

某大型水电站地下厂房通风空调系统设计

黄河锦, 秦福兴, 王命福, 李伟, 杨扬

(雅砻江流域水电开发有限公司, 四川成都 610051)

摘要:目前国内外水电站大多采用地下厂房设计,其内部结构复杂,气道交错纵横,厂内设备发热量大且不一,发热量大且设备较为集中,因此对于地下厂房通风空调系统的研究与设计十分必要,地下厂房以机械排风为主,多种空调辅助排风及除湿为辅,并在不降低通风效果情况下按不同季节采取不同排风方式,进一步降低厂用电率,为后续同类型地下厂房的通风空调系统提供了一种较为合理的设计方案。

关键词:地下厂房;通风空调系统;通风空调;温度;湿度

中图分类号:TV731

文献标志码:A

文章编号:1001-2184(2023)增 1-0115-05

Design of Ventilation and Air Conditioning System for Underground Powerhouse of a Large Hydropower Station

HUANG Hejin, QIN Fuxing, WANG Mingfu, LI Wei, YANG Yang

(Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610051)

Abstract: At present, most of the hydropower stations in China and abroad adopt the design of underground powerhouse. Its internal structure is complex, the airways are criss-crossed and the equipment is relatively concentrated. The heat generated by the equipment in the plant is large and different. Therefore, it is necessary to study and design the ventilation and air conditioning system of the underground powerhouse. The underground powerhouse is dominated by mechanical exhaust, supplemented by a variety of air conditioning auxiliary exhaust and dehumidification, and adopts different exhaust methods according to different seasons without reducing the ventilation effect, so as to further reduce the power consumption rate of the plant. It provides a more reasonable design scheme of the ventilation and air conditioning system for the same type of underground powerhouse.

Keywords: Underground powerhouse; Ventilation and air conditioning system; Ventilation air conditioning; Temperature; Humidity

0 引言

水力发电是将水的势能转换为电能的一种发电方式,由于碳排放量小,且可开发装机容量大,是目前应用最广泛的可再生能源。

水电站多为地下厂房,环境湿热,光靠自然通风达不到要求,为保护现场工作人员的身体健康以及设备运行正常,需要风机进行主动气交换^[1]。

1 通风空调总体设计

1.1 气流走向

通风空调系统由空调供水系统、主厂房通风空调系统(含母线洞)、一副厂房通风空调系统、主变洞通风空调系统(包括出线竖井)、尾闸洞通风

系统、厂外通风空调系统和通风空调监控系统等组成。进厂交通洞作为主厂房、一副厂房、主变洞的主进风道,通风兼安全洞分隔成完全独立的安全通道和排风道(兼排烟),主变排风洞汇入通风兼安全洞排风道(兼排烟),在终端设置总排风机房,直接排至室外,500 kV 出线洞兼作为地下 GIS 层和出线洞的排风通道。

1.2 设备组成

地下厂房空间大,在充分考虑通风容量及现有通风洞情况下,采用母线洞与主厂房串联通风方式,进入主厂房的风量经各层循环后,大部分从母线洞排出。地下厂房各区域通风参数及方式见表 1。

收稿日期:2023-06-16

表1 地下厂房各区域通风参数及方式

区域	通风量 / (万 m ³ · h ⁻¹)	通风方式
发电机层	22	机械通风、水冷空调
中间层(含母线洞)	21.4	机械通风、水冷空调
水轮机层	3.6	机械通风
尾水廊道层	3.6	机械通风
副厂房	7.3	机械通风
主变洞	31	机械通风、除湿机

1.3 通风空调系统控制模式

通风系统控制模式分为温度控制模式和湿度控制模式,正常情况下运行于温度控制模式。主厂房的温度控制目标为 25℃,湿度控制目标为 50%。

1.3.1 温度控制模式

(1)温度高工况。当厂房内温度在 22℃至 28℃之间,开启一副厂房顶层、安装间副厂房顶层组合空调各 1 台,保持厂内通风,当厂房内温度高于 28℃,此时若厂外温度高于 28℃,直接将 2 台组合空调运行于空调模式;若厂内温度高于 32℃,启动 3 台组合空调制冷;若厂内温度高于 36℃,启动 4 台组合空调制冷。停止顺序条件类推,温度回差为 2℃。

