

文章编号: 1674—8247(2023)05—0093—07

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2023.05.017

中老铁路友谊隧道盐岩段衬砌开裂变形 机理研究

罗仁立¹ 舒俊良¹ 刘志韬¹ 李鹏州¹ 易鹏¹ 周平² 任松³

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南交通大学, 成都 611756;

3. 重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要:中老铁路友谊隧道穿越盐岩地层, 石盐含量高达80%, 国内外罕见。隧道穿越盐岩地层时发生了较为严重的开裂、底鼓和变形等病害。结合现场补勘及监控量测, 对衬砌开裂和变形机理进行了深入研究。研究表明: (1) 盐岩段衬砌开裂和变形主要是由盐岩重结晶作用产生的膨胀力引起; (2) 重结晶易发生在初支与二衬间空隙、初支与围岩间的空隙、离开挖轮廓距离较近的围岩裂隙内; (3) 重结晶作用的发生程度与盐岩含量和地下水发育程度紧密相关; (4) 对仅施作矮边墙及仰拱段落, 随着膨胀力的增大表现出不同的受力状态; 对于全环衬砌地段, 当膨胀力大于126 kPa时, 衬砌将出现开裂破坏; (5) 对于盐岩段衬砌, 应重点控制地下水流动, 防止盐岩重结晶发生, 同时采用圆形以结构加强, 以防止隧道开裂变形。

关键词:铁路隧道; 病害机理; 试验研究; 盐岩; 重结晶

中图分类号: U457

文献标志码: A

A Study on Mechanism of Lining Cracking and Deformation in Halite Section of Youyi Tunnel of China-Laos Railway

LUO Renli¹ SHU Junliang¹ LIU Zhitao¹ LI Pengzhou¹ YI Peng¹ ZHOU Ping² REN Song³

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Youyi Tunnel of China-Laos Railway traverses the halite formations with an exceptionally high halite content of up to 80%, which is rare both in and out of China. In the halite formations, significant issues such as cracking, bottom heave, and deformation occurred in the tunnel. Through on-site surveys and monitoring measurements, a comprehensive study was conducted on the mechanism of lining cracking and deformation. The findings are as follows:

(1) Lining cracking and deformation in the halite section are primarily caused by the expansive force generated by halite recrystallization. (2) Recrystallization tends to occur in the gaps between the initial support and the second lining, gaps between the initial support and the surrounding rock, and cracks in the surrounding rock located close to the excavation contour. (3) The degree of recrystallization is closely related to the halite content and the extent of groundwater development. (4) In sections with only low sidewalls and arch invert, different stress states are observed as the expansive force increases. In fully lined sections, when the expansive force exceeds 126 kPa, lining cracking and failure will occur. (5) Measures for the halite section should focus on controlling groundwater flow to prevent halite recrystallization.

收稿日期: 2023-01-04

作者简介: 罗仁立(1984-), 男, 高级工程师。

引文格式: 罗仁立, 舒俊良, 刘志韬, 等. 中老铁路友谊隧道盐岩段衬砌开裂变形机理研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(5): 93-99.

LUO Renli, SHU Junliang, LIU Zhitao, et al. A Study on Mechanism of Lining Cracking and Deformation in Halite Section of Youyi Tunnel of China-Laos Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(5): 93-99.

Additionally, a circular reinforcement structure should be employed to strengthen the tunnel and prevent cracking and deformation.

Key words: railway tunnel; defect mechanism; experimental study; halite; recrystallization

盐岩是一种由各种化学沉积岩组成的特殊岩类,是碱金属类卤素矿物组成岩层的总称。TB 10038—2022《铁路工程特殊岩土勘察规程》^[1]将盐岩按主要化学成分分为氯盐类、硫酸盐类和碳酸盐类盐岩。氯盐类盐岩又分为:石盐(NaCl)、钾盐(KCl)、钙盐(CaCl₂)、镁盐(MgCl₂)等。

目前国内在盐岩地层中修建的隧道较为少见,仅有黄东海^[2]、于占华^[3]对含盐地层隧道施工技术进行了介绍;肖勇刚^[4]、刘高金^[5]等对含盐地层隧道结构侵蚀成因进行了简要探讨。然而,上述研究均以穿越含石膏的硫酸盐类盐岩地层隧道为研究对象,而针对穿越含石盐的氯盐类盐岩地层隧道的相关研究还处于空白。中老铁路友谊隧道穿越长段落石盐地层且石盐含量高达80%,隧道穿越盐岩地层时发生了较为

