

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.014

高水头闸门水封密封有效性试验研究

陈吉丰¹, 黎军杰², 沈燕萍¹, 胡坚柯¹, 董依培¹, 姜青林², 郭建斌²

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司; 2. 河海大学电气与动力工程学院)

摘要: 针对高水头闸门水封密封有效性受材料衰减效应影响面临较大不确定性的问题,通过橡胶水封的本构特性试验,分析了橡胶材料的应力松弛、滞回效应与塑性变形等衰减特征和时变规律,结合水封填充狭隙空间的密封机理,建立了密封力学模型,明确并试验验证了水封可靠密封的约束条件。结果表明:压缩率是影响高水头闸门水封密封有效性的关键要素,其中压缩率小于25%的水封密封有效性与压缩率呈现良好的正相关性,而压缩率大于25%的水封密封有效性与压缩率呈现显著的负相关性;建立的密封有效性约束条件与极限承压试验结果吻合较好,可为高水头闸门的可靠密封提供重要的参考依据。

关键词: 高水头闸门; 橡胶水封; 密封有效性; 应力松弛; 滞回效应; 塑性变形

Experimental study on sealing effectiveness of water seals for high-head gates

Chen Jifeng¹, Li Junjie², Shen Yanping¹, Hu Jianke¹, Dong Yipei¹, Jiang Qinglin², Guo Jianbin²

(1. POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited; 2. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University)

Abstract: Given the significant uncertainty in the sealing effectiveness of water seals for high-head gates caused by material attenuation effects, the attenuation characteristics (including stress relaxation, hysteresis effect, and plastic deformation) and time-varying laws of rubber materials were analyzed through constitutive characteristic tests of rubber water seals. A mechanical model for sealing was established by integrating the sealing mechanism of water seals filling the narrow gap space, and the constraint conditions for reliable sealing of water seals were clarified and experimentally verified. The results indicate that the compression ratio is a key factor affecting the sealing effectiveness of water seals for high-head gates; specifically, the sealing effectiveness of water seals with a compression ratio of less than 25% shows a good positive correlation with the compression ratio, whereas that of water seals with a compression ratio of greater than 25% shows a significant negative correlation with the compression ratio. The established constraint conditions for sealing effectiveness agree well with the ultimate pressure-bearing test results, which can provide an important reference for the reliable sealing of high-head gates.

Key words: high-head gate; rubber water seal; sealing effectiveness; stress relaxation; hysteresis effect; plastic deformation

受橡胶材料应力松弛、滞回效应与塑性变形等衰减效应影响^[1-3],高水头闸门水封密封有效性面临较大的不确定性,极易诱发工程病害的发生和发展^[4-5]。例如:庆云闸闸门水封泄漏曾导致水工建筑物出现明显水激振动病害,相关研究表明,闸门在复杂水动力作用下易产生流激振动,并进一步威胁结构安全^[6];三峡工程冲沙底孔闸门水封的密封有效性完全依靠人工经验,密封的不确定性导致泄漏经常发生,除了引起水能损失外还造成受力构件产生严重腐蚀病害^[7],工程养护和运行面临困难。近年来我国抽水蓄能电站大规模建设^[8-9],也使得高水头闸门保有量快速增长,加强对水封密封有效性的研究,对于工程安全运行具有重要的现实意义。

李斌等^[10]等通过单轴拉伸和应力松弛试验,建立了氟橡胶的超弹性和黏弹性本构模型,为橡胶密封性能分析与安全评价提供了依据。李昕龙等^[11]等通过高应变速率压缩试验研究了金属橡胶的动态压缩力学特性,为其在高速冲击防护领域的应用提供了依据。Zheng等^[12]基于试验研究成果建立了高温下压缩封隔器橡胶密封性能评价系统,为封隔器设计优化提供了依据。本文对高水头闸门水封应力松弛、滞回效应与塑性变形等材料衰减因素开展本构特性试验,明确和验证橡胶水封对狭隙空间的填充性能,从而更好掌握橡胶水封密封的极限承压性能和工作状态,以为高水头闸门水封的密封有效性提供参考。

