

大规模压缩空气储能电站主厂房设计优化分析

姜小峰[✉], 李季, 陆云, 李睿, 朱学成, 吴斌

(中国能源建设集团江苏省电力设计研究院有限公司, 江苏南京 211102)

摘要: [目的] 压缩空气储能电站在进行主厂房设计时缺少相应规范作为技术支持, 可参照执行的《压缩空气站设计规范》中存在一些有争议和不适用的规定, 难以满足当前压缩空气储能电站大规模发展的需要。为了解决在规范执行过程中遇到一些重点问题, 找到更优的主厂房设计方案。[方法] 对空气储能用压缩机的爆炸危险性进行了分析, 将合并厂房设计与分厂房设计做了经济性对比, 并对压缩机房内压缩空气的储存容积做了整理和总结。[结果] 结果表明: 空气储能用压缩机不具备化学危险性, 在设备质量达标的前提下也不具备物理爆炸危险性; 合并厂房设计较分厂房设计可以节省大量投资; 压缩机房内压缩气体的储存容积较主厂房体积占比较小。[结论] 从工艺流程、系统集成度、整体经济性、运行维护方便等角度考虑, 大规模压缩空气储能电站主厂房推荐采用合并厂房设计; 并可根
据工艺布置和检修运行需求, 采取大平台布置结构; 压缩机厂房与其它房间相邻时可设置甲级防火门, 并应设置门斗等防护措施。

关键词: 大规模压缩空气储能电站; 主厂房设计; 优化分析; 合并厂房; 大平台结构; 甲级防火门; 门斗

中图分类号: TK01; TK11

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)02-0032-07

开放科学(资源服务)二维码:



Optimization Analysis of Main Power House Design of a Large-Scale Compressed Air Energy Storage Power Station

JIANG Xiaofeng[✉], LI Ji, LU Yun, LI Rui, ZHU Xuecheng, WU Bin

(China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co., Ltd., Nanjing 211102, Jiangsu, China)

Abstract: [Introduction] The compressed air energy storage power station lacks corresponding codes as technical support in the design of main power House. There are some controversial and inapplicable provisions in the *Code for design of compressed air station*, which is difficult to meet the needs of the current large-scale development of compressed air storage power station. The paper aims to solve these critical problems in the implementation of the codes and to find better design schemes for the main power House. [Method] The explosion risks of the air energy storage compressor were analyzed, an economic comparison between the combined power House design and the separate power House design was made, and the storage volume of compressed air in the compressor room was sorted out and summarized. [Result] The results show that the air energy storage compressor has no chemical explosion hazard, and no physical explosion hazard on the premise that the equipment's quality meets the standard. Combined power House design can save a lot of investment compared with separate power House design. The storage volume of compressed air in the compressor room is smaller than that of the main power House. [Conclusion] From the perspective of process flow, system integration, overall economy, convenient operation and maintenance, combined power House design is recommended for the main power House of a large-scale compressed air energy storage power station. According to the process layout and maintenance operation requirements, large platform structure is also recommended. A class-A fire door can be set up when the compressor power House is adjacent to other rooms, and the door buckets together with other protective measures should be set up.

Key words: large-scale compressed air energy storage power station; main power house design; optimization analysis; combined power

收稿日期: 2022-07-18 修回日期: 2022-09-05

基金项目: 中国能源建设集团股份有限公司重大科技专项“300 MW 级压缩空气储能电站关键技术和装备研究”(CEEC2021-KJZX-04)