严重的开裂、底鼓和变形等病害。如何确保盐岩地层隧道衬砌的安全成为了亟待解决的问题,因此开展针对盐岩段衬砌开裂变形机理的研究是十分必要的。

1 工程概况

友谊隧道穿越中国和老挝国境线,为设计旅客列车速度160 km/h的单线隧道全长9 595.407 m,老挝境内长2 425 m。隧道中国境内设2座斜井,老挝境内设置1座斜井(3号斜井),长750 m。老挝境内段共穿越第三系及白垩系地层:自小里程向大里程方向依次为第三系(E₁₋₂)泥岩夹砂岩、砾岩、盐岩含石膏;白垩系上统(K₂)泥岩夹砾岩、砂岩,下统(K₁)砂岩夹砾岩、泥岩。埋深240 m,均为Ⅳ级、Ⅴ级围岩。隧道平面如图1所示。

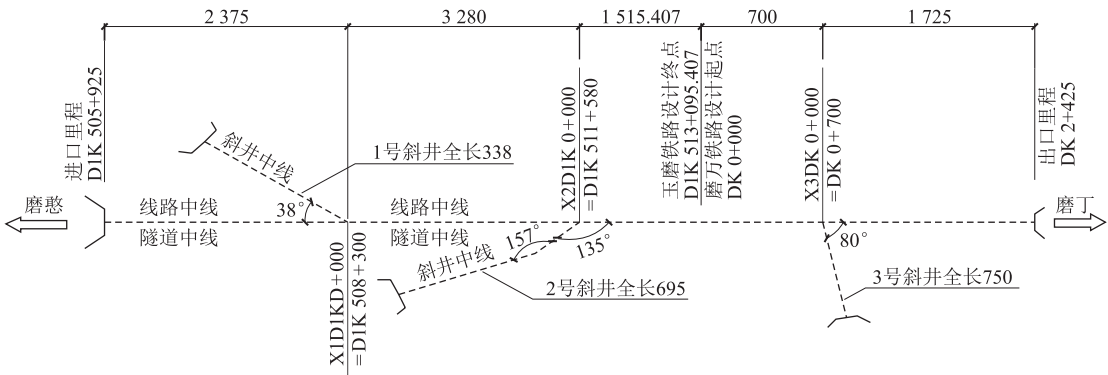


图1 隧道平面示意图(m)

友谊隧道(老挝境内DK 0+000~DK 0+363段及DK 0+550~DK 1+565段)开挖揭示的盐岩多为浅白、紫红、暗灰色,与灰色、紫红色砂泥岩碎石、角砾混杂。经岩石薄片鉴定试验分析,友谊隧道正洞揭示的盐岩主要为含硬石膏、泥灰质角砾石盐岩(石盐含量77%~80%,硬石膏含量5%~6%),属氯盐类盐岩,是由含盐度较高的溶液或卤水通过蒸发浓缩作用形成的化学沉积岩。其工程特性主要表现为强溶解性、强侵蚀性和强膨胀性。

2 开挖揭示及衬砌开裂病害情况

开挖揭示各段盐岩含量不均,正洞DK 0+000~DK 0+363段盐岩含量总体上自小里程向大里程方向逐渐减少,DK 0+550~DK 1+565段盐岩含量总体

上自小里程向大里程方向逐渐增大。盐岩具有局部富集现象,部分地段盐岩含量达80%以上。开挖揭示围岩呈现较为统一的规律,即掌子面岩盐含量越低,围岩越破碎,节理裂隙越发育,地下水越发育;反之,掌子面岩盐含量越高,围岩越完整,节理裂隙越不发育,地下水越不发育。

3号斜井工区盐岩段现场开挖揭示各段盐岩含量、地下水发育情况及衬砌施作情况如图2所示。

3号斜井工区84 m长Ⅳb型衬砌(采用C45素混凝土)仰拱及矮边墙(DK 0+659~+695、DK 0+708~+732、DK 0+756~+780段)、24 m拱墙衬砌(DK 0+683~+695和DK 0+708~720段)两侧边墙、仰拱填充面陆续出现开裂现象,裂缝数量不断增加,宽度不断扩大。

