

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.05.003

牟萍, 陈野鹰, 刘志敏. 一种气垫式调压室防漏新方法[J]. 水利水运工程学报, 2017(5): 18-22. (MU Ping, CHEN Yeying, LIU Zhimin. A new anti-leakage method used in air cushion surge chamber[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017(5): 18-22. (in Chinese))

一种气垫式调压室防漏新方法

牟 萍^{1,2}, 陈野鹰^{1,2}, 刘志敏³

(1. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 3. 湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙 410008)

摘要: 气垫式调压室具有良好的水击波反射功能,能有效降低水电站负荷急剧变化时压力管道的水击压力,但运行过程中的漏气现象制约了气垫式调压室的推广应用。提出了一种防止气垫式调压室漏气的新方法,即在传统气垫式调压室内放置橡胶芯袋作为盛气装置,实现调压室盛气和结构承载功能的分离,利用橡胶材料柔软、弹性模量小、密封性好等特点,从根本上解决了盛气密封薄壳容易开裂渗漏的问题。根据力学平衡原理、材料的应力应变关系和调压室结构的变形协调条件,结合流体力学理论和调压室内水位波动的变化规律,构建了橡胶芯袋变形与受力本构关系,并分别推导出了单个、多个橡胶芯袋预灌气压的计算式,为调压室结构设计与工程控制提供了理论依据。

关 键 词: 气垫式调压室; 防漏; 橡胶芯袋; 压力平衡理论

中图分类号: TV74

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2017)05-0018-05

气垫式调压室是顶部完全封闭,室内充满压缩气体,当水锤发生时,利用气体的压缩和膨胀特性来调整调压室内水位,进而促使压力管道水流减速或加速的竖圆筒式水电站建筑物^[1-3]。目前气垫式调压室封闭气体的形式有围岩闭气、水幕闭气和罩式闭气三种^[4-6]。解决运行过程中的漏气问题是长期以来气垫式调压室推广应用的主要技术难题^[7],以围岩闭气型气垫调压室为例,天然情况下封闭性很难满足要求,通常需要灌浆或者衬砌,成本高且施工技术复杂,漏气后维修困难,耗时长,一般检修充气需2~4 d;同时,受气垫式调压室气体压力的作用,调压室顶部岩体存在上抬失稳破坏的风险^[8]。因此在气垫式调压室建设中,特别是水文地质条件不好的情况下,确保调压室良好的封闭性是气垫式调压室建设的关键技术^[9-11]。

本文针对气垫式调压室漏气问题,提出了采用橡胶芯袋封闭气体的橡胶芯袋式气垫调压室,能够较好地解决气垫式调压室的漏气问题,丰富了气垫式调压室的闭气型式。

1 橡胶芯袋式气垫

橡胶芯袋式气垫是在传统的气垫式调压室顶部封闭空间内安装橡胶芯袋,如图1所示。通过安装橡胶芯袋,可以简化调压室壁结构的功能,橡胶芯袋式气垫调压室的室壁结构只需满足承载的要求,无需再考虑是否漏气。用橡胶芯袋替代

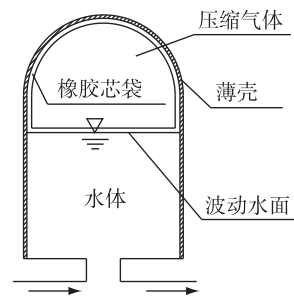


图1 单一橡胶芯袋式气垫结构

Fig. 1 Air cushion structure with an add-on rubber bag

收稿日期: 2016-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51509027)

作者简介: 牟 萍(1986—),女,山东德州人,博士研究生,主要从事水电站建筑物、航道整治理论与技术研究。

E-mail: mpdream2012@163.com 通信作者: 陈野鹰(E-mail: cyy2227@163.com)

传统的薄壳, 优点在于橡胶芯袋防漏气效果好, 且材质柔软、弹性模量小, 其表面形状与水面和封闭薄壳围成的空间完全相同, 能够实现橡胶芯袋与水面、围岩的无缝结合, 较好地解决了气垫式调压室的漏气问题。具体做法: 根据水动力学条件和压力平衡理论, 预先将适量压缩气体灌入橡胶芯袋内, 然后将橡胶芯袋置于调压室内。

为了方便制作与检修更换, 还可将橡胶芯袋制作成若干个独立的小芯袋——多芯袋式橡胶气垫调压室。与单一橡胶芯袋相比, 多橡胶芯袋可根据上游库水位的变化或下游尾水位的涨落情况灵活地选择需充压缩气体的橡胶芯袋数量, 水位差越大, 需要充气的芯袋数量越多, 反之则充气的芯袋数量越少。

