

秘鲁圣加旺III水电站气垫式调压室闭气钢板与衬砌优化分析

余伟威¹ 陈国龙¹ 余磊¹ 徐伟杰¹ 贾卓凡²

1.中国水利电力对外有限公司 北京 101149

2.三峡大学三峡库区地质灾害教育部重点实验室 湖北 宜昌 443002

【摘要】：以秘鲁圣加旺III水电站气垫式调压室闭气钢板与衬砌为对象，基于三维数值模拟，围绕钢板布置方式、钢板厚度及衬砌厚度三个关键参数开展协同优化研究。首先对比分析内侧式与夹心式两种钢板布置形式，结果表明夹心式可与混凝土形成复合夹层结构，显著提升体系整体刚度，使洞周最大拉应力降低约17%、最大压应力峰值降低约10%，在变形控制与应力重分布方面均优于内侧式。随后对10-16 mm钢板厚度进行参数化计算，结果显示厚度为控制围岩位移的主导因素，增厚可使竖向与水平位移减少约60%，但超过12 mm后刚度增益呈明显边际递减。进一步对100-130 mm衬砌厚度进行对比，研究表明110-120 mm区间可有效降低洞周应力集中并显著收缩高位移区，其中120 mm在安全性、稳定性与经济性之间具有最优综合表现，而130 mm更适用于拱顶、端部等关键受力部位的局部加强。

【关键词】：岩石力学；气垫式调压室；闭气钢板；衬砌优化；数值模拟

DOI:10.12417/2811-0722.26.06.020

1 引言

气垫式调压室^[1-3]是高水头长引水隧洞中削减水力过渡过程、稳定运行工况的重要设施，其结构安全性直接关系到水电站整体系统的可靠性与调压效率。秘鲁圣加旺III水电站处于高陡山地地形区，引水隧洞埋深大、初始地应力高、节理裂隙发育，施工扰动强烈，使调压室在开挖和运行阶段均面临复杂的力学环境。在此背景下，作为气垫室保持密封与功能稳定的关键构件，闭气钢板的受力性能与布置合理性直接关系到气垫压力是否能够可靠维持。一旦钢板设计不合理导致发生局部屈曲、过度变形或密封效率降低，将引起气垫压力波动放大，进而威胁调压室及隧洞衬砌的长期安全。因此，对闭气钢板进行系统的力学分析与优化设计具有紧迫的工程必要性。

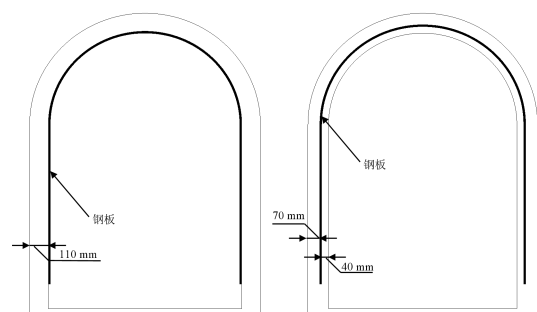
现有研究多集中于气垫式调压室的总体布置^[4-7]、水力瞬变响应以及常规衬砌稳定性分析，而对闭气钢板这一核心构件的独立受力特性、不同布置方式的影响规律以及其对调压室整体安全性的敏感性研究相对不足。特别是在类似圣加旺III这种强扰动和大跨度调压室的环境下，闭气钢板能否在运行全程保持稳定状态，并维持足够的气封能力，仍缺乏基于数值模拟的系统评估。同时，衬砌厚度的设计往往沿用经验或类比工程值，未能充分考虑钢板优化后的新受力状态，使得衬砌设计存在一定安全冗余或潜在薄弱环节，亟需进一步量化优化。

鉴于上述不足，本文以圣加旺III水电站气垫式调压室为例，采用三维化数值模拟方法，拟重点解决以下问题：（1）闭气钢板在不同布置方式下的应力、位移及稳定性变化规律；（2）基于钢板优化后的调压室受力条件，分析衬砌厚度调整对结构安全性的影响。

