

钢坝闸侧止水墙面材料选型设计与研究

车迎春

天津市水务规划勘测设计有限公司, 中国·天津 300204

摘要: 钢坝闸是水利工程中的常见的挡水建筑物, 其侧止水墙面的材料性能直接影响闸门的密封性、耐久性与运行安全。论文聚焦于钢坝闸侧止水墙面材料选型设计, 深入分析南北方显著温度差异对材料性能的影响, 系统对比天然大理石与不锈钢两种常用材料的特性、适用条件及工程表现, 提出分区选型建议与优化施工方案, 为提升钢坝闸工程在复杂气候条件下的长期稳定运行提供理论依据与实践指导。

关键词: 钢坝闸; 侧止水墙面; 材料选型; 温度差异; 大理石; 不锈钢; 耐久性

Design and Research on Material Selection for Water Stop Wall Surface of Steel Dam Sluice

Yingchun Che

Tianjin Water Planning Survey and Design Co., Ltd., Tianjin, 300204, China

Abstract: Steel dam gates are common water retaining structures in hydraulic engineering, and the material properties of their side water stop walls directly affect the sealing, durability, and operational safety of the gates. The paper focuses on the material selection and design of the water stop wall on the side of the steel dam gate, deeply analyzes the impact of significant temperature differences between the north and south on material properties, systematically compares the characteristics, applicable conditions, and engineering performance of two commonly used materials, natural marble and stainless steel, proposes zoning selection suggestions and optimized construction plans, and provides theoretical basis and practical guidance for improving the long-term stable operation of steel dam gate projects under complex climatic conditions.

Keywords: steel dam gate; side water stop wall surface; material selection; temperature difference; marble; stainless steel; durability

0 前言

随着城市治水、景观建设的需要, 传统水利工程中水闸建筑物增加了一系列新设计方案, 近年来多种与城市景观相协调的新型闸门在工程中得到了广泛的应用。以上海苏州河口水闸为例, 自 2005 年建成投入运行以后, 底轴(驱动)式钢坝闸门等新型闸门在国内水利工程中应用如雨后春笋般兴起, 目前中国已有数千座水利景观钢坝闸。

钢坝闸组成包括土建结构、带固定轴的钢制坝体、驱动装置、控制装置和止水装置等, 钢制坝体相当于随底轴转动的平板闸门, 其门叶安装固定在底轴上, 底轴通过轴承装置固定在闸底槛上, 底轴的两端穿过闸墙, 与布置在设备室的启闭设备连接, 由启闭设备驱动底轴在 $0^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围内旋转, 带动门叶翻转, 实现直立挡水(可单向或双向)、卧倒过水和通航, 适当开启调节水位, 还可以利用闸门门顶过水, 形成人工瀑布的景观效果。闸坝底止水橡皮与底轴形成水封, 侧止水橡皮需要挤压在土建结构的侧挡墙上, 要求侧墙结构具有较高的平整度和光滑度, 常见材质有抛光大理石或预埋光滑不锈钢板等。

钢坝闸结构布置如图 1、图 2 所示。

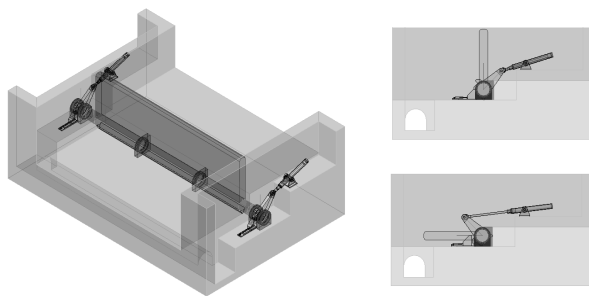


图 1 钢坝闸结构(三维布置图)



图 2 钢坝闸结构(工程实例照片)

钢坝闸侧止水系统是保障闸门严密挡水、高效运行的核心, 止水工作面材料的科学选型直接决定了止水效果与工

程寿命。在南方温暖湿润的工作环境，采用抛光大理石作为钢坝闸侧止水工作面可以很好的保证止水效果与工程寿命，但在北方严寒的工作环境，大理石表面很容易出现薄层成片状或鳞片状剥离脱落现象，严重的还有大理石整片脱落的情况发生，导致侧止水系统失效，闸坝两侧无法止水。前述两种情况如图 3、图 4 所示。