2 橡胶芯袋压力平衡

当电站发生意外突然关闭引水阀门或需要打开阀门引水发电时, 上游水位的变化会导致调压室内的水位产生上下波动^[12], 如为开敞式调压室, 水面压力保持不变、始终与大气压相等, 但顶部封闭后, 水面压力随水位波动发生变化。水位升高, 顶部封闭气体被压缩, 水面压力随之增大; 相反水位降落时调压室顶部封闭气体膨胀, 水面压力下降。传统的气垫式调压室是依靠薄壳来平衡水压力, 顶部水面以上封闭薄壳承受的最大压力、气体压力与调压室内异相界面压力三者相等, 如图 2(a) 所示。

橡胶芯袋式气垫调压室, 其顶部封闭壳体所承受的压力大小与变化规律与传统气垫式调压室没有差异, 不同之处在于作用在顶部封闭壳体的压力不是由气体直接传递, 而是通过橡胶芯袋传递到薄壳, 由于受橡胶芯袋自重和侧面摩擦阻力的影响, 其压力值略小于波动水面压力。然而当调压室内水位发生波动时, 水面挤压橡胶芯袋使其体积减小、气体受到压缩、气压增高, 若不受外界约束, 在袋内气压作用下, 芯袋的橡胶会产生拉力, 其容积尺寸变大。但芯袋周围受水面挤压, 同时受到调压室壁和顶部薄壳的制约, 橡胶芯袋的容积不增, 反而减小。尽管如此, 由于橡胶自身弹性模量较小, 橡胶芯袋仍能够紧贴在薄壳上, 实现与薄壳的无缝结合。径向上将自身承受的气压增量均匀地传递给圆筒薄壳, 完全由薄壳进行平衡, 在此过程中芯袋橡胶仅作为垫块起传递气压荷载的作用; 轴向上, 橡胶芯袋气压由顶部薄壳(波动水面)和橡胶芯袋轴向弹性变形力共同承担, 如图 2(b) 所示。当水位降低时, 压缩气体逐渐膨胀, 气压相应降低, 橡胶芯袋传递至薄壳的压力也随之减小, 直至消失。由于水面波动过程中, 芯袋体形产生改变, 其弹性应力也会发生变化, 因此, 薄壳受到的压力增量与芯袋内气压增量不完全一致。

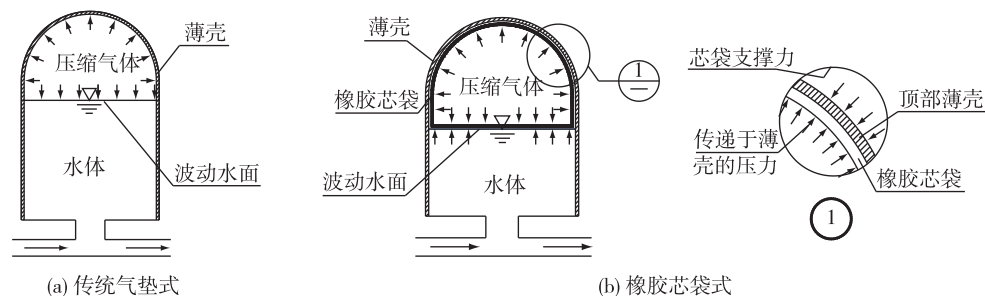


图 2 气垫调压室压力传递

Fig. 2 Pressure transmission for air cushion surge chamber

本文提出的橡胶芯袋式调压室中, 橡胶芯袋和围岩各司其职, 围岩仅提供结构支撑和盛水的作用, 不再兼顾盛气功能, 结构制作不再需要内衬钢板密封气体, 只需采用简单钢筋混凝土或预应力混凝土材料即可, 橡胶芯袋负责盛气调压, 两者可实现无缝结合。但是, 为了阻止水位波动, 尽快使调压室内水位恢复平稳, 橡胶芯袋内需预先灌入压缩气体, 使其在调压室内水位波动过程中具有足够的能量抵抗水位升降, 并快速恢复至稳定状态, 减小水位波动对引水系统与压力管道的不利影响, 保护电站机组正常工作与安全运行, 灌入气体压力的大小应由橡胶的物理特性、力的平衡条件与电站运行要求确定。