house; large platform structure; class-A fire door; door buckets

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

压缩空气储能(Compressed Air Energy Storage, CAES)属于物理储能技术的一种,具备建设成本低、安全性相对较高、运行过程中不产生环境污染、储能时间长、使用寿命长等技术优势^[1-2],作为电力系统的稳压器^[3],在实现清洁能源消纳、电网削峰填谷、调峰调频、备用电源、多能耦合等方面将发挥重要作用^[4-6],未来在电源侧、电网侧和用户侧3类储能场景中存在广阔的应用前景^[7]。主厂房设计作为压缩空气储能电站的设计重点之一,其主要是指压缩机厂房或透平膨胀机厂房,其中压缩机厂房主要布置压缩机、电动机和变频器等核心装备,透平膨胀机厂房主要布置空气透平和发电机等核心设备。然而,目前压缩空气储能电站在进行主厂房布置和结构设计时缺少相应规范作为技术支撑^[8]。目前可参照执行的规范《压缩空气站设计规范》(GB 50029—2014)^[9],主要针对化工、冶金等领域压缩机站作为辅助气源站的设计,对于压缩机作为主设备的压缩空气储能领域应用场合不完全适用,其条文内容上也存在一些有争议的规定,难以满足当前压缩空气储能电站大规模发展的需要。因此,本文针对大规模压缩空气储能电站主厂房布置及结构优化设计中的一些标准适用性相关的问题进行分析研究。

1 标准适用性相关问题

1.1 分厂房及单层布置

按照《压缩空气站设计规范》(GB 50029—2014)^[9]第2.0.3条规定:装有活塞空气压缩机、隔膜空气压缩机或离心空气压缩机的压缩机站,当单机额定功率大于或等于75 kW或总台数大于3台时,宜为独立建筑物。由我院设计的某压缩空气储能发电项目(以下简称某储能项目)压缩侧设有低压LP压缩机、中压MP压缩机和高压HP压缩机共3台,单机额定功率最大为28 MW。在设计过程中,压缩机厂房和膨胀机厂房按《压缩空气站设计规范》(GB 50029—2014)^[9]第2.0.3条推荐采用分厂房设计。一方面,两个独立的主厂房增加了土建施工成本,检修起吊

设施及检修场地无法共用,需要重复设置,同样也增加了设备采购成本和土建成本;另一方面,分厂房设计给运行检修人员后期对设备的运维带来了不便。

按照《压缩空气站设计规范》(GB 50029—2014)^[9]第2.0.4条规定:工作压力大于或等于3.2 MPa的压缩空气站不得布置在地下室、半地下室以及楼层内,机器间和储气罐间应为单层,屋面不得设置与压缩空气站无关的设备与设施。某储能项目HP压缩机末级排气压力14.1 MPa,在设计过程中严格执行了该条文的规定,将压缩机厂房设计为岛式单层结构,某储能项目压缩机厂房实景如图1所示。

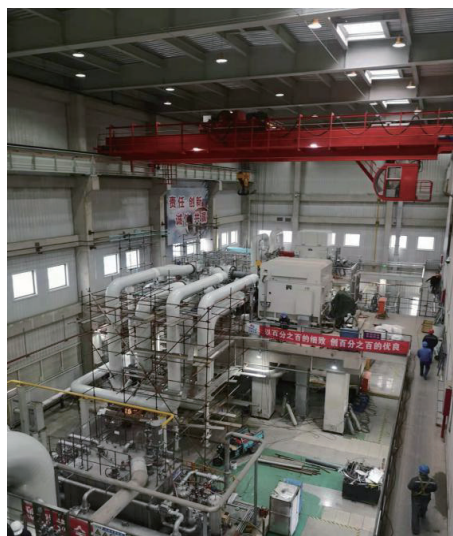


图1 某储能项目压缩机厂房实景图

Fig. 1 Real picture of compressor powerhouse in an energy storage project

从图中可以看出,压缩机采用高位岛式布置,在运转层靠近B轴设置检修通道。由于该项目采用多轴离心式压缩机,单台压缩机设备段间管道连接及上下穿越较多,采用岛式布置给管道支吊带来了困难,部分管道支架从零米直接生根,影响了整体美观。另外,岛式单层布置本身检修通道较窄,上下穿越的管道又进一步影响了检修通行。