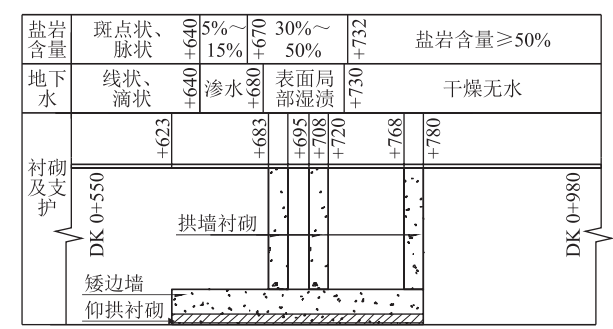


图 2 3 号斜井工区开挖揭示及衬砌施作图

DK 0 + 720 ~ + 732 段(仅施作仰拱及矮边墙)裂缝展示如图 3 所示。

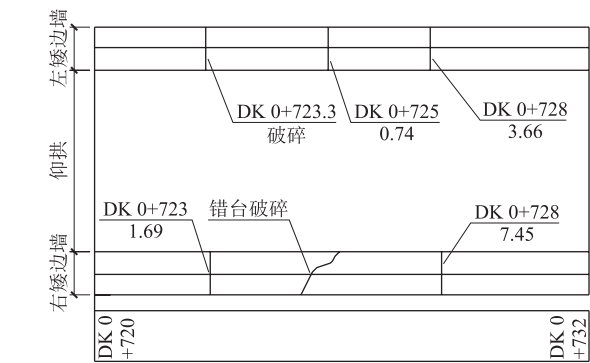


图 3 DK 0 + 720 ~ + 732 段裂缝图(mm)

DK 0 + 708 ~ + 720 段(施作拱墙衬砌)裂缝展示如图 4 所示。

除了衬砌开裂,还发生了以下病害:DK 0 + 760 处线路左侧避车洞底部,因盐岩强溶解性形成空腔,并导致下沉塌陷;初支表面盐类晶体析出;洞内钢材受到强侵蚀性的影响严重腐蚀。

3 衬砌开裂变形机理分析

某隧道是国内具有代表性的受含盐地层影响发生病害的隧道工程,穿越以石膏为主的硫酸盐类盐岩地层,病害特征主要表现为初支和二衬混凝土腐蚀劣化开裂,强度降低,排水管堵塞等^[6-7]。研究者认为,该隧道的危害主要是由硫酸盐类盐岩的物理侵蚀和化学侵蚀作用引发的。

