

第一届全国青年燃烧学术会议

隧道高载荷重大火灾动力学特性及控制方法研究

报告人：陈长坤 教授 副所长/系副主任

中南大学土木工程学院消防工程系

高速铁路建造技术国家工程实验室

2015年5月20日

报告内容

一 研究背景

二 国内外研究进展

三 现有研究工作及成果

四 关键问题与前沿

一、研究背景



近年来，我国隧道里程延长迅速，《中长期铁路网规划》中指出到2020年，我国修建客运专线隧道工程约达**1200km**。

隧道长度、建设难度纪录不断被刷新，钱江隧道、港珠澳大桥海底隧道、秦岭终南山隧道等一系列**长大型隧道**蓬勃发展。

但隧道内部狭窄及其两侧封闭的独特结构，使得火灾扑救、烟气的排放、车辆及车上人员疏散困难增加，一旦发生火灾，所造成的损失也就十分惨重。

国外部分已建成和在建长度大于10km隧道

隧道名称	国家	长度 (m)
勃朗峰 (Mont Blanc)	法国—意大利	11600
弗雷瑞斯 (Frejus)	法国—意大利	12901
圣达哥 (St.Gothard)	瑞士	16918
阿尔贝格 (Arberg)	奥地利	13927
格兰沙索 (Gran Sasso)	意大利	10173
关越1 (Kan—Etsu)	日本	10920
关越2 (Kan—Etsu)	日本	11010
居德旺恩 (Gudvanga)	挪威	11400
Folgefonn	挪威	11100
Aurland Laerdal	挪威	24500

国内已建成和在建的长度大于10km的隧道

隧道名称	开通年份	孔数* 车道	长度 (m)
秦岭终南山隧道	2007	2*2	18020
锦屏山隧道	2011	2*1	17504
米仓山隧道	在建	2*2	13833
二郎山隧道	在建	2*2	13433
桐梓坡路至鸭子 铺通道	在建	2*3	10845
包家山隧道	2009	2*2	11200
泥巴山隧道	2012	2*2	10007

一、研究背景



其次，我国重载铁路也开始进入快速发展阶段，由于**货流量大、运送效率高**（例如我国大秦铁路，已最大限度地增开2万吨重载列车，最高每天开行100对不同吨位级重载列车，列车间隔时间保持在13-15分钟），这使得重载列车在**隧道起火的概率大大增加**，并且一旦发生火灾，火势将可能迅速蔓延整个列车，形成大规模的持续火灾。由于**可燃物多、人员少**，这使得重载铁路隧道火灾与普通货运或客运铁路隧道火灾有着明显的区别，在火灾起因、频率、蔓延特点、危害以及防治措施上，重载铁路隧道火灾都呈现了**独特性和强大的破坏性**。

一、研究背景

时间	名称	火灾情况
1971年	法国克洛次隧道	大火持续燃烧一昼夜，部分隧道倒塌，交通中断96天
1987年	中国十里山二号隧道	六、七辆罐车颠覆，16个油罐车起火，行车中断近202小时
1999年	法、意边境的勃朗峰隧道	装载黄油的车自燃起火，温度高达1000多℃，大量新鲜空气进入，浓烟迅速扩散，助长了火势。持续燃烧了55个小时

此外，2014年3月1日山西省晋济高速岩后隧道内发生两辆甲醇车追尾相撞起火，事故共造成40人死亡。2014年3月11日，贵州贾托坡隧道内发生挂车自燃事件，导致交通中断10余小时。这些新出现的事故，说明了**隧道火灾形势依然严峻，以货运为主的隧道火灾蔓延规律及灭火方法的研究显得尤为迫切。**

1999年	法、意边境的勃朗峰隧道	装载黄油的车自燃起火，温度高达1000多℃，大量新鲜空气进入，浓烟迅速扩散，助长了火势。持续燃烧了55个小时
2008年	宝成铁路109号隧道	12节油罐车起火，引起山体塌方
2011年	瑞士瓦莱州辛普朗铁路隧道	10节满载货物的车厢起火燃烧

