

电加热技术在寒区隧道中的应用

夏梦彪 刘志强*

兰州交通大学, 中国·甘肃 兰州 730070

摘要: 为了减少寒区隧道冻害现象的发生, 论文以某铁路隧道为工程背景, 在隧道初衬与二衬之间铺设电加热带, 通过模拟不同的外界环境温度, 探究电加热带在不同铺装功率下, 寒区隧道围岩-衬砌温度场分布的影响规律以及距离衬砌不同位置处加热到 0℃所需的时间。之后在隧道衬砌表面铺设 5cm 硬质聚氨酯保温材料, 进一步探究电加热技术在有无保温材料的情况下, 对围岩-衬砌温度场的影响, 为寒区隧道的防冻设计提供一定参考。

关键词: 寒区隧道; 数值模拟; 电加热带; 加热效果

Application of Electric Heating Technology in Tunnels in Cold Regions

Mengbiao Xia Zhiqiang Liu*

Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu, 730070, China

Abstract: In order to reduce the occurrence of frost damage in tunnels in cold areas, this paper takes a railway tunnel as the engineering background, and lays an electric heating belt between the primary lining and the second lining of the tunnel, by simulating different external ambient temperatures, the influence of the temperature field distribution of the surrounding rock and lining of the tunnel in the cold area and the time required to heat the electric heating belt to 0℃ from different positions of the lining under different pavement powers were explored. Then, 5cm rigid polyurethane insulation material was laid on the surface of the tunnel lining, and the influence of electric heating technology on the temperature field of the surrounding rock and lining with or without insulation materials was further explored, which provided a certain reference for the anti-freezing design of tunnels in cold areas.

Keywords: cold zone tunnel; numerical simulation; electric heating belt; heating effect

0 前言

目前, 中国已建成寒区隧道的冻害现象十分普遍^[1], 特别是在隧道的运营阶段, 经常出现衬砌壁面挂冰、衬砌开裂、剥落以及洞口热融滑塌等现象, 因此中国许多学者对寒区隧道提出了相应的保温措施, 主要包括两类保温措施, 一类是被动保温, 另一类是主动加热。

对于被动保温措施, 吴根强^[2]等通过对比分析不同保温层敷设方式的优缺点以及对高地温隧道中的隔热材料进行模糊评价, 最后通过数值模拟的方法得出铺设适当厚度的保温层可以有效减弱衬砌与冷空气之间的热量交换, 从而起到一定的保温作用。崔振伟^[3]在季节性冻土隧道洞口处设置防寒保温门, 阻隔了洞内空气与洞外冷空气的热交换, 并且通过数值模拟验证了设置防寒保温门对隧道的保温效果的可靠性。高炎等^[4]提出了在寒区隧道工程中应用空气幕保温系统, 并且采用了分离变量法、叠加原理以及贝塞尔特征函数建立了在列车风的影响下寒区隧道温度场的计算模型, 探究了列车在不同运行速度及间隔时间下对温度场的分布规律, 并且验证了空气幕保温系统的保温效果。关喜彬^[5]提出了侧吹式空气幕保温系统, 构建了空气幕阻隔效率的控制方程以及保温装置的设计, 通过对保温装置内空气流场和温度场的试验研究, 得出了射流角度、风速和外界风速与阻

隔效率之间的变化规律, 认为侧吹式空气幕保温系统保温效果良好, 能够有效预防冻害现象的产生。

对于主动保温措施, 孙克国^[6]等提出了设置阳光棚措施, 通过建立三维瞬态传热模型得到隧道初始温度场, 并且通过对现场温度的监测验证了模型的正确性, 最后通过数值模拟验证了阳光棚的保温效果, 并且认为阳光棚适用于低风速、大长度、小跨度的寒区隧道中。官成兵等^[7]针对寒区公路隧道提出了路面电加热融雪防滑新型技术, 通过现场试验以及数值模拟分析, 得出了洞口路面的加热结构型式、加热功率、预热时间等参数, 验证了电加热技术在寒区隧道洞口路面处的可靠性。王连广等^[8]模拟了对负温条件下混凝土试件的电加热试验, 得出在一定规格下的电热带, 同时配合 4cm 厚的聚氨酯板作为保温层时, 混凝土试件的表面温度能够在 1 小时之内上升 4℃。然而, 对于寒区隧道而言, 绝大多数在保温措施上仅仅采用单一的被动保温措施来进行防冻设计, 但是在极端天气情况下只通过隔热材料进行被动式保温往往不能够达到预想效果, 因此需要通过主动加热与被动保温相结合的方式来实现保障隧道的防冻设计。