友谊隧道盐岩主要为氯盐类盐岩,与该隧道穿越硫酸盐类盐岩不同,其开裂机理亦不相同。为探究衬砌开裂变形机理,对病害段衬砌进行钻孔取芯和探坑开挖验证。

DK 0 + 710 处已施作全环衬砌,对边墙开裂处取芯观察显示,裂缝沿二衬基本贯通,二衬混凝土中未发现盐类侵蚀混凝土裂化迹象。对于未开裂部位,经

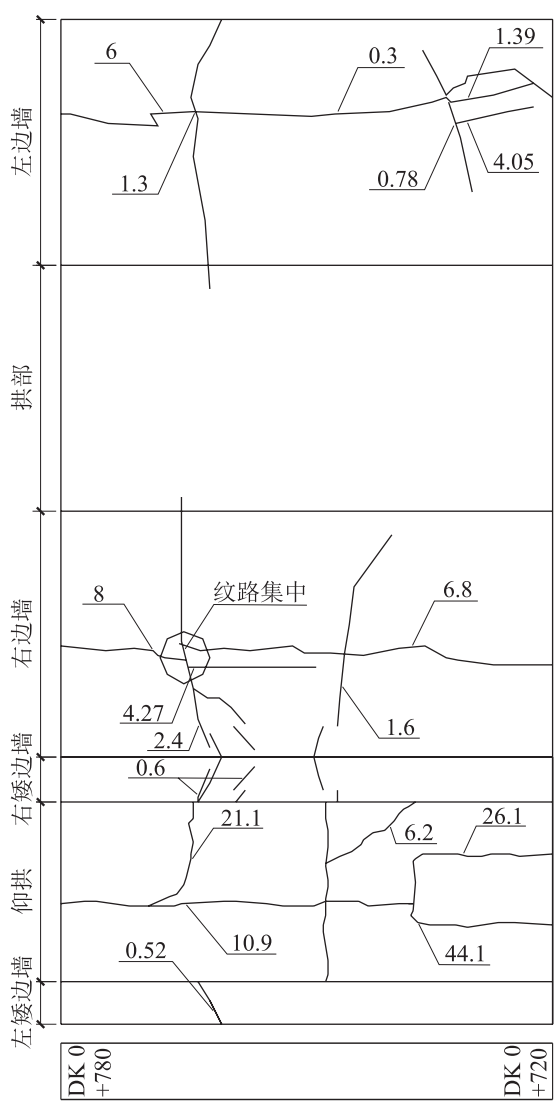


图 4 DK 0 + 708 ~ + 720 段裂缝图(mm)

回弹法检验混凝土强度符合要求,未出现强度降低现象。同时,隧道结构自施作到开裂时间跨度很短(仅 1 ~ 2 月),因此可基本排除盐类侵蚀混凝土是导致混凝土腐蚀肢解引起开裂的原因。

友谊隧道开裂段二衬均为素混凝土结构,因此可以排除 Cl⁻ 与钢筋发生电化学反应产生锈胀压力引起开裂的可能性。

现场初支内表面渗水处常伴有白色盐类结晶体析出。经取样进行了成分鉴定,主要为 NaCl。

对初支内表面有晶体析出的部位进行取芯,发现芯样岩体中存在明显的沿节理裂隙面形成的多道层状盐岩结晶体。经成分鉴定,其主要成分为 NaCl,厚度在 0.8 ~ 2 cm,在初支背后 0.5 m 内均有分布,且细小晶体颗粒明显,与原状围岩中盐岩晶体较大、呈斑点状、脉状或大块状明显不同。

DK 0 + 728 处物探显示异常,于该处自仰拱填充

面开挖探坑,开挖揭示未见空洞,基底无虚渣,开挖面存在积水,且可见明显结晶盐块、小盐粒等。

综合钻孔取芯和探坑开挖验证可以看出,初支内表面、初支与围岩间及围岩裂隙中均存在盐岩结晶体,这些盐岩结晶体均为隧道开挖后因重结晶作用的产物。

重结晶作用是围岩内部的石盐溶解后随地下水径流迁移至新的地点后因溶解度变化而重新从溶液中结晶的过程。

石盐常温下溶解度为 36 g/cm^3 ,隧道环境溶解度变化主要受 3 个方面影响:(1) 含盐溶液中水分自然蒸发后形成过饱和溶液,导致石盐结晶析出;(2) 新浇筑混凝土持续水化作用吸取含盐溶液中的水分后形成过饱和溶液而结晶析出;(3) 混凝土浇筑后温度逐渐降低,含盐溶液中溶解度降低。

综上所述,盐岩重晶体挤压隧道衬砌形成的膨胀压力是短期内衬砌开裂变形的主要因素。初支与二衬间空隙、初支与围岩间的空隙、离开挖轮廓距离较近的围岩裂隙是地下水最易汇集,也是溶解度最易发生变化而发生重结晶作用的地方。同时,盐岩中硫酸盐含量为 5%,后期硫酸盐类的侵蚀膨胀压力叠加,进一步加剧了结构的开裂变形^[8-9]。

4 变形规律分析

自 2018 年 8 月至 2019 年 6 月对已开挖段初支变形进行监测,量测断面拱顶最大沉降量 69.4 mm (DK 0 + 620),周边收敛最大 95.34 mm (DK 0 + 730)。其中,初支收敛变形趋势、收敛变形量和拱顶下沉变形量情况分别如图 5 ~ 图 7 所示。

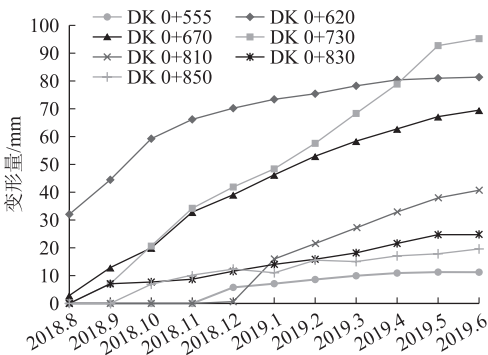


图 5 初支收敛变形趋势图

根据盐岩重结晶机理,重结晶作用与盐岩含量和地下水发育程度紧密相关。DK 0 + 620、+ 670、+ 730 盐岩含量均小于 50%,且开挖揭示有地下水,重结晶