二、国内外研究进展

- 近几十年来，国内外很多学者开展了大量关于**隧道烟气流动与通风控制**的研究工作，并开展了一系列的**试验研究**，也取得了丰富的研究成果，推动了隧道火灾科学的快速发展。
- 火灾高温下**隧道结构的响应行为**、破坏机制和防火方法也是目前国内外学者重点关注的热点问题。

二、国内外研究进展——国外

- 20世纪70年代，**欧洲各国开展了尤里卡EUREK EU499 “Firetun”项目**，该项目最早由**德国**地下运输设施协会、德国科隆大学以及**加拿大**的布伦瑞克（Brunswick）大学进行，其后**英国、意大利、瑞典、法国、奥地利**等多个国家也相继参与，该项目历时多年，获得了与隧道火灾相关的大量成果，包括隧道内的相关**火灾现象、隧道人员疏散与救援、隧道灭火技术、隧道火灾对车辆和隧道结构的影响**等各方面的结论和成果，是最全面、最著名的关于隧道火灾的实验研究

二、国内外研究进展——国外

□ 1993年，美国在废弃的Memorial公路隧道中开展了隧道火灾通风试验计划（Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Programm，简称MTFVTP项目），该项目包括了一系列的全比例隧道火灾实验，通过大约130次隧道火灾实验，研究了自然通风、纵向通风、横向通风和半横向通风等不同通风排烟方式对隧道火灾烟气控制效果的影响，并得到了火灾时隧道内温度场、流速场、能见度、通风率、烟流分布和扩散速度等蔓延规律，从而为隧道通风排烟系统的设计提供了重要的依据和参考。

二、国内外研究进展——国外

- 法国的Vauquelin O等学者搭建了1:20的隧道缩尺寸模型，并利用空气和氦气代替火灾产生的热烟气模拟了隧道内的烟气的运动和扩散，从而分别获得了纵向通风方式和横向通风方式时隧道内火灾热释放速率、风速以及烟气蔓延范围等参数的变化规律，同时，还得到了半横向排烟系统中隧道的排烟效率达到100%的合理排烟量。
- 法国的F.Demouge 和 D.Lacroix对采用横向通风排烟模式的隧道发生火灾时的流场进行了CFD数值模拟，研究了发生火灾时横向通风排烟方式下隧道内的烟气运动情况以及蔓延规律。

二、国内外研究进展——国外

- ❑ 2000年-2001年，在荷兰鹿特丹附近的Bunelux隧道内，荷兰学者进行了**14组实体火灾试验**来评估隧道内火灾场景下的逃生环境，并对**隧道内的温度、热量辐射水平、烟雾浓度**以及**热释放速率**等基础参数进行了详细地测量，并录制了隧道内火灾的发展及烟气的传播过程，在此基础上研究**纵向通风和自动喷水系统有效**时人员逃生的可能性。
- ❑ 2012年，**瑞典**学者利用试验的方法研究了**隧道内重型货车**导致的火灾场景下在火灾、沿程损失及局部损失的作用下隧道内的流速降低规律及隧道内的阻力分布特性，并建立了**隧道内的流速损失理论模型**。

二、国内外研究进展——国外

- 2006年，**韩国**的 Dong-Ho Rie, Myung-Whan Hwang 等人搭建了 **1:40 的小尺寸隧道模型试验台**，并将数值模拟与模型实验的结果相结合对**地铁隧道内的排烟模式**进行了分析研究，得到了排烟口最合适的开启方案。
- 2010年，**韩国**的 Eui Ju Lee 等人通过模型试验对隧道火灾的侧向排烟及其排烟效率进行了研究，该实验是通过**采用侧向点式排烟系统的隧道的1:20缩尺寸模型**开展的，通过在一定的排烟速率条件下**对比隧道机械通风和自然送风时的排烟效率**，从而得到了在没有机械通风且排烟速率合适的条件下，点式排烟系统的排烟效率更高的结论。

