

# 大跨度气膜结构关键技术研究

王 军 峰, 熊 伟 峰

(中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066)

**摘 要:**气膜仓作为一种创新型轻型建筑结构,利用内外气压差原理构建大跨度无梁柱空间,通过向内部充气形成高压气腔,膜材在气压作用下绷紧扩张,如同充气的气球般形成稳固建筑。智能控制系统精确调控内部气压,确保结构稳定并能承受自身及外部荷载,且利用备用风机保障持续运行,选用难燃透光材料制造,既确保了安全性又实现了节能效果。

**关键词:**气膜;大跨度;节能

中图分类号: TU3

文献标志码: A

文章编号: 1001-2184(2024)增 1-0099-06

## Research on Key Technologies of Large-span Air-film Structures

WANG Junfeng, XIONG Weifeng

(Sinohydro Bureau 5 Co., LTD., Chengdu Sichuan 610066)

**Abstract:** As an innovative light-duty building structure, the air-film silo is used to construct a long-span space without beams and columns by the principle of air pressure difference between inside and outside. By inflating inward to form a high-pressure air chamber, the membrane tenses and expands under the action of air pressure, forming a stable building like an inflatable balloon. The intelligent control system precisely controls the internal air pressure to ensure that the structure is stable and can withstand its own and external loads, uses backup fans to ensure continuous operation, and use of flame-retardant transparent material manufacturing, ensuring the safety and achieves the energy-saving effects.

**Key words:** Air-film; Large-span; Energy-saving

### 1 概 述

随着建筑技术的进步和新材料的应用,大跨度气膜结构作为一种新型的空间结构形式,因其独特的设计理念和出色的性能优势,在体育场馆、展览中心、仓储设施等领域得到了广泛的应用。大跨度气膜结构以其轻质、高强度、快速搭建等特点,成为现代建筑领域的一大亮点。

然而,作为一种非传统的建筑形式,大跨度气膜结构在设计、制造、安装和维护等方面面临着诸多挑战,为了更好地发挥气膜结构的潜力,关键技术研究显得尤为重要。包括材料性能、结构设计、气压控制、安全性能评估等方面,以期气膜结构的设计和应用提供科学依据和技术支持。

蕲春县石鼓冲绿色建材基地项目是一个蕴藏丰富片麻岩与花岗岩的大型矿产工程,年产量

高达 7 000 万 t,储备建筑石材约 4.6 亿 m<sup>3</sup>。项目涵盖矿山开采、砂石加工、长距离传输廊道及码头建设,其中码头位于彭思镇张滩村,邻近长江,物流优势显著。矿石经廊道直送至码头旁的巨型气膜仓堆场,该堆场尺寸为 335 m×182 m×61 m(长×宽×高),面积为 6.1 万 m<sup>2</sup>,堆存能力为 27.2 万 m<sup>3</sup>,采用全封闭气承式膜结构<sup>[1]</sup>,其规模在国内外均属罕见,对气膜技术创新应用提出新要求,具有重要研究价值。码头陆域堆场气膜仓效果见图 1。

### 2 气膜结构安装

施工准备阶段,需确保人员与机械就绪,并对工人进行详细的安全技术指导。按照预定分区封闭工地,铺设彩条布以防气膜损伤,对混凝土墙体及设备棱角加装保护,同时明确标识膜材拼接区域,预置 U 型埋件处标记钢索代码。根据工程进度,气膜仓内的胶带机上方的卸料车、栏杆、轨道、皮带和滚轮延期至气膜充气稳定后安装,以防施

收稿日期: 2024-07-15



图1 码头陆域堆场气膜仓效果图

工期间受损。

### 2.1 膜材及钢丝绳进场

膜材进场后应对材料性能及外观质量进行验收,检测结果应满足设计及《膜结构技术规程》CECS 158—2015 要求。钢索使用前必须检查绳索是否有损坏,以及直径大小是否符合要求;钢丝