2 闭气钢板数值模型建立与力学响应分析

2.1 数值模拟计算方案

钢板布置方式是影响其受力稳定性与施工可行性的关键因素。本研究初步提出内侧衬砌式、夹心衬砌式和外侧衬砌式三种方案，随后按照工程可实施性和力学合理性进行筛选。外侧衬砌式布置将钢板置于混凝土衬砌与围岩之间。经分析，该方案存在以下难以克服的问题：（1）开挖面粗糙不平常导致钢板背后形成初始空腔，难以保证气封安全；（2）混凝土浇筑过程中钢板易发生位置偏移，质量控制难度大；（3）运营期无法进行有效检查与维护。因此，本研究将外侧衬砌式排除。为确保研究具有工程可行性与对比意义，最终选定内侧衬砌式（钢板直接暴露于气室）与夹心衬砌式（钢板嵌入混凝土中形成复合衬砌）两种布置方式开展系统研究。



(a) 内侧式

(b) 夹心式

图1 钢板布置位置

在钢板厚度的参数设计上，设定了包括钢板厚度（ t ）为10 mm、12 mm、14 mm和16 mm在内的厚度序列，这一设计既能考察厚度减薄（10 mm）对结构刚度的削弱效应，也能系统评估适度加厚（14 mm和16 mm）对抑制变形、改善应力及接触状态的强化效果。

边界条件方面，底部边界完全固定，侧向边界施加法向位移约束，顶部边界为自由边界并施加荷载。围岩的力学行为采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型描述，其弹性模量、泊松比、内聚力、内摩擦角、抗拉强度、密度和剪胀角等参数均通过室内试验、地质勘察和工程经验综合确定。计算时参数选取见表 1 所示。

表 1 模型参数

	密度(g·cm ⁻³)	体积模量(GPa)	剪切模量(GPa)
混凝土	2200	15.63	12.7
钢板	2500	79.23	171.67

2.2 位移响应特征分析

部分工况下部分围岩竖向位移云图如图 2 和 3 所示。隧洞拱顶上方区域普遍出现向下的沉降变形，而拱底下方区域表现为向上的隆起变形。在隧洞两侧及远离开挖扰动的区域，竖向位移基本接近于零，表明该区域围岩整体保持稳定。上述位移特征反映了开挖后围岩典型的“拱顶沉降、拱底隆起”基本响应模式。

内侧式钢板布置时，随着钢板厚度由 10 mm 增加至 16 mm，围岩的最大变形呈现出持续减小的趋势：拱顶最大沉降由约 0.81 mm 降至约 0.67 mm；拱底最大隆起（绝对值）由约 0.46 mm 减小至约 0.38 mm。该结果表明，随着钢板刚度的提高，其对衬砌及围岩的支撑作用增强，从而有效抑制了隧洞上、下部的竖向变形。与此同时，位移云图的渐变区域在厚度增加后略显平缓，且位移接近于零的区域范围有所扩大，说明较厚钢板能够在一定程度上缩小变形影响范围，使远场围岩受扰动更加有限。

对比内侧式与夹心式两种布置方式，整体变形均呈现相似的竖向位移分布特征，核心变形区集中在拱顶与拱底附近，并随距离增大而逐渐衰减。然而，位移极值表明两者之间仍存在一定差别。夹心式布置下拱顶最大沉降约为 0.74 mm，略低于内侧式的约 0.75 mm，说明钢板嵌入混凝土后对上部围岩具有更强的约束效果。相比之下，夹心式在控制拱底隆起方面略弱，其最大位移绝对值约为 0.42 mm，略高于内侧式的约 0.40 mm。

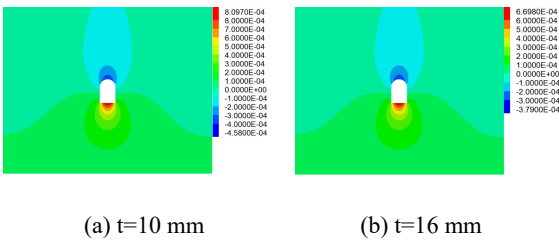


图 2 内侧式竖向位移云图（单位：mm）

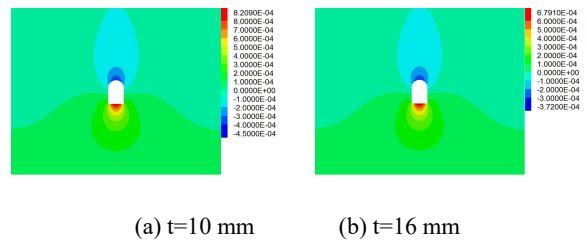


图 3 夹心式竖向位移云图（单位：mm）

如图 4 和图 5 所示，不同工况下围岩水平位移最大位移主要集中在洞室侧壁附近，并向远场逐渐衰减。以内侧式钢板布置为例，随着钢板厚度的增加，围岩的水平向最大正向位移与最大负向位移均呈现出明显的单调递减趋势。当钢板厚度为 10 mm 时，围岩的最大正向与负向位移分别为约 0.32 mm 和 0.31 mm；当厚度增至 12 mm 时，两者均降至约 0.29 mm；在 14 mm 工况下进一步减小至约 0.27 mm；最终在 16 mm 厚度下稳定于约 0.26 mm。该规律表明，提高钢板厚度能够有效增强支护系统的横向约束能力，从而系统性地削弱围岩的松弛变形。