1.2 混凝土防护墙设置

《压缩空气站设计规范》(GB 50029—2014)^[9]第5.0.5条规定:工作压力大于或等于10 MPa的压

缩空气站,其机器间、配气台间、储气罐间、充瓶间与其他房间的隔墙,应采用钢筋混凝土防护墙;防护墙的厚度不应小于 200 mm。客观上,电气、控制房间需要与压缩机间相邻布置。从图 1 也可以看出,某储能项目执行了该条文的规定,在压缩机间与电气、热控房间之间设置了钢筋混凝土防护墙,这样设置导致无法开门和开设桥架洞口,运行人员只能通过两侧的楼梯从压缩机厂房外侧绕行,同时电缆桥架也须从厂房外迂回布置,这对厂房布置和运行维护造成了很大的不便。大量的电缆绕行、大面积的钢筋混凝土墙体设置,也会对工程造价和结构计算带来不利的影响。

2 压缩机爆炸危险性分析

从《压缩空气站设计规范》(GB 50029—2014)^[9]第 2.0.4 条的条文说明可以看出,压缩机站单层布置的出发点要考虑压缩机本体设备及系统发生爆炸事故,爆破物造成建筑物损坏和人身伤害的状况。下面针对空气压缩机发生化学和物理爆炸两个方面进行分析。

2.1 化学爆炸风险

压缩机按大类可以分为容积式和速度式,其中容积式压缩机主要分为往复式和回转式两种^[10],而速度式压缩机主要分为离心式和轴流式两种^[11]。传统容积式空气压缩机,尤其是往复式压缩机,缸体和活塞需要润滑油润滑,长期运行会产生积碳,空气经压缩后温度升高,积碳、高温和空气 3 个要素叠加会造成空气压缩机发生化学爆炸^[12-14]。另有相关研究分析一起制冷压缩机爆炸事故时,爆炸机型同样是容积式压缩机,可燃物分析是制冷压缩机中制冷剂分解产生的可燃气体或者润滑油高温形成的油雾,高温、可燃物和空气等要素叠加导致压缩机爆炸^[15]。

大型压缩空气储能项目中使用的空气压缩机,因其压缩空气流量较大、压比较高,通常采用单列或双列速度式压缩机组,每一列压缩机组均由离心式压缩机和轴流式压缩机组合而成。不论是离心式或者轴流式压缩机均属于透平式压缩机,需要润滑的部件主要是调速设备、转动轴承和联轴器等,而气缸内与空气接触的叶轮、机壳不需要润滑,所以气缸内无润滑油,由于缸体内缺少可燃物,因此其内部不会有化学爆炸的风险。而对于油系统设备中可能聚集

气体的腔室,如轴承箱、回油母管等,均设置有排放空气的设施,并且缸内的高温空气通过轴承传递到轴承箱的温度较低,达不到润滑油的闪点或燃点,因此也不具备化学爆炸的风险。

2.2 物理爆炸风险

相较于化学爆炸风险,《压缩空气站设计规范》(GB 50029—2014)^[9]在制定时更多考虑的是物理爆炸风险,尤其是在传统化工或石化行业中,压缩空气站一般为辅助气源站,与其毗邻的其他化工装置存在易燃易爆的危险性,若压缩机发生物理爆炸,高温高压的空气和压缩机爆炸产生的喷射物可能会引发其他装置的次生灾害或破坏相邻房间的设备,因此提出了独立厂房和设置混凝土防护墙的要求。

压缩机发生物理爆炸通常是由缸体内超压、设备零部件质量不合格或人为操作不当导致^[16-17]。对于大规模压缩空气储能电站用透平式压缩机,在压缩机本体及其配套设备构件、零部件质量合格的前提下,当缸内实际工作压力大于设计压力时,可能会引起压缩机壳体变形、轴承故障、转子齿变形或断裂、轴封泄漏等问题,从而造成压缩机发生物理爆炸。因此,空气压缩机均设置有安全阀排放系统,一旦系统发生超压,安全阀开启并排放一定的压缩空气进行泄压,确保系统压力不超过设计值,从而避免超压引起的事故发生。另外,对于大规模压缩空气储能电站用透平式压缩机,要求机壳的最高允许工作压力至少应等于最高吸入压力与跳闸转速下压缩机在所有规定工况的最恶劣的组合条件下操作时可能产生的最大升压之和的 1.25 倍,或至少等于规定的安全阀设定值,两者取较大值。因此,在设备质量达标的情况下,空气压缩机不存在物理爆炸风险。