索不得有急剧的曲折、环圈、跳丝或砸扁等缺陷。

### 2.2 架空辅助钢索铺设

气膜采用架空安装的方式,原理是利用钢结构桁架设置架空钢索的方式对气膜起到支撑安装的作用。架空钢索通过受力计算进行具体的铺设,架空钢索铺设见图2。

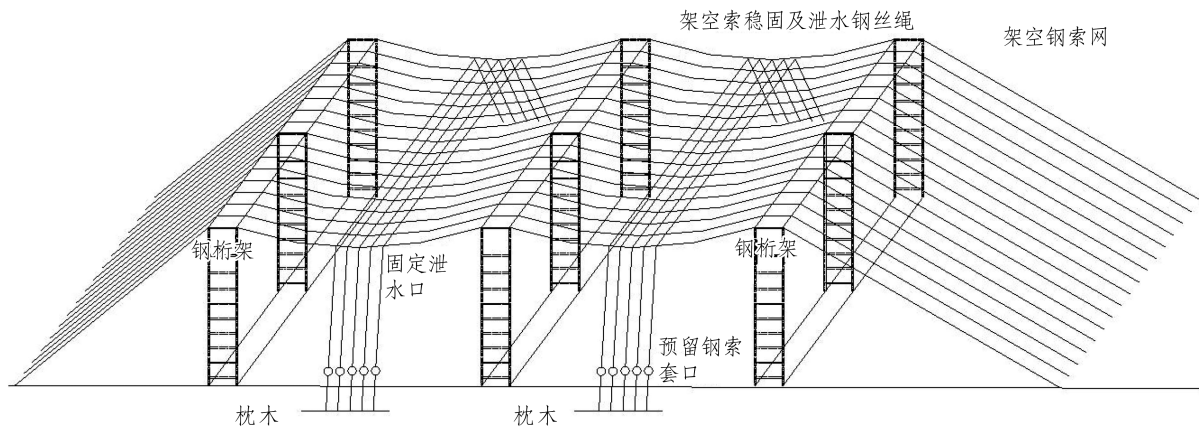


图2 架空钢索铺设示意图

### 2.3 气膜安装、拼接

因该工程为大跨度气膜仓,膜材的分区尤为重要,气膜加工应根据工程现场地形条件、施工顺序、人员机械安排等与气膜仓厂家进行有效沟通<sup>[2]</sup>。气膜仓厂家根据现场条件设计索网、膜单元分区图。

(1)气膜材料主要参数及要求。技术性能需满足设计规范,若无具体指示,则依循《膜结构技术规程》CECS158 推荐的 P7 级。膜材涂层与面

层需根据环境条件、预期寿命及自洁、耐久性要求精选,确保材料防火性能达 B1 级<sup>[3]</sup>,符合国家安全标准,质保期 15 年,预期寿命不低于 30 年<sup>[4]</sup>。外观要求膜面平整、色泽统一,涂层均匀无瑕疵,如针孔、污渍、破损等,并需具备 7%~8% 的透光率,以自然光照满足作业需求<sup>[5]</sup>。

(2)气膜材料加工。膜材拟加工打包分为 13 片,每片膜约为 5 000 m<sup>2</sup>,重约 5.5 t,加工完成后,将这些膜材打包为 3 m×3 m(长×宽)的尺寸

运输至工程施工区域进行拼接。

气膜加工前的裁剪设计需依据膜材特性来确定应变补偿量以确保结构性能,同时追求视觉美观与材料高效利用,便于实际操作。加工环节应在室内清洁、干燥环境下作业,理想温度控制在  $5\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间。为保证质量,单体结构推荐使用出自同一批次的膜材。裁剪与热合步骤应采用专业设备执行,推荐使用全自动裁剪机进行精确裁剪,并采用轨道式高频热合机来提升热合效率与质量。

(3)膜材安装。考虑膜材端部在安装期间有兜风隐患,计划先进行中部膜材(3~11号膜)安装,再进行端部安装(两端同步进行)。

#### ①膜材滚开上桁架

展膜到挡墙位置钢丝绳先不紧固,利用两台 50 t 吊车(膜重约 5.5 t,工作幅度 10 m,吊载 6.8 t)吊上桁架放置;完成后利用云梯车上人拆除吊装辅助设施;吊装完成后再进行架空网索紧固。

