

文章编号: 1671-6612 (2020) 05-577-04

# 长大公路隧道喷雾降温可行性分析

刘庆平 冯 炼

(西南交通大学 成都 610031)

**【摘 要】** 对于长大公路隧道, 由于纵向通风的距离较大, 而行驶的机动车产生的热量积聚在隧道内, 以至于在隧道纵向方向空气温度不断升高, 可能会影响行车安全。参考江苏某隧道建立了长大公路隧道三维温度场模型, 利用 fluent 软件, 模拟分析了长大隧道在正常运营通风情况下的温度场分布。并在此基础上, 加入了空气相对湿度的计算, 利用 Fluent 的 DPM (离散相模型) 对隧道通风时加入喷雾以后的温度场进行了模拟。结果表明: 喷雾降温的方式可以有效地控制隧道内的升温情况。

**【关键词】** 长大公路隧道; 数值模拟; 喷雾降温; 温度场

中图分类号 U435.5 文献标识码 A

## Feasibility Analysis of Spray Cooling for Long Highway Tunnel

Liu Qingping Feng Lian

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** For long highway tunnels, due to the large distance of longitudinal ventilation and the heat generated by driving vehicles accumulates in the tunnel, so that the air temperature in the direction of tunnel ventilation increases continuously, which may affect the driving safety. In this paper, a three-dimensional temperature field model of a long highway tunnel is established with reference to a tunnel in Jiangsu Province. Using FLUENT software, the temperature field distribution of the long tunnel under normal operation ventilation is simulated and analyzed. On the basis of this, the calculation of relative humidity of air is added, and the temperature field of tunnel ventilation is simulated by using DPM (discrete phase model) of Fluent. The results show that spray cooling can effectively control the temperature rise in the tunnel.

**【Keywords】** Long highway tunnel; numerical simulation; spray cooling; temperature field

作者简介: 刘庆平 (1995-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 2627782376@qq.com

通讯作者: 冯 炼 (1964-), 女, 博士, 教授, E-mail: lancyfeng90@163.com

收稿日期: 2019-11-27

## 0 引言

随着公路隧道向长大化方向的发展, 行车密度的加大, 根据现有规范<sup>[1]</sup>, 隧道内通风量是由稀释隧道内 CO 和烟雾等污染物浓度决定。一般说来, 对于交通流量不是太大或长度较短的中小型隧道而言, 洞内通风量在保证空气品质达到一定标准后, 隧道内空气温度也不会带来太多的问题。所以以往的城市道路隧道通风设计中一般都不考虑温度因素的影响。事实上, 当车辆在隧道内行驶时, 汽油

或柴油燃烧后, 向隧道内排出废气的同时亦向周围排出大量的废热, 排热量能使洞内温度升高。在较短隧道中, 隧道升温的矛盾不是特别突出, 但在炎热夏季, 对于交通比较繁忙的长大隧道, 尤其是在土壤及隧道结构散热条件不是很好的情况下, 对隧道内温度的控制就不能忽略了。

通常情况下, 一旦气温达到 40°C 以上, 机动车发动机的工作效能会降低, 可能引起汽车有路电路故障、水箱温度上升, 从而导致汽车抛锚引起事

故<sup>[2]</sup>。车辆在隧道内发生故障或者事故，以及隧道内需要施工人员对隧道进行维护，一部分人将在隧道内逗留较长的时间，由相关热环境理论可知，人在高温环境中的逗留时间不宜过长，参考各项因素<sup>[3]</sup>，公路隧道内温度可见表 1。

表 1 公路隧道空气温度标准

Table 1 Air temperature standard of highway tunnel

隧道空气温度 (°C)	可接受暴露时间 (min)
<40	无限制
40~42	<5
42~45	<1
>45	无法接受

近年来，喷雾降温作为一种新型的降温方式，降温效果好，耗电量低，不产生其他污染物，是一种高效节能的降温装置，逐渐受到人们的重视。

### 1 长大公路隧道温度场预测

#### 1.1 物理模型

参考江苏某隧道，利用 ICEM 软件，建立了长大公路隧道三维温度场模型，隧道截面如图 1 所示，截面面积为 115m<sup>2</sup>；隧道纵向长度为 7210m，竖井位于距离隧道出口 180m 处。