基于此, 论文依托某铁路隧道工程, 通过数值模拟, 在衬砌结构中预埋发热电缆, 探究在不同外界环境温度下电加热的保温效果以及对于距离衬砌不同位置处达到 0℃所需

的时间,并且通过在隧道衬砌表面铺设 5cm 聚氨酯保温材料,进一步探究保温材料对电加热保温效果的影响,为寒区隧道的防冻设计提供一定参考。

1 电加热工作原理

目前发热电缆主要包括两种类型:一是限功率式电加热带,二是自限温式电加热带。两者区别在于限功率式电加热带电缆发热丝为并联方式,通过互相平行的两根镀锡铜绞线包裹在绝缘层中作为电源母线,同时将镍铬合金电热丝包裹其外层,在固定距离处对电热丝进行焊接将所有电热丝组成一个整体结构,形成一个完整连续的并联电阻,当母线接电后,使得电阻发热,从而形成一个庞大的电加热系统,除了并联方式外还有串联方式,其输出功率恒定不变,不会受周围环境温度的影响而变化。自限温式电加热带会根据周围环境温度的改变而改变,当环境温度升高时,自控导电塑料中的微分子发生膨胀现象,使得碳粒之间产生距离而分散,从而导致电路断路,自动降低输出功率。当温度降低时,自控导电塑料中微分子又缩短距离而聚集,碳粒再次连接,电路重新闭合,电加热输出功率再次增加,从而继续升温到目标温度,达到衬砌背后排水管排水流畅不冻结。图 1 为电加热系统装置中电缆结构示意图。

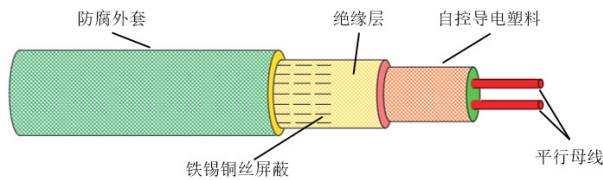


图 1 电加热系统电缆结构示意图

2 模型建立、边界条件及参数设置

该隧道全长 20.1km,隧址区属于高寒半干旱气候,季节性温差较大,雨季和旱季明显,多年平均地温为 3℃,多年平均气温为 3.1℃,最低气温 -31.5℃,最高气温 35.3℃,多年最冷月平均气温 -15.3℃,最大埋深 437m,最大冻结深度 2.56m。

由于围岩宽度需大于断面跨度的 3~4 倍^[1],故取围岩宽度为 90m×90m,隧道上方距围岩边界 40m,隧道左侧距围岩边界 40.5m,初衬与二衬的厚度分别为 0.3m 和 0.5m,将初衬与二衬的接触表面设置为线热源,建立二维计算模型。网格采用自由三角形网格,共计 6202 个单元和 22027 个自由度。图 2 为隧道横断面示意图,图 3 为隧道模型网格图。

根据该隧道所在地区的气象数据,可知从第一年七月份到第二年六月份的每月最冷平均气温,将其绘制于坐标系中并进行拟合,如图 4 所示。

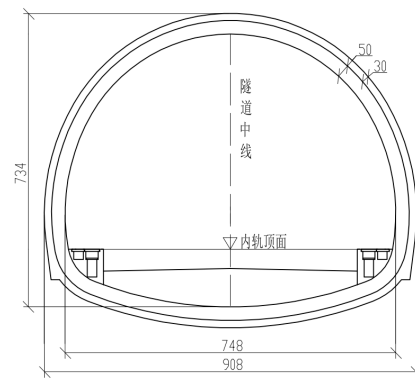


图 2 隧道横断面示意图 (单位: cm)