在钢板厚度为 12 mm 的条件下，对比内侧式与夹心式布置方式可进一步揭示布置位置对水平变形的影响规律。两种方案的位移云图高度一致，然而在位移极值方面，夹心式布置表现出略优的变形控制效果：其最大正向位移与最大负向位移分别较内侧式略小（约 0.028 mm 与 0.029 mm），显示出对围岩朝洞内和洞外两个方向的水平位移均具有更强约束能力。这主要归因于夹心式布置中钢板与混凝土形成的复合夹层结构，能够显著提升衬砌整体抗弯刚度，从而更有效地抑制侧壁的水平松弛变形；相比之下，内侧式布置的钢板更偏向于内表面防护，对整体刚度的贡献有限。由此可见，钢板厚度变化带来的位移降低幅度远高于布置方式的影响。

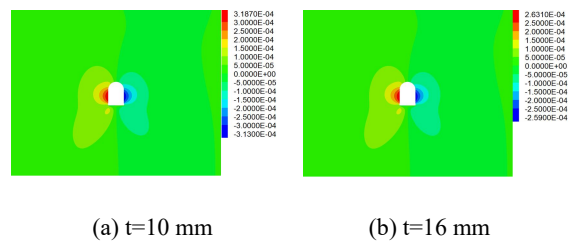


图 4 内侧式水平向位移云图（单位：mm）

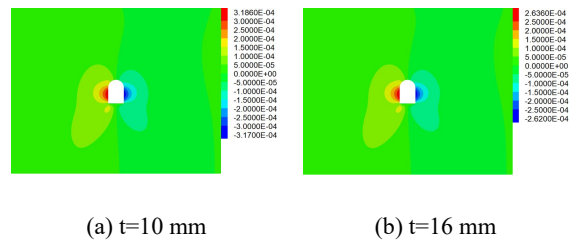


图 5 夹心式水平向位移云图（单位：mm）

2.3 应力响应特征分析

如图6和7所示,各工况下围岩均呈现拉应力与压应力同时存在的应力状态,其中压应力绝对值远大于拉应力。内侧式钢板布置时,钢板厚度为10 mm下围岩最大拉应力约为1.01 MPa,最大压应力约为1.62 MPa。将厚度增至12 mm后,最大拉应力增至1.11 MPa,而最大压应力绝对值略减至1.55 MPa。随着厚度进一步增加至14 mm和16 mm,围岩应力水平出现明显改善:最大拉应力分别降至0.87 MPa和0.84 MPa,最大压应力绝对值亦下降至1.40 MPa和1.34 MPa。从变化规律上看,钢板厚度由10 mm增至12 mm时拉应力出现小幅升高,而压应力略有缓解;当厚度超过12 mm后,拉、压应力绝对值均进入持续下降阶段。该“先升后降”的响应规律源于支护刚度与应力重分布的耦合作用:较薄钢板刚度不足,围岩变形较大,局部拉应力易出现集中;当厚度增至12 mm时,支护约束增强,局部区域由应力释放转为应力承载,造成拉应力短暂上升;而当厚度进一步提升至14-16 mm时,衬砌整体刚度显著增强,可有效抑制围岩松弛,使洞周高应力逐渐向深部强度更高的岩体转移,从而造成拉应力与压应力的同步降低。

进一步比较内侧式与夹心式布置形式,二者的应力场总体分布模式基本一致,但夹心式布置表现出更显著的应力缓和效果。内侧式布置下围岩最大拉应力和压应力分别为1.11 MPa和1.55 MPa,而采用夹心式布置后对应值分别降至0.92 MPa和1.47 MPa,拉应力降低约17.2%,压应力绝对值降低约4.8%。应力极值向零值方向收缩表明夹心式布置能够更有效地降低洞周应力集中。