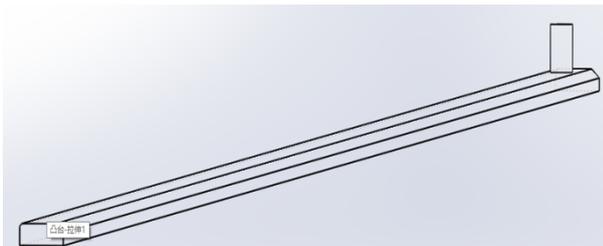


图 1 隧道物理模型

Fig.1 Tunnel physical model

#### 1.2 计算参数选取

本次模拟计算重点考虑汽车在隧道内行驶过程中的排出的尾气和车体本身的散热量。汽车在行驶过程中排出大量的废气，现代汽油车发动机的有效热效率约为 35%，柴油车发动机的有效热功率约为 40%，汽油的燃料热值约为 43.5MJ 柴油的燃料热值约为 40.2~44.4MJ。

汽车行驶过程中的散热量很大程度上去取决于隧道的交通量，隧道高峰小时预测交通量<sup>[4]</sup>下单位长度的散热量如图 2 所示。

参考相关规范<sup>[5,6]</sup>，选取以下数据作为本论文

模拟的隧道外气象参数。夏季通风室外计算温度 31.3°C；相对湿度 70%；隧道材料为混凝土，衬砌厚度为 1.5m，密度为 2500kg/m<sup>3</sup>，导热系数为 1.74W/(m·°C)。

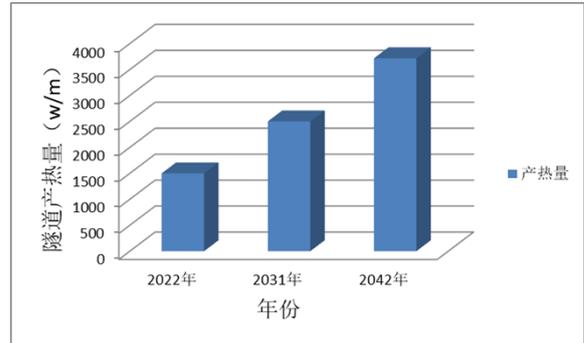


图 2 隧道预测交通量下隧道内单位长度散热量

Fig.2 Heat dissipation per unit length in tunnel under predicted traffic volume

单向长大公路隧道的通风状况由隧道自身的条件及隧道的交通量等因素共同确定，根据《公路隧道通风设计细则》所提供的特长公路隧道通风条文和计算方法，计算得到隧道在不同年份交通量下的通风参数<sup>[4]</sup>，如表 2 所示。

表 2 隧道南线在不同年份交通量下的通风参数

Table 2 Ventilation parameters of South line of tunnel under traffic volume in different years

特征年	设计需风量
2022	301.29
2030	419.67
2041	629.65

#### 1.3 模拟结果

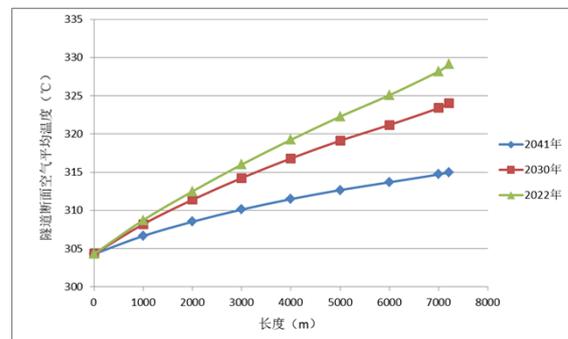


图 3 隧道空气沿长度方向上温度分布

Fig.3 Temperature distribution of tunnel air along the length direction

由图 3 可看出，随着隧道长度的增加，车辆运

行过程中散发的热量在隧道内无法及时排出而逐渐积聚, 温度随长度的增加而逐渐升高。

对于预测的高峰小时交通量比较大的时候, 此时隧道内单位长度的排热量也比较大。由模拟结果可以看出, 当隧道内排热量较大同时隧道内需风量如果只取决于释隧道内 CO 和烟雾等污染物浓度, 此时无法很好的控制隧道内的温度。也就是说, 交通量比较大而需风量取值仅仅是为了控制污染物浓度时, 隧道内空气的温度很有可能超过 45℃。