3 主厂房优化设计研究

3.1 合并厂房设计

某储能项目压缩机厂房和膨胀机厂房按《压缩空气站设计规范》(GB 50029—2014)^[9]第 2.0.3 条建议,采用分厂房设计,其中设计的压缩机厂房平面布置图如图 2 所示。

从图 2 可以看出,3 台压缩机横向中心线平行布置在压缩机房内,压缩机房长度为 58.0 m, A-B 跨度为 20.0 m,屋架下弦标高为 19.8 m,轨顶标高 16.2 m。3 台压缩机采用高位岛式布置,压缩机房零米布置

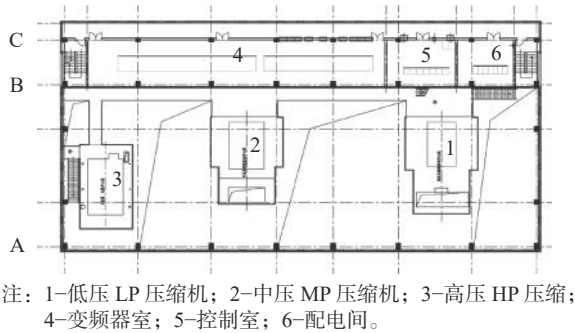


图2 某储能项目压缩机厂房平面图

Fig. 2 Plan of compressor powerhouse in an energy storage project

有3台压缩机的润滑油模块。辅机楼布置在压缩机房内B~C跨内,长度为58.0 m,跨度为5.5 m,共2层。辅机楼零米层布置有10 kV 配电间、380 V 配电间和蓄电池室。辅机楼6.5 m层布置有10 kV 变频器室、控制室和380 V 配电间。

除了压缩机厂房,根据规范建议单独设置了透平膨胀机房,其平面图如图3所示。

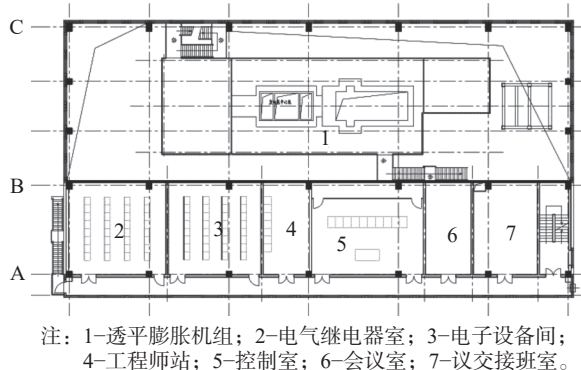


图3 某储能项目膨胀机厂房平面图

Fig. 3 Plan of expander powerhouse in an energy storage project

从图3可以看出,1台透平发电机组纵向布置在透平机房内。透平机房长度为50.0 m, B~C跨度为16.0 m,屋架下弦标高为18.8 m,轨顶标高15.5 m。透平发电机组采用高位岛式布置,透平机房零米主要布置有主油箱、EH油装置等。辅机楼布置在透平机房内A~B跨内,长度为50.0 m,跨度为9.0 m,共2层。辅机楼零米布置有配电间、通信机房、380 V 配电间、UPS室和卫生间等。辅机楼6.5 m层布置有电气继电器室、电子设备间、工程师室、控制室、会议室和交接班室等。

从本质上讲,压缩机和膨胀机都属于高转速转

动机械,两者流通介质都是高压空气。压缩侧是用电动机带动压缩机将空气进行加压存储,膨胀侧则是通过膨胀机将存储的高压空气进行膨胀释能,带动发电机进行发电。从工艺流程看,合并厂房设计并不会导致危险源发生变化。