1 力学模型

1.1 密封有效性的力学表现

闸门止水结构由底板、压板、螺栓和橡胶水封构成,如图 1(a)所示。由于机加工制造精度的限制,工件接触表面呈现凹凸不平的狭隙微观特征,因此闸门水封的密封性主要取决于其对接触界面狭隙的压密填充能力^[13]。

闸门止水结构的密封机理如图 1(b)所示,在力学承载条件中表现为橡胶水封对狭隙空间填充的张紧应力(P')必须大于狭隙空间密封水体对橡胶水封的顶托作用力(P_h),否则狭隙空间的密封水体将顶开橡胶水封与接触面的局部黏合区域,引发泄漏。因此,橡胶水封的密封有效性需要重点考虑橡胶水封的材料力学本构特性,以及这一力学本构特性对狭隙空间填充的张紧应力的复合影响。

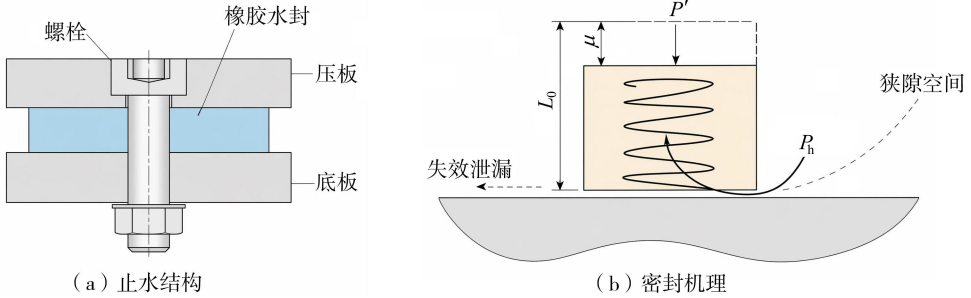


图 1 闸门止水结构与密封机理

Fig. 1 Gate water stop structure and sealing mechanism

1.2 橡胶材料的力学本构特性

橡胶材料的种类繁多,本文将橡胶水封材料简化为各向同性、均匀变形的 Mooney-Rivlin 材料物理模型讨论^[14],该模型的力学本构关系如式(1)所示,基于该模型,可进一步分析橡胶水封在压缩变形过程中对狭隙空间的填充受力特性。

$$\begin{cases} W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + \frac{1}{d}(J - 1)^2 \\ P = \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \varepsilon} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \varepsilon} \\ I_1 = \varepsilon^2 + 2\varepsilon^{-1} + 2 \\ I_2 = \varepsilon^2 + \varepsilon^{-2} + 4 \end{cases} \quad (1)$$

式中: W 为橡胶水封应变能密度函数; C_{10} 、 C_{01} 为 Mooney-Rivlin 模型的材料常数,由试验测得; I_1 、 I_2 分别为第一和第二应变张量的惯性不变量; d 为不可压缩参数; J 为体积比,橡胶水封取 1; P 为橡胶水封材料的固有张紧应力(即理论值); ε 为橡胶水封的压缩率, $\varepsilon = \eta/L_0$,其中 η 为橡胶水封压缩量, L_0 为橡胶水封的初始厚度,如图 1(b)所示。

1.3 水封密封的力学约束条件

橡胶水封分子链具有滑移和重排的特点,因此橡胶水封的力学响应具有明显的几何非线性、材料非线性和边界非线性特征^[15-16]。按照前述密封有效性的力学行为,橡胶水封的本构特性在工程中表现为固有张紧应力随着时间、压缩率、材料类别等多要素关联的函数或过程,呈现为考虑应力松弛、滞回效应与塑性变形等衰减效应影响和承载性能互馈的力学模型系统,其力学模型如图 2 所示。