## 2 喷雾降温可行性分析

### 2.1 喷嘴流量的选取

雾滴显热吸热量+雾滴气化潜热吸热量=隧道内空气传递给雾滴的热量

$$m = \frac{W + G\rho_a c_p (t - 32)}{r + c_l (t - t_0)} \quad (1)$$

式中:  $W$  为隧道内产热量;  $m$  为隧道内总喷雾质量流量;  $G$  为隧道入口空气体积流量;  $\rho_a c_p$  为空气热容;  $r$  为雾滴气化潜热;  $t$  为喷嘴断面处空气干球温度;  $t_0$  为水的初始温度;  $c_l$  为水的定压比热。

取隧道内的通风量为 629.65m<sup>3</sup>/s, 水的汽化潜热为 2500kJ/kg, 空气的密度为 1.2kg/m<sup>3</sup>, 水的定压比热为 4.18kJ/(kg·K), 设空气的干球温度为 38℃, 相对湿度为 60%。

### 2.2 雾滴粒径大小的选择

雾滴在蒸发分为 2 个过程, 雾滴加热升温过程和雾滴稳态蒸发过程, 雾滴由粒径  $d$  蒸发至  $d_0$  的时间<sup>[7]</sup>可由下式表示:

$$t = \frac{\rho RT (d^2 - d_0^2)}{8DM (P_s - P)} \quad (2)$$

式中:  $t$  为时间;  $\rho$  为液体密度;  $T$  为环境温度;  $d$  为雾滴初始直径;  $d_0$  为雾滴蒸发后直径;  $M$  为液体分子重量;  $P_s$  为水蒸气的饱和分压力;  $P$  为雾滴周围空气压力;  $D$  为扩散系数。

雾滴在稳定状态下, 则雾滴的温度<sup>[7]</sup>可由以下方程式计算:

$$T - T_s = \frac{DML}{RK_t} \left( \frac{P_s}{T_s} - \frac{P}{T} \right) \quad (3)$$

式中:  $T_s$  雾滴稳定状态温度;  $L$  为水的蒸发潜热。  $K_t$  空气的热传导系数。

雾滴由于重力的作用, 会在空气中向下运动, 但由于摩擦阻力等力的存在, 雾滴的速度会逐渐降

低, 直到雾滴的阻力与重力达到平衡, 此时的速度为雾滴的下降速度或称终端速度。单颗雾滴下降速度<sup>[8]</sup>下式计算:

$$V_s = \sqrt{\frac{4\rho g d}{3\rho_a C_{d,s}}} \quad (4)$$

式中:  $V_s$  为颗粒下降速度;  $\rho_a$  为空气密度;  $C_d$  为阻力系数, 可由下式计算, 此式适用于层流及紊流。

$$C_d = \left[ \left( \frac{24}{Re} \right)^{0.52} + 0.32^{0.52} \right]^{1/0.52} \quad (5)$$

由上述公式, 即可计算不同大小雾滴完全蒸发时所需下降高度。实际雾滴在隧道内的运动要复杂的多, 雾滴在隧道中不断蒸发, 本身的粒径不断变小, 也可能与其他雾滴相互碰撞转化为大颗粒雾滴, 另外隧道内的空气处于紊流流动, 在一定程度上也会改变雾滴的运动轨迹。

### 2.3 物理模型和喷嘴布置

喷嘴雾化模型选用 solid-cone 雾化喷嘴, 喷嘴条件设置为每个喷嘴流量 0.0245kg/s, 雾滴平均粒径大小为 50μm, 模拟在 500m 长的隧道空间内进行, 每 50m 为一个截面, 每个界面均匀设置 3 个喷嘴, 喷嘴设置在距离地面 6m 的高度处, 喷口扩散角为 50°, 垂直向下喷出雾滴, 水温为 30℃。忽略隧道内的产湿量, 隧道内初始的空气温度为 38℃, 相对湿度为 60%。