当厂房内温度高于 28℃,此时厂外温度在 22℃至 28℃之间,开启一副厂房顶、安装间副厂房顶各 1 台组合空调通风。若厂内温度高于 32℃,启动 3 台组合空调制冷;若厂内温度高于 36℃,启动 4 台组合空调制冷。停止顺序条件类推,温度回差为 2℃。

当厂房内温度高于 28℃,此时厂外温度低于 22℃时,开启一副厂房顶层、安装间副厂房顶层各 1 台组合空调通风;若厂内温度高于 32℃,启动 3 台组合空调通风;若厂内温度高于 36℃,启动 4 台组合空调通风。停止顺序条件类推,温度回差为 2℃。

(2)温度低工况。当厂房内温度低于 22℃,开启 1 台组合空调运行于通风模式。

1.3.2 湿度控制模式

当厂房内湿度高于 80%时,退出温度控制模式,启动湿度控制模式,此时启动一副厂房顶层、安装间副厂房顶层组合空调各 1 台进行制冷;如果湿度到达 85%,启动 3 台风机进行制冷;如果湿度到达 90%,启动 4 台风机制冷。

制冷过程中如果温度达到 20℃时,或湿度降

低为 60%时,自动切换至温度控制模式。

温湿度控制模式能基本满足厂内通风要求,从上述控制模式变化来看,组合空调能根据厂内温湿度自动控制,以达到保证人身和设备安全的目的。

2 通风空调系统布置

该地下厂房共装有 4 台单机容量为 375 MW 的水轮发电机,由于厂房埋深较深,受外界气候的直接影响较小,厂房内的热湿负荷主要来自地下厂房洞室群的岩体散湿和机电设备的散热。据分析散热负荷主要来自于照明、发电机、大电流封闭母线、变压器及各类配电设备等。根据电气等专业所提供的设备初步散热量,参照相应规模已建电站和在建电站的发热量计算,地下厂房主要场所发热负荷见表 2。

表2 地下厂房主要场所发热负荷表

区域	发热量 / kW
主厂房发电机层	434.0
主厂房中间层	150.4
主厂房水轮机层	31.0
主厂房其他区域	35.8
副厂房	160.0
主变洞	518.0
母线洞	695.4
电缆竖井	125.0
总计	2 149.6

2.1 主厂房通风空调系统

主厂房是体积最大的洞室,上下共分五层,发电机层是全厂运行的主要场所;中间层设置有母线洞、机组自用变配电设备和控制盘等;水轮机层主要为调速器系统的油压装置以及推冷泵等设备;尾水廊道层主要为技术供水管路和水泵。主厂房热湿负荷的特征是上部发电机层和中间层发热负荷大,下部尾水廊道层发热量小、散湿量大。所以发电机层和中间层设计以通风空调为主,水轮机层及尾水廊道层设计以通风除湿为主。

2.1.1 发电机层

由于发电机层采用双侧进风、双侧机房方案,送风方式基本可定型为从顶部下送风^[2]。该送风方式已在大型地下厂房成功应用,并经过多次模型试验和模拟计算,理论和实践都证明是一种较为合理的方式。

主厂房顶部考虑采用风管送风方式,上下游侧分别设置送风主管,主管长度和断面按左右侧

送风量确定,为满足长距离送风的均匀性,设置送风支管,送风口风速按 6 m/s 左右选定。送风口间距和布置形式可参照或类比同类厂房模型实验和模拟计算的结果。

根据类似工程经验,进入到厂房末端的空气较为潮湿,相对湿度达到 90%~98%,若将此潮湿空气直接送入主厂房发电机层,在发热量较小的情况下,特别是在发电初期,将会导致发电机层空气的相对湿度偏高,因此主厂房发电机层进风采用组合式空调器以降低空气的绝对含湿量。室外新风经空调器冷却除湿、过滤后接主厂房拱顶送风总管。

发电机层热负荷 434 kW,要满足温湿度参数,需选择 4 台组合式空调器,左右各设置 2 台,分别布置在副厂房顶层风机房和安装场顶层风机房内。副厂房顶层空调器从通风兼安全洞进风道进风,末端温度约为 24 °C,空调器冷却段拟采用库水冷却器,单台所需制冷量为 45 kW,单台风量为 5.5 万 m³/h,安装场顶层空调器从进厂交通洞进风,末端温度约为 22.5 °C,单台风量为 5.5 万 m³/h,空调器冷却段亦采用库水冷却器,单台所需制冷量为 25 kW。主厂房发电机层总送风量为 22 万 m³/h,从进厂交通洞和通风兼安全洞进风各进 11 万 m³/h 风量。