采用合并厂房设计,压缩机和膨胀机可以共用检修起吊装置,主厂房内设置1台桥式起重机,起重量根据厂房内检修起吊最重件确定。原单独设置的两块检修场地可以共用,主厂房长度缩减至100.0 m,降低了土建投资成本。合并后的机器间、辅控楼宽度与原压缩机厂房一致,A~B跨度20.0 m,屋架下弦标高为19.8 m,轨顶标高16.2 m,3台压缩机横向中心线平行布置、1台透平发电机组纵向布置于A~B跨内。辅机楼布置在主厂房内B~C跨内,跨度为5.5 m,共2层,原压缩机房和透平机房各自的配电间、UPS室及蓄电池室等进行了压缩合并,单台电气设备容量增大、数量减少。同时,合并厂房后各用电设备布置更近,原两厂房之间的连接母线和厂用电电缆可以大量缩减,降低了电气电缆的采购和施工成本。某储能项目分厂房设计与合并厂房设计经济性比对如表1所示,可以看出采用合并厂房设计总投资较分厂房设计可减少793.9万元。

表1 分厂房与合并厂房设计经济性对比

Tab. 1 Economic comparison between separate powerhouse design and combined powerhouse design

项目	分厂房设计	合并厂房设计
主厂房总长度/m	108.0	100.0
机器间宽度/m	20.0/16.0	20.0
辅控楼宽度/m	5.5/9.0	5.5
主厂房总体积/m ³	基准	-4 975.0
主厂房土建费用/万元	基准	-304.5
起吊装置费用/万元	基准	-180.0
电缆沟及电缆桥架费用/万元	基准	-33.0
10 kV浇筑母线及安装费/万元	基准	-162.8
电缆材料及安装费/万元	基准	-113.6
总投资/万元	基准	-793.9

表1中,初设收口版概算单位体积综合造价压缩机房为695元/m³、膨胀机房为612元/m³,合并厂房减少的体积单位综合造价按照612元/m³计算。

合并厂房后可缩减原压缩机厂房与膨胀机厂房间电缆沟、电缆桥架和10 kV浇筑母线长度约80.0 m,

电缆总长减少约 9.1 km,按 6 kV 以上动力电缆、6 kV 以下动力电缆和控制电缆各占三分之一考虑。材料单价均按照实际采购单价考虑。因压缩机和膨胀机与各自对应换热器场地的相对位置不变,合并厂房后工艺管道长度基本不变。

因此,从工艺流程、系统集成度、整体经济性、运行维护方便以及不会引起危险源变化角度考虑,建议大规模压缩空气储能项目将压缩机房和膨胀机房进行合并厂房设计,目前投运的中国科学院贵州毕节 10 MW 压缩空气储能示范平台和山东肥城 10 MW 先进压缩空气储能电站也都采用了合并主厂房的设计方案。

3.2 大平台布置

《压缩空气站设计规范》(GB50029—2014)^[9]第

4.0.9 条的条文解释对离心压缩机的布置方式进行了说明,从压缩机的结构型式和现场安装条件两个方面,建议压缩机段数较多、进排气口上下连接或中间冷却器独立布置时采用双层布置形式,而对于压缩机侧向进气或冷却器与压缩机合体布置时则推荐采用单层布置形式。需要指出的是,这一条针对的是压缩机本体的布置,某储能项目多轴离心式压缩机采用的岛式高位布置,相当于是双层结构型式。而第 2.0.4 条规定的单层要求指的是机器间的建筑结构,即除了屋面,机器间建筑物中间不得有其他楼层。

压缩机房内储存压缩空气的容器包括压缩机缸体和各级空气管道,某储能项目压缩机房压缩空气储存容积如表 2 所示。

表 2 压缩机房压缩空气储存容积

Tab. 2 Storage volume of compressed air in the compressor room

项目	压力/MPa	温度/℃	储存容积/m ³	空气体积/Nm ³
LP压缩机本体、级间管路	0.58	180	119.00	416
LP压缩机出口管路	0.92	340	9.72	40
MP压缩机进口管路	0.92	40	3.48	28
MP压缩机本体、级间管路	4.90	190	27.00	780
MP压缩机出口管路	6.22	340	2.52	70
HP压缩机进口管路	6.22	40	1.71	93
HP压缩机本体、级间管路	9.15	70	2.95	215
HP压缩机出口管路	14.10	116	1.20	119
合计	—	—	167.58	1 760