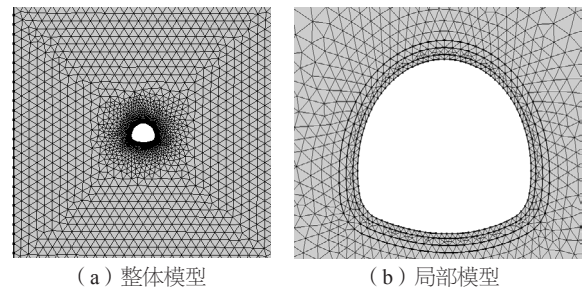


图 3 隧道模型网格图

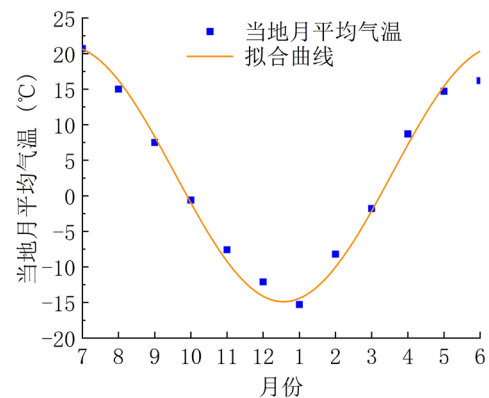


图 4 隧址区一年内大气温度拟合函数图

将上述气象数据拟合为正弦函数,得到如下关系式:

$$T = 3.1 + 18\sin\left(\frac{2\pi t}{365} + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1)$$

式中: t——时间,单位为 d。

模型上边界为气温函数,模型下边界为热流密度边界,热流密度 q 取 0.024W/m,洞内表面温度为对流换热边界,换热系数取 10W/m²·K,其余边界均设为热绝缘边界。围岩与衬砌混凝土及硬质聚氨酯保温材料的热物性参数取值如表 1 所示^[9,10]。

表 1 围岩、衬砌混凝土的热物性参数

材料	温度 (°C)	密度 (kg/m ³)	导热系数 (W/m·K)	比热 (J/kg·K)
围岩	≥ -0.5	1800	0.80	1278
	< -0.5	1950	1.20	1200
初衬	—	2300	1.58	970
二衬	—	2300	1.58	970
硬质聚氨酯	—	60	0.02	1260

3 数值模拟结果与分析

3.1 初始温度场

图 5 为计算模型加载一年后，外界气温分别为 -5°C、-10°C、-15°C、-20°C、-25°C、-30°C 时的稳定初始温度场分

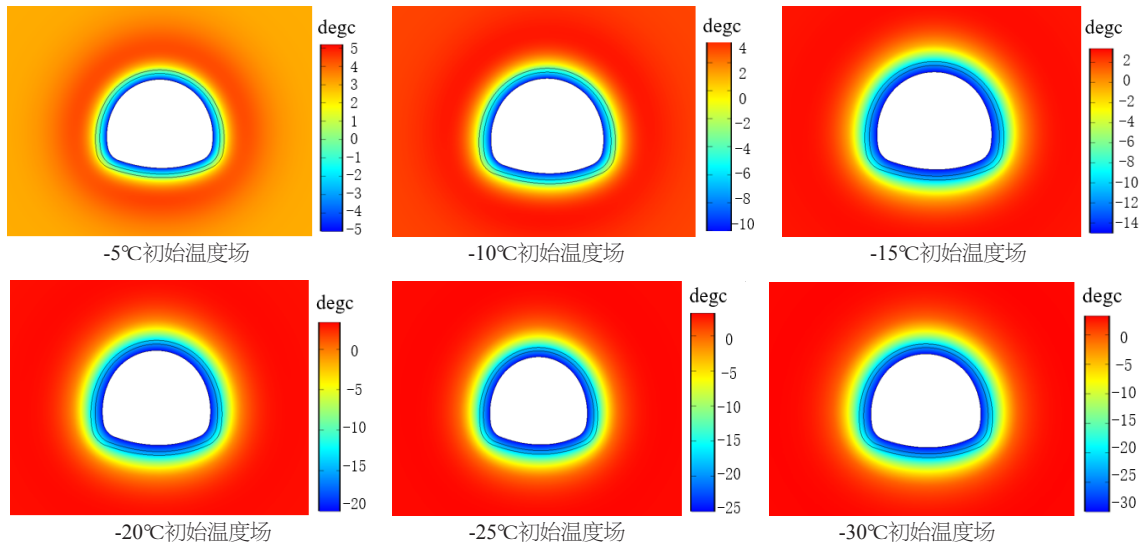


图 5 不同外界气温下的初始温度场

表 2 不同铺装功率下的热流量

铺装功率 (W)	电缆直径 (CM)	热流量 (W/m ²)
200	0.65	653.27
250	0.65	816.59
300	0.65	979.91
350	0.65	1143.23

