况, 风机安装在弯头处对风机的影响可能最大。则以方案 3 的模型风管为研究对象, 使风机安装位置分别位于出风口弯头处、直管段加长 2de 和直管段加长 7.2de 来改变风机的安装位置 (见图 7), 测试在不同的风机运行工况下系统的风量系数, 结果如图 13 所示。

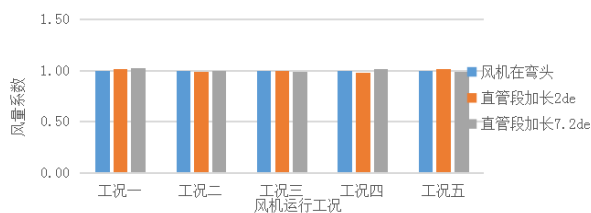


图 13 风机在不同安装位置时系统风量对比图

Fig.13 Comparison of system air volume of the fan at different installation positions

以方案 3 的模型风管风机在弯头处的风量为基准, 计算改变风机位置后系统的风量变化率, 如下表 2。

表 2 改变风机位置的模型风管系统风量变化率 (%)

Table 2 Air duct rate change rate of model duct system changing fan position

风机位置	风机运行工况				
	工况一	工况二	工况三	工况四	工况五
直管段加长 2de	1.83	-1.30	0.00	-1.73	1.73
直管段加长 7.2de	2.45	-0.43	-1.31	1.30	-1.16

从表 3 中风量变化率可以看出, 5 种不同运行工况下, 改变风机位置后, 系统风量变化率绝对值在 3% 以内, 可以认为风机安装位置对系统风量影响不大。

4 结论

根据以上测试结果分析, 可以得出以下结论:

(1) 将夹墙风管与锚索冲突的位置挖空, 使风管避开锚索索头影响的两种处理方案, 即将风管在两个索头对应位置独立挖空或索头部位及中间连通部分同时挖空, 对夹墙风管系统风量的影响均在 10% 以内, 处于工程允许的偏差范围内。因此在施工过程中, 夹墙风管遇到锚索影响的情况下, 可以参考上述两种挖空处理方案。

(2) 将风管对应两个索头部位及中间连通部分挖空, 并同时 will 风管竖直部分的厚度压缩 40%,

对夹墙风管系统风量的影响也在10%以内。故工程中如夹墙风管遇到锚索影响的同时,还存在岩壁凹凸不平等土建因素的影响,还可参考本试验结果进一步压缩风管的厚度。

(3) 夹墙风管系统中风机位置位于出口弯管附近,与位于出口弯管后加长的直管段 $2d_e$ 、 $7.2d_e$ 处,系统风量并无明显差异,说明工程中可将风机安装在出口弯管附近处。

参考文献:

- [1] 肖益民,林婷莹,徐蒯东.地下水电站主厂房通风空调系统设计风量的确定[J].暖通空调,2014,44(12):27-31.
- [2] 杨晓峰.仙游抽水蓄能电站地下厂房空调通风模型试验[D].西安:西安建筑科技大学,2014
- [3] 王旭.基于网络分析的水电站地下洞室群通风系统设计方法研究[D].重庆:重庆大学,2004.
- [4] 刘守君.锚杆支护原理及应用实践[J].有色金属(矿山部分),2009,61(3):19-20.
- [5] 柯贤栋,王云龙,贾瑞荣.锚杆和锚索外露长度的确定[J].科技情报开发与经济,2012,22(1):156-157.
- [6] 周谟仁.流体力学泵与风机(第2版)[M].北京:中国建筑工业出版社,1985:123
- [7] 王学华,周谟仁.水电站高窗厂房自然通风相似方法的研究[J].通风除尘,1987,(2):1-5.
- [8] 李晓冬,王莉,王彪.空调通风管道的阻力性能测试分析[C].全国暖通空调制冷2010年学术年会论文集,2010:118
- [9] 田胜元,萧曰嵘.实验设计与数据处理[M].北京:中国建筑工业出版社,1988:45-46.
- [5] Farhanian D, Haghighat F, Lee C S, et al. Impact of design parameters on the performance of ultraviolet photocatalytic oxidation air cleaner[J]. Building & Environment, 2013,66:148-157.
- [6] 李国文,樊青娟,刘强,等.挥发性有机废气的污染控制技术[J].西安建筑科技大学学报,1998,30(4):399-402.
- [7] 王斌.挥发性有机化合物对室内空气品质的影响[D].天津:天津大学,2004.
- [8] 金伟力.VOCs污染空气的净化与PM2.5污染防空技术[C].2016中国环境科学学会学术年会论文集(第四卷),中国环境科学学会,2016:9.
- [9] 曹国庆,谢慧,赵申.公共建筑室内PM2.5污染控制策略研究[J].建筑科学,2015,31(4):40-44.
- [10] 郑洁,苗慧鸿,张雨,等.一种空气可吸入颗粒物浓度超限报警方法[P].中国专利:ZL201410581176.0. 2015.
- [11] 郑洁,张雨,崔玉琦,等.一种空气可吸入颗粒物浓度超限报警装置[P].中国专利,ZL201410586736.1.2015-1-14.
- [12] 陈清,余刚,张彭义.室内空气中挥发性有机物的污染及其控制[J].上海环境科学,2001(12):616-620,628.
- [13] 殷乃超,孙智广.光催化降解室内VOCs气体空气净化机的研制[J].科研,2017(2):00124-00124.
- [14] 串禾,曹浩,张雨,等.一种空调系统新风回风调节装置及方法[P].中国专利:ZL201410757255.2.2015-3-25.

(上接第465页)

4 结论

本文提出的关于控制室内PM2.5及VOCs浓度的两种方法均可以与集中式通风空调系统结合,相较于普通的空气净化器,改进了传统空气净化器自身占室内空间大,结构模块复杂的缺点,不影响美观,节省空间和材料,并可与空调系统其它空气处理功能结合,具有结构简单,过滤效果好,催化反应效率高等优点。同时,2.2节中PM2.5的控制方法成本低、能耗小,能进行实施检测和调控;3.2节中VOCs的控制方法是利用光催化技术直接将空气中细菌、病毒等杀死,并且可以将室内挥发有机物VOCs直接分解为CO₂和H₂O等无机小分子产物,具有反应效率高、条件温和、能耗少、二次污染少等优点。

参考文献:

- [1] 黄玉嫡,苑翔.室内PM2.5污染控制的现状及发展[J].山西建筑,2017,43(27):156-158.
- [2] 丁泽群,许延荔,王阳.办公建筑室内PM2.5浓度的监测分析与控制研究[J].中国科技纵横,2017(7):12-17.
- [3] 王清勤,李国柱,赵力,等.建筑室内细颗粒物(PM2.5)污染现状、控制技术与标准[J].暖通空调,2016,46(2):1-7.
- [4] 莫金汉,张寅平,杨瑞.管状光催化反应器甲醛降解强化研究[J].暖通空调,2007,37(10):70-72.