按图 2 所示模型框架,水封密封有效性力学模型包含 3 层信息:第 1 层为时间、压缩率、材料类别等多要素节点;第 2 层为应力松弛、滞回效应与塑性变形等衰减效应影响;第 3 层为时效、聚合运算,主要纳入材料衰减因素,以及几何、材料和边界影响等多要素节点信息,明确橡胶水封对狭隙空间填充的张紧应力,最后形成水封密封有效性力学约束条件:

$$\begin{cases} P' = \lambda(\varepsilon, t)(P - \psi(\varepsilon, t)) \\ P' \geq P_h \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\lambda(\varepsilon, t)$ 为材料应力松弛效应的修正系数,表现为张紧应力的时效性衰减特性; $\psi(\varepsilon, t)$ 为材料本构特性

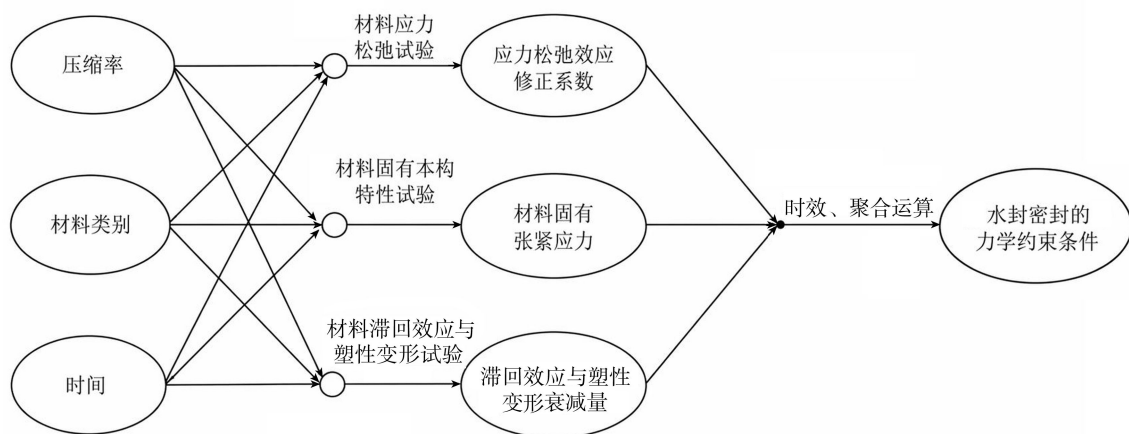


Fig. 2 Mechanical model for sealing effectiveness of water seal

因滞回效应与塑性变形引起的衰减量。

2 本构特性试验

选择工程常用的 SF7774 水封材料按 GB/T 2941-2025《橡胶 物理试验方法试样制备和调节通用程序》的规定制备橡胶水封试件,分别开展试件压缩性能的应力松弛试验、滞回效应与塑性变形试验。

试验通过螺母螺杆加力装置对试件进行夹持压缩,控制试件压缩率,并通过拉压传感器实测试件的张紧应力,以掌握橡胶水封的应力松弛、滞回效应与塑性变形等衰减效应因素的影响水平,为橡胶水封的密封有效性研究提供参考数据和验证方法。试验流程如图3所示。