如图8和9所示,围岩最小主应力的数值范围整体处于较高压应力水平,各工况最大压应力值均超过12 MPa,局部区域高达14 MPa以上。以内侧式钢板布置为例,当钢板厚度为10 mm时,围岩最小主应力(即最大压应力)约为14.62 MPa;厚度增至12 mm时,该值略增至14.89 MPa,表明压应力集中略有增强。但当厚度继续增加至14 mm和16 mm时,最小主应力显著下降,分别降至13.30 MPa和12.10 MPa,整体降幅约为18.7%。由此可见,钢板厚度对应力的影响呈现典型的非单调规律:10-12 mm阶段,由于支护刚度有限,围岩仍发生一定松弛变形,导致局部压应力集中有所强化;而当厚度增至14-16 mm时,支护体系刚度显著提高,有效降低洞周压应力峰值。对比内侧式与夹心式布置形式,在钢板厚度相同(12 mm)条件下,夹心式布置的最大压应力绝对值较内侧式降低约10.7%,且云图等值线呈整体向小压应力方向收缩,说明夹心式布置能够进一步缓解洞周高压应力集中。

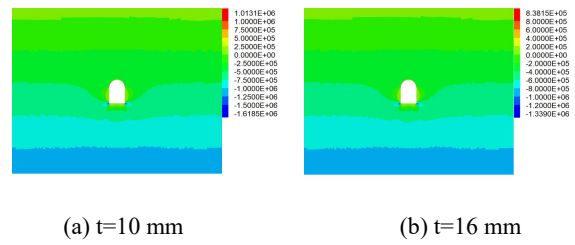


图6 内侧式最大主应力云图(单位: Pa)

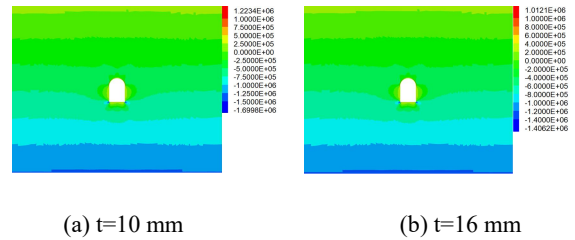


图7 夹心式最大主应力云图(单位: Pa)

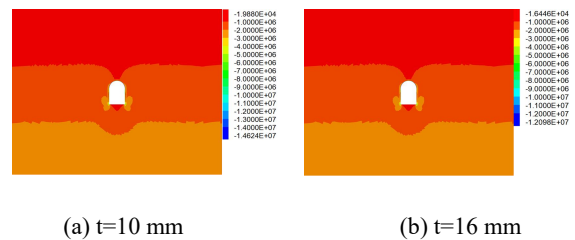


图8 内侧式最小主应力云图(单位: Pa)

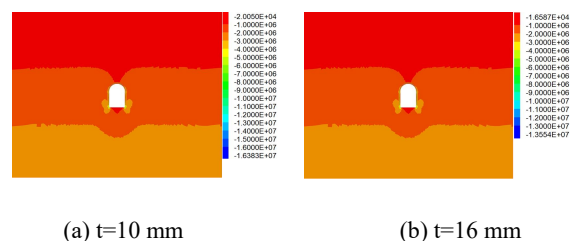


图9 夹心式最小主应力云图(单位: Pa)

基于前述数值模拟结果,气垫式调压室钢板衬砌的优化设计应综合考虑结构刚度特性与围岩一支护体系的相互作用机制。分析表明,钢板布置方式的优选应以提高衬砌体系整体抗弯刚度为主要目标。相比内侧式布置,夹心式钢板能与混凝土共同形成复合夹层结构,从而显著提升结构刚度。其力学优势主要体现在两个方面:(1)能够有效抑制洞周围岩变形,保证衬砌的整体位移水平维持在较低范围;(2)可显著改善围岩应力分布,最大拉应力降低超过17%,最大压应力集中程度减少约10%,从而有效减轻洞壁附近的局部应力峰值并提升结构整体稳定性。

在厚度参数的确定方面,应引入基于刚度敏感性的设计思路。计算结果显示,钢板厚度由10 mm增至16 mm时,洞周位移减少约60%;同时,当厚度超过12 mm后,衬砌刚度显著增强,可有效激发围岩拱效应,使高压应力向深部岩体重新

分布。然而，厚度增加带来的刚度提升呈现明显的边际递减特征，继续加厚并不能成比例改善力学响应。因此，建议以 12 mm 为基准厚度开展参数化分析，在满足位移控制和应力分布优化要求的前提下，通过模拟比选确定最具经济合理性的厚度区间，以实现结构安全性与经济性的综合优化。

