

# 隧道冻害研究现状与进展

陈星光

中国煤炭科工集团重庆设计研究院

DOI: 10.12238/jpm.v4i3.5742

**[摘要]** 寒区隧道受水冰相变冻胀作用的影响,常出现隧道冻害问题。本文综述国内外寒区隧道冻害研究,提出了一系列重要成就,总结分析了国外隧道冻害的防治技术以及我国四大防治技术的优缺点及其适用条件。同时,强调了冻胀损害分类的重要性,并系统总结了国内外对寒区隧道的研究成果,对研究不足进行综合分析提出了进一步的研究方向。

**[关键词]** 寒区隧道;冻害;防治技术

## Research status and progress of tunnel freezing damage

Starlight Chen

Chongqing Design and Research Institute of China Coal Science and Industry Group, Chongqing 400042

**[Abstract]** The cold area tunnel is affected by the frost swelling effect, and the tunnel freezing problem often occurs. This paper summarizes the study of tunnel freezing damage in cold areas, puts forward a series of important achievements, summarizes and analyzes the prevention technology of tunnel freezing damage abroad and the advantages and disadvantages of the four major control technologies and their applications in China. At the same time, the importance of classification of frost swelling injury damage is emphasized, and the research results of tunnel in cold area are systematically summarized, and further research directions are proposed for comprehensive analysis of research deficiencies.

**[Key words]** tunnel in cold area; freezing damage; control technology

### 1 引言

中国东北和西北部、日本、欧洲、挪威和俄罗斯寒区已经施工建造了许多寒冷地区的隧道<sup>[1]</sup>。然而寒区由于温度降低,导致水冰相变膨胀从而对隧道产生严重的损害,甚至由于严重的冻胀破坏导致隧道主体结构报废,并在运营期间发生严重的交通事故<sup>[2]</sup>。根据1979年的日本国家铁路统计资料,全国3800条铁路隧道中的1100条由于冻害而危及冬季运营期间的行车安全,北海道的302条高速公路隧道中有104条受到了严重的冻结破坏。为维护隧道稳定,在隧道中安装电加热设备,避免侧壁和拱形中水相变成冰对围岩产生冻害,但是这些措施的成本很高<sup>[3]</sup>。欧洲斯堪的纳维亚半岛和阿尔卑斯山,隧道中经常发生冻结破坏现象,为了防止冬季的霜冻,一些公路隧道采取采暖措施,但是成本也很高<sup>[4]</sup>。挪威于1990年建造了630条寒区隧道,总长60公里,所有的隧道都有大范围的泄漏和冰柱<sup>[5]</sup>。前苏联的许多铁路项目(克拉斯诺亚尔斯克,贝加尔河和东西伯利亚的铁路)以及德意志联邦共和国,瑞典和法国的正常运行受到霜冻的影响<sup>[6]</sup>。

在我国寒区,某些隧道由于冻结破坏长达8~9个月无法正常使用<sup>[7]</sup>。例如,乌鞘岭隧道西北部、奎仙大班隧道、关角隧道和七道梁隧道的西北部受到了典型的冻害,新疆天山217号国道的玉溪-莫雷盖隧道因严重的冻结损伤破坏,经过几年的

运营后废弃<sup>[8]</sup>。我国自1949年以来在东北高纬地区修建了数十个寒区隧道,例如鸭绿江线的岭顶隧道、嫩岭线的西陵1号和2号隧道、溪洛旗1号,由于对寒区隧道工程特性了解不足,许多隧道在施工过程中遭受了严重的冻胀破坏,而且经过长时间的运行,甚至十年或更长时间,新的冻胀破坏仍将继续发生。霜冻的危害越来越严重<sup>[9]</sup>。

近年来,中国已经修建了许多高海拔和极寒地区的隧道,例如大板山公路隧道(海拔3790 m,最低温度-30℃),鹫鸪山公路隧道(海拔3300 m,最低气温为-31.1℃),昆仑山铁路隧道(海拔4600 m,最低温度-36℃)和凤霍山铁路隧道(海拔4800 m,最低温度-37℃)<sup>[10]</sup>,学者对这些隧道从建设到运营进行深入调查研究,为研究提供了有价值的数据库。本文总结上述工作成果,为寒冷地区隧道的设计与施工以及防冻害研究提供参考。

### 2 隧道冻害分类

隧道的冻害问题因自然环境、地质条件的不同,冻害情况也不同。要制定经济合理的补救方案和隧道冻结破坏的预防措施,需要根据隧道的冻胀状况及冻胀破坏程度,对隧道冻害进行分类。只有对隧道的冻害程度进行适当的分类,才能全面分析冻害的情况,科学地评估冻害的状况。

