

齐热电站高地温引水隧洞热 - 结构耦合分析

王保东, 于可忱

(中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘 要: 齐热水电站引水隧洞洞段较长、地温高, 通水运行造成的降温卸载对衬砌结构有较大影响。本文运用有限元分析软件对隧洞衬砌工程进行热 - 结构耦合, 分析隔热涂层对地温 - 水温联合作用下的衬砌应力演化, 结果表明: ①隔热涂层能有效控制随隧洞温度, 显著降低温度卸载引起的衬砌应力; ②衬砌结构内侧在通水运行之初温度梯度和应力最大, 随后逐渐降低。衬砌结构外侧通水运行后温度梯度和衬砌应力逐渐增加; ③喷涂隔热涂层后衬砌结构仅构造配筋即能满足设计需要, 达到高效经济的建设要求。

关键词: 引水隧道; 高地温; 有限元; 隔热涂层; 衬砌应力

中图分类号: TV672 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 08—0152—03

随着我国西部开发战略的实施, 大量工程建设在新疆山地高原地区展开, 齐热哈塔尔水电站作为其中水利水电工程建设的标志性项目, 能有效缓解喀什及南疆地区供电紧张状况, 促进地区经济社会发展, 显著提高人民生活水平。

齐热水电工程引水发电隧洞长 15.64km, 隧洞最大埋深 1720m, 洞径 4.7m, 桩号 6+900~10+990 与桩号 Y7+010~Y10+355 区间处于高地温洞段^[1], 爆破后掌子面岩石表面实测温度最高达到 119℃, 并伴有高压高温 (147℃) 气体喷出, 隧洞空气温度超过 60℃。赵国斌等^[2]认为该地区具有较好的热流背景值, 且岩体完整, 裂隙不发育使得地下水循环较差, 能形成较好的储热体造成高地热现象。由于隧道埋深较大, 裸洞情况下高地应力多造成岩爆现象^[3], 使得洞壁岩石剥落、掉块, 影响工程安全。运行期间, 隧洞过水时温度较低, 围岩在温度荷载作用下会产生较大的拉应力, 使原来发生岩爆经应力重分布达到稳定状态的岩体再次失稳、剥落^[4]。

本文基于齐热水电工程引水发电隧洞工程实践, 采用有限元分析软件, 考虑高地温隧道衬砌工程的热 - 结构耦合关系, 探讨了衬砌结构在温度场影响下的应力演化, 并进行相关配筋计算分析, 为相关工程实践提供参考, 具有理论意义和实际价值。

1 模型建立

1.1 模型参数设定

针对齐热水电站引水隧洞穿越高地温、高地应力地层现状, 建立 ANSYS 有限元模型, 模型基本假定如下:

- (1) 假定围岩为均质的各向同性岩体;
- (2) 假定混凝土衬砌之前, 围岩地应力已经充分释放。

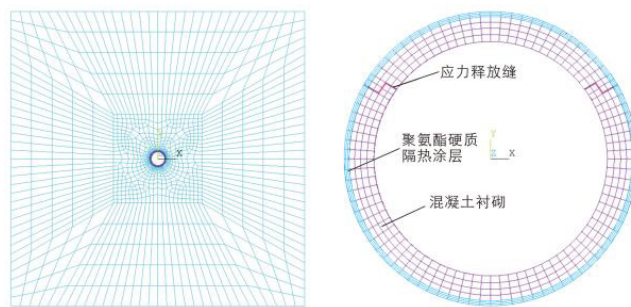


图 1 隧道模型及衬砌结构

计算模型见图 1, 为避免周边围岩约束对隧洞计算结果的影响, 隧洞四周可取 5 倍洞径以上, 左右两侧约束水平位移, 上下两侧约束垂直位移。

隧洞高温洞段主要以Ⅲ类围岩为主, 隧洞开挖断面为圆形, 直径 590cm, 开挖后喷涂聚氨酯硬质泡沫隔热材料, 厚度 10cm, 后进行钢筋混凝土衬砌支护, 衬砌厚度 50cm。隧道围岩岩体主要物理力学参数值见表 1。

表 1 隧道围岩物理力学参数

密度/(g/cm ³)	饱和抗压强度/(MPa)	饱和抗拉强度/(MPa)	弹性模量/(GPa)
2.55	80~90	3.2~3.8	18.0
泊松比	单位弹性抗力系数(MPa/cm)	C (MPa)	$\phi(^{\circ})$
0.23~0.26	40~50	1.5~2.0	42~45

1.2 工况设计

设定围岩外边界温度为 90℃,同时对衬砌结构进行配筋计算,设计如下:

(1)不喷涂隔热材料:隧洞开挖后持续通风 30 天,洞内空气温度降低至 45℃,后进行衬砌结构浇筑,30 天后进行隧洞通水,水温 10℃;