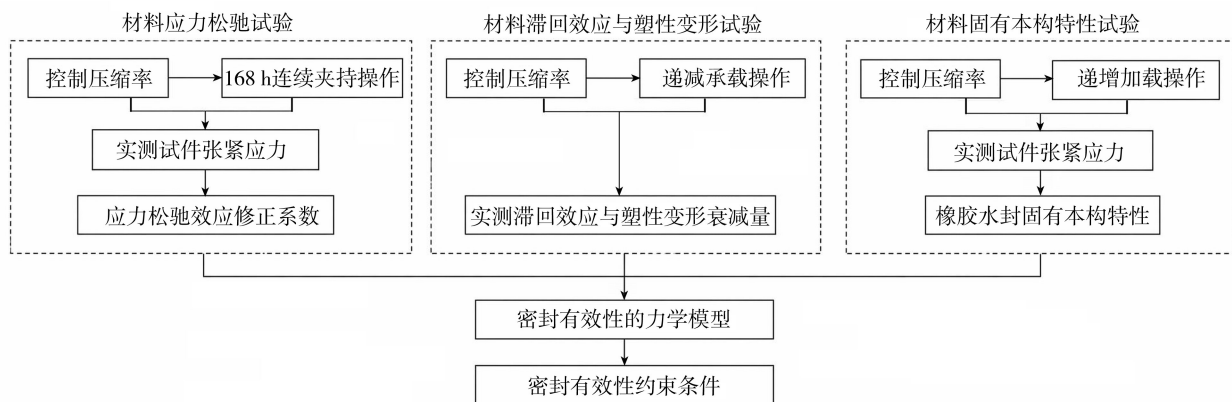


图3 水封材料本构特性试验流程

Fig. 3 Test process for constitutive characteristics of water seal material

2.1 应力松弛试验

对试件夹持压缩,并控制压缩率为 10%、15%、20%、25%、30%,分别开展 168 h 连续试验,实测试件的张紧应力,得到橡胶水封试件的应力松弛时效特性曲线如图 4(a)所示,水封材料应力松弛效应显著,与材料的压缩率正相关,并随时间呈先快后缓、最终趋于稳定的衰减特性。

2.2 滞回效应与塑性变形试验

对试件采取递减承载操作,并控制试件的压缩率开展试验。考虑压缩率小于 15% 的试件滞回效应与塑性变形微弱(小于 1%),以及压缩率大于 30% 的试件易发生材料特性破坏,仅记录压缩率介于 15%~30% 区间的滞回效应与塑性变形衰减量。试验得到的水封试件滞回效应与塑性变形的关联特性曲线如图 4(b) 所示,试件滞回效应与塑性变形的衰减量随压缩率增大而快速增强,并且压缩率介于 25%~30% 区间的衰减量呈现急剧增大特征,表明水封密封有效性显著减弱。

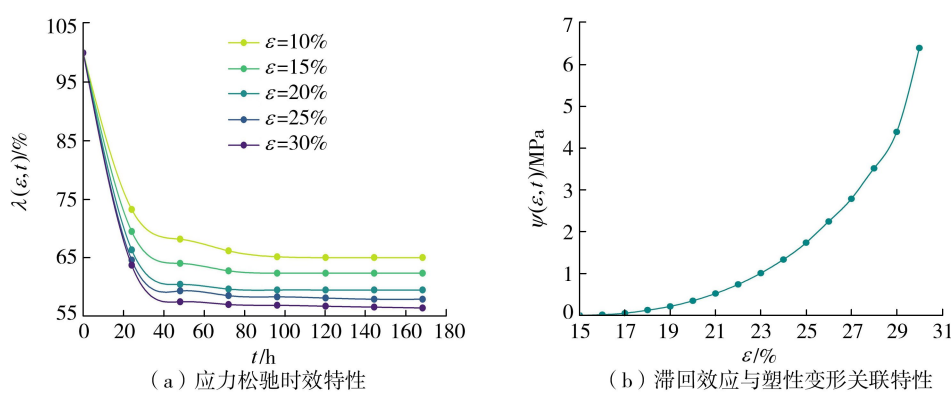


图4 水封材料的衰减效应

Fig.4 Attenuation effect of water seal material

2.3 约束条件

- a. 对初出厂的水封试件进行递增加载操作,并控制试件的压缩率,实测试件的固有张紧应力,结果如图5所示。
- b. 拟合试件的实测固有张紧应力值,得到橡胶水封固本构特性关系曲线 ε - P ,如图5所示。根据密封有效性的力学模型,按照式(2)扣减应力松弛、滞回效应与塑性变形等衰减效应影响,得到密封有效性约束条件 ε - P' ,如图5所示。
- c. 图5表明,密封有效性约束条件曲线表征了水封密封的极限承压性能,因此控制压缩率是保障水封密封有效性的关键因素。
- d. 图5表明, ε - P' 与 ε - P 之间的区域表征水封密封性能的衰减劣化情况。其中压缩率在 0%~15% 区间的衰减劣化情况微弱,呈现为橡胶水封的高效密封有效性;压缩率在 15%~25% 区间的衰减劣化情况逐渐显现,密封有效性约束条件随压缩率增长呈现正相关特性,并逐渐趋缓;压缩率在 25%~30% 区间的衰减劣化情况显著,密封有效性约束条件随压缩率增长呈现急剧衰减特性。因此,橡胶水封的密封有效性必须兼顾材料应力松弛、滞回效应与塑性变形等材料衰减效应影响,从而更好地掌握水封密封的极限承压性能和工作状态,为高水头闸门安全运行提供关键技术保障。