将电缆铺设在初衬与二衬之间，在 200W 恒定功率下开始加热，分别对不同外界气温下隧道围岩 - 衬砌结构加热 5h，加热后围岩 - 衬砌结构温度场分布如图 6 所示。

从图 6 可以看出。在电伴热系统的主动加热下，电缆周围附近的温度有所升高，但是并不能使整个衬砌结构都处于正温状态，安装电伴热系统的主要目的是为了能够使预埋衬砌中的排水管内处于正温状态，以及衬砌背后一定范围内围岩温度处于正温状态，这样才能够保证排水管内排水流畅不堵塞。由此可知，加热时间以及电伴热系统输出功率均会影响衬砌以及衬砌背后围岩处温度值的大小。

图 7 为不同输出功率以及不同外界环境温度下，衬砌以及衬砌背后围岩处温度达到 0°C 所需的时间。

布云图。由图 5 温度分布云图可以看出，随着外界环境温度的不断降低，隧道周围的冻融圈范围不断增大。

3.2 不同铺装功率下的数值模拟

由于电缆是在恒定功率下进行通电加热，因此电缆单位长度下的发热功率，即线功率，通过公式换算为热流量，作为发热电缆表面的载荷，换算公式如下^[11]：

$$q_s = \frac{q_l}{3.14d} \quad (2)$$

式中： q_s ——电缆表面的热流量，单位 W/m^2 ；

q_l ——电缆线功率，单位 W/m ；

d ——电缆直径，单位 m 。

通过式 (2) 可以计算出发热电缆在不同铺装功率下的热流量，如表 2 所示。

从图 7 可以看出，在一定外界环境温度下，随着铺装功率的增加，各测点位置处温度达到 0°C 所需的时间会大大缩短，同时，沿衬砌径向深度不断增加时，出现“先减小后增大”的现象，这是由于在距离衬砌 0.6m 处正好是电缆位置所在处，因此出现了由 0.6m 处为 midpoint，随着两边距离的不断增大，围岩 - 衬砌结构所接收到的热量也随之减小，故达到 0°C 所需时间也越长，但是对于衬砌表面到电缆位置处与围岩到电缆位置处而言，可以看出，在 0~0.6m 处的加热时间明显高于 0.6~1.2m，这是因为在 0m 处是衬砌表面，衬砌表面与洞内冷空气不断进行热量交换，随着径向深度不断增加，热量交换的程度也越来越小，因此，0.6~1.2m 处的温度高于 0~0.6m 处的温度，故离发热电缆相同距离下，围岩一侧达到 0°C 所需的时间要更短。并且随着外界环境温度的不断降低，0~0.6m 位置处达到 0°C 所需时间越来越长，不同铺装功率下的发热电缆的加热效果差距也越来越大。