3 橡胶芯袋气压变化规律

由于受到调压室内水位波动的影响,橡胶芯袋内压缩气体的体积不断发生变化,体积变化也将引发气体压力的改变。当发电机出现飞逸事故突然关闭压力钢管闸阀时,水击压力很快传递至调压室,使室内水位上升,橡胶芯袋受到挤压,体积逐渐缩小,气体压力随之升高,水位波动至最高时气压出现峰值。在此过程中管道内的水压力逐渐减小,最终低于调压室的水压力,在压力差的作用下,调压室内的水体又开始流入管道,其水位回落气体压力逐渐减小,当调压室与管内水体压相等时,在惯性作用下水体的流动仍不会停止,橡胶芯袋内的气压仍在减小,这种变化将继续到水位波动至低谷时,橡胶芯袋内的气体压力出现最低值。然后,在管道水压的作用下,水体又反向由管道流入调压室,使调压室内水位重新开始上升,气体压力又逐渐加大直至水位波动到峰值,这样周而复始,直至水位波动停止。

4 橡胶芯袋气压的理论计算

由于橡胶芯袋式气垫调压室的袋内气压随水位波动发生变化,为了确保橡胶芯袋的承载能力满足要求,掌握气体压力变化规律,保证调压室正常工作,有必要建立橡胶芯袋受力与水位波动变幅间的本构关系。当电站发电机飞逸时,阀门关闭时间受水轮机的特性与引水系统的安全制约,关闭时间长、调压室中水位波动小、引水系统附加压力低,但高速水流长时间冲击水轮机空转,对水轮机不利、容易造成破坏,反之亦然。由此可知当发电机产生飞逸时,应找到能使引水系统与水轮机组两者综合危害最低的阀门关闭时间,虽然调压室水面波动幅度较大,在橡胶芯袋的选择上仅需考虑最低和最高发电水位以及相应条件时要求的压力选择调压室、橡胶芯袋的尺寸等物理参数即可。据此可以确定水位波动与其他调压室水力参数。

假设①水位波动发生前橡胶芯袋底部与水面完全接触;②忽略了钢筋混凝土室壁结构变形和橡胶芯袋的自重。若橡胶芯袋式气垫调压室水位波动容许值为 $[z]$ 、与阀门关闭时间相应的同条件开敞式调压室水位波动值为 z ,则水位波动表面压力即橡胶芯袋式气垫最大气体压力 p ,调压室结构几何参数如图3所示。

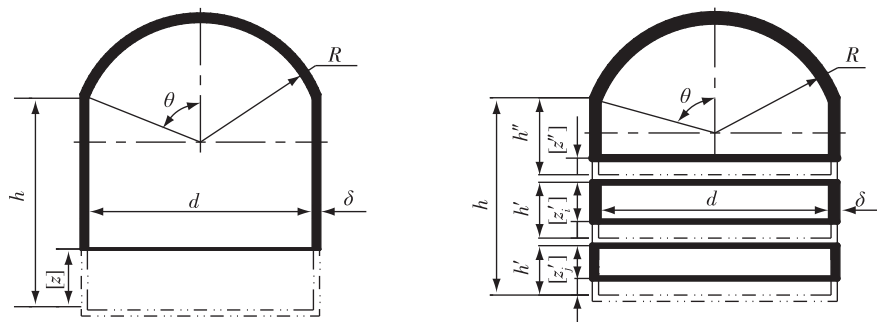


图3 单一橡胶芯袋和多个橡胶芯袋几何参数

Fig. 3 Geometric parameters for air cushion structure with one add-on rubber bag and multiple add-on rubber bags

$$\text{对于单一橡胶芯袋式气垫调压室,则有: } p = (z - [z])\gamma \quad (1)$$

$$\text{水位波动过程中橡胶芯袋气体体积压缩量 } \Delta v, \text{ 有: } \Delta v = (\pi/4)d^2[z] \quad (2)$$

$$\text{橡胶芯袋面积应变 } \Delta \varepsilon: \Delta \varepsilon = \frac{2[z]\sin\theta}{R\sin^2\theta + 2h\sin\theta + 2R(1 - \cos\theta)} \quad (3)$$

$$\text{橡胶芯袋压缩气体压力增量 } \Delta p: \Delta p = \zeta[z] - \eta[z] \quad (4)$$

$$\text{橡胶芯袋压缩气体注入压力: } p_z: p_z = (z - [z])\gamma - \zeta[z] + \eta[z] \quad (5)$$

式中: γ 为水的重度 (kN/m^3); R 为调压室顶部球形薄壳半径 (m); d 为调压室下部圆柱直径 (m); θ 为调压室顶部封闭薄壳球心与球体外缘的夹角 (弧度); h 为未变形时橡胶芯袋下部圆柱体的高度 (m); $\zeta =$