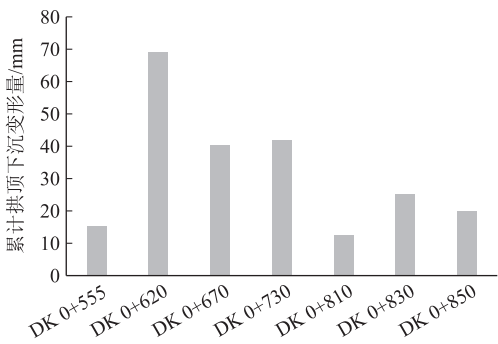


图 6 初支累计拱顶下沉变形量统计表

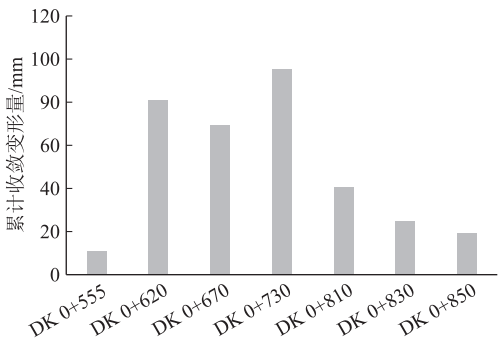


图 7 初支累计收敛变形量统计表

作用强烈,变形量最大,变形发展较快且变形趋势未收敛。DK 0 + 810、+ 830、+ 850 虽盐岩含量均大于 50%,但地下水不发育,重结晶作用较弱,变形量相对较小,变形发展较慢。DK 0 + 555 接近非盐岩段,虽地下水较发育,但盐岩含量很小,重结晶作用较弱,故该处变形量亦相对较小。

5 衬砌结构受力状态分析

结合现场衬砌施作情况,假定初支与二衬间、初支与围岩间以及围岩内部的盐岩重结晶作用力按均布力作用在二衬上,针对施工矮边墙及仰拱与全环衬砌两种工况进行讨论分析。

(1) 对于仅施作矮边墙及仰拱的段落,其受力状态可分为两个阶段:

①当重结晶膨胀力较小时,尚不足以使结构发生整体上鼓,受力模式如图 8 所示。

建立竖向平衡的条件为:

$$F_m \times 2 + G = f_p \times B \tag{1}$$

$$F_m = f_p \times h \times \mu \tag{2}$$

式中: f_p ——膨胀压力;
 F_m ——矮边墙侧壁摩阻力;
 μ ——摩阻力系数,取 0.65 ;
 h ——矮边墙高度,取 1.02 m;

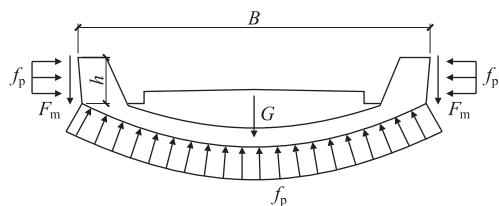


图 8 仰拱矮边墙受力图($f_p=31.6\text{ kN/m}$)

B ——结构宽度,取 7.48 m ;
 G ——结构自重,取 194.5 kN/m 。
求得极限平衡时, $f_p=31.6\text{ kN/m}$ 。此时对仰拱及矮边墙各处正截面受力进行验算,最小安全系数为 21.2 。横断面各处均不发生开裂。

②当重结晶膨胀力大于 31.6 kN/m 时,仰拱发生整体上浮现象。上浮后,仰拱部分形变膨胀压力 f_p 为 0 ,仅矮边墙部分承受形变膨胀压力。受力模式如图 9 所示。

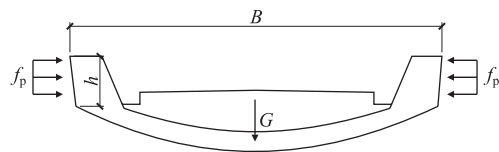


图 9 仰拱矮边墙受力图($f_p>31.6\text{ kN/m}$)