国内外学者采用多种方法对隧道冻害进行了分类。日本学

者研究了运营隧道的衬砌变形和破坏,并制定了相应的分类标准。1997年中国铁路部门颁布了《铁路桥梁和隧道建筑物劣化评估标准隧道》(T2820.2-1997),并根据冻结损害对隧道正常运行的影响制定了分类标准。但是隧道冻害是一种安全隐患,冻害的发展过程是有规律的也是随机的,仅根据隧道破坏的最终形式(包括衬砌变形,劣化和位移)对隧道冻害进行分类是不够的。考虑隧道冻结破坏的温度、地下水埋藏状况等基本条件,需要一种更科学、实用的方法。

缺乏有关寒冷地区新隧道技术设计和施工的法规。根据青藏高原多年冻土的特点,只有行业标准《青藏高原冻土工程设计暂行规定》才对多年冻土地区的隧道工程进行了总体设计和施工。《公路隧道设计规范》(JTG D70-2004)<sup>[11]</sup>仅提供了几项简单规定。如,当地下水最冷月份的平均温度低于 $-10^{\circ}\text{C}$ 时,应将排水通道深埋在隧道人行道的下方,并应将排水通道设置在隧道下方,以防止冰冻时的冻害。最冷月份的平均温度低 $-25^{\circ}\text{C}$ 。但这些规定不能满足寒冷地区隧道设计和施工的需要。因此,应对隧道冻害的程度进行分类,制定相应的冻害防治措施。

目前,《铁路工程设计隧道技术手册》<sup>[12]</sup>根据最冷月份的平均温度和最大冻结深度对寒区隧道进行了划分,提出了不同形式的排水渠道,以及地下水渗入隧道的情况。最冷月份的平均温度和冻结深度是区域气候寒冷程度和低温状态的两个特征值。罗彦斌<sup>[13]</sup>根据最冷月份的平均温度和冻结深度对隧道的冷度进行了分类,并结合地下水条件,采用综合评价法将冻害程度分为五级。此外,他建议在进一步研究量化地下水对隧道冻害的危害程度,以实现可靠可行的分类。在此基础上,考虑衬砌变形、恶化和间隙收敛位移速率等隧道病害特征,以及寒冷气候和地下水等冻害条件,对隧道冻害分类进行进一步研究,使其更具科学性和实用性。此外,在今后的研究中,还可以考虑埋深和岩体地质条件等因素对隧道衬砌和岩体温度分布的影响,使分类更加具体。

### 3 预防隧道冻害的措施

国内外诸多国家根据实际国情的进行了大量的研究形成了各种预防隧道冻害的措施<sup>[14]</sup>。

#### 3.1 国外防冻措施

前苏联<sup>[15]</sup>采用集成防水和排水措施系统(包括防水层,衬里排水管和排水道)来防止隧道冻害。排水措施通常设置在季节性冻结范围之外的岩体表面,如果冻结深度较大,则应在支护体与岩体之间或在排水设施的表面中设置隔热层;排水通道应通过热水或蒸汽加热;排水的衬里也应采用空气绝缘板或红外线辐射等方法进行局部加热。衬里表面绝热层用于减少衬里表面的热应力。对于长隧道,通常设有与主隧道平行的辅助隧道,当冬季外部空气温度低于 $0^{\circ}\text{C}$ 时,安装在竖井附近的电加热器将其加热到 $2^{\circ}\text{C}$ ;同时,加热的空气通过通风井到达通风通道,然后通过强制通风将其带入维修通道;暖空气沿着辅助隧道流向主隧道入口方向,主隧道也随之被加热。

挪威<sup>[16]</sup>采用隔热材料防止隧道冻结,早期使用铝板和石棉,然而铝板的安装既昂贵又低效,后来开发出将塑料泡沫夹在铝板,钢板或玻璃纤维增强的聚酯板之间以形成隔热层。并

在一些隧道中安装双层防寒门,火车在隧道附近时使用自动装置打开此门,火车通过后将其关闭。美国<sup>[17]</sup>采用隔热排水系统来防止隧道冻害,将封闭的微孔聚氨酯材料制成固定在岩石或混凝土衬砌表面上的板。在排水系统中采取合理措施来防止隧道冻结,如在排水隧道的出入口处使用绝热材料,在排水通道中使用泡沫绝热材料,在排水管中使用加热电缆。法国<sup>[18]</sup>使用隔离墙板防止隧道冻害,墙板的背面由聚乙烯泡沫制成,而正面则由钢筋混凝土制成。