$\frac{3E_a \sin^2 \theta}{3h \sin^2 \theta + 2R - R \cos \theta (2 + R \sin^2 \theta)}$, $\eta = \frac{4\delta E_1}{2R^2(1 - \cos \theta) + 2Rh \sin \theta + R^2 \sin^2 \theta}$, E_a 为压缩气体体积变形模量 (kPa); E_1 为橡胶芯袋弹性模量 (kPa); δ 为橡胶芯袋壁厚 (m)。

对于多个 (如 $n+1$ 个, 其中顶部圆柱球形帽橡胶芯袋 1 个, 下部圆柱形橡胶芯袋 n 个) 橡胶芯袋的气垫式调压室, 忽略橡胶芯袋之间的摩擦力。

$$\text{下部第 } i \text{ 个圆柱形橡胶芯袋灌注压力 } P_{zi}^1, P_{zi}^1 = (z - [z])\gamma - \zeta'_i [z'_i] + \eta'_i [z'_i] \quad (6)$$

$$\text{顶部带球帽圆柱形橡胶芯袋灌注压力 } P_z^2, P_z^2 = (z - [z])\gamma - \zeta'' [z''] + \eta'' [z''] \quad (7)$$

式中: $[z]$ 为橡胶芯袋式气垫调压室水位波动容许值 (m); $[z] = \sum_i^n [z'_i] + [z'']$, $[z']$ 为圆柱形橡胶芯袋的压缩值 (m); $[z'']$ 为顶部带球帽圆柱形橡胶芯袋的压缩值 (m); $\zeta'_i = E_a/h'_i$, $\eta'_i = 2\delta_i E_1 / ((h'_i + R)R)$, $\zeta'' = 3E_a \sin^2 \theta / (3h'' \sin^2 \theta + 2R - R \cos \theta (2 + R \sin^2 \theta))$, $\eta'' = 4\delta'' E_1 / (2R^2(1 - \cos \theta) + 2Rh'' \sin \theta + R^2 \sin^2 \theta)$, $h = \sum_{i=1}^n h'_i + h''$, h' , h'' 分别为下部圆柱形和顶部带球帽圆柱形橡胶芯袋未变形时圆柱的高度 (m)。

当各个橡胶芯袋预灌压力 P_z 相同时, 即 $P_{zi}^1 = P_z^2 = P_z$, 则式 (6) 可简化为:

$$P_z^1 = (z - [z])\gamma - \zeta' [z'] + \eta' [z'] \quad (8)$$

式中: $\zeta' = E_a/h'$, $\eta' = \frac{2\delta_i E_1}{(h' + R)R}$, $[z] = n[z'] + [z'']$, $h = nh' + h''$, $\frac{[z']}{[z'']} = \frac{\zeta'' - \eta''}{\zeta' - \eta'}$, $\frac{h'}{h''} = \frac{\zeta'' - \eta''}{\zeta' - \eta'}$, 其中 $[z'_i]$ 与 $[z'']$ 和 h'_i 与 h'' 可根据需要设定。

5 结 语

漏气现象阻碍了气垫式调压室的应用推广与发展, 本文提出的橡胶芯袋式气垫调压室, 通过调压室内置入橡胶芯袋, 将结构构造与盛气容器进行分离, 便于调压室的检修与盛气芯袋的更换, 较好地解决了气垫式调压室封闭薄壳漏气的工程难题。利用橡胶芯袋变形与受力的本构关系创建了橡胶芯袋气压计算方法, 为内置橡胶芯袋预灌气压标准和结构设计计算提供了理论依据。

参 考 文 献:

- [1] 王波, 张建梅, 鞠小明, 等. 气垫式调压室的运行特性[J]. 人民黄河, 2006, 28(2): 77-78. (WANG Bo, ZHANG Jianmei, JU Xiaoming, et al. Characteristics of air cushion surge chamber[J]. Yellow River, 2006, 28(2): 77-78. (in Chinese))
- [2] 马善定, 汪如泽. 水电站建筑物[M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (MA Shanding, WANG Ruze. Structure of hydroelectric power station[M]. 2nd ed. Beijing: China Water and Power Press, 2002. (in Chinese))
- [3] KIM S G, LEE K B, KIM K Y. Water hammer in the pump-rising pipeline system with an air chamber[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014(6): 960-964.
- [4] 方光达. 水电站气垫式调压室应用现状和主要设计问题[J]. 水力发电, 2005, 31(2): 44-47. (FANG Guangda. Application of air-cushion surge shaft for hydropower station and its main design problems[J]. Water Power, 2005, 31(2): 44-47. (in Chinese))
- [5] 张团, 郭元元, 杨兴义. 地下气垫式调压室首次采用钢管闭气型式的应用[C]//中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 水电站压力管道——第八届全国水电站压力管道学术会议论文集. 北京: 中国水利水电出版社, 2014. (ZHANG Tuan, GUO Yuanyuan, YANG Xingyi. First application of steel pipe type in the underground air-cushion surge chamber[C]// Chengdu Engineering Corporation Limited, Power China. Pressure Pipe System of Hydropower Station——Proceedings of the Eighth National Symposium. Beijing: China Water and Power Press, 2014. (in Chinese))
- [6] 李强, 郑道明, 周雪琼. (外挂)钢罩气垫式调压室施工技术[J]. 四川水力发电, 2013, 32(3): 150-153, 228. (LI Qiang, ZHENG Daoming, ZHOU Xueqiong. Construction technology of air cushion surge chamber with add-on steel cover[J]. Sichuan Water Power, 2013, 32(3): 150-153, 228. (in Chinese))
- [7] 李海涛, 孙丽君. 气垫调压室与减压阀联合防护下的减压阀优化[J]. 人民长江, 2016, 47(9): 67-70. (LI Haitao, SUN

