

文章编号: 1674-8085 (2021) 06-0082-06

寒区隧道围岩初始温度场及保温材料对非稳态温度场的影响

廉海浔¹, 林立彬², *朱彤¹

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 200082; 2. 辽宁省交通规划设计院有限责任公司, 辽宁, 沈阳 110111)

摘要: 本研究利用商用模拟软件FLUENT, 分别使用非稳态初始条件和均温初始条件, 对寒区隧道围岩内温度场随时间的变化特性进行了模拟仿真, 表明隧道围岩的初始温度场分布对准确模拟寒流导致的围岩温度分布有重要影响。分析了不同保温层材料对隧道围岩结构温度分布的影响, 由于三种保温材料的热导率均比较小, 5 cm厚保温层后的围岩温度相差不大, 但是5 cm厚保温层不足以保证所依托隧道结构不发生冻害; 需要根据寒区隧道的气象条件铺设主动加热带, 从而有效防止冻害现象的发生。

关键词: 隧道冻害, 保温层, 围岩温度场, 非稳态热传导

中图分类号: U451+.2

文献标识码: A

DOI: 10.3669/j.issn.1674-8085.2021.06.015

EFFECT OF SURROUNDING ROCK'S INITIAL TEMPERATURE FIELD IN COLD REGIONS AND THERMAL INSULATION MATERIAL ON UNSTEADY TEMPERATURE FIELD

LIAN Hai-xun¹, LIN Li-bin², *ZHU Tong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200082, China;

2. Liaoning Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110111, China)

Abstract: The variation characterization of the temperature field with time in the tunnel surrounding rock was simulated by using FLUENT, including two initial conditions as the unsteady and uniform temperature field. The results showed the initial temperature field had an important influence on the accuracy of the simulation results. Since the thermal conductivity of the three insulation materials is relatively small, the temperature difference after 5cm insulation layer was not very obvious. However, the 5cm thick insulation layer was not enough to guarantee the structure away from freezing damage. Therefore, it was necessary to lay a heating zone according to the weather conditions to prevent the occurrence of freezing damage.

Key words: tunnel freezing damage; insulation layer; surrounding rock temperature field; unsteady heat conduction

从既有公路隧道运营状况来看, 排水设施、消防设施的冻害问题在建成之初就已经出现, 并

具有一定普遍性。由于我国东北地区多为季节性冻土区, 季冻区的气温变化, 尤其是冬季寒冷工

收稿日期: 2021-08-17; 修改日期: 2021-09-24

作者简介: 廉海浔(1991-), 男, 黑龙江海伦人, 硕士生, 主要从事散热方案设计、仿真模拟等方面的研究(E-mail: lianhaixun@126.com);

林立彬(1974-), 男, 吉林农安人, 教授级高级工程师, 主要从事公路隧道养护设计咨询方面的生产和研究(E-mail: llb_ln@163.com);

*朱彤(1969-), 男, 浙江杭州人, 教授, 博士, 主要从事高效洁净燃烧技术、燃烧稳定性和能源互联网关键技术等研究(E-mail: zhu_tong@tongji.edu.cn).

况给隧道工程的设计及施工带来了很多的问题,也为后期运营和维护带来了困难,处理不慎就会造成很大的经济损失^[1]。目前,寒区公路隧道冻害主要有:衬砌漏水、挂冰;拱脚、检修道渗水、结冰;隧道底部冒水、路面结冰;衬砌冻融开裂、酥碎、剥落;中心水沟(检查井)保温深度不足;“三缝”渗水结冰;衬砌局部渗水挂冰;衬砌大面积渗水挂冰;中心水沟(检查井)淤堵;排水系统结晶等。一旦冻害发生,将会造成极大的交通运行及车辆行驶的安全隐患,并且大大增加了隧道的维护及运行成本^[2]。

隧道发生冻害的原因一般有以下两点:(1)围岩温度低于 0°C ;(2)含水量充足。因此冻害的防治措施多是针对以上两点,分为主动措施和被动措施。主动防冻措施主要目的是从源头上防止出现冻害,向围岩提供热量以延缓甚至消除其冻结的倾向,主要加热措施有电伴热系统、地源热泵系统。被动防冻措施则是减缓岩体温度下降速率,主要方法多是在衬砌与围岩之间铺设保温层。