图 3 南方暖湿环境挡墙大理石良好



图 4 北方寒冷环境挡墙大理石脱落

1 钢坝闸侧止水墙功能要求

钢坝闸侧止水墙面是闸门与闸墩之间的关键密封界面，其核心功能要求：①高效止水，在承受巨大水压情况下，确保闸门闭合时滴水不漏；②耐磨抗冲击，抵抗闸门启闭过程中的反复摩擦、水流夹带泥沙的冲刷；③结构稳定，在长期水压、温度变化及外力作用下保持几何精度与整体性；④长期耐久，在水浸、干湿交替、温度循环、化学腐蚀等复杂环境下保持性能稳定，延长工程寿命。

南北方巨大的温度差异是影响材料选型的关键环境因素：

北方寒冷地区：冬季低温显著（可达 -30℃以下），冻融循环频繁，冻胀力大；夏季温差大。材料须具备优异的抗冻融性、低热膨胀系数、低温韧性。

南方温暖地区：年均气温高，夏季高温湿热，降水量大，湿度高。材料须具备良好的耐热性、抗湿热老化性、抗生物侵蚀性（如藻类）、耐盐雾腐蚀性（沿海地区）。

2 温度差异对材料性能的影响

在钢坝闸侧止水墙面设计选型时，需要充分考虑温度差异对材料性能的影响，如冻融循环、温度应力、低温脆性和高温蠕变、老化等因素，各因素的作用和影响见表 1 对比。

3 大理石与不锈钢材料特性深度对比分析

钢坝闸侧止水墙面常用材料有大理石和不锈钢，这两种材质有着各自的优缺点，各项性能比较如表 2 所示。

表 1 温度差异对材料性能的影响对比表

对比项目	作用	影响
冻融循环 (北方核心挑战)	水渗入材料孔隙结冰膨胀（体积增大约 9%），反复作用导致材料内部结构疲劳破坏、开裂、剥落。	显著降低材料的强度、密度和表面完整性，破坏止水密封面。
温度应力 (南北方共同挑战，程度不同)	材料具有热胀冷缩特性（热膨胀系数 α ）。温度变化 ΔT 引起热应变 $\epsilon = \alpha \Delta T$ ，当变形受约束时产生温度应力 $\sigma = E \alpha \Delta T$ （E 为弹性模量）。	北方：年温差极大，如东北可达 60℃~70℃，冬季低温收缩应力巨大，易导致脆性材料开裂或连接处失效。 南方：高温引起的膨胀应力可能导致构件挤压变形、表面起鼓或密封失效；持续的湿热环境加速材料老化。
低温脆性 (北方特有风险)	某些材料在低温下韧性急剧下降，由韧性断裂转变为脆性断裂。	材料在低温或冲击荷载下易发生无征兆的突然断裂。
高温蠕变/老化 (南方重要考量)	长期高温下，材料在恒定应力作用下发生缓慢的塑性变形，导致蠕变。	高温、高湿、紫外线等因素加速高分子材料（如密封胶）降解、金属氧化、石材风化。

表 2 大理石和不锈钢材质性能对比表

特性	天然大理石	不锈钢（常用 304、316L）
主要成分	方解石、白云石（ CaCO_3 、 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ）	Fe-Cr-Ni 合金（304:18Cr-8Ni; 316L:16Cr-10Ni-2Mo）
硬度/耐磨性	较高（莫氏 3~4 级），但低于石英砂	很高（HRC 70+），极其耐磨
抗压强度	高（70~250MPa）	很高（ $\geq 520\text{MPa}$ ）
热膨胀系数（ α ）	较高（ $4\sim 12 \times 10^{-6}/\text{℃}$ ），各向异性明显	较低（ $17\sim 18 \times 10^{-6}/\text{℃}$ ），各向同性
导热性	较低	较高
抗冻融性	关键弱点！孔隙率高，冻融循环 < 25 次	极优，几乎不受影响
低温韧性	差，低温脆性明显	优，良好的低温冲击韧性

特性	天然大理石	不锈钢（常用 304、316L）
耐腐蚀性	耐碱性好，耐酸性差，酸性环境易损坏	优异（尤其 316L 耐点蚀、耐氯离子）
耐候性 / 老化	易风化、易被藻类附着（南方潮湿环境）	优异，长期保持光泽与性能
止水密封面	需高精度加工研磨，依赖胶缝密封	可精密加工焊接，自身可成连续密封面
维护需求	较高（需定期清洁、防护、检查胶缝）	很低（基本免维护）
经济性	材料成本较低，加工安装要求高	材料成本较高，安装相对便捷