二、国内外研究进展——国外

□ 英国火灾研究中心的G. Cox和S. Kumar等人采用三维计算流体动力学CFD方法研究隧道火灾问题，建立了JASMINE数学模型，并模拟了坡度、通风以及火灾烟流场稳定与否对隧道内温度场、流速场的影响，且进一步论证了该模拟研究结果与奥地利的Zwenberg隧道火灾实验的结果较吻合。

二、国内外研究进展——国外

- 日本的M. Dobashi和T. Imai等人对隧道火灾时的通风排烟系统进行了CFD数值模拟，主要研究了纵向通风排烟系统以及横向混合通风排烟系统，同时还通过数值求解一维对流扩散方程分析了隧道内的烟流密度随时间、空间的变化规律，得到了隧道发生火灾时的通风方案，并成功地将研究成果应用到了日本的Higashiyama隧道。
- 日本学者Hitoshi Kurioka等人建立了三种比例的隧道模型，分别为1:10、1:2及全尺寸隧道，变换隧道的横截面、火灾规模及纵向风速，最终分析得出了隧道火灾下火焰高度、火焰倾斜程度及烟气层高度的预测模型，并在1:2尺寸和全尺寸中进行了验证。

二、国内外研究进展——国外

- ❑ Feist等在隧道衬砌结构火灾损伤方面做了相关的研究工作。
- ❑ Schrefler等开展了现场实测、试验及理论研究工作，分析探讨了火灾高温对隧道衬砌结构的损伤形式以衬砌结构的火灾防护技术。
- ❑ Kim等从避免混凝土爆裂和降低火源向混凝土传热的研究思路，对隧道衬砌结构火灾防护方面做了系统深入的研究。

二、国内研究进展——国内

□ 国内中国科学技术大学、中南大学、西南交通大学、郑州大学、南京工业大学、重庆大学、同济大学、武汉大学等单位也针对不同隧道的情况，开展了隧道火灾试验研究，对隧道火灾烟气蔓延、隧道火灾热环境影响、人员疏散和火灾高温下隧道结构破坏机理等关键科学问题做了深入而系统的研究。

二、国内外研究进展——国内

- 中国科学技术大学霍然等人在中国西南某隧道进行全尺寸的火灾试验，得出了较为理想的隧道内的温升值，同时研究了不同纵向风速下隧道内的火羽流状态。
- 胡隆华等通过实验和数值模拟给出了隧道火灾中CO浓度和温度纵向分布的数学模型，并且指出沿着隧道方向，温度的衰减速度快于CO浓度的变化。
- 纪杰，钟委等对隧道集中排烟系统的排烟效率进行了研究，通过一系列的实验和数值模拟，得出了排烟口的流速和高度对排烟系统的排烟效率的影响。纪杰开展了纵向风作用下不同海拔公路隧道受限火羽流行为特征研究。

二、国内外研究进展——国内

- ❑ 中国科技大学程小军通过对隧道火灾辐射理论的研究，对铃木提出的多区域模型进行了合理的改进，并将计算结果与实验及FDS模拟软件进行对比，得出该方法在保证计算的准确性时具有更好的时效性。
- ❑ 中国科学技术大学李立明在理论分析的基础上，建立了隧道内自然通风和机械通风场景下的温度分布特性曲线，并结合隧道内的阻塞比情况，对其进行数值模拟计算，得到更适用的火灾最高温度值和临界风速理论模型。

二、国内外研究进展——国内

- 香港理工大学的Jojo S. M. Li和Chow W. K.研究了不同火灾热释放速率下隧道分别采用纵向、横向和半横向通风排烟系统时的烟气蔓延规律。
- 南京工业大学王彦富、蒋军成(2009年)结合数值模拟和试验研究，建立了半敞开式公路隧道火灾烟气流动的数学模型。
- 西南交通大学的吴德兴结合特长公路隧道的实际，对设置了独立排烟道的点式集中排烟系统进行了系统全面的研究。
- 东南大学学者在全尺寸的竖井自然通风隧道中不同的位置进行了三组火灾试验研究，研究得出了自然通风隧道竖井对隧道火灾烟气及温度的影响，并对隧道内的能见度及安全范围进行了一定的研究。