此时结构可简化为素混凝土受弯构件,根据《铁路工程设计技术手册—隧道》按式(3)检算混凝土矩形截面受弯构件的截面强度:

$$KM \leq \frac{R_l b h^2}{3.5}$$

(3)

式中: M ——弯矩;
 K ——安全系数,取 3.6 ;
 R_l ——素混凝土抗拉极限强度,标号 C45 取 2.9 MPa ;
 b ——截面宽度,取 1 m ;
 h ——截面高度,取截面最小处的高度 0.4 m 。

求得 $M=36.8\text{ kN}\cdot\text{m}$,进而求得 $f_p=70.8\text{ kN/m}$,即当膨胀力大于 70.8 kN/m 时,整个结构为受弯承载控制。衬砌外侧开裂无法直观可见,现场矮边墙发生环向、斜向裂缝居多,推测为沿线路方向不同里程膨胀力差异而引起矮边墙环向开裂。当膨胀力继续增大,矮边墙受斜截面控制,则可能导致对矮边墙发生剪切破坏。

(2)对全环衬砌地段进行结构受力分析

全环衬砌段属深埋Ⅳ级,根据地勘报告围岩重度取 24 kN/m^3 ,计算摩擦角取 50° ,分别按膨胀压力

100 kPa 、 200 kPa 及 300 kPa 进行结构计算,以膨胀力 200 kPa 为例按荷载结构法计算内力,结果如图 10 所示。

经计算,仰拱中心、边墙脚、轨面以上 2.5 m 处边墙和拱顶等 4 个部位安全系数较低,各部位安全系数如表 1 所示。

表 1 各部位安全系数表

部位	受弯情况	安全系数		
		膨胀力 100 Kpa	膨胀力 200 Kpa	膨胀力 300 Kpa
仰拱中心	内侧受拉	4.42	2.39	1.63
边墙脚	外侧受拉 (内侧受压)	外侧 2.31 (内侧 3.6)	外侧 1.15 (内侧 2.08)	外侧 0.77 (内侧 1.46)
轨面以上 2.5m	内侧受拉	5.42	2.76	1.88
拱顶	外侧受拉	7.4	3.65	2.6

由表 1 可知,当膨胀力为 200 kPa 和 300 kPa 时,仰拱中心和轨面以上 2.5 m 处的安全系数小于规范要求的受拉安全系数 3.6 ,结构将发生上鼓和开裂,与现场实际病害情况一致。经计算,膨胀力为 126 kPa 时,仰拱中心的安全系数恰好为 3.6 ,此时轨面以上 2.5 m 处的安全系数 3.72 ,此时全环衬砌处于破坏临界状态。

6 对策措施

(1)针对盐岩段(DK 0+000 ~ DK 0+363 段及 DK 0+550 ~ DK 1+565 段),根据初支渗漏水情况采取隧底注浆、局部径向注浆和初支背后充填注浆,以限制地下水流动。洞内施工严格控制施工用水量,开挖后尽快封闭围岩,减少空气中水分溶解袭夺盐岩,从而避免盐岩发生重结晶作用,同时也避免盐岩溶解形成空洞。

(2)盐岩段衬砌加深加厚仰拱,通过增加自重和纵向刚度的方法,避免结构成环前因膨胀力而上浮。

(3)盐岩段衬砌采用圆形加强结构,以提高结构抵抗外力能力。考虑到石盐地层的复杂性,为增加设计冗余度,衬砌内轮廓预留 30 cm 拱墙补强空间,内轮廓半径设定为 4.7 m 。