2.1.2 中间层

因采用母线洞与主厂房串联通风的方式,进入主厂房的风量经各层循环后,大部分需从母线洞处排出。中间层是与母线洞相连的唯一通道,故进入主厂房 22 万 m³/h 风量,除进入电缆道 6 000 m³/h 外,余下 21.4 万 m³/h 进入下游 4 条母线洞。

经上游墙上壁式轴流风机从发电机层送入中间层的送风总量约 3.6 万 m³/h,来自水轮机层和尾水盘型阀操作廊道层的排风量为 8.1 万 m³/h,其余 10.3 万 m³/h 通过楼梯间从发电机层进入。

中间层热负荷为 150.4 kW,主要集中在下游母线侧和中部自用变配电设备处。经计算,除设置通风系统外,还需设置总制冷量为 100 kW 的空调器去除余热。拟在每个机组段下游侧设置 1 台单元式水冷空调机,共 4 台,单台制冷量为 25 kW。

2.1.3 水轮机层

水轮机层有效面积基本同中间层,由于机墩

混凝土厚实,机组对空间的热传导可忽略不计,又因电气发热设备较少,只有不持续运行的油压装置,所以该层热负荷相对较小,但散湿量与中间层相当,所以应以机械通风为主,按换气次数 3 次/h 计算,所需通风量约为 3.6 万 m³/h。空气经上游墙上壁式轴流风机从发电机层送入,排风经下游侧夹墙风管和风机排至中间层下游侧,因该层机墩混凝土体积量较大,施工余水散湿较大,在发电初期环境的相对湿度将不能满足要求,应设置除湿装置。在 4 个机墩间共设置 4 台冷冻除湿机,单台除湿量为 7.5 kg/h。

2.1.4 主厂房其他区域

主厂房其他区域包含空压机室以及尾水廊道层。空压机室压气设备为风冷型。采用机械通风方式,通风量为 9 000 m³/h,进风经上游墙上壁式轴流风机从发电机层取风,排风经下游侧夹墙风管和风机排至中间层下游侧。考虑风冷压气机散热量较大,在压气机室设单元式水冷空调机 1 台,处理风量为 2 500 m³/h,制冷量约 15 kW。

尾水廊道层由于结构需要,且有效面积较小,仅为 1 194 m²,除照明散热外,机组段热量很小,另外机组段间设置大管径技术供水管路,水温较低,表面吸热后,环境温度降低,可以预测机组段相对湿度很大,所以,除设置必要的通风换气系统外,应重点考虑设置除湿装置。通风形式同水轮机层,上游夹墙风管从发电机层引风 3.6 万 m³/h,排风经下游排至中间层。在每个机组段设置 1 台除湿机,共 4 台,单台除湿量为 10 kg/h。在左端侧水泵房设置 2 台除湿量为 10 kg/h 的除湿机 2 台。

2.2 副厂房通风空调系统

副厂房位于主厂房的左侧,共分 10 层,主要布置有中压压气设备、油罐、照明变配电装置、公用变配电装置、电缆、二次盘柜室等,中控室位于第 8 层,顶层为通风设备层。经计算副厂房主要发热设备集中于压气机层、变配电层和中控层等。为维持必要的通风换气次数,每层需保证一定的新风量,同时由于各层功能的不同,最大发热时间也不同。因此,采用带独立新风的分层进风系统和分层独立排风系统,通风采用机械送排风方式,排风量一般都满足地下厂房最小通风换气量及事故后排烟的通风量(一般为 6 次/h)。对发热量较

大的压气机室、变配电盘柜室和环境温湿度要求较高的蓄电池室等,采用单元式水冷空调器循环制冷降温。对于通信设备室等重要设备额外配备一台精密空调,用以实时控制室内温湿度。所需总机械制冷量约为160 kW。这种通风、空调组合方式能使通风系统运行稳定,空调系统投入相对灵活,既满足正常排风要求,又能满足火灾后排烟需要。副厂房总送、排风量约8.9万 m^3/h 。进风来自通风兼安全洞进风道,排风汇入通风兼安全洞排风道,经洞口总排风机排出厂外。

2.3 主变洞通风空调系统

主变洞热负荷约518 kW,大部分场所对环境相对湿度要求不高,设计以通风排热为主。进风来自于进厂交通洞,排风主要由2条通道:通风兼安全洞排风道和出线洞,主变洞总进、排风量约31万 m^3/h 。对含有 SF_6 气体设备的场所考虑正常通风和事故泄露时排风的两种要求。