#### ②展膜、拼接

胶带机桁架高约 25.5 m,桁架距挡墙边约 41 m,需进行高空拉膜,利用 6 台 50 t 吊车(工作幅度 20 m,臂长 40 m)辅助展膜,2 台云梯车辅助上桁架;云梯车输送人员到桁架上,对吊装在桁架的膜片端部埋绳边进行吊装夹板安置,另布置 2 台吊车站于桁架两侧对向抬升膜材,到位后收臂拉到桁架边位置,然后挡墙外吊车同步拉置到挡墙,完成后对向挡墙吊车同步进行膜材拉置到挡墙。

3~11 号膜材按以上步骤进行作业,完成后开始进行拼接,因高空拼接需在膜底部进行螺栓施工,每条拼接点配置 4 个作业面,每个作业面安排 3 人,2 个作业面从中部往两边拼接,另 2 个作业面从挡墙往中部作业,采用 3 台云梯车进行辅助,上部紧固作业设置 2 道安全绳,配置 5 点式双大钩安全带在膜面进行拼接。两端膜材也如上述步骤同步进行作业。展膜铺设施工见图 3。



图 3 展膜铺设施工图

#### ③膜材拼接

膜材之间的主要受力缝应采用热合连接,其他连接缝采用铝合金压板;与挡墙基础之间压膜采用镀锌角钢,镀锌角钢钻孔与原预埋螺栓采用螺栓连接;膜材与膜材连接采用 304 不锈钢螺栓连接;铝板尺寸为  $200\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 厚),螺栓材质为 304 不锈钢,长度为 40 m。具体方式如下:

首先将膜材展开,把相邻 2 片膜材用专用工具拉到拼接位置;膜材连接部位和铝板出厂前都

已开好孔,2 片膜材的开孔位置要对好,用 2 块铝板上下把膜材夹住,然后用螺栓穿孔连接,用电动扳手拧紧;其他依照此方式依次连接固定,整个拼接缝完成后,检查各螺栓的松紧度,检查合格后,将防水批帘反扣在拼接缝上,防止雨水从拼接缝流入。

#### 2.4 网索铺设、打卡扣

该工程气膜仓高度达 61 m,对钢索质量和布局设计有着极高要求。采用高强度、防老化钢芯热镀锌钢缆,并在外面套 $\geq 1.5\text{ mm}$  厚高密度聚

乙烯(HDPE)保护层,特别设计防止钢缆间滑动损伤PE层,同时在锚具连接处进行防水密封,所有锚具均做热镀锌防腐,以增强耐久性。依据精确计算,定制钢缆直径与科学布置方案,施工过程复杂精细。首先,依据图纸标记定位U型预埋件,确保钢索精准嵌入。铺设钢索时,采用S型路径以防止非充气状态下缠绕,便于后续安装十字

扣。膜材安装完毕后,利用50 t吊车将网索吊装至预定点,人工精确拉伸至预埋件固定,优先固定中间区域辅助钢丝绳,以保障结构稳固,再向挡墙延伸固定。钢索铺设全程严格复核编号,确保无误,为后续工作铺平道路。最后,借助云梯车辅助安装十字扣,确保每一个交叉节点精准对接,防止错位。斜向钢索系统示意图见图4。