国内外很多专家日益重视冻害问题的防治问题。Moncef Krart^[3]建立了地下隧道的热分析模型,该模型可以预测隧道径向任意时刻温度,并与实验数据进行对比。Guymon 和 Luthin^[4]建立了基于理查兹方程的一维热湿相互作用模型。Weiwei Liu^[5]利用 FLAC3D 软件对玉希莫勒盖隧道简化三维模型进行了仿真模拟,进口风速和温度随时间的变化采用正弦函数的方式给定,并对保温层厚度与温度场关系进行探究,得到以下结论:5 cm 厚的保温层减少了长度方向的冻结长度,从原来的 143 m 减少到 70 m,入口最大径向冻结深度从 4.7 m 变为 2.4 m。孙晓鹏^[6]对隧道冻害防治措施进行了研究,采用仿真模拟的手段对陈家沟隧道冻害机理做出分析,认为保温层铺设厚度应与隧道洞口距离成反比。罗彦斌^[7]针对祥云岭隧道设计了隧道温度场测试方案,并通过拟合及仿真分析,认为防冻隔温层应铺设在衬砌中间,此时厚度要比铺设在衬砌表面厚度要少 1 cm 左右,经济效益较好。

目前,已有文献中隧道温度场数值模拟的初始条件主要采用赋值的方式,但实际上多年运行的隧道初场不应是均匀定值,而应是变化周期相对较长的温度波。这种温度波与围岩结构、保

温材料以及隧道所在地的气象环境变化周期等因素有关。一般很难测量得到不同径向深度位置处的温度值。为此,本研究以某公路隧道为背景,利用数值模拟的方法研究隧道洞内冷空气与围岩之间的传热过程,探索如何获得相对准确的非稳态温度场的初始分布;通过不同的初始温度场设置,分析其对最终模拟计算结果的影响,为寒区隧道数值模拟初场设置提供理论指导;另外,还分析了保温层及其材料对寒区隧道围岩温度场的影响,从而为寒区公路隧道冻害防治提供理论指导。

1 隧道结构初始场温度分布数值模拟

在面对复杂的公路隧道围岩结构以及复杂多变的气象条件时,隧道围岩温度场是不可能解析解的。需要使用数值模拟仿真计算方法,才能计算分析公路隧道围岩结构内部的温度分布。

公路隧道正常运营时,围岩与周围空气热交换的方式为对流传热。为此,需要针对具体隧道形状、围岩结构、保温层铺设方式以及中心管沟等具体结构,根据能量守恒、动量守恒和质量守恒定律等理论建立数学模型。

图 1 为某隧道的横截面图,根据围岩温度影响范围为隧道断面设计跨度的 3~4 倍,确定横断面方向围岩边界距离隧道结构 50 m,为方便计算,对模型进行简化,应用 Solidworks 软件进行建模并进行网格划分,如图 2 所示。

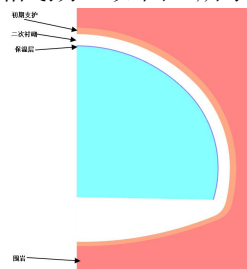


图 1 某隧道截面示意图
Fig.1 Sectional view of a tunnel

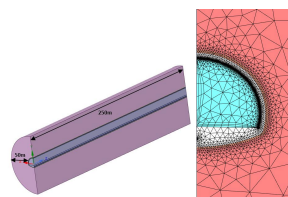


图 2 某隧道对应的仿真模型及网格图
Fig.2 Simulation model and grids of a tunnel

2 边界条件及参数设置

该隧道围岩、衬砌的材料及热物性参数如表 1 所示。

表 1 围岩及衬砌热物性参数

Table 1 Thermal properties of surrounding rock and lining

材料名称	温度 (°C)	热导率 (W/(m·K))	比热容 (J/(kg·K))	密度 (kg/m³)	围岩含水量 (15%)
围岩	-15	3.5	2000	2700	15
	-3	3.1	2000	2700	15
	-1	2.8	2000	2700	15
	20	2.5	2000	2700	15
衬砌	—	1.74	920	2500	—

根据该隧道所在地的气象数据,假定隧道进口气温为以年为周期且按正弦规律变化的曲线。参考该隧道所在地区的平均年气温为 -2.1°C ,气温年较差为 60°C ,则隧道进口空气温度变化曲线为: $T_d=30\sin(2\pi t/T+3/2\pi)-2.1$,其中 $T=360(\text{day})=31104000(\text{s})$ 。换算后,约在每年的2月1日气温最低为 -32.1°C ,在8月1日气温最高为 27.9°C 。