2.3.1 主变层

主变层主要是共设有13台单相油浸式主变压器,其中1台备用。每台变压器设置于独立的房间内,考虑防火和防爆的需要^[3],对每台变压器室设置独立的排风兼排烟系统,每台变压器排风量为12 000 m^3/h ,排风引至顶拱主排风排烟总管,由通风兼安全洞排风道排出地面。主变压器室下游墙进风处设置电控和熔动的防火阀。该层其余房间电工试验室、细水雾泵房、卫生间、污水处理室设机械排风系统,卫生间和污水处理室排风量按换气次数10次/h计算,其余房间排风量按换气次数6次/h计算。

2.3.2 电缆廊道层

设自然进风、机械排风,进风取自与进厂交通洞连接的主变洞底层主变运输通道。排风至顶拱,通过通风兼安全洞排风道排出地面。排风量按换气次数不小于6次/h计算,约1.5万 m^3/h 。

2.3.3 GIB层

该层母线布置于主变室下游,设机械进风、机械排风。排风按4次/h进行计算,通风量为1.9万 m^3/h 。设2套排风系统,排风系统兼事故时 SF_6 排风,排风机设于顶拱,排风口贴地面布置。事故时由 SF_6 气体泄漏报警装置自动控制使2套风机均投入运行。

该层还设有电工试验室、备品库、工具间等,

设机械通风系统,通风量按6次/h进行计算,总通风量约为2.3万 m^3/h 。

2.4 母线洞通风空调系统

由于母线洞与主厂房中间层通风系统串联运行,从主厂房中间层排风状况可知,进入母线洞的风温约29.5~30.0 $^{\circ}\text{C}$,总进风量约21.4万 m^3/h 。

母线洞电气设备布置集中,发热负荷较大,约占全厂发热负荷的32%,根据母线洞发热量计算,每条母线洞平均发热量约173 kW,在机组连续运行时,不计母线洞岩壁吸热,在每条母线洞5.35万 m^3/h 风量作用下,母线洞末端温升将达13 $^{\circ}\text{C}$ 左右,排风温度高达43 $^{\circ}\text{C}$ 以上,这样的环境温度对母线洞电气和控制设备运行很不利,单靠机械通风是很难满足电气设备的环境要求,需采用必要的降温措施。经计算,4条母线洞需增加空凋制冷量约432 kW,每条母线洞需108 kW的空凋制冷量。每条母线洞设置2台水冷空调器,共8台,单台制冷量为54 kW。

在每条母线洞的末端与主变洞上游交接处设置母线洞排风道,母线洞热空气在排风机的负压作用下可顺畅地排至主变洞顶拱。排风机布置于主变洞顶层处,每个母线洞设置1台双速排风机,配合主厂房总进风量,排风机做低速或高速运行,经4条母线洞排至主变洞顶层的总风量约21.4万 m^3/h ,该部分风量将汇入通风兼安全洞排风道排出。

2.5 电缆竖井通风空调系统

该工程采用500 kV高压电缆出线,高压电缆由主变洞二层的下游引出,该洞分为竖井段、上平段、下平段,引至地面出线场。由于高压电缆电流较小,发热量相对较小,采用机械通风方式可排除余热。考虑出线洞洞体断面较大,围岩有较大的吸热能力,排风量可适当减小,故在出线洞口处设置2台排风机,根据出线洞发热情况,风机可运行1台或2台。出线洞总通风量约4万 m^3/h 。

3 结 语

在厂房通风空调方案选择时主要考虑系统安全可靠、设备先进、管理方便、运行节能的原则,具体侧重于以下方面:

(1)在保证通风效果的前提下,充分利用已有的洞室和通道,组织合理的通风流程,尽量减少专用通风通道和竖井的开挖^[4]。

(2) 对主厂房、副厂房、主变洞等按防火分区的原则设置通风空调系统,有利于地下厂房的防火、防烟和排烟。

(3) 充分利用现有进风道通道的自然降温去湿效应(夏季),以降低厂房空调电负荷。

(4) 利用机组尾水管低温水作为末端空调器的冷却水或采用库水直接冷却。

(5) 通风气流组织应考虑地下厂房火灾时烟气的流动规律,在火灾事故时能控制烟雾流向,尽快排除烟雾,使人员安全疏散,减少火灾事故的危害。

(6) 对深埋地下厂房应采用可靠、有效的防潮和除湿措施,使厂房相对湿度较大的部位,能够进行湿度控制。

(7) 由于地下洞室在冬季具有明显温升的效果,加上电气设备等本身的散热量,根据类似工程经验,本电站地下厂房在冬季不考虑采暖措施。

该站通风空调系统基本满足站内通风除湿需求,同时考虑了岩体吸、放热的过程,地下厂房由于在地底深处,受外借大气环境影响较小,但岩体对厂房温度影响不可小觑,因此该站通风空调系统设计充分考虑了岩体影响,将岩体吸、放热量做为设计安全余量考虑^[5],为电站的良好运行做充

(上接第 89 页)

中产生的大量热量需要通过技术供水系统将热

表 1 机组技术供水系统流量报警值

序号	描述	单位	一级报警值	二级报警值
1	发电机上导轴承冷却水进口流量监测	m ³ /s	≤40	≤35
2	发电机下导轴承冷却水进口流量监测	m ³ /s	≤40	≤35
3	发电机空冷器冷却水进口流量监测	m ³ /s	≤670	≤588
4	推力轴承冷却水进口流量监测	m ³ /s	≤280	≤245
5	水导轴承冷却水进口流量监测	m ³ /s	≤18.0	≤12.0

量带走。若机组冷却水中断,技术供水系统运行异常,机组轴承瓦温、油温会不断上升,当温度过高时会导致机组非计划停运,直接影响电站的安全运行和经济效益,给企业造成不可挽回的损失^[3]。本文通过对机组多次发生的导轴承冷却水流量低报警事件进行分析,查明了其报警原因,并给出了后续

分准备,同时也为后续同类型地下厂房建设提供了一个较好的范本。

参考文献:

[1] 陈军,盘晓红,徐蒯东,等.白鹤滩水电站通风空调系统设计[J].暖通空调,2022,52(10):129-134. DOI:10.19991/j.hvac1971.2022.10.19.

[2] 丁宇.某抽水蓄能电站地下厂房热环境通风调控试验研究[D].重庆大学,2018.

[3] 王树国,朱述友.基于一种新型高速泄压技术的油浸变压器防爆防火方案研究[J].电气应用,2022,41(12):51-57.

[4] 刘石磊,童谣,王树刚.隧道施工通风系统中竖井风量及影响因素分析[J].隧道建设(中英文),2022,42(S1):104-111.

[5] 王淑莹.不良地质段地下厂房岩锚梁开挖技术探究[J].水利建设与管理,2022,42(10):57-61+69. DOI:10.16616/j.cnki.11-4446/TV.2022.10.11.

作者简介:

黄河锦(1999-),男,湖南常德人,工程学士,从事水利水电工程工作;

秦福兴(1993-),男,四川成都人,电气工程助理工程师,工程学士,从事水利水电工程工作;

王命福(1992-),男,福建福清人,电气工程师,工程学士,从事水利水电工程工作;

李伟(1995-),男,吉林德惠人,电气工程助理工程师,工程学士,从事水利水电工程工作;

杨扬(1998-),男,云南寻甸人,电气工程助理工程师,工程学士,从事水利水电工程工作。

(责任编辑:吴永红)

解决方案,对于后续机组发生类似事件如何进行分析和处置具有一定的指导意义。同时该事件也表面在后续分析报警信号时不能只考虑设备因素,自然环境因素的改变也应该引起重视^[4]。

参考文献:

[1] 金波.阿海水电站技术供水系统运行优化[J].云南水力发电,2022,38(12):319-321.

[2] 黄茵.右江水电厂技术供水减压阀故障分析及其处理[J].广西水利水电,2022,(01):102-104.

[3] 喻建波.技术供水冷却水流量低引起事故停机的分析[J].水电站机电技术,2005(05):51-54.

[4] 许修乐,陈磊,肖维宝.琅琊山抽水蓄能电站技术供水出口压力低原因分析及处理[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会.抽水蓄能电站工程建设文集 2021.中国水利水电出版社,2021:384-388. DOI:10.26914/c.cnkihy.2021.038154.

作者简介:

甘鑫(1996-),男,河南南阳人,助理工程师,工学学士,从事水电站运行工作;

赵传啸(1986-),男,四川成都人,高级工程师,硕士,从事水电站运行工作。

(责任编辑:史心雨)