3 气垫式调压室洞室衬砌施工优化分析

选取衬砌厚度(d)为 100 mm、110 mm、120 mm 和 130 mm 四种具有代表性的衬砌厚度作为分析对象，并在统一的“夹心式”钢板布置条件下开展数值模拟。

3.1 位移响应特征分析

综合不同衬砌厚度条件下围岩竖向及水平位移(图 10-11)的变化规律可知：随着衬砌厚度由 100 mm 逐步增加至 130 mm，围岩的最大沉降量、局部隆起幅度以及水平向偏移量均呈现持续递减趋势，整体变形水平得到显著改善。这表明，适当增加衬砌厚度能够有效提升结构整体刚度，增强围岩一衬砌体系的协调变形能力，从而对围岩松弛具有更强的抑制作用。从位移云图空间分布特征来看，100 mm 厚度工况下竖向与水平向位移的高值区范围最为广泛，尤其在拱部、端部及靠支洞侧区域形成明显的集中峰值，说明该厚度对围岩变形约束能力较弱。当厚度增至 110 mm 时，高位移区显著收缩，主要峰值区域的沉降和水平偏移量均出现大幅下降，变形控制效果提升最为明显；继续将厚度提高至 120 mm 后，围岩位移值持续降低，但下降幅度相较前一阶段有所收敛，云图分布趋于均衡，结构刚度的增益开始由“显著提升阶段”转向“稳定提升阶段”。在 130 mm 厚度工况下，位移较 120 mm 仍有一定程度的减小，但云图变化已相当有限，说明继续增加厚度所带来的边际刚度增益逐渐减弱，结构性能趋于饱和。

从位移增量敏感性分析的角度进一步观察可见：100 mm 至 110 mm 区间的位移降幅占整体改善的主要比例，是衬砌厚度调整中最关键的“主效应区”；110 mm 至 120 mm 厚度区间仍表现出可观的位移降低效果，尤其在拱部和端部等高敏感区域，变形峰值得到进一步抑制，可视为“次主效应区”；而 120 mm 至 130 mm 的位移变化幅度最小，增厚所带来的性能提升难以再与材料投入形成相对匹配的工程效益，属于“边际效应区”。

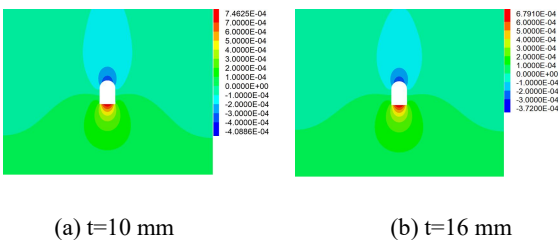


图 10 竖向位移云图 (单位: mm)

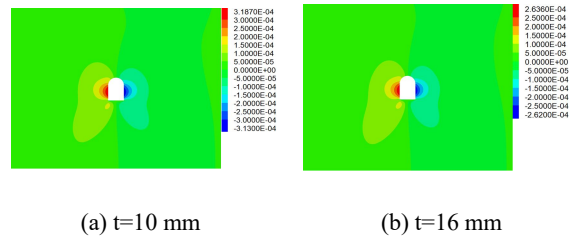


图 11 水平向位移云图 (单位: mm)

3.2 应力响应特征分析

如图 12 和图 13 所示，展示了部分工况下围岩应力云图分布。随着衬砌厚度由 100 mm 递增至 130 mm，洞周最大主应力的峰值和高应力区范围均呈收缩趋势：100 mm 工况下高应力带最为集中且峰值最高，110 mm 后峰值显著下降，120 mm 时应力场分布更趋均匀，而 130 mm 的进一步增厚虽仍有改善但幅度较小；高应力区主要集中在拱部、端部及靠近施工洞口的切削区，厚衬砌有助于将表层应力向深部传递，从而降低洞周的应力集中。关于最小主应力值对比显示：薄衬砌(100 mm)时洞周拉应力区更广、负值峰值更大，110 mm-120 mm 区间拉应力显著收敛，120 mm 后拉应力的进一步收缩同样出现边际递减现象，这说明衬砌增厚对抑制洞周拉应力极为有效，尤其能降低潜在拉裂或界面剥离风险。

100 mm 增厚至 110 mm 的最大主应力与最小主应力降幅占总体改善的主要部分，表明由薄向薄中厚的过渡是最具成本效益的改良段；110 mm 增厚至 120 mm 仍能带来明显的有利重分布效果，使高应力区边界外移并降低峰值；而 120 mm 增厚至 130 mm 的应力降幅最小，表明增厚到 130 mm 后性能提升与材料投入之间的边际收益正在减弱。区域敏感性分析还显示，端部、拱顶及靠支洞侧为应力响应最敏感的部位，应在这些关键部位优先观察厚度调整的效果。