二、国内外研究进展——国内

- 重庆大学学者建立了1:10的缩尺寸的**地铁隧道试验模型**，对隧道火灾下特性参数进行了研究，结合数值模拟软件FDS5.5进行了数值模拟计算，最终**得出了地铁隧道内烟气回流长度及临界风速的预测方法和模型**。
- 重庆交通科学研究院建立了长100m的**1:1的公路隧道试验模型**，对**隧道内风机动力、压力、局部阻力，升压力等**难点进行了研究，并主持编写了《公路隧道通风照明设计规范》（JTJ026.1-1999）。

二、国内外研究进展——国内

- 中南大学徐志胜、陈长坤、易亮等人则对**长大公路隧道**发生火灾时采用**集中排烟模式**、**隧道结构火灾损伤与坍塌机理**的相关科学问题进行了较系统的研究
- 在湖南省常吉高速公路开展了**全尺寸隧道火灾烟气蔓延规律的实验**。并利用**1:9**的缩尺寸隧道模型试验，得出了隧道内的温度、流速等参数分布，结合试验数据建立了合理的隧道火灾临界风速预测理论模型，并与前人理论模型对比分析，证实了临界风速理论模型的合理性。

二、国内外研究进展——国内

- 此外中南大学还开展了不同坡度下公路隧道火灾实验研究、铁路隧道列车运动火灾烟气蔓延实验研究、越江公路隧道火灾集中排烟模型试验研究、特长多匝城市公路隧道火灾烟气控制策略及通风研究、双层盾构公路隧道火灾侧向排烟系统烟气蔓延规律研究、城际铁路隧道运动火灾特性数值模拟研究、重载铁路隧道火灾特性机理研究等工作。
- 研究了隧道分别采用单向排烟和双向排烟时各排烟口的排烟效率。研究了重特大隧道火灾衬砌结构及顶隔板结构的损伤机理及破坏条件。

二、国内外研究进展——国内

- ❑ 2010年北京交通大学毛军等针对地铁隧道火灾中的回燃现象展开了缩尺寸的试验研究。
- ❑ 中南大学陈长坤2010年-至今铁道部科技研究开发计划重点课题（分课题）“狮子洋水下隧道火灾蔓延规律及人员逃生疏散研究”；公安部消防局科研计划项目“高速公路隧道工程消防验收方法及技术标准指南研究”；中国铁路总公司科技研究开发计划重大课题“长大隧道及特殊环境防灾安全技术——长大及大规模隧道群的防灾救援技术”；湖南省自然科学基金重点项目“重载铁路隧道高载荷重大火灾动力学特性及控制方法研究”、国家自然科学基金面上项目“隧道内易燃液体液气两相耦合爆燃机理及火焰传播特性研究”等一系列课题，主要研究隧道高热释放速率、强变热流火灾、回燃及爆燃机理等关键问题。