从对比表中可清晰看出，大理石材质的抗冻融性差，不适宜北方寒冷或极寒气候，但孔隙率高的特性可以保持一定吸水率，在无冻融环境中为橡皮止水的摩擦提供天然的润滑剂，因此在具体工程设计中可以灵活选材。

4 基于南北方温度差异的选型策略与应用方案

工程设计中对钢坝闸侧止水墙面材料的选型应充分考虑南北方温度差异，制定最佳的选型策略和应用方案。

4.1 北方地区

在北方地区特别是东北和西北地区，由于冬季存在寒冷低温环境，应对的核心矛盾是冻融、低温脆性、大温差应力等因素，故侧止水墙面材料首选不锈钢，理由有下面 4 个推荐点：

- ①卓越的抗冻融性：完全无惧冻融循环，是解决北方核心挑战的最可靠方案。
 - ②优异的低温韧性：在极寒条件下仍能保持良好韧性，避免脆性断裂风险。
 - ③较低且稳定的热膨胀系数：温度变化引起的变形和应力相对较小，系统稳定性高。
 - ④高强度和耐磨性：满足闸门频繁启闭的严苛要求。
- 推荐牌号：
 304 不锈钢：适用于大部分内陆淡水环境，经济性较好。
 316L 不锈钢：适用于近海地区、融雪剂使用区域或污染较重的河流，具有更强的耐氯离子腐蚀和耐点蚀能力。

应用方案：采用整体焊接或精密螺栓连接的连续不锈钢止水面板，面板厚度需根据挡水水头、闸门尺寸计算确定，通常不小于 6mm；与混凝土闸墩的连接需设计柔性过渡结构（如预埋不锈钢锚固件 + 弹性密封胶），吸收变形差异。

在低冻融风险区域的华北部分地区，如极端低温少、冻融次数少、对景观有特殊要求的情况下，可以选择（谨慎非首选）大理石作为侧止水墙面材料，但应提出较为严格的标准：

- ①选材要求：应选用密度极高（> 2.7g/cm³）、吸水率极低（< 0.2%）、结构致密均匀的优质大理石（如汉白玉、特定黑色大理石），必须进行严格的冻融循环试验（≥ 50 次合格）。
- ②设计要求：增大板厚（通常 ≥ 40mm），提高抗弯刚度；采用小分块设计（单块面积宜小），预留宽缝（≥ 8mm）并用高性能硅酮耐候密封胶填充，允许温度变形；背衬需有可靠排水设计，防止背后积水冻胀；与闸墩连接采用柔性锚

固（如不锈钢背栓 + 长圆孔）。

- ③维护要求：必须制定严格的定期检查，包括胶缝、清洁和防护（憎水处理）计划。

4.2 南方地区

在南方地区，由于气候温暖湿润、冬季不存在寒冷低温环境，应对的核心矛盾是高温老化、湿热腐蚀、生物侵蚀等不利因素，首选材料为综合优势明显的大理石材料，理由有下面 4 个推荐点：

- ①良好的耐候性与稳定性：在高温环境下物理性能稳定，不易发生高温蠕变。
- ②优异的耐碱性：适应南方湿润环境下的碱性水土条件。
- ③天然美观：符合南方园林化水利工程景观需求。
- ④经济性相对较好：材料成本低于高品质不锈钢。

选材与设计要点：
 ①选材：优先选择结构致密、吸水率低（< 0.5%）、耐酸性相对较好的石材，大理石建议选深色、矿物稳定的品种，另外花岗岩则是更优选择。

②防腐防藻：表面应进行憎水、防污、防藻的防护处理。沿海地区需特别注意选择耐盐雾品种或加强防护。

③密封设计：精心设计接缝（宽度适中，约 5~6mm），选用耐高温、耐紫外、耐湿热老化性能优异的硅酮密封胶。

④排水：确保墙面排水通畅，避免长期积水滋生藻类或加速腐蚀。

当然南方地区也可以因地制宜不锈钢作为侧止水墙面材料，不锈钢作为可靠备选材料，如在以下特定场景选型使用：

- ①大型、高水头、启闭频繁的重要闸门。
- ②强腐蚀环境（如海水闸门、污染严重河道）。
- ③对维护要求极低（无人值守）的工程。
- ④需要极高精度和光滑止水面的场合。