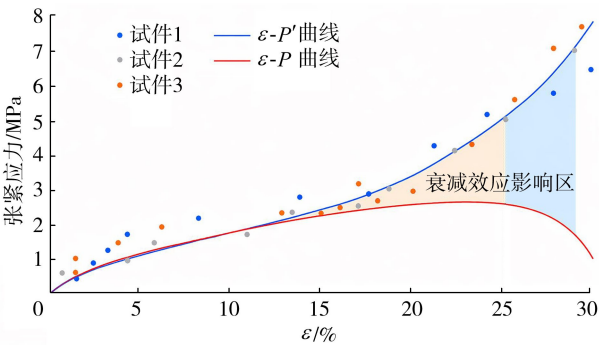


图5 水封材料固本构特性与密封有效性约束条件

Fig.5 Inherent constitutive characteristics of water seal material and constraint conditions for sealing effectiveness

3 有效性验证

参考某抽水蓄能电站发电洞工作闸门的设计方案,采用专门试验装置(图6(a)(b))开展水封密封有效

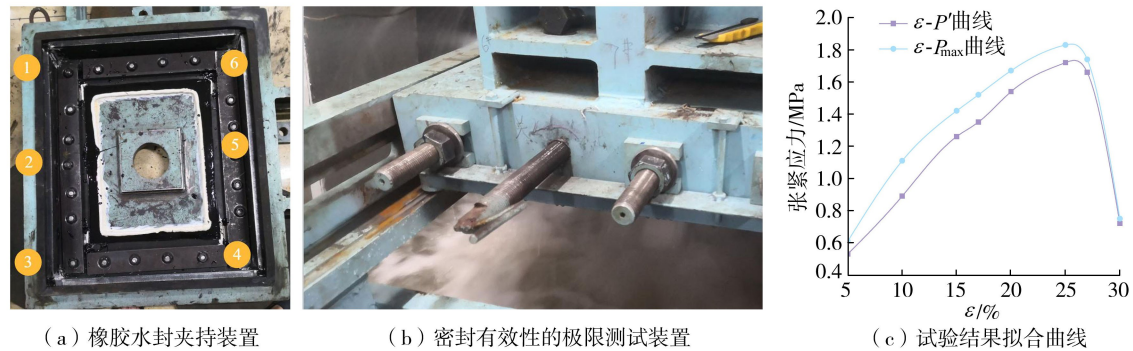


图6 水封密封有效性验证试验

Fig.6 Verification test for sealing effectiveness of water seal

性验证试验。对不同压缩率(5%、10%、15%、17%、20%、25%、27%、30%)的 8 组橡胶水封,按密封有效性约束条件(图 5 中 ε - P' 曲线)明确试验水压,并按试验水压的 50%、70%、80%、90%、95%、100% 逐级施加,观测水封密封的极限承压($P_{\max}$),结果见图 6(c)。

根据试验测得的极限承压数据,拟合得到橡胶水封承压的关联特性 ε - $P_{\max}$ 曲线,并与密封有效性约束条件对比,如果如图 6(c)所示。图 6(c)表明:①通过力学模型模拟得到的密封有效性约束条件,较好预测了水封密封的极限承压性能,为水封密封有效性的预测提供了参考依据;②相对于实际观测的密封极限承压,根据水封密封的约束条件模拟计算得到的张紧应力明显偏小,该模型预测水封密封有效性偏于保守;③压缩率在 0%~25% 区间的水封密封有效性与压缩率呈现良好的正相关性,表现为提高压缩率才能确保密封的极限承压性能;而压缩率在 25%~30% 区间的水封密封有效性与压缩率呈现负相关性,提高压缩率反而导致密封极限承压性能快速下降。