- Lijun. Optimization of pressure reducing value under joint protection of pressure reducing value and air cushioned surge chamber [J]. Yangtze River, 2016, 47(9): 67-70. (in Chinese))
- [8] 华富刚. 气垫式调压室设计中的主要问题研究[J]. 水利科技与经济, 2006, 12(4): 221-222, 226. (HUA Fugang. Research on the main design problems of air-cushioned surge chamber[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2006, 12(4): 221-222, 226. (in Chinese))
- [9] 杜鹏侠. 气垫式调压室在我国的应用研究[D]. 成都: 四川大学, 2005. (DU Pengxia. Application of air cushion surge chamber in China[D]. Chengdu: Sichuan University, 2005. (in Chinese))
- [10] HU Jianyong, ZHANG Jian, SUO Lisheng, et al. Advance in research on air cushion surge chamber in hydropower plant[C]//Energy Systems: Analysis, Thermodynamics and Sustainability——ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE). American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2007: 259-264.
- [11] LUO Guojie, HU Yongsheng, HUANG Kun. Research on the effect of gas leaking and gas-supplementing measurements of air cushion surge chamber[C]//Applied Mechanics and Materials——International Conference on Civil Engineering, Architecture and Sustainable Infrastructure, ICCEASI 2012. Trans Tech Publications, P. O. Box 1254, Clausthal-Zellerfeld, D-38670, Germany 2012: 414-418.
- [12] 彭志远, 杨建东, 郭文成. 恒定流条件下气垫式调压室室内水位与气压的模拟[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2016, 31(2): 239-244. (PENG Zhiyuan, YANG Jiandong, GUO Wencheng. Simulation of water level and air pressure inside the air cushion surge chamber under steady flow condition[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics(SerA), 2016, 31(2): 239-244. (in Chinese))

A new anti-leakage method used in air cushion surge chamber

MU Ping^{1,2}, CHEN Yeying^{1,2}, LIU Zhimin³

(1. National Engineering Technology Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Water Conservancy and Transport Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute, Changsha 410008, China)

Abstract: The air cushion surge chamber has a good function for reflecting water-hammer waves. That is why it can effectively reduce water hammer pressure in the pressure pipeline when the load of hydroelectric power station change dramatically. However, the leakage is always restricting the popularization and application of the air cushion surge chamber at a large scale. To solve such problems, a new technique which can effectively prevent the leakage of pressure gas is put forward in this paper. We can place rubber bags as a kind of obturator devices in the traditional air cushion surge, as a result, the rubber bags can confine gas and the surrounding rock just undertakes structural load. The new air cushion surge chamber with add-on rubber bags can successfully realize the separation of confining gas and bearing load. The air cushion surge chamber with add-on rubber bags that has the advantages of softness, low elastic modulus, and good sealing, is first put forward to radically solve the problems of pressure gas leakage when the closed thin shell is cracking. At the same time, it can achieve the seamless merge between the rubber bags and the surrounding rock of the air cushion surge chamber. Based on the theory of fluid mechanics and water level fluctuation in the air cushion surge chamber, the constitutive relation between stress and deformation of the rubber bag is well analyzed and then the calculation formulas of air needed to be pushed into a single rubber bag or multiple ones are deduced. They can meet with the force balance principle, the stress-strain relationships of the rubber material, as well as deformable coordination condition of the surge chamber. The new method for preventing leakage provides theoretical references for design and construction of the air cushion surge chamber and for engineering control in the process of operation.

Key words: air cushion surge chamber; a new anti-leakage method; rubber bag; pressure balance theory