图4 斜向钢索系统示意图

## 2.5 封闭口连接处理

气膜仓需进行封闭口处理位置主要有气膜仓与胶带机进料口、气膜仓与挡墙基础、气膜仓与地弄廊道结构出料口等。

(1)气膜仓与胶带机进料口。气膜仓与进料口胶带机穿越膜结构区域设置双层密封通道。

(2)气膜仓与挡墙基础。与挡墙基础之间压

膜采用镀锌角钢,镀锌角钢钻孔与原预埋螺栓采用螺栓连接<sup>[6]</sup>。膜材与挡墙之间处理示意图见图5。

(3)气膜仓与地弄廊道结构出料口。气膜仓与地弄廊道两侧出料口采用方钢做框架加膜材料做封堵墙以封闭廊道空间,设置活动平开门用于日常管理人员出入,减少漏风量。

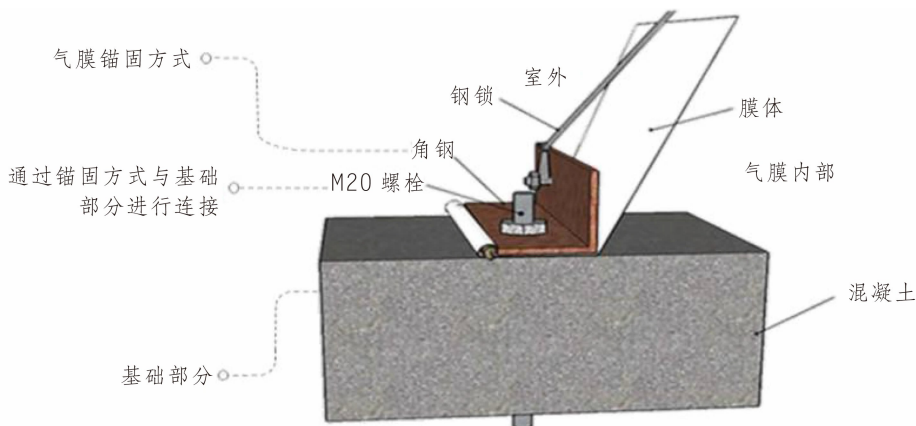


图5 膜材与挡墙之间处理示意图

## 3 设备安装

### 3.1 供电、设备及控制系统安装

(1)供电。该项目电气系统由发包方提供双路380 V电源接入新建气膜配电室,以确保满足

气膜设施的电力需求,并额外配置柴油发电机作为保安电源,专供气膜风机使用。低压配电系统采用主放射式布局,部分采用链式结构,最多串联三台设备,由低压开关柜和动力配电箱统一供电,移动设备则通过软电缆灵活供电。气膜风机采用变频控制,空调风机采用工频星三角启动,大功率电机采用降压启动,其余电机直接启动。

(2)智能送风加压系统安装。该工程共需设置 41 台送风加压风机,沿纵向挡墙对称进行布设,每台功率为 18.5 kW,采用工频与变频结合设

置。送风加压系统包括风机、定向吹风调节器等,保证料场内不同使用条件时的通风需求。

(3)室内新风换气系统安装。通过风机加压维持气膜结构安全的同时满足室内新风要求,新风换气量的大小通过混凝土护壁上的排气阀及气膜顶部的排气阀调节,由智能控制系统根据室内的空气环境自动控制运行。气膜仓顶部智能通风换气系统包括固定基础、气膜、顶部排气通道、排放阀、气膜 PLC 控制系统以及气膜室内空气质量监测系统。气膜仓内排气示意图 6。