图 8 为在隧道衬砌表面铺设 5cm 硬质聚氨酯保温材料时，不同铺装功率下衬砌以及衬砌背后围岩处温度达到 0°C 所需的时间。

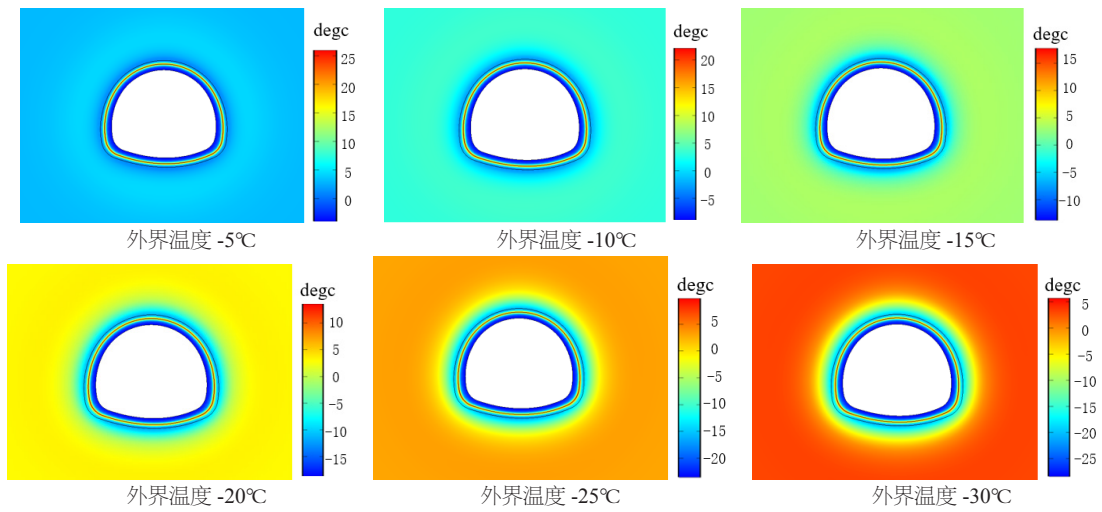


图 6 不同外界气温下加热 5h 温度场分布

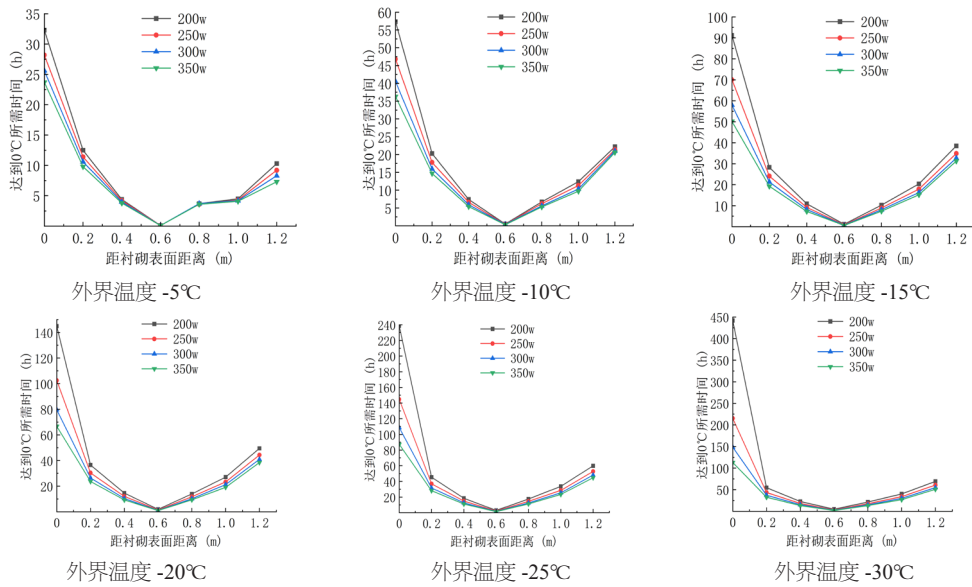


图 7 不同输出功率和不同外界环境温度下各测点达到 0°C 所需的时间

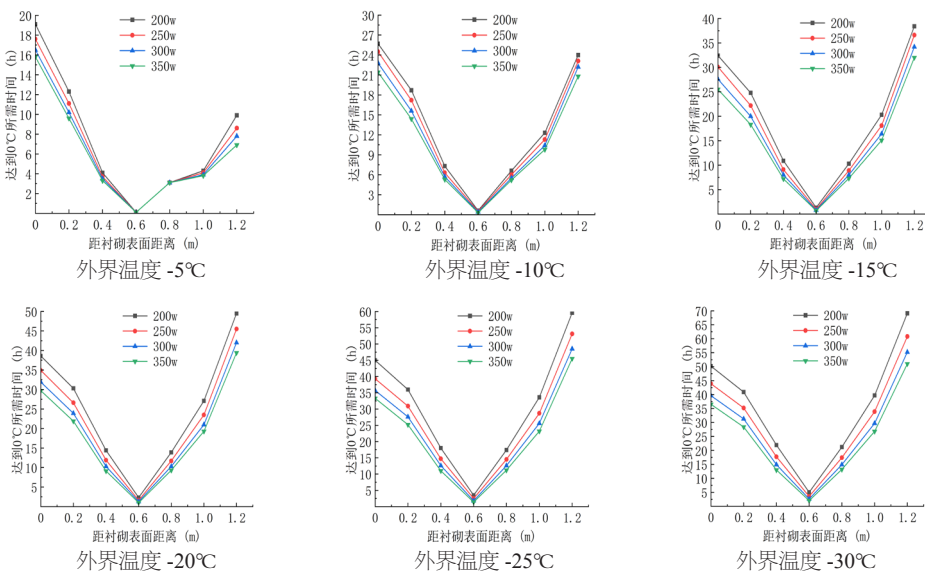


图 8 不同输出功率和不同外界环境温度下各测点达到 0°C 所需的时间 (铺设保温层后)

从图 8 可以明显看出,在铺设 5cm 保温层后相比未铺设保温层时,各测点达到 0℃所需的时间大大缩短,并且靠近衬砌表面一侧所需的时间已经小于靠近围岩一侧的时间,说明铺设保温层后的加热效果非常有效,不但减弱了衬砌与洞内冷空气的热交换,同时还阻碍了发热电缆热量的流失,因此将保温层与电加热系统同时铺设在隧道结构内能够有效保证衬砌-围岩结构处于正温状态,减小围岩冻胀力对衬砌结构的破坏,同时能够保证衬砌中预埋的排水管道排水通畅不冻结。

4 结论

①在一定外界环境温度下,电加热带随着铺装功率的增加,加热效果更加显著,当电加热带埋置在初衬与二衬之间时,电加热带附近温度升的最快,越远离电加热带处的温度升的越慢,即达到 0℃所需的时间越长,并且靠近衬砌一侧的各位置升温速度大于靠近围岩一侧的各位置升温速度。

②当在隧道衬砌表面铺设 5cm 硬质聚氨酯保温材料后,同时启动电加热系统时,距离衬砌一侧的各位置升温速度得到了极大缩短,并且小于围岩一侧各位置的升温速度,说明被动保温措施与主动保温措施共同作用时,对寒区隧道的防冻有着积极的作用。

参考文献:

- [1] 苏林军.寒区隧道冻害预测与对策研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [2] 吴根强,王志杰.高地温铁路隧道隔热层方案研究[J].铁道科学与工程学报,2017,14(8):1715-1726.