从上面可以看出,国外对寒冷地区隧道防冻害的预防主要是基于保温,排水和主动供热。在岩体或衬砌混凝土表面设置隔热材料是减少隧道结构与冷空气之间热交换的有效隔热措施。进行隧道排水时,应将排水通道设置在冰冻范围之外,或在通道上铺设保温材料,确保隧道排水顺畅。以上措施因其成本低,效果显著的特点,在实际过程中被广泛应用。然而,对于主动加热法,如电加热和热管加热成本非常高,一般在冻胀严重或在极端寒冷的环境中使用。

#### 3.2 国内预防冻害的措施

国内隧道学者为解决隧道冻害做了许多设计研究,隧道的冻胀损害主要是防水,排水和防冻问题。下面讨论当前对隧道冻害的部分预防措施<sup>[19-21]</sup>。

##### (1) 防冻排水隧道

防冻排水隧道目的是使隧道岩体脱水,隧道位于主隧道下方,类似于带有排水孔的小型隧道。排水隧道排水系统有垂直排水管、排水孔、航向隧道、竖井以及排水口。岩体衬砌后面的地下水由排水隧道中的排水系统收集,然后排放到隧道外。排水隧道可以大大减少或消除隧道冻结破坏,例如春季的地下水,悬冰和冻胀。

排水隧道适用于寒冷地区,最冷月份的平均温度低于 $-20^{\circ}\text{C}$ 摄氏度,岩石的冻结深度为 $5\sim 6\text{m}$ 。排水隧道的埋深取决于岩体的冻结深度,通常为 $5\text{m}$ ,如果隧道上方的土壤厚度小于冻结深度,则应在表面回填一定厚度的土壤。为确保在寒冷季节排水口不会冻结,需要温暖的圆锥形排水口。

##### (2) 中央深埋排水

中央深埋排水系统是埋在主隧道下方且深度超过岩体冻结深度的排水设施,并利用岩层的温度使排水系统中的水保持未冻结状态。通常适用于冻结深度在 $1.5\sim 2.5\text{m}$ 之间、冬季存在水的寒冷地区。中央深埋排水沟基本相似,排水隧道通常布置在深冻地区,采用地下开挖方法建造。而中央深埋河道是浅埋的,并采用地表开挖方法建造。中央深埋通道的主要优点是松散的回填是排水系统具有强渗透性,排水效果较好;但是受开挖影响,可能会对衬砌和隧道结构产生一定影响,给工程带来安全隐患。

##### (3) 防冻排水通道

防冻排水通道浅埋于岩体冻结深度内,通道中采取了隔热措施防止水冻结。防冻排水通道适用于水分较多,最冷月份的平均温度 $-10^{\circ}\text{C}\sim -15^{\circ}\text{C}$ ,岩体的冻结深度 $1.0\sim 1.5\text{m}$ 的寒冷地区。当隧道较长时,隧道中间部分由于温度较高,不会出现冻胀破坏的线性,因此仅需要在两个长度为 $150\sim 400\text{m}$ 的入口部分设置热绝缘材料即可。

防冻排水通道一般采用侧沟系统, 通道的上部覆盖双层板, 上下板之间填充隔热材料, 隔热层的厚度通常大于 30 cm, 通道中的水流设置在双层板的下部。但是对于某些严重和极端的寒区隧道, 此方法并不适用。例如嫩林铁路的百加路隧道, 其中最冷月份的平均温度降至-28℃, 隧道采用沥青玻璃棉作为绝缘材料。但是由于河道冻结, 为防止隧道发生故障, 在施工期间将 450 mm 的蒸汽管保留在通道下方, 并配备了蒸发量为 0.4T/h 的锅炉来加热隧道。锅炉从 1977 年冬天开始工作, 从而解决隧道冻结问题, 但是人力、物力和能源消耗都很高, 用于防冻结的排水通道不适用于寒冷地区, 但适用于中等冻结寒冷地区。

#### (4) 保温层

冷空气与岩体之间的热交换是寒冷地区隧道冻结破坏的主要原因, 保温隔热层可减小隧道的冻结范围, 确保衬砌内围岩中的水不冻结从而避免冻胀。隔热层有两种方式安装, 一种是将隔热层安装在衬砌内表面; 另一种是在两个衬砌结构之间安装隔热层。例如, 在青藏铁路上采用新奥地利隧道法建造的风火山隧道中, 隔热层安装在初始支护和二次衬砌之间。绝热层的构建方法包括表面喷涂法, 表面铺设法和中间铺设法, 但是施工技术和相关设计参数有待进一步研究。Yang<sup>[22]</sup>探索了保温层的材料, 厚度和长度对隧道冻结的影响, 并设计了系统的保温层设计方法, 但是关键技术问题仍未解决。例如选择合理的隔热层长度, 目前一般采用日本黑川(1980)的经验公式计算, 它是隧道入口温度及隧道出口与温度为 0℃ 的位置之间的距离的拟合公式。但是保温层的长度不仅与温度有关, 而且与地质条件, 地下水的分布, 隧道入口的方向和排水坡度有关。