4 结 论

- a. 橡胶水封压缩率在 0%~25% 区间的水封密封有效性与压缩率呈现良好的正相关性,但压缩率大于 25% 的水封密封有效性与压缩率呈现显著的负相关性。因此,控制压缩率是保障水封密封有效性的关键因素。
- b. 基于力学模型建立的密封有效性约束条件与极限承压试验结果吻合较好,可用于评估水封密封的极限承压边界和工作状态,为高水头闸门水封密封有效性评价提供参考。
- c. 水工闸门的密封设计必须综合考虑橡胶材料的应力松弛、滞回效应及塑性变形等材料衰减因素,确保橡胶水封在极限承压下的密封性能,从而为高水头闸门的安全运行提供关键的技术保障。

参考文献:

[1] 王珏,郑赞,汪振宁,等. 基于 Burgers 黏弹性模型的 P 型橡胶水封长期服役止水密封性仿真[J]. 中国农村水利水电,2023 (12):266-272. (Wang Jue,Zheng Yun,Wang Zhenning,et al. Sealing performance of P-type rubber water seals based on burgers viscoelastic model in the long-term service simulation [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023 (12): 266-272. (in Chinese))

[2] 王银龙,李钊,李子然,等. 未硫化橡胶黏弹塑性本构模型及有限元实现[J]. 上海交通大学学报,2023,57(8):1086-1095. (Wang Yinlong, Li Zhao, Li Ziran, et al. A visco-elastoplastic constitutive model of uncured rubber and its finite element implementation [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57 (8): 1086-1095. (in Chinese))

[3] Leng D X, Huang C, Xu K, et al. Experimental mechanics and numerical prediction on stress relaxation and unrecoverable damage characteristics of rubber materials [J]. Polymer Testing, 2021, 98: 107183.

[4] 马斌,郭乙良. 水工闸门振动研究现状及发展趋势[J]. 水利水运工程学报,2019(2):55-64. (Ma Bin, Guo Yiliang. Current research status and development trend of hydraulic gate vibration [J]. Hydro-Science and Engineering, 2019 (2): 55-64. (in Chinese))

[5] 王延召,徐国宾. 平面闸门爬行振动物理模型试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(5):37-44. (Wang Yanzhao, Xu Guobin. Experimental study on physical model of slip-stick vibration of plane gate [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52 (5): 37-44. (in Chinese))

[6] 彭思贤,赵兰浩,毛佳. 大宽高比弧形钢闸门流激振动数值分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):90-96. (Peng Sixian, Zhao Lanhao, Mao Jia. Numerical analysis of flow-induced vibration of a steel radial gate with large width to height ratio [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42 (3): 90-96. (in Chinese))

[7] 郭建斌,孙鹏,陈吉丰,等. 闸门受蚀构件的力学性能衰减特性[J]. 腐蚀与防护,2023,44(4):113-118. (Guo Jianbin, Sun Peng, Chen Jifeng, et al. Mechanical property attenuation characteristics of corroded components of gates [J]. Corrosion & Protection, 2023, 44 (4): 113-118. (in Chinese))

[8] 韩冬,任伟楠,周力,等. 中国抽水蓄能发展形势和展望[J]. 人民长江,2024,55(11):39-45. (Han Dong, Ren Weinan, Zhou Li, et al. Development status and outlook of pumped storage hydropower in China [J]. Yangtze River, 2024, 55 (11): 39-45. (in Chinese))

[9] 李晓超,周叶,李尚奇,等. 抽水蓄能电站在电网系统占比影响研究[J]. 人民长江,2025,56(增刊 1):284-289. (Li Xiaochao, Zhou Ye, Li Shangqi, et al. Research on the influence of installed capacity of pumped storage power station on the

proportion of power system[J]. Yangtze River,2025,56(S1):284-289. (in Chinese))

[10] 李斌,于富盛,郑旭,等. 高温下橡胶应力松弛行为对封隔器密封性能的影响研究[J]. 应用力学学报,2020,37(5):2153-2159. (Li Bin,Yu Fusheng,Zheng Xu,et al. Effects of rubber stress relaxation on packer sealing performance at high temperature [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2020,37(5):2153-2159. (in Chinese))

[11] 李昕龙,原霞,王玉帅,等. 高速冲击下金属橡胶动态力学特性研究[J]. 兵器装备工程学报,2024,45(3):265-273. (Li Xinlong,Yuan Xia,Wang Yushuai,et al. Research on dynamic mechanical properties of metal rubber under high-speed impact [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2024,45(3):265-273. (in Chinese))

[12] Zheng Xu,Li Bin,Fei Gensheng. Evaluation of sealing performance of a compression packer at high temperature[J]. Science Progress,2022,105(1):1-24.