注:(1)压缩机本体、级间管路所注为平均工作压力和平均工作温度;(2)压缩机间管路未计列压损。

假设压缩机系统内的管道或设备存在质量瑕疵、运行时存在物理爆炸风险,从表 2 中的数据可以看出,压缩机房压缩空气的储存容积共 167.58 m³,假设压缩机系统内所有的设备和管道同时发生物理爆炸,爆炸后的高压空气折算成标态下的体积为 1 760 Nm³,仅为压缩机房 A~B 跨体积 22 968 m³ 的 7.7%。从表 2 中也可以看出,5.00 MPa 以上的高压空气储存容积仅为 8.38 m³,体积较小,设备或管道系统事故时高压空气扩散到整个厂房空间后压力已经很小,且压缩机房为非密闭空间,屋顶有机机械通风,可以很好的对高压空气进行泄压。

压缩机房采用大平台布置,将厂房的空间一分为二后,单层的体积仍有 11 484 m³,并不会影响泄压

效果。大平台布置的目的是方便检修通行和管道支吊,底层主要是布置管道和一些辅助设备,所以即使发生破坏,与单层布置产生的影响相似。而且楼层隔断并不需要满铺楼板,可以采用楼板和钢格栅板结合的形式,从而增强厂房的泄压能力。

基于以上分析,建议压缩空气厂房可以根据工艺布置和检修运行需求,采取大平台的布置方式。尤其采用合并厂房设计后,大平台布置可以进一步提升空间利用率和使运行维护方便。

3.3 机器间隔墙设计

《压缩空气站设计规范》(GB50029—2014)^[9]第 5.0.5 条是强制性条文,其条文指出 10.00 MPa 及以上高压等级的压缩机属于易发生事故的高压设备,

出于安全角度考虑提出了设置隔墙的要求。从表2中的数据看出,压缩机房 10.00 MPa 以上的高压空气储存容积仅为 1.2 m³,体积非常小,即使发生物理爆炸,飞射物产生的冲击伤害也不大。同样作为高转速的旋转机械,目前超超临界二次再热百万机组汽轮机的新蒸汽进汽参数达到 31.00 MPa、605 °C 以上,相关规范也并未提出汽机房设置钢筋混凝土防护隔墙的要求。

针对储能系统建设,北京颁布了地方标准《电力储能系统建设运行规范》(DB11/T 1893—2021)^[18],其中附录 E 第 2.3 条规定:压缩空气储能系统的生产车间、作业场所、辅助建筑、附属建筑、生活建筑和易燃易爆的危险场所以及地下建筑物设计应符合 GB 50016 的有关规定。而《建筑设计防火规范(2018 年版)》(GB50016—2014)^[19]第 3.6.10 条规定,有爆炸危险区域内的楼梯间、室外楼梯或有爆炸危险的区域与相邻区域连通处,应设置门斗等防护措施。门斗的隔墙应为耐火极限不应低于 2.00 h 的防火隔墙,门应采用甲级防火门并应与楼梯间的门错位设置。在美标 *Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems* (NFPA 855—2020)^[20]第 4.3.6 条中也有相似的规定:包含 ESS(Energy Storage Systems)储能系统的房间或空间,应与建筑物内其它区域用耐火极限不低于 2.00 h 的防火隔断和水平组件隔开,并按照当地建筑规范建造。

通过以上分析,并结合文章第 2 节关于压缩机爆炸危险性分析的结果,考虑到压缩机房 10 MPa 以上高压空气的储存容积较小,在压缩机房厂房设计时,可参照 GB 50029—2014 第 5.0.5 条规定执行,并在机器间隔断建筑设计过程中做如下优化:压缩机房与其他房间相邻时,为防止压缩机因产品质量问题或人为原因导致的意外事故发生,机器间应设置钢筋混凝土隔墙,同时可以设置甲级防火门,防火门的位置应与楼梯间错位布置,应同时设置门斗或采取其他防护措施,门斗应设置耐火极限不低于 2.00 h 的防火隔墙。