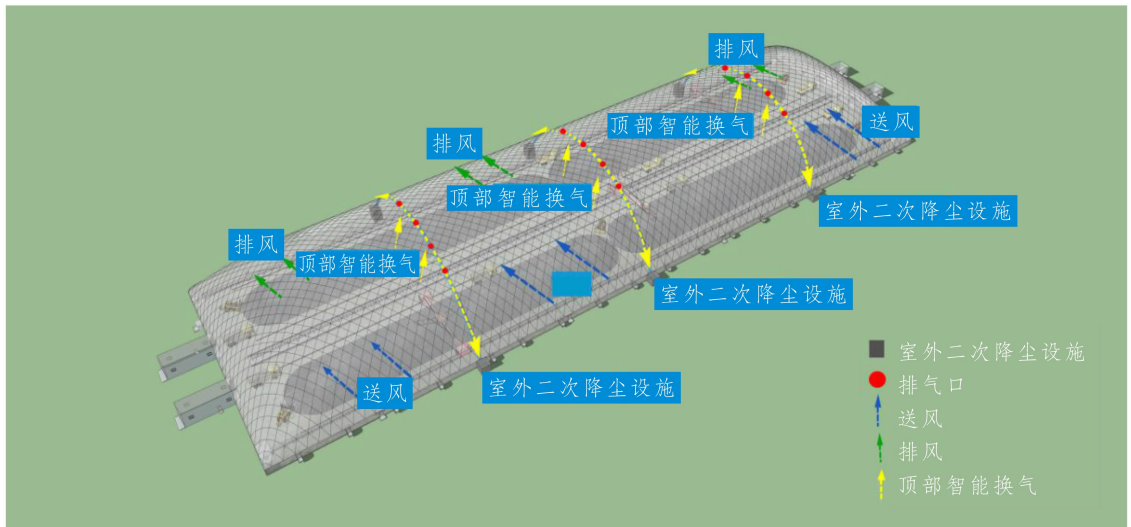


图 6 气膜仓内排气示意图

(4)传感器监测系统安装。气膜仓全封闭完成后,室内散发的粉尘及机械排放的废气需要及时排放,否则当粉尘聚焦后存在爆炸的隐患,严重影响作业人员安全。

通过室内各种传感器监测系统收集室内空气环境信号,传输到控制系统,经过 PLC 系统分析处理后,全自动智能控制新风换气设备运行,确保室内空气质量。

(5)PLC 智能控制系统安装。PLC 智能控制系统是气膜设施的核心和大脑,控制着气膜所有设备的运行。智能系统通过遍布在室内外的各种传感器收集环境数据(例如:粉尘浓度、瓦斯和空气质量感应器、室内气压感应器、室外的风速感应器、雪荷载感应器等),智能控制系统会根据 PLC 编程自动控制风机、排气装置、排尘装置等设备变频协调运行,实现无人值守管理,从而达到气膜设施安全、空气清新、环境舒适、节能环保的目的。控制系统远程终端示意图见图 7。

### 3.2 附属设施安装

该项目附属设施施工着重于安全保障与环境友好,具体包括照明、备用电源、消防及除尘系统。

(1)照明系统安装。照明系统严格遵循《照明设计技术规定》,确保料棚内光照充足,无论检修还是巡检均无障碍。灯具布局周全,具备防水、防尘、防震及防爆功能,安装于挡墙四周。照明配电箱采用防爆设计,设于入口且系统智能调控,仅在自然光不足时自动启动可以节约能源。

(2)备用电源及自动切换装置。为应对断电危机,项目配备了大容量柴油发电机组作为备用电源,足以应对极端天气下所有设备全负荷运转的需求,能自动切换至市电功能,确保电力供应不间断。发电机组设计耐寒,备有充足燃油,至少保证 8 h 连续供电。