(2)喷涂隔热材料:隧洞开挖后喷涂聚氨酯硬质泡沫 10cm,持续通风 30 天,洞内空气温度降低至 25℃,后进行衬砌结构浇筑,30 天后进行隧洞通水,水温 10℃。

2 模拟结果与分析

2.1 衬砌应力演化及分析

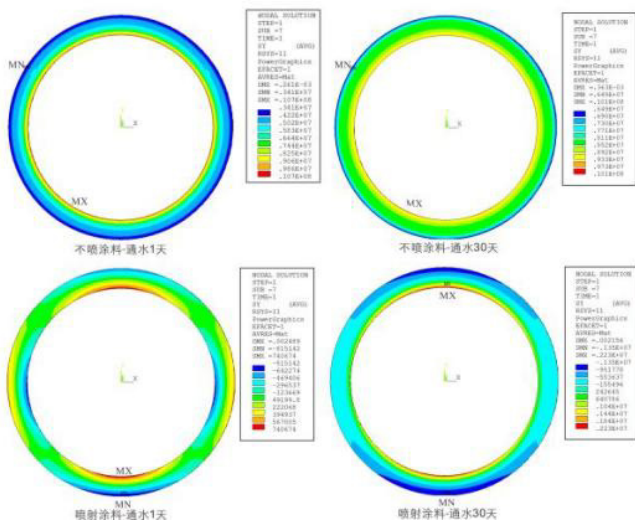


图 2 通水后隧道衬砌应力分布图

通水运行后隧洞内衬砌应力演化分布如图 2,在不喷射隔热涂层条件下衬砌应力由内向外逐渐减小,环向分布均匀。通水运行使衬砌结构表面温度骤降,衬砌结构产生显著的降温荷载,全断面产生环向拉应力;通水运行 30 天后,水流对隧道衬砌层的影响逐渐深入且稳

定,温度卸载引起的衬砌应力向外扩展显著;衬砌结构整体运行期间全断面环向应力超过混凝土温度应力允许值 1.587MPa,严重影响工程安全。喷射隔热涂层后隧道温度逐渐降低并稳定,通水后衬砌结构内外温度梯度较小,温度卸载引起的衬砌应力也较小;通水运行 1 天后衬砌结构顶部和底部的内侧出现局部拉应力集中,超过混凝土温度应力允许值 1.587MPa 的截面高度不足衬砌结构高度的十分之一,不影响衬砌结构的安全和稳定;运行 30 天后,水流温度影响半径增加,衬砌结构温度差异进一步减小,降温卸载造成的衬砌应力最小。

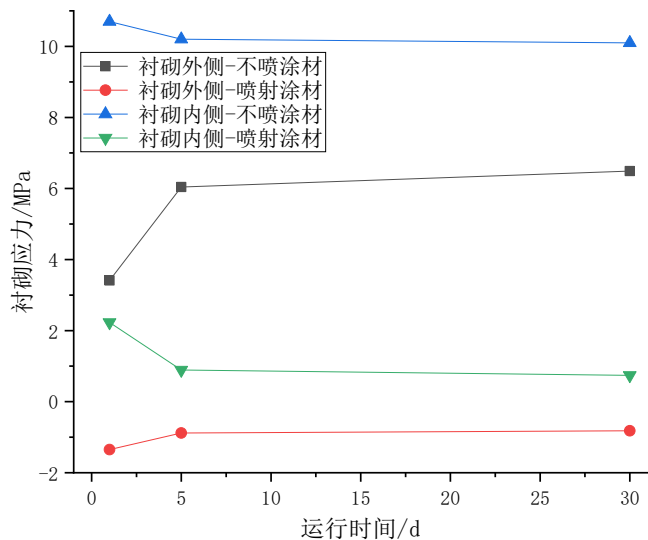


图 3 衬砌结构内外部应力演化

衬砌结构内外侧在通水运行前 5 天受温度卸载影响较大,衬砌应力急剧变化,如图 3,不喷隔热涂层条件下衬砌外侧应力增至 6.04MPa,占运行前 30 天应力增量的 93%,后期运行期间,衬砌结构温度基本稳定,应力变化较小。通水运行之初衬砌内侧温度梯度及降温卸载应力最大,运行 30 天后衬砌结构内侧温度梯度与应力逐渐稳定;衬砌结构外层温度梯度和卸载应力随通水运行时长的增加而升高,不喷射隔热涂层条件外侧下衬砌应力逐渐由 3.41MPa 增加至 6.49MPa;喷射隔热涂层将会显著降低隧道温度,使通水前后温度梯度与卸载应力较小,如喷射隔热涂层的衬砌结构内侧首次通水运行时应力仅 2.23MPa,是不喷射条件下的 1/5。