(4)采用全包防水+多道设防理念,设素混凝土隔水层结构及两道卷材防水层,充分利用混凝土良好的自防水性来阻断地下水和氯离子对二衬钢筋的侵蚀。

(5)隔水层和二衬采用特殊低标号混凝土材料,在提高电通量和氯离子扩散系数等指标性能的同时降低水化热^[10],防止混凝土开裂。

(6)为防止氯离子侵蚀,二衬钢筋及隔水层接茬

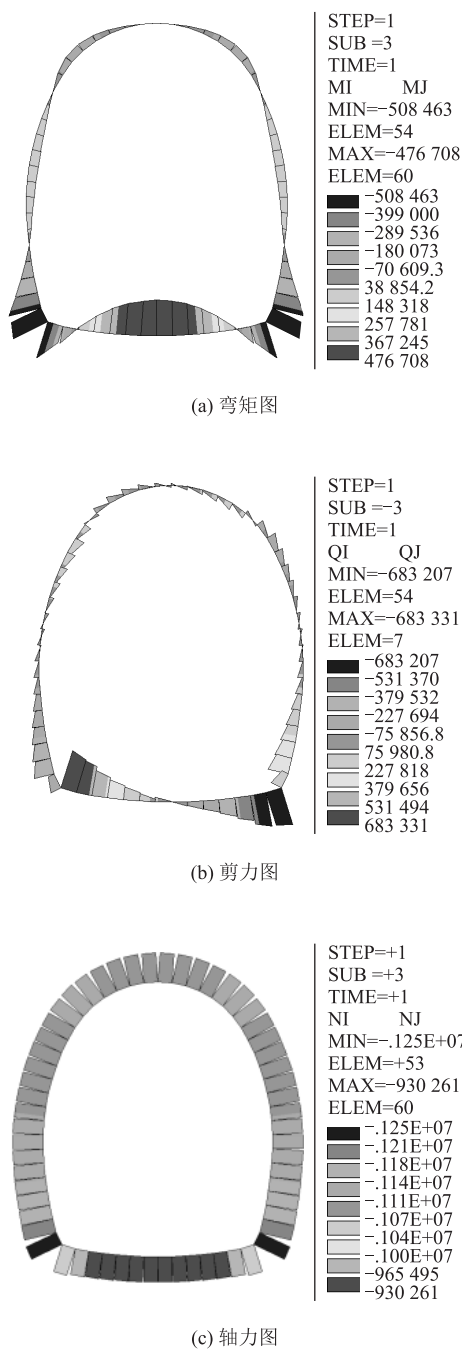


图 10 膨胀力为 200 KPa 全环衬砌内力图

钢筋均采用环氧涂层防腐。
具体结构布置如图 11 所示。

7 结论

本文重点阐述了友谊隧道盐岩段开挖揭示及衬砌开裂病害情况,分析总结了盐岩段衬砌开裂机理和变形规律。结合结构受力分析,针对性地提出了盐岩段隧道结构对策措施,得到主要结论如下:
(1)友谊隧道盐岩段衬砌开裂主要是由盐岩重结晶作用产生的膨胀力引起。

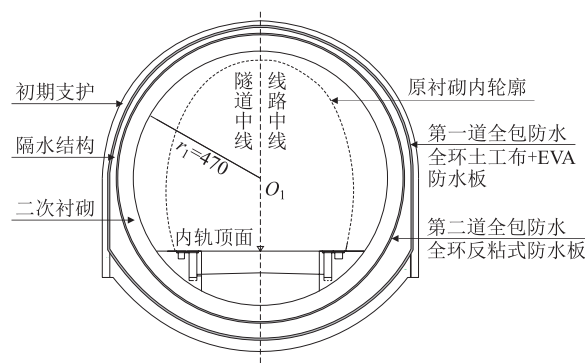


图 11 盐岩段衬砌结构横断面图(cm)

(2)初支与二衬间空隙、初支与围岩间的空隙、离开挖轮廓距离较近的围岩裂隙是重结晶易发生的地方。
(3)重结晶作用与盐岩含量和地下水发育程度紧密相关。地下水越发育且有一定盐岩含量时,隧道初支更容易发生变形。地下水不发育时,即使盐岩含量较高,隧道初支变形也较小。地下水发育但盐岩含量较低时,隧道初支变形亦较小。
(4)仅施作矮边墙及仰拱段落,当膨胀力 f_p 小于 31.6 kN/m 时,仰拱不上浮;当膨胀力 f_p 为 31.6~78.7 kN/m 时,仰拱表现为整体上浮,但尚未发生开裂现象;当膨胀力 f_p 大于 78.7 kN/m 时,仰拱表现为整体上浮同时矮边墙出现开裂现象。全环衬砌地段当膨胀力大于 126 kPa 时,衬砌将出现开裂破坏。
(5)盐岩段衬砌措施应以“注浆堵水、全包防水、强化材料防腐、圆形加强结构”为原则进行处理。