推荐牌号：316L 不锈钢。其在高温高湿、含氯离子环境下的耐腐蚀性远超 304。

需要引起注意的问题是在湿热环境下，需注意焊缝质量，避免晶间腐蚀和表面清洁，防止局部积垢腐蚀，可选择拉丝、喷砂等表面处理提高耐污性。

5 关键施工与构造措施建议

无论选择哪一种材质作为侧止水墙面材料，在施工过

程中都应注意以下几个方面:

①基面处理: 无论采用何种材料, 混凝土闸墩基面必须坚固、平整、干燥、清洁, 务必达到设计要求强度, 并进行必要的界面处理(如凿毛、涂刷界面剂)。

②变形缝与诱导缝: 在长墙段合理设置变形缝或诱导缝, 吸收结构整体变形, 防止不规则开裂破坏止水。缝内需有可靠止水带(如铜止水、橡胶止水带)和弹性填缝材料。

③锚固系统:

大理石: 必须使用柔性锚固件(如背栓、不锈钢长螺杆+长圆孔+弹性垫片), 允许石材板面有微小位移, 避免应力集中拉裂。严禁刚性水泥砂浆直接粘贴。

不锈钢: 焊接或螺栓连接需牢固可靠。焊接需由合格焊工按工艺执行, 避免热变形和晶间腐蚀(304材质要特别注意), 螺栓连接需考虑防松和防腐。

④密封胶施工:

选择符合设计要求的高性能硅酮耐候密封胶, 并关注其位移能力、耐温范围、耐候性、与基材相容性; 接缝清洁干燥是成败关键, 严格按规范要求打胶, 确保饱满、连续、粘结牢固, 形成有效密封。

⑤排水系统: 在墙面背后(尤其大理石墙面)和底部设计有效的排水通道, 防止积水、冻胀或滋生微生物。

⑥防腐和防护处理:

大理石: 施工完成后(或安装前)涂刷优质的渗透性石材防护剂(憎水、防污、防藻型)。

不锈钢: 焊后需对焊缝及热影响区进行必要的酸洗钝化处理, 恢复其耐腐蚀性, 根据环境选择表面处理, 如钝化、抛光、拉丝等。

6 结语

钢坝闸侧止水墙面材料的科学选型是保障工程长期安全、高效、稳定运行的核心环节, 南北方显著的温度差异对

材料的核心性能提出了截然不同的要求:

北方严寒/寒冷地区: 应将不锈钢作为首选材料, 其卓越的抗冻融性、优异的低温韧性和较低的热膨胀系数, 能有效应对冻融循环、低温脆化和巨大温差应力的严峻挑战; 天然大理石在北方区域的应用需极其谨慎, 仅限于特定低风险场景, 且必须选用超高品质石材、进行严格的抗冻试验并采取特殊设计构造措施。

南方温暖/炎热潮湿地区: 天然大理石凭借良好的高温稳定性、耐碱性、经济性和景观效果成为优选方案, 需注重选材、表面防护和密封胶性能, 不锈钢则在强腐蚀环境、高要求闸门和极低维护需求场景下展现出不可替代的优势。

科学的选型必须基于工程所在地的详细气候参数、闸门运行条件以及经济性和维护要求进行综合判断, 无论选择何种材料, 精心的节点设计、严格的施工质量控制和必要的防护措施都是确保侧止水墙面长期有效密封的关键所在。总之在工程设计中应结合科学论证, 通过因地制宜的材料选型与精细化的工程实践, 最终达到提升钢坝闸工程在全气候条件下的服役性能和使用寿命, 最大程度的延长工程的生命周期, 建设精品水利工程。

参考文献:

- [1] SL74—2019 水利水电工程钢闸门设计规范[S].
- [2] GB50086—2015 锚杆喷射混凝土支护技术规范[S].
- [3] JGJ133—2013 金属与石材幕墙工程技术规范[S].
- [4] GB/T3280—2015 不锈钢冷轧钢板和钢带[S].
- [5] GB/T9966—2020 天然石材试验方法[S].
- [6] T/CWEC34—2022 底轴旋转式钢闸门设计、制造、安装及验收规范[S].

作者简介: 车迎春(1979-), 男, 高级工程师, 从事水利水电工程金属结构设计研究。