(3)消防系统。消防系统遵循最高标准,采用固定消防炮系统,布局合理,覆盖料场全范围,射

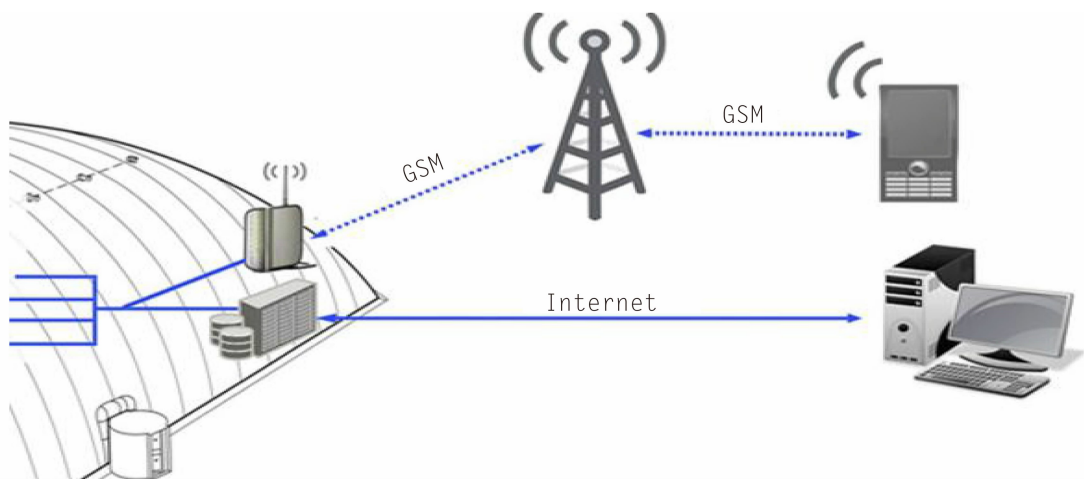


图7 控制系统远程终端示意图

程达 60 m,支持远程遥控,提高了应急反应速度和操作安全性。消防炮附近配置报警联动按钮,提升了系统灵活性与响应效率。

(4)除尘雾炮。除尘方面,采用 60 m 射程的雾炮系统,全面覆盖堆场,用水源自中水系统,单台雾炮耗水量 4.0~6.0 m<sup>3</sup>/h,系统设计至少支持两台同时运行,总供水量 8.0~12.0 m<sup>3</sup>/h。雾炮系统集成控制、供电、供水子系统,可通过现场或远程遥控操作,雾炮动作灵活可控,有效提升料场在多种作业条件下的安全、环保效能。

#### 4 气膜充气起膜

在进行气膜结构初次充气前,需确保气象条件适宜,避免风速超过 6 m/s 或在雨天操作。事先检查风机与发电机的运行状态,验证风机无异常且发电机可自动切换,确保电力供应稳定。对于该项目 61 m 高的气膜棚,充气前务必对风机采取防护措施,防止膜材受风向影响遮挡风机入口。在雨季施工时,预先在低洼处设置排水系统,使用潜水泵等工具排空积水,防止膜面带水充气,以免雨水积聚导致膜材损坏。通过这些措施,确保气膜结构安全、高效地完成充气过程。气膜充气起膜见图 8。

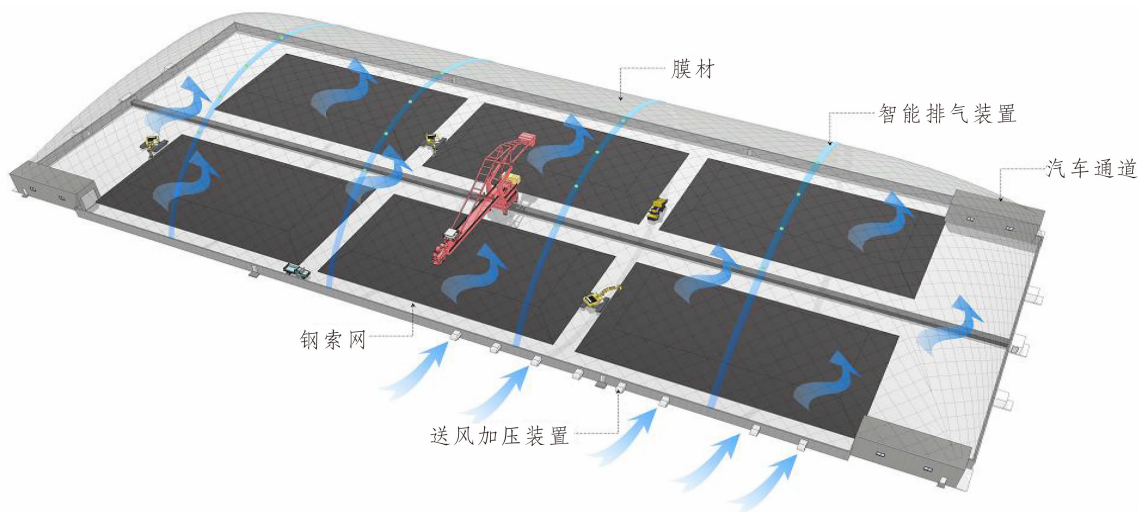


图8 气膜充气起膜

#### 5 结语

气膜仓采用模块化设计和预制组件,使安装过程快捷高效,工期显著缩短,相对于传统建筑模式极大节省了时间和成本,在施工过程中对

环境影响轻微,噪音低,体现了良好的环保特性。同时,气膜仓具备出色的保温隔热性能,有效降低能耗,顺应了节能减排的时代趋势。气

(下转第 137 页)

技有限公司对系统进行了长达 7 个月的研发、部署和试验。最终得到的系统性能如表 1 所列：

表 1 系统性能表

试验项	测试方法	实验结果
发送速度	模拟大量短信同时发送	发送速度>200 条/min
丢包率	一次向 30 个手机号码发送 10 条数据	未丢失信息,即丢包率<0.3%
屏蔽功能	反复测试四种屏蔽功能	操作均成功
定时发送	每日 4 次定时短信,持续一月	定时信息无漏发
通道切换	反复切换移动和电信发送通道 10 次	每次切换通道均能正常维持短信发送功能