不同通水运行期衬砌结构主应力演化如图 4,不喷

射隔热涂层时衬砌结构的最大主应力为 10.7MPa，喷射隔热涂层后衬砌结构得最大主应力仅 2.23MPa，且在通水 30 天后降低至 0.74MPa。岩体应力差越大，产生的剪切应力越大，越容易产生变形破坏。不喷射隔热涂层时衬砌结构的最大应力差高达 11.6MPa，而喷射后隧道衬砌结构的最大应力差仅 3.6MPa，是前者的 1/3。

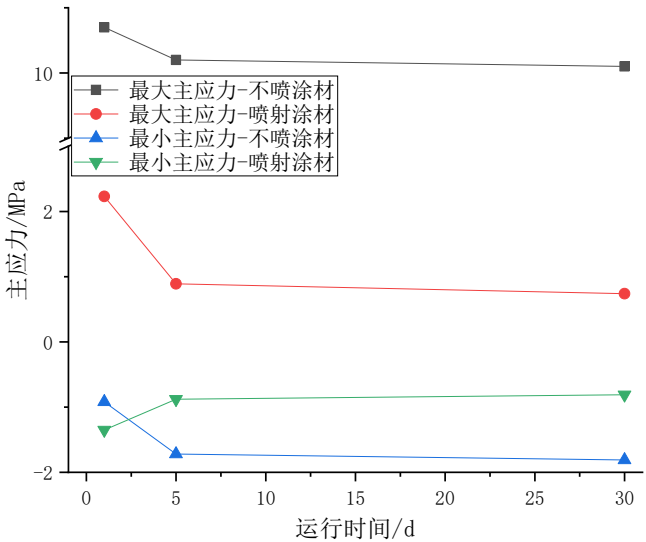


图 4 衬砌结构主应力演化

2.2 衬砌配筋及分析

衬砌结构在未喷射隔热涂层条件下通水运行 30 天后总应力发展至最大，超过混凝土温度应力允许 1.587MPa，衬砌结构全断面环向受拉，故需要配置大量钢筋以保证衬砌结构的安全。在喷射隔热涂层条件下通水运行 1 天后，衬砌结构总应力最大，然而衬砌结构洞底和洞腰部位合力为负是压力，即衬砌结构整体处以压应力状态，且压应力相对较小，远未达到混凝土的破坏条件，按照构造配筋即能满足衬砌结构设计要求。

表 2 引水隧洞衬砌结构配筋计算表

衬砌结构	运行日期	衬砌结构位置	最大合力/(kN)	计算配筋面积/(mm ²)	选配钢筋	配筋面积/(mm ²)
未喷射涂层	30 天	洞底	4334.888	17340	10φ36+10φ32	18221
		洞腰	4338.632	17355	10φ36+10φ32	18221
喷射隔热涂层	1 天	洞底	-41.627	—	构造配筋	—
		洞腰	-48.037	—	构造配筋	—

隧道衬砌结构的配筋计算见表 2，在未喷射隔热涂层条件下最大合力达 8673.5KN，按钢筋 300MPa 的抗拉强度及 1.2 的安全系数计算，需配置 10φ36+10φ32 才

能保证衬砌结构的安全，考虑到工程经济性和施工效率，是不可行的。喷射隔热涂层后能较好的控制隧洞温度，使得衬砌结构降温卸载应力较小，最大合力仅为 89.6KN，且为环向受压，均在混凝土温度应力允许值以内，构造配筋即可满足设计要求，既保证工程安全，又经济高效。

3 结论

本文基于齐热水电工程，运用有限元模拟进行引水隧洞衬砌工程的热-结构耦合，研究结论如下：

隔热涂层能极大改善隧洞内的高地温现象，使衬砌结构在通水运行期间的降温卸载效应减弱，通水运行 30 天内，最大衬砌主应力逐渐由 2.23MPa 降低至 0.74MPa，仅为未喷涂前的 1/5。

高地温围岩中，不喷涂隔热材料的衬砌结构在通水运行期间产生较大的环向应力，衬砌结构全断面受拉且超过混凝土应力允许值 1.587MPa，不利于结构稳定；喷涂后衬砌结构应力显著减小，在结构建设要求的安全范围内。

隧洞衬砌结构在未喷射隔热涂层条件下需要进行大量配筋才能满足设计要求，不符合工程建设经济高效原则；喷射隔热涂层后仅需构造配筋即可满足工程设计要求，是更合理可行的施工方案。

参考文献：

[1] 宿辉，马超豪，马飞．基于高地温引水隧洞的温度场数值模拟研究[J]．水利水电技术，2016，47(4)：34-37。
[2] 赵国斌，徐学勇，廖卓，等．齐热哈塔尔水电站引水隧洞岩体破坏及机理研究[C]//2016 年全国工程地质学术年会论文集．成都：科学出版社，2016：1337-1342。
[3] 席燕林，许煜忠，王立成．齐热哈塔尔水电站大深埋长隧洞关键技术难题及对策[J]，水利水电技术，2017，48(10)：26-30。
[4] 汪健．齐热哈塔尔高地温引水隧洞热稳定性分析[D]．河北工程大学，2015。