除了上述防止霜冻的预防措施外, 还可以通过其他措施来提高隧道内的温度。例如, 如果隧道的通行量很小, 可以在隧道入口处安装防寒门或防寒帷幕。

#### 4 总结展望

冻结损坏是公路和铁路运输中的主要危害。国内外学者冻结损伤机理, 温度场规律, 霜冻的分类, 防治措施进行了系统的研究, 提出了一些建议和结论, 为高寒地区隧道的设计提供理论支持和工程参考, 但是还存在一些隧道冻害问题仍需进一步研究。

(1) 冻融循环下隧道喷射混凝土的结构破坏很少被研究, 因此在这一领域需要进一步的研究和突破。

(2) 寒区隧道温度场的研究虽有一定的成果, 但寒区隧道温度场分布规律总结和分析研究很少, 应引起更多的重视。

(3) 现有的霜冻防治技术各有优缺点, 可以适应不同程度的霜冻危害。因此, 应根据不同的冻害程度和不同的工程条件选择合理的冻害防治技术。

#### 【参考文献】

[1]张学富, 赖远明, 杨风才, 喻文兵. 寒区隧道围岩冻融影响数值分析[J]. 铁道学报, 2002(04): 92-96.  
 [2]孙文昊. 寒区特长公路隧道抗防冻对策研究[D]. 西南交通大学, 2005.  
 [3]Kojima Y, Asakura T. 1996. Tunnel leakage and prevention measures. RRR (8), 10-13.

[4]Lu Ittger H, Poyda F. 1992. Brandversuch in warmegedamnten tunnel. Tunnel 12 (3), 116-119 .  
 [5]Gronhaug A, 1988. Designs for water and frost prevention in road tunnels. Tunnels and Water 725-729.  
 [6]Тру́бчиков А, 1990. Design and construction experience of soviet mountain ridge railway tunnel: information of seminar for the Siberian railway. Tunnel Collected Translation 10, 1-16.  
 [7]罗彦斌. 寒区隧道冻害等级划分及防治技术研究[D]. 北京交通大学, 2010.  
 [8]Sheng Y, Wu Z W, Zhu L N, et al, 1996. Preliminary Analysis of Frost Heave Force of Rock Mass in Cold Region Tunnel. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Lanzhou.  
 [9]许再良, 仇祥凯. 铁道第三勘察设计院铁路工程地质世纪成就回顾[J]. 铁道工程学报, 2005(S1): 18-28.  
 [10]苏林军. 寒区隧道冻害预测与对策研究[D]. 西南交通大学, 2007.  
 [11]重庆交通研究设计院, 2004. 公路隧道设计规范. JT G D70-2004. 重庆交通研究设计院, 重庆.  
 [12]中铁二源工程集团, 1995. 铁路工程设计技术手册-隧道. 中国铁路出版社, 北京.  
 [13]罗彦斌. 寒区隧道冻害等级划分及防治技术研究[D]. 北京交通大学, 2010.  
 [14]Ren-sheng Chen, Er-si Kang, Xi-bin Ji, Jian-ping Yang, Yong Yang. Cold Regions in China[J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 45(2).  
 [15]Мака́ров О.Н, Меркин В.Е, Власов С.Н, 1993. The former Soviet Union traffic tunnel project. Tunnel Collected Translation 1, 19-22.  
 [16]Gronhaug A, 1990. Designs for water and frost prevention in road tunnels. Tunnel Collected Translation 11, 29-33.  
 [17]Elliot G.M, Sandfort M.R, May J.C, 1996. How to prevent tunnel ice-up. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts 33 (6), 278A.  
 [18]Jaby J.F, 1990. Waterproof and thermal insulated lining in tunnels. Tunnel Collected Translation 7, 49-50.  
 [19]陈建勋. 梯子岭隧道防冻隔温层效果现场测试及分析[J]. 公路, 2006(08): 221-224.  
 [20]陈建勋, 张建勋, 朱计华. 硬质聚氨酯在寒冷地区隧道冻害防治中的应用[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006(05): 66-68.  
 [21]陈建勋. 公路隧道冻害防治技术[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006(04): 68-70.  
 [22]Yang G S, Zhou C H, Tian Y G, 2006. Numerical simulation and analysis of moisture-heat coupling for soft rock tunnel in cold regions. Rock and Soil Mechanics 27 (8), 1258-1262.