4 结论

1)从爆炸产生的原因、大规模空气储能压缩机的类型、压缩机所处的环境等角度分析,大规模压缩空气储能用压缩机不存在化学爆炸风险,在设备质

量达标的前提下也不存在物理爆炸风险。

2)针对 GB 50029—2014 第 2.0.3 条,以某储能项目为例,优化结果表明:合并厂房设计总投资较分厂房设计可减少 793.9 万元。从工艺流程、系统集成度、整体经济性、运行维护方便以及不会引起危险源变化角度考虑,建议大规模压缩空气储能项目将压缩机房和膨胀机房进行合并厂房设计。

3)针对 GB 50029—2014 第 2.0.4 条,分析了某储能项目压缩空气储存容积,因折成标态所占主厂房空间比例较小,推断大平台布置形式不会影响高压空气的泄压,建议压缩空气储能电站主厂房可以根据工艺布置和检修运行需求,采取大平台的布置方式,楼层隔断可以采用楼板和钢格栅板结合的形式,以增强厂房的泄压能力。

4)针对 GB 50029—2014 第 5.0.5 条,分析了压缩机房 10 MPa 以上高压空气的储存容积,以某储能项目为例仅 1.2 m³,结合北京地方标准和美标条文的具体内容,建议压缩空气储能压缩机厂房与其它房间相邻时,可以设置甲级防火门,防火门的位置应与楼梯间错位布置,应同时设置门斗或采取其他防护措施,门斗应设置耐火极限不低于 2.00 h 的防火隔墙。

参考文献:

- [1] HUANG B H, QIU X Z, WANG W M, et al. Overview of research situation and progress on compressed air energy storage technology [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, 295(2): 012020. DOI: 10.1088/1755-1315/295/2/012020.
- [2] 王富强,王汉斌,武明鑫,等.压缩空气储能技术与发展 [J]. *水力发电*, 2022, 48(11): 10-15.
WANG F Q, WANG H B, WU M, et al. Compressed air energy storage technology and development [J]. *Water Power*, 2022, 48(11): 10-15.
- [3] 李季,黄恩和,范仁东,等.压缩空气储能技术研究现状与展望 [J]. *汽轮机技术*, 2021, 63(2): 86-89,126. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2021.02.002.
LI J, HUANG E H, FAN R D, et al. Research status and development prospects of compressed air energy storage technology [J]. *Turbine Technology*, 2021, 63(2): 86-89,126. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2021.02.002.
- [4] 梅生伟,公茂琼,秦国良,等.基于盐穴储气的先进绝热压缩空气储能技术及应用前景 [J]. *电网技术*, 2017, 41(10): 3392-3399. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1992.
MEI S W, GONG M Q, QIN G L, et al. Advanced adiabatic compressed air energy storage system with salt cavern air storage and its application prospects [J]. *Power System Technology*,