根据当地风速条件,忽略外部条件对寒风方向及大小的影响,将进口风速简化为年平均风速 2 m/s ,方向平行于隧道纵深方向。

3 数值模拟结果及分析

3.1 初始场不同围岩温度场仿真结果对比

为分析比较非稳态温度场的初始条件对模拟计算结果的影响,假定在某个时间寒流来袭,那么,不同初始条件下,隧道围岩结构内部的温度场有哪些不同?为此,我们开展了两种初始条件的模拟计算。一种是取无保温层的隧道模型,应用商业计算流体力学软件 *Fluent*,采用非稳态流固耦合模拟计算方法,获得在前述周期性进气边界条件下、一年后的围岩及隧道结构温度场;将其作为初始温度场进行寒流来袭工况的模拟计算。把这种初始条件称为非稳态初始条件。另一种则是取初始温度场为均一定值,称为均温初始条件。很明显前者初始条件相比后者更符合实际情况。

隧道内壁面与地面的交点多是隧道上面的渗水汇集处,是易发生冻害的薄弱点,选取此点作为温度比较的监测点,命名为 A 点,沿围岩方向

深 7.5 m 点为 B 点。如图 3 所示。

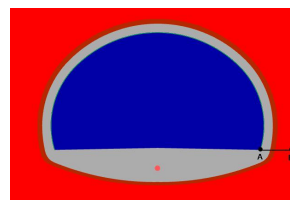


图 3 后处理位置示意图

Fig.3 Post-processing position map

假定该隧道在1月15日(此时气温为 -25°C)突然遇到为期3 d的寒流,寒流温度为 -30°C ,风速为 3 m/s (平行于隧道纵深方向),对此种工况进行模拟分析。均温初始温度场初始温度为 8°C 。

两种不同初始条件下的 A 点温度随时间变化曲线分布见图 4 和图 5。

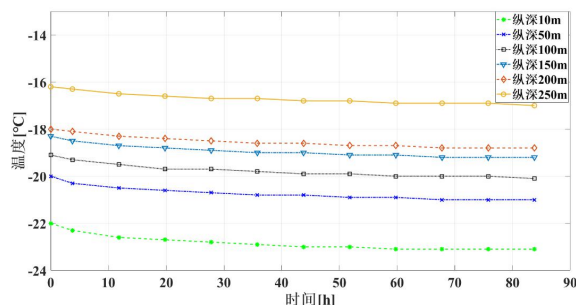


图 4 非稳态初始条件下的模拟结果

Fig.4 Simulation results under unsteady initial conditions

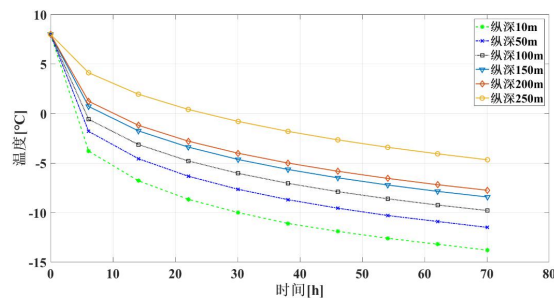


图 5 均温初始条件下的模拟结果

Fig.5 Simulation results under the initial conditions of uniform temperature

通过图 4 与图 5 的对比,可见两种不同初始条件的模拟结果相差很大。前者隧道不同纵深的内壁面温度已在 -22°C 至 -16°C ,在 -30°C 寒流的作用下,温度变化并不是很大,经过 80 h 后,隧道内壁面 A 点的温度下降 1°C 左右。而后者不同纵深处的 A 点温度均是从 8°C 开始下降,在寒流作用下,降温明显,纵深 10 m 处的 A 点经过 70 h ,温度降低 22°C ;随着纵深加大,温度降低值相对减少。由此可说明初始场的合理设置对温度场计

算结果的影响很大。

隧道纵深 100 m 处 A 点至 B 点，即沿围岩深度方向的第三天温度分布见图 6。均温初始条件下，寒流导致距离隧道内壁面约 1.2 m 深的围岩温度下降；而采用非稳态初始温度场的工况，则距离隧道内壁面的温度变化不大，这是因为初始气象条件以及围岩内部温度与 -30°C 的寒流温差小，引起的热量散失远小于前者。