三、已开展研究工作及成果

(一) 隧道火灾蔓延规律及防治机理



中南大学隧道火灾模型实验台

模型隧道实验现场

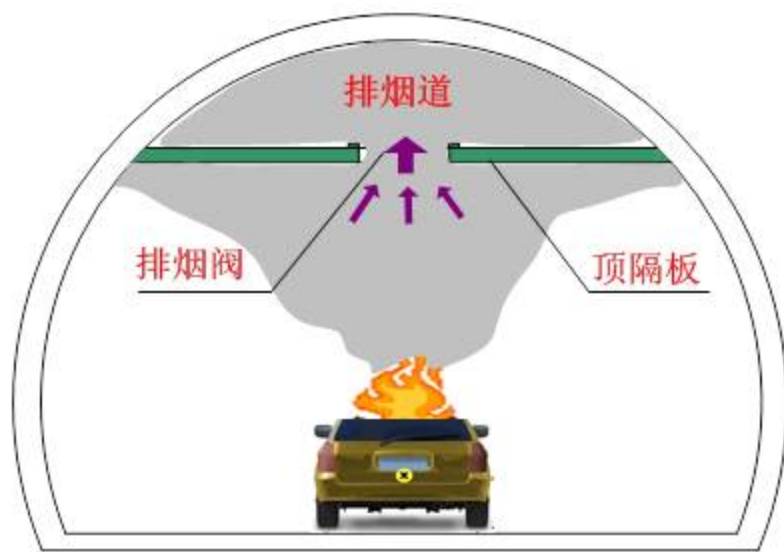


（二）隧道独立排烟道顶隔板结构耐火特性研究

（1）独立排烟道集中排烟模式下**排烟道顶隔板结构**，是一种新的结构形式，国内外皆**没有防火设计标准**；

（2）排烟道顶隔板结构在隧道火灾高温下的**灾变特性以及耐火性能**关键技术参数**缺乏系统的研究**；

（3）该结构形式**能否安全应用于**特长公路隧道火灾下的**通风排烟迫切需要得到验证**。



独立排烟道集中排烟系统横断面图

(二) 隧道独立排烟道顶隔板结构耐火特性研究

排烟道牛腿抗火性能试验研究



顶格板火灾测试实验

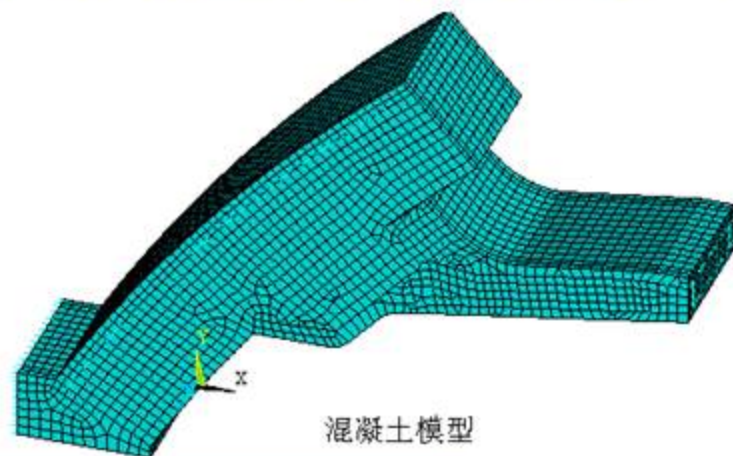