- [3] 崔振伟.季节性冻土隧道洞口段防冻保温技术研究[D].兰州:兰州交通大学,2017.
- [4] 高焱,耿纪莹,贾超,等.寒区隧道温度场变化规律及空气幕保温效果[J].西南交通大学学报,2019,54(5):1047-1054.
- [5] 关喜彬.寒区隧道侧吹式空气幕保温系统及模型试验研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(10):1720-1728.
- [6] 孙克国,魏勇,贾敬龙,等.寒区隧道阳光棚温升效果与影响[J].西南交通大学学报,2023,58(3):645-655.
- [7] 宫成兵,田正.寒区公路隧道路面电加热融雪防滑新型技术研究[J].公路,2013(4):205-209.
- [8] 王连广,徐宵,李雪.寒区隧道衬砌电加热试验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2021,42(7):1025-1031.
- [9] 徐教祖,王家澄,张立新.冻土物理学[M].北京:科学出版社,2010.
- [10] 王志杰,周飞聪,周平,等.高寒高海拔隧道保温层敷设方式及设计参数优化[J].中国公路学报,2020,33(8):182-194.
- [11] 广龙.基于电加热的寒区隧道保温防冻试验与数值模拟研究[D].西安:长安大学,2013.

作者简介:夏梦彪(1998-),男,中国陕西咸阳人,硕士,从事寒区隧道保温排水关键技术研究。

通讯作者:刘志强(1968-),男,中国陕西佳县人,博士,教授,从事工程力学、结构力学、岩土工程理论与应用研究。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(项目编号:41761015);项目名称:典型寒区隧道洞门结构在冻融循环下的力学特征及冻害防治技术研究。