新 On-CALL 系统主界面如图 1 所示：



图 1 on-call 系统主界面

### 3 结语

通过对 On-CALL 功能问题的总结和发掘，

猴子岩电站设计并掌握了新型信息系统的设计方法和技术基础，提出了一整套标准规范要求，完整地满足了值班报警业务在水电厂生产中的业务场景需要。

同时，新系统在技术上完全实现了初始的设计要求，发展了当前的水电 On-CALL 系统业务模式，也成为电站智慧化建设的基石之一。

#### 参考文献：

- [1] 刘国云. ONCALL 系统与移动短信平台联动研究与实施[J]. 水电厂自动化, 2016(3):72-74.
- [2] 商宁,覃飞,刘福龙. EDPF-ONCALL 系统在猴子岩水电站的开发与应用[J]. 工程建设与设计, 2019, (14):244-245, 250.
- [3] 章明. 可可托海水电站 ONCALL 系统设计及实施方案探讨[J]. 新疆有色金属, 2017, 40(6):106-107, 109.
- [4] 全亮,朱立新,杨龙保. 漫湾水电站多通道短信报警系统的设计与实现[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, 3(5):53-56.
- [5] 肖亮. 龙开口水电站 ONCALL 系统设计与实现[J]. 水电站机电技术, 2018, 41(7):28-29, 78.

#### 作者简介：

邱 华(1984-),男,湖北咸宁人,工程师,本科学士学位,从事水电厂生产技术管理工作;  
 王鲁川(1992-),男,四川眉山人,助理工程师,本科学士学位,从事水电厂自动化、智慧化项目的开发与实施工作;  
 冯 迅(1979-),男,安徽芜湖人,高级工程师,硕士研究生,从事水电厂自动化、智慧化项目的开发与实施工作;  
 李天智(1992-),男,四川乐山人,工程师,本科学士学位,从事水电厂生产运行、自动化技术管理工作。

(编辑:史心雨)

(上接第 104 页)

膜仓设计灵活,可以根据实际应用场景的需求调整空间尺寸和形状,广泛应用于工业仓储、体育场馆、展览馆等多种领域。采用高强度的膜材结合先进的气压控制系统,气膜仓在抵御风雨雪等恶劣天气条件的同时,抗震性能卓越,保障了建筑的安全性。内部无梁无柱的构造简化了气膜仓的维护工作,即便在需要维修或更换膜材时,也能较为便捷地进行,从而降低了后期维护成本。凭借快速搭建、环保节能、结构灵活、经济效益显著、安全性高以及易于维护的诸多优点,气膜仓已成为现代建筑行业中极具竞争力和广泛应用潜力的一种建筑形式,对环保事业和社会效益具有积极的推动作用。

#### 参考文献：

- [1] 中国工程建设标准化协会. 充气膜结构技术规程充气膜结

- [1] 构技术规程:T/CECS 1323-2023[S]. 北京:中国计划出版社,2023.
- [2] 杨涛,丁辛,杨旭东,等. 建筑用膜结构材料的发展现状和趋势[J]. 纺织导报, 2019:95-97.
- [3] 张媛媛,朱国庆,韩如适. 气膜建筑材料燃烧特性试验[J]. 消防科学与技术, 2013(4):360-363.
- [4] 中国工程建设标准化协会. 膜结构技术规程:CECS 158-2015[S]. 北京:中国计划出版社,2016.
- [5] 中国国家标准化管理委员会. 塑料 聚乙烯(PE)透气膜专用料:GB/T 33319-2016[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [6] 中国国家标准化管理委员会. 预应力筋用锚具、夹具和连接器:GB/T 14370-2015[S]. 北京:中国标准出版社,2016.

#### 作者简介：

王军峰(1985-),男,甘肃天水人,本科,从事矿山工程施工技术与管理工作;  
 熊伟峰(1989-),男,江西宜春人,本科,项目总工程师,从事矿山工程施工技术与管理工作。

(编辑:吴永红)