顶格板与牛腿实验

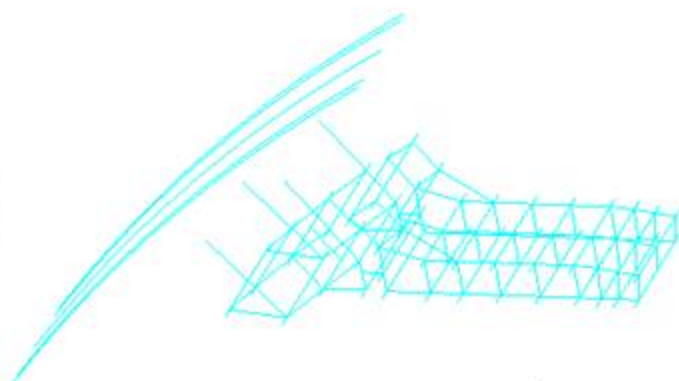
排烟道牛腿抗火性能试验研究



排烟道牛腿抗火有限元分析

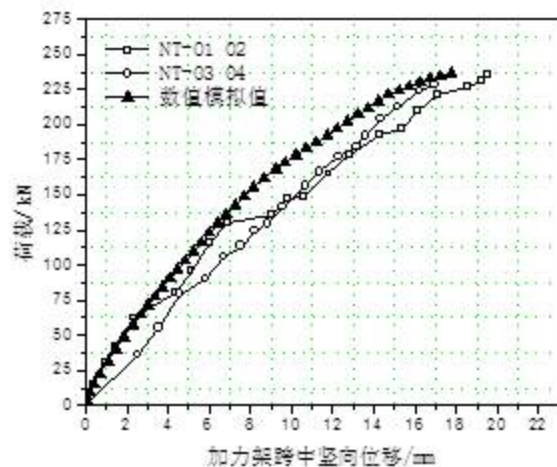


混凝土模型

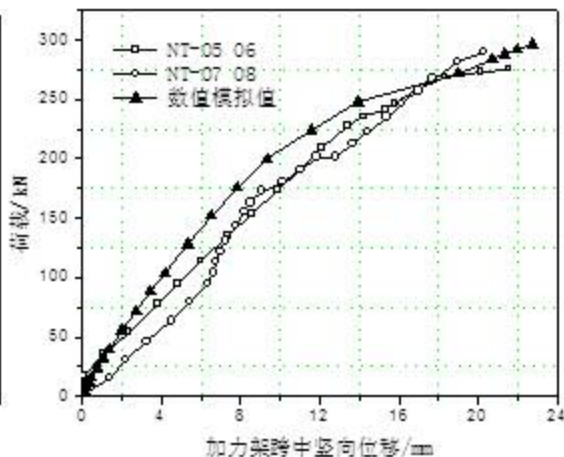


钢筋模型

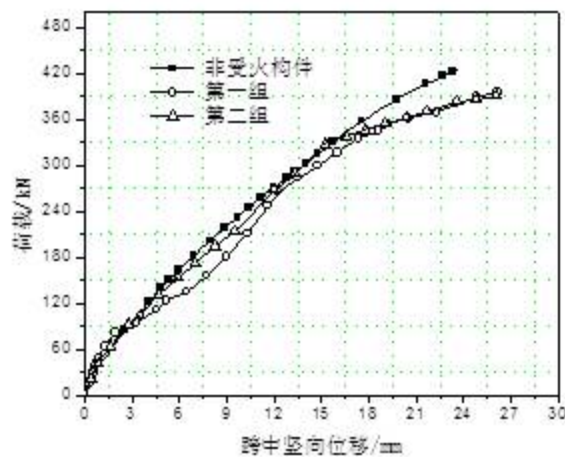
模拟结果与试验结果对比



无防火涂料构件



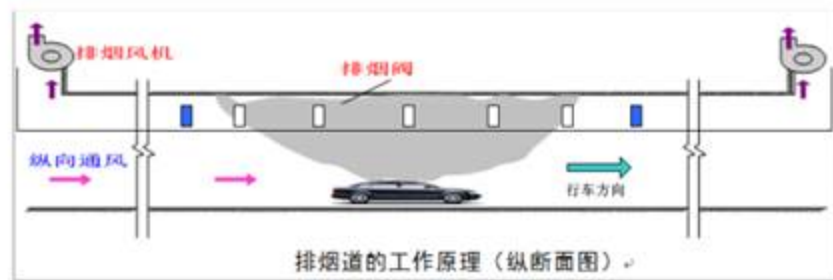
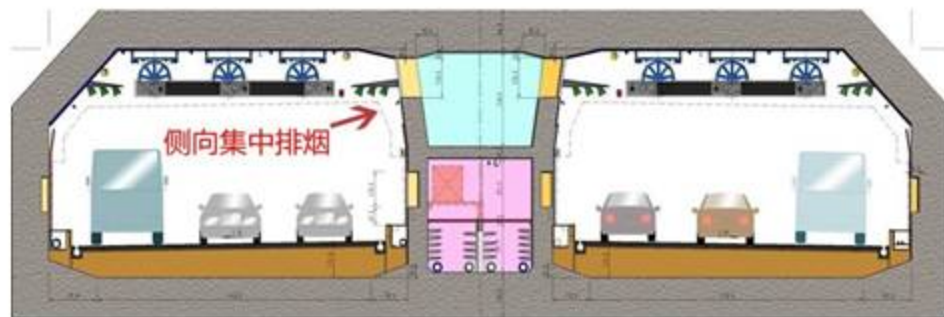
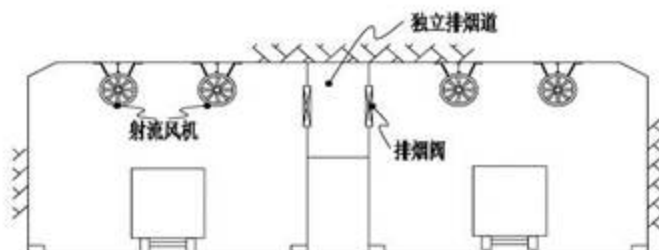
有防火涂料构件