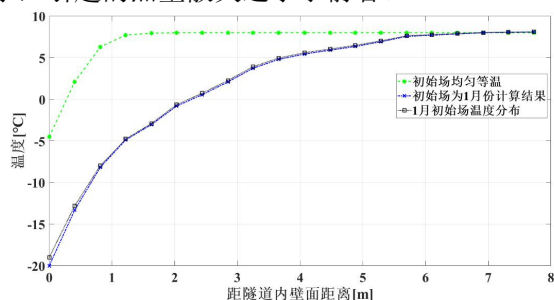


图 6 两种工况对比曲线

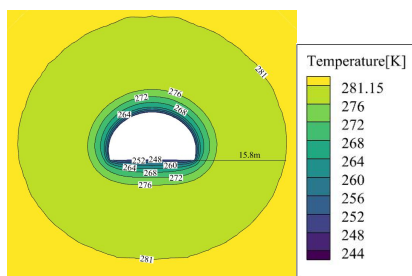
Fig.6 Comparison curves of two working conditions

3.2 保温层对围岩温度分布的影响

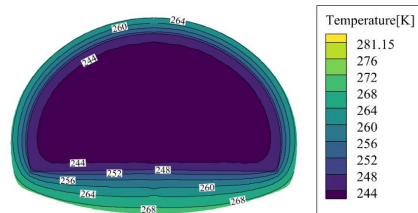
为分析保温层对隧道温度分布的影响，假定于 12 月 15 日（气温为 -16°C ）隧道突遇寒流（ -30°C ， 3m/s ），采用非稳态初始条件，分别模拟不同材料贴壁保温层的隧道围岩温度分布，保温层厚度均为 5 cm。

纵深 100 m 处，没有敷设保温层的围岩温度分布如图 7 所示，图 a 中的 15.8 m 表示隧道围岩 A 点至 8°C 等温线的水平长度，代表由于隧道开通后，在环境通风以及在寒流作用下，围岩温度的变化范围；图 b 为隧道内空气的温度分布，反映隧道外气流在流过 100 m 长后的温度变化。

在隧道内壁面敷设 5 cm 厚酚醛泡沫保温层，在同样外界气象条件变化后，围岩温度分布如图 8 所示。环境通风及寒流作用引起的围岩温度变化范围减少至 11.9 m，相比无保温层情况小很多，保温层后隧道围岩结构温度要高于无保温层工况。



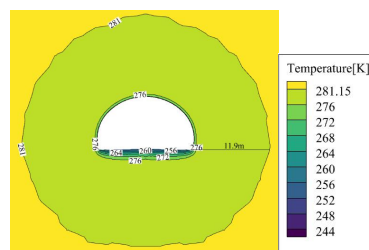
(a) 隧道结构及围岩温度分布云图



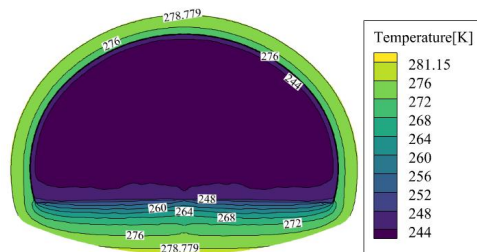
(b) 空气及隧道结构温度分布云图

图 7 无保温层温度云图

Fig.7 Temperature cloud without insulation layer



(a) 隧道结构及围岩温度分布云图



(b) 空气及隧道结构温度分布云图

图 8 有保温层温度云图

Fig.8 Temperature cloud with insulation layer

在寒流来袭情况下，不同纵深处 A 点温度随时间变化如图 9、图 10 所示。可见，保温层覆盖隧道内壁面后，有效提高了保温层后围岩结构的温度，相比没有保温层温度提高了 10°C 多。尽管从图 9 和图 10 的比较中，有保温层情况下，A 点温度变化幅度大于无保温层情况，但这是因为没有保温层情况下隧道内壁面温度与寒流温度差小于有保温层情况，在同样的流动风速下，气流与隧道内壁面的对流传热系数接近，故前者隧道壁面热量散失增加量小于后者。