- 2017, 41(10): 3392-3399. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.1992.
- [5] 李阳海, 徐万兵, 张彪, 等. 压缩空气储能技术与应用 [J]. *湖北电力*, 2022, 46(4): 1-7. DOI: 10.19308/j.hep.2022.04.001.
LI Y H, XU W B, ZHANG B, et al. Compressed air energy storage technology and its application [J]. *Hubei Power*, 2022, 46(4): 1-7. DOI: 10.19308/j.hep.2022.04.001.
- [6] 韩越, 李睿, 孙世超, 等. 压缩空气储能+的多能耦合技术研究进展 [J]. *能源研究与利用*, 2022, 3: 25-29. DOI: 10.16404/j.cnki.issn.1001-5523.2022.03.011.
HAN Y, LI R, SUN S C. Research progress of multi-energy coupling technology of compressed air energy storage [J]. *Energy Research & Utilization*, 2022, 3: 25-29. DOI: 10.16404/j.cnki.issn.1001-5523.2022.03.011.
- [7] 郭祚刚, 马溪原, 雷金勇, 等. 压缩空气储能示范进展及商业应用场景综述 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(3): 17-26. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.003.
GUO Z G, MA X Y, LEI J Y, et al. Review on demonstration progress and commercial application scenarios of compressed air energy storage system [J]. *Southern Energy Construction*, 2019, 6(3): 17-26. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.003.
- [8] 梁丽君, 何军飞. 压缩空气储能技术及其标准现状分析 [J]. *机电工程技术*, 2020, 49(8): 36-37. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2020.08.011.
LIANG L J, HE J F. Analysis of compressed air energy storage technology and its standards status [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2020, 49(8): 36-37. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2020.08.011.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 压缩空气站设计规范: GB 50029—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of compresses air station: GB 50029-2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014..
- [10] 崔琳琳. 压缩机的原理及其选型原则 [J]. *中国设备工程*, 2017(4): 122-123.
CUI L L. Compressor principle and selection principle [J]. *China Plant Engineering*, 2017(4): 122-123.
- [11] 叶长青, 张琪. 轴流压缩机与离心压缩机综合比较 [J]. *流体机械*, 1998(12): 21-24.
YE C Q, ZHANG Q. A comprehensive comparison of axial flow compressors and centrifugal compressors [J]. *Fluid Machinery*, 1998(12): 21-24.
- [12] 赵玉明. 空气压缩机的防爆 [J]. *天津冶金*, 2001(3): 51-53. DOI: 10.3969/j.issn.1006-110X.2001.03.018.
ZHAO Y M. Anti-explosion of air compressor [J]. *Tianjin Metallurgy*, 2001(3): 51-53. DOI: 10.3969/j.issn.1006-110X.2001.03.018.
- [13] 俞文雅. 活塞式压缩机的故障原因及维修措施研究 [J]. *内燃机与配件*, 2021(6): 103-104. DOI: 10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2021.06.050.
YU W Y. Study on failure causes and maintenance measures of piston compressor [J]. *Internal combustion engine and accessories*, 2021(6): 103-104. DOI: 10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2021.06.050.
- [14] 王典, 史宝成, 应若蒙, 等. 注减氧空气驱油注气系统空压机爆炸风险分析 [J]. *广州化工*, 2020, 48(22): 240-244. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9677.2020.22.083.
WANG D, SHI B C, YING R M, et al. Analysis of explosion risk of air compressor in oil flooding system with oxygen reducing air injection [J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2020, 48(22): 240-244. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9677.2020.22.083.
- [15] 许彬. 一起制冷压缩机爆炸事故的分析 [J]. *广东化工*, 2017, 44(5): 122+132. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1865.2017.05.056.
XU B. The analysis of an explosion accident of a refrigeration compressor [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2017, 44(5): 122+132. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1865.2017.05.056.
- [16] 韩树新. 压缩机物理爆炸压力分析 [J]. *流体机械*, 2008, 36(8): 38-41. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0329.2008.08.010.
HAN S X. Analysis of internal burst pressure of a compressor physical explosion accident [J]. *Fluid Machinery*, 2008, 36(8): 38-41. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0329.2008.08.010.
- [17] 鲁洪全. 洗井空压机爆炸事故原因分析与预防措施 [J]. *露天采矿技术*, 2012(1): 89-90. DOI: 10.13235/j.cnki.ltcn.2012.01.036.
LU H Q. Cause analysis and preventive measures of air compressor explosion accident [J]. *Open-pit mining technology*, 2012(1): 89-90. DOI: 10.13235/j.cnki.ltcn.2012.01.036.
- [18] 北京市市场监督管理局. 电力储能系统建设运行规范: DB 11/T 1893—2021 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
Beijing Municipal Bureau of Market Supervision and Administration. Specification for construction and operation of electrical energy storage systems: DB 11/T 1893-2021 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑设计防火规范(2018年版): GB 50016—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for fire protection design of buildings (2018 ed.): GB 50016-2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [20] National Fire Protection Association. Standard for the installation of stationary energy storage systems: NFPA 855-2020 [S]. Quincy, U. S. A. : National Fire Protection Association, 2020.

作者简介:



姜小峰

姜小峰(通信作者)

1989-, 男, 江苏如皋人, 工程师, 东南大学热能工程硕士, 主要从事电力工程咨询设计及新型储能技术研究工作 (e-mail) jiangxiaofeng@jspd.com.cn。

(编辑 孙舒)