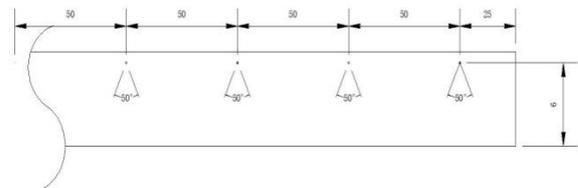


图 4 喷雾喷嘴布置主视图

Fig.4 Main layout of spray nozzle arrangement

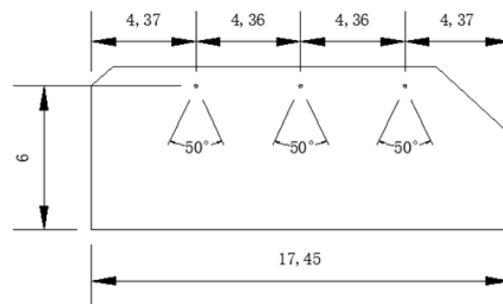


图 5 喷雾降喷嘴布置左视图

Fig.5 Left side view of spray nozzle

2.4 喷雾降温前后温度场对比

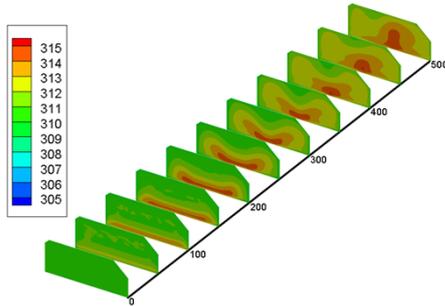


图 6 喷雾前纵向方向上温度场分布

Fig.6 Distribution of temperature field in longitudinal direction before spraying

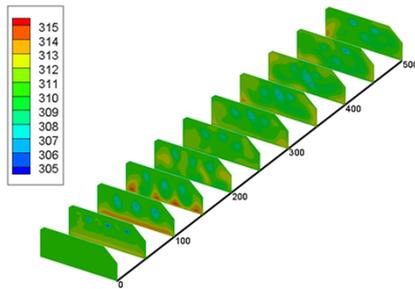


图 7 喷雾后纵向方向上温度场分布

Fig.7 Distribution of temperature field in longitudinal direction after spray

由于隧道加载的内热源的存在,喷雾前隧道内空气温度随着纵向长度的增大而逐渐升高。喷雾前后出口截面平均温度差约 2℃;由于热浮升力的影响,热空气向上运动,在近地面处喷雾前后最大温差可达到 4~5℃。由前文对雾滴运动轨迹的分析可知,雾滴从喷嘴喷出以后,速度迅速衰减,之后受周围空气的影响,跟随空气运动,喷雾后模拟区域的后部分的降温效果明显,所以采用喷雾降温的方式是可行的。

3 结论

本文通过对长大公路隧道进行三维建模,然后

利用 fluent 对正常运营状态下的隧道温度场进行模拟预测,结果显示车辆运行过程中散发的热量在隧道内无法及时排出而逐渐积聚,温度随长度的增加而逐渐升高。从模拟结果来看,当交通量比较大而需风量取值仅仅是为了控制污染物浓度时,隧道内空气的温度很有可能超过 45℃。

在对温度场模拟的基础上,加入了空气相对湿度的计算,利用 Fluent 的 DPM (离散相模型)对隧道通风时加入喷雾以后的温度场进行了模拟。结果表明:喷雾前后出口截面平均温度差约 2℃;由于热浮升力的影响,热空气向上运动,在近地面处喷雾前后最大温差可达到 4~5℃。喷雾后模拟区域的后部分的降温效果明显,所以采用喷雾降温的方式是可行的。

参考文献:

[1] JTJ 026.1-1999, 公路隧道通风照明设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2000.

[2] 文韬. 城市公路隧道通风设计中的温度控制初探[J]. 建筑热能通风空调,2015,34(6):71-73,57.

[3] 蒋卫艇,郑晋丽,劳衡生. 长大公路隧道温升的初步探讨[J]. 地下工程与隧道,2006(1):44-47,61.

[4] JTGT D702-02-2014, 公路隧道通风设计细则[S]. 北京:人民交通出版社,2014.

[5] GB 50019-2015, 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2015.

[6] JTG3370.1-2018, 公路隧道设计规范第一册土建工程[S]. 北京:人民交通出版社,2018.

[7] CM Megaridis. Comparison between experimental measurements and numerical predictions of internal temperature distributions of a droplet vaporizing under high-temperature convective conditions[J]. Combustion and Flame, 1993,93:287-302.

[8] Holterman H J. Kinetics and evaporation of water drops in air[J]. 2003.