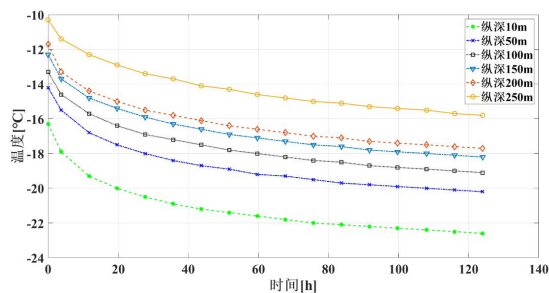


图 9 无保温层计算结果

Fig.9 Results without insulation layer

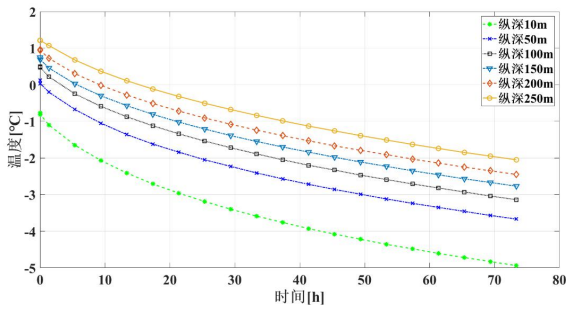


图 10 有保温层计算结果
Fig.10 Results with insulation layer

为进一步探究保温材料热物性对围岩温度场的影响，选取三种常用的保温材料^[9-10]进行模拟计算。保温层厚度均为 5cm，同样为 12 月 15 日遇到 3 天寒流（3m/s、-30℃）。

表 2 保温材料热物性表

Table 2 Thermal properties of insulation materials

性能	酚醛泡沫	聚氨酯	岩棉
密度(kg/m ³)	50	30	100
热导率 (W/(m·K))	0.025	0.030	0.050
比热容(J/(kg·K))	1260	1260	750
热扩散率 (m ² /s)	3.97×10 ⁻⁷	7.94×10 ⁻⁷	6.67×10 ⁻⁷

在敷设三种不同保温材料后，不同纵深处的 A 点温度随时间变化曲线见图 11-13。

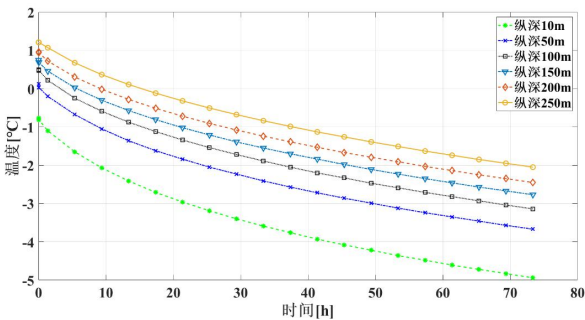


图 11 酚醛泡沫工况
Fig.11 Working condition of phenolic foam

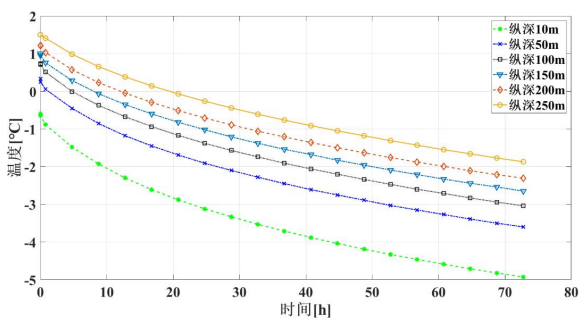


图 12 聚氨酯计算工况
Fig.12 Polyurethane calculation conditions

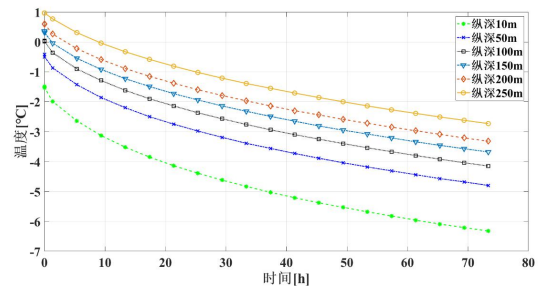


图 13 岩棉计算工况
Fig.13 Rock wool calculation conditions

72 h 寒流来袭后，不同纵深处 A 点温度下降数值如表 3 所示。

表 3 不同保温材料 3 天寒流后温度降低值

Table 3 ΔT of different insulation materials after 3 days cold current

材料 \ 纵深	10 m	50 m	100 m	150 m	200 m	250 m
酚醛泡沫(℃)	4.17	3.79	3.63	3.51	3.41	3.26
聚氨酯(℃)	4.33	3.93	3.76	3.65	3.53	3.37
岩棉(℃)	4.83	4.38	4.19	4.04	3.90	3.69