基于以上最大值与增量的综合判断，并结合围岩变形控制与经济性考量，120 mm 衬砌厚度在本工程工况下显示出最佳的“安全—经济”平衡：相较于 100 mm 与 110 mm 能显著降低最大/最小主应力峰值并改善应力分布，而相较于 130 mm 则避免了过度材料投入但改善有限的情况。为进一步提高局部安全裕度，建议在拱顶、端部和靠支洞侧等受扰动显著区域采用局部增厚措施(可按设计需局部提升至 130 mm)，而整体衬砌厚度以 120 mm 为主。

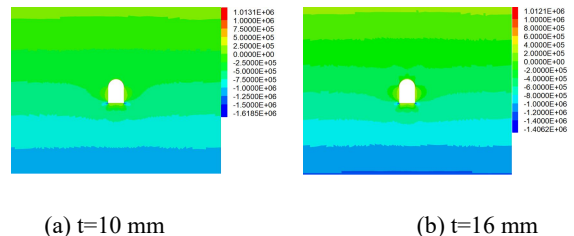
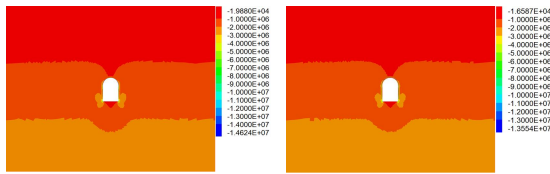


图 12 最大主应力云图 (单位: Pa)



(a) t=10 mm

(b) t=16 mm

图 13 最小主应力云图 (单位: Pa)

总体来看,衬砌厚度不宜一味加大,而应综合变形控制需求、施工可行性与经济性进行合理选择。从变形降低效率与刚度增益的综合表现判断,110-120 mm 区间可视为本工程衬砌厚度优化的合理范围。

4 结论

(1) 钢板布置位置的影响显著:对比分析表明,夹心式布置方案在力学性能上全面优于内侧式方案。该方案通过形成

钢-混凝土复合夹层结构,提供了更高的整体刚度,不仅能更有效地抑制围岩的水平与竖向变形,更能显著优化围岩的应力状态,具体表现为大幅降低洞周拉应力水平(降幅超 17%)和缓解高压应力集中(降幅约 10%),从而从根本上提升了围岩的整体稳定性与安全性。

(2) 分析结果明确揭示了钢板厚度是控制围岩变形与应力的敏感性主导因素。同时,厚度增加(特别是超过 12 mm 后)能有效促进围岩应力向深部有利重分布,降低应力集中程度。

(3) 气垫式调压室闭气钢板的稳定性优化应遵循“位置优先,厚度优化”的原则。

(4) 从变形降低效率与刚度增益的综合表现判断,110-120 mm 区间可视为本工程衬砌厚度优化的合理范围。为进一步提高局部安全裕度,建议在拱顶、端部和靠支洞侧等受扰动显著区域采用局部增厚措施(可按设计需局部提升至 130 mm),而整体衬砌厚度以 120 mm 为主。

参考文献:

- [1] 黄智鑫,周培勇,石刚,等.城门洞型气垫式调压室与圆管型气垫式调压室水力性能对比分析[J].水电能源科学,2025,43(07):167-171+152.
- [2] 黄智鑫,张道法,闻锐,等.气垫式调压室特征参数对水电站引水系统水锤防护效果的影响研究[J].西北水电,2025,(02):86-93.
- [3] 保庆顺,杨仕志,严谨,野三河水电站气垫式调压室设计与运行研究
- [4] 黄智鑫,周培勇,石刚,等.城门洞型气垫式调压室与圆管型气垫式调压室水力性能对比分析[J].水电能源科学,2025,43(07):167-171+152.
- [5] 赵立杨,冯梦雪,李昊,等.气垫调压室联合单向塔的停泵水锤防护研究[J].水电能源科学,2023,41(05):81-84+47.
- [6] 李付林,何全洋,何旭皆.磨子水电站外挂钢管气垫式调压室施工技术[J].四川水利,2020,(S1):1-5.
- [7] 水电站压力钢管设计规范:SL 281-2003[S].奔流电子音像出版(北京)有限公司,2003.