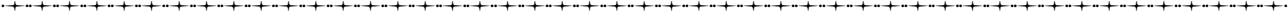
[13] 田宇. 压力容器吊装孔密封结构的泄漏机理研究与仿真分析[D]. 武汉:华中科技大学,2021.

[14] 陈凯杰,邱中辉,陈蔚芳,等. 丁腈橡胶大应变率范围本构模型建立[J]. 热能动力工程,2024,39(8):183-192. (Chen Kaijie,Qiu Zhonghui,Chen Weifang,et al. Establishment of constitutive model of nitrile butadiene rubber over a wide strain rate range[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2024,39(8):183-192. (in Chinese))

[15] 宋义虎,李承宇. 橡胶复合材料的 Mullins 效应[J]. 工程塑料应用,2024,52(6):70-81. (Song Yihu,Li Chengyu. Mullins effect of rubber composites[J]. Engineering Plastics Applications,2024,52(6):70-81. (in Chinese))

[16] 王婷婷,吴尚,徐帅帅,等. 模拟研究橡胶的压缩永久变形[J]. 安徽大学学报(自然科学版),2024,48(6):70-77. (Wang Tingting,Wu Shang,Xu Shuashuai,et al. Simulated study of compression permanent deformation of rubber[J]. Journal of Anhui University (Natural Science Edition),2024,48(6):70-77. (in Chinese))

(收稿日期:2025-01-14 编辑:熊水斌)



(上接第110页)

[20] 黄茁,曹小欢. 大型水库局部藻华控制技术探讨[J]. 人民长江,2009,40(7):27-29. (Huang Zhuo,Cao Xiaohuan. Discussion on algae bloom control in local area of large reservoir[J]. Yangtze River,2009,40(7):27-29. (in Chinese))

[21] 张琪,缪荣丽,刘国祥,等. 淡水甲藻水华研究综述[J]. 水生生物学报,2012,36(2):352-360. (Zhang Qi,Miao Rongli,Liu Guoxiang,et al. The review of the studies on freshwater dinoflagellate bloom[J]. Acta Hydrobiologica Sinica,2012,36(2):352-360. (in Chinese))

[22] 邢领航,贺蔚,张健,等. 隔水幕分层取水研究进展及应用现状[J]. 长江科学院院报,2020,37(3):18-25. (Xing Linghang, He Wei,Zhang Jian,et al. Present research and application of temperature-control curtain in stratified reservoir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2020,37(3):18-25. (in Chinese))

[23] 贺蔚. 深水水库隔水幕布改善出库水温效果及受力机理研究[D]. 天津:天津大学,2017.

[24] 王鸿洋,杨霞,马骏,等. 三峡水库汛期中小洪水调度对支流水华的影响[J]. 水力发电学报,2021,40(7):61-72. (Wang Hongyang,Yang Xia,Ma Jun,et al. Influence of regulating small and medium floods on algal blooms in tributaries of Three Gorges Reservoir in flood season[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(7):61-72. (in Chinese))

[25] 啜明英,马骏,刘德富,等. 整流幕对香溪河库湾水温特性影响数值模拟[J]. 长江流域资源与环境,2018,27(9):2101-2112. (Chuo Mingying,Ma Jun,Liu Defu,et al. Numerical simulation of the influence of curtain weirs on characteristics of water temperature in Xiangxi Bay[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2018,27(9):2101-2112. (in Chinese))

[26] 刘德富,黄钰铃,纪道斌,等. 三峡水库支流水华与生态调度[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.

[27] 刘流. 三峡水库支流库湾水温分层及其对水华的影响[D]. 宜昌:三峡大学,2012.

(收稿日期:2025-01-03 编辑:熊水斌)