由模拟计算结果可知，热导率小的保温材料，A 点温度相对要高一点。尽管酚醛泡沫的热导率仅为岩棉的一半，但在寒流来袭情况下，两者 A 点的温度降低值相差不到 1℃。当然，三种工况的最终温度都在 0℃ 以下，说明此时隧道围岩结构有发生冻害的可能。表明季冻区冬季气温较低，5 cm 厚保温层并不足以阻止隧道及围岩冻害的发生，还需要主动加热措施，防止冻害发生。

4 结论

通过对隧道冻害问题分析，基于数值模拟仿真，分析研究了在非稳态传热过程模拟中初始温度场和保温层材料对模拟结果的影响。得到如下结论：

1) 初始条件设置对最终模拟结果有重要影响，准确的初始条件设置才能反映实际的隧道围岩结构温度分布状况。一般需要通过长周期的非稳态温度场模拟，获得某一时刻的围岩温度场，将其作为初始条件，然后才能开始模拟研究突变条件下的围岩温度场分布。

2) 在隧道内壁面敷设常用的三种保温材料后，围岩结构的温度均比没有敷设保温材料的高，但由于季冻区冬季温度较低，5 cm 厚保温层并不

足以阻止隧道及围岩冻害的发生, 还需要主动采取加热措施, 防止冻害现象的发生。

参考文献:

- [1] 陈香利. 回头沟隧道岩石导热系数及围岩温度场分布规律研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [2] Zeng Y, Liu K, Zhou X, et al. Tunnel temperature fields analysis under the couple effect of convection-conduction in cold regions [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 120:378-392.
- [3] Krarti M, Kreider J F. Analytical model for heat transfer in an underground air tunnel [J]. *Energy Conversion and Management*, 1996, 37(10):1561-1574.
- [4] Guymon G L, Luthin J N J W R R. A coupled heat and moisture transport model for arctic soils[J]. 1974, 10(5): 995-1001.
- [5] Liu W, Feng Q, Wang C, et al. Analytical solution for three-dimensional radial heat transfer in a cold-region tunnel [J]. 2019, 164.
- [6] 孙晓鹏. 季节性冻土区铁路隧道防冻措施及温度场变化规律研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [7] 罗彦斌. 隧道冻害发生机理及其防治措施的研究 [D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [8] 李磊. 多年冻土隧道洞口段抗冻设防长度计算方法及温度响应研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016
- [9] 李寅, 吴文敬, 王晓静等. 高硅氧纤维/酚醛泡沫复合材料的结构与性能[J]. *宇航材料工艺*, 2018, 48(5):26-29.
- [10] 李荣博, 刘晓强, 龚巍, 等. 新燃料运输容器聚氨酯泡沫填充材料性能研究[J]. *包装工程*, 2017, 38(21): 10-14.

(上接第 73 页)

参考文献:

- [1] 曹明伟. 纯电动汽车电池组被动式液冷散热系统仿真分析与优化[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [2] 饶中浩, 张国庆. 电池热管理[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [3] 林国发. 纯电动汽车锂电池组温度场研究及散热结构优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [4] 李秋芬. 车用动力电池包的散热仿真分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [5] 徐善红, 聂永福. 动力电池系统热管理仿真分析及设计优化[J]. *汽车实用技术*, 2019, (11):3-5.
- [6] 楼英莺. 混合动力车用镍氢电池散热系统研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [7] Claude Letoumeau, Denis Geoffroy, Philippe St-Germain, Progress in lithum polymer battery system for electric vehicles[C]. Belgium, Brussels: EVS-15, 1998.
- [8] 张浩, 罗志民, 宋韩龙, 等. 电动车动力锂离子电池水冷系统研究[J]. *汽车实用技术*, 2017(6): 47-50.
- [9] 魏增辉, 许思传, 李钊, 等. 基于相变材料和液冷的 LiFePO₄ 电池包热管理研究[J]. *电源技术*, 2016, 40(1): 44-46.