参考文献:

[1] TB 10038 - 2022 铁路工程特殊岩土勘察规程[S].
TB 10038 - 2022 Code for Special Soil and Rock Investigation of Railway Engineering [S].
[2] 黄东海. 盐岩地层条件下铁路隧道施工技术研究[J]. 山东工业技术, 2015(12): 116.
HUANG Donghai. Study on Construction Technology of Railway Tunnel under Salt Rock Stratum Condition [J]. Shandong Industrial Technology, 2015(12): 116.
[3] 于占华. 盐岩地层条件下铁路隧道施工技术研究[J]. 建筑技术开发, 2018, 45(19): 48 - 49.
YU Zhanhua. Study on Construction Technology of Railway Tunnel under Salt Rock Formation Condition [J]. Building Technique Development, 2018, 45(19): 48 - 49.
[4] 肖勇刚. 含盐地层隧道修建关键技术研究[J]. 工程建设与设计, 2017(23): 85 - 87, 90.
XIAO Yonggang. Key Technology Research of Tunnel Construction in Saliferous Stratum[J]. Construction & Design for Project, 2017(23):

- 85 – 87, 90.
- [5] 刘高金,张广泽,冯涛. 不同岩性的含盐地层隧道工程侵蚀成因探讨[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(10): 15 – 19.
LIU Gaojin, ZHANG Guangze, FENG Tao. Exploration on the Causes of Erosion about Tunnel through Different Saliferous Strata [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(10): 15 – 19.
- [6] 蒲文明,陈钊,任松,等. 膨胀岩研究现状及其隧道施工技术综述[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(S1): 232 – 239.
PU Wenming, CHEN Fan, REN Song, et al. Research of Swelling Rock and Summarize of Tunnel Construction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(S1): 232 – 239.
- [7] 崔蓬勃,王国安,董薇,等. 膨胀力对运营期间隧道二次衬砌结构影响研究[J]. 公路, 2020, 65(2): 320 – 325.
CUI Pengbo, WANG Guoan, DONG Wei, et al. Study on the Influence of Expansion Force on the Secondary Lining Structure of Tunnel during Operation [J]. Highway, 2020, 65(2): 320 – 325.
- [8] 王超,张水林,蒲文明,等. 模拟隧道水压对石膏围岩强度特性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(S1): 235 – 239.
WANG Chao, ZHANG Shuilin, PU Wenming, et al. Influence of Water Pressure on Surrounding Rock Strength in Tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(S1): 235 – 239.
- [9] 庞山,宋玉香,朱永全. 太行山隧道膏溶角砾岩地段合理断面型式研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2006, 19(4): 48 – 51.
PANG Shan, SONG Yuxiang, ZHU Yongquan. Study on Rational Section of Taihang Mountain Tunnel in Gypsum Breccia Region [J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2006, 19(4): 48 – 51.
- [10] 张亮亮,陈天地,陈思孝,等. 影响混凝土结构水化热温度多因素分析[J]. 高速铁路技术, 2010, 1(3): 5 – 8, 13.
ZHANG Liangliang, CHEN Tiandi, CHEN Sixiao, et al. Finite Element Analysis for Influencing Factors Heat of Hydration Temperature of Concrete Structure [J]. High Speed Railway Technology, 2010, 1(3): 5 – 8, 13.

(上接第28页)

- [14] 林国松. 牵引供电系统新型保护与测距原理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
LIN Guosong. Study on New Protection and Ranging Principle of Traction Power Supply System [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [15] 王继芳. 全并联AT供电牵引网故障测距研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
WANG Jifang. Research on Fault Location of Fully Parallel AT Power Supply Traction Network [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [16] LI Gang, LIN Guosong. Short Circuit Impedance Analysis for Novel AT Power Traction Network [C]//2012 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. March 27 – 29, 2012, Shanghai, China. IEEE, 2012: 1 – 5.
- [17] 缪弼东,李瑞,艾广宁. 高速铁路牵引供电系统故障测距方法的研究和修正[J]. 电气化铁道, 2019, 30(1): 20 – 23.
MIAO Bidong, LI Rui, AI Guangning. Researches and Modification of Fault Location for Traction Power Supply System for High Speed Railways [J]. Electric Railway, 2019, 30(1): 20 – 23.