非受火构件

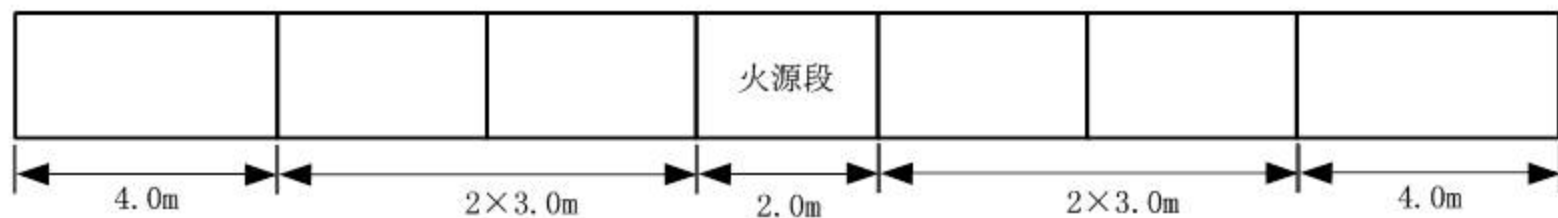
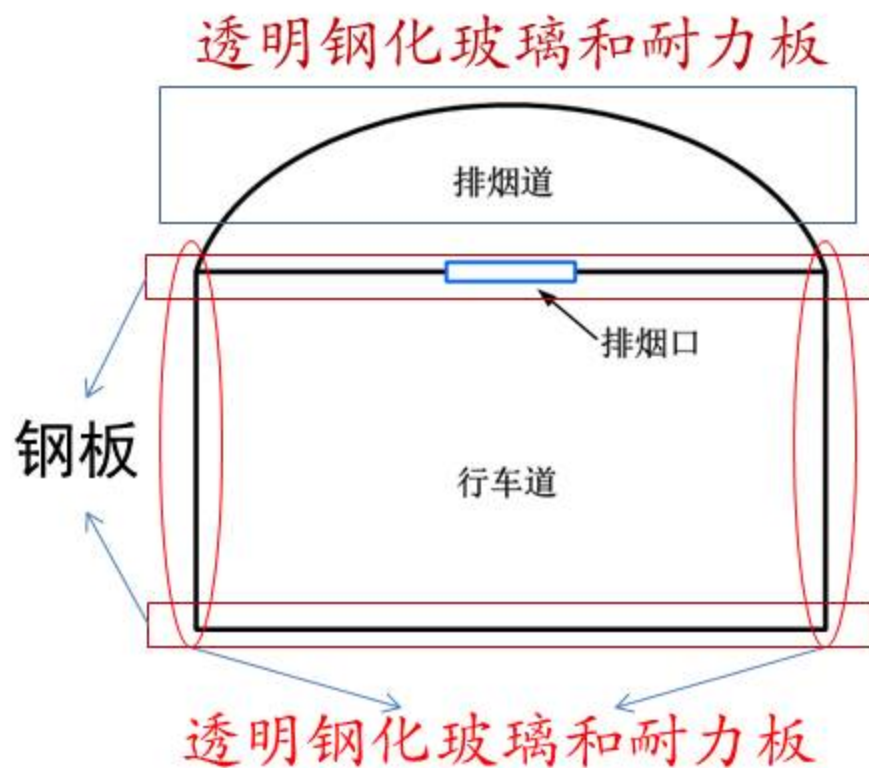
(三) 港珠澳大桥海底隧道烟气蔓延

- 侧向集中排烟模式下烟气控制关键技术参数研究
- 隧道不同区段纵向通风所需临界风速
- 隧道不同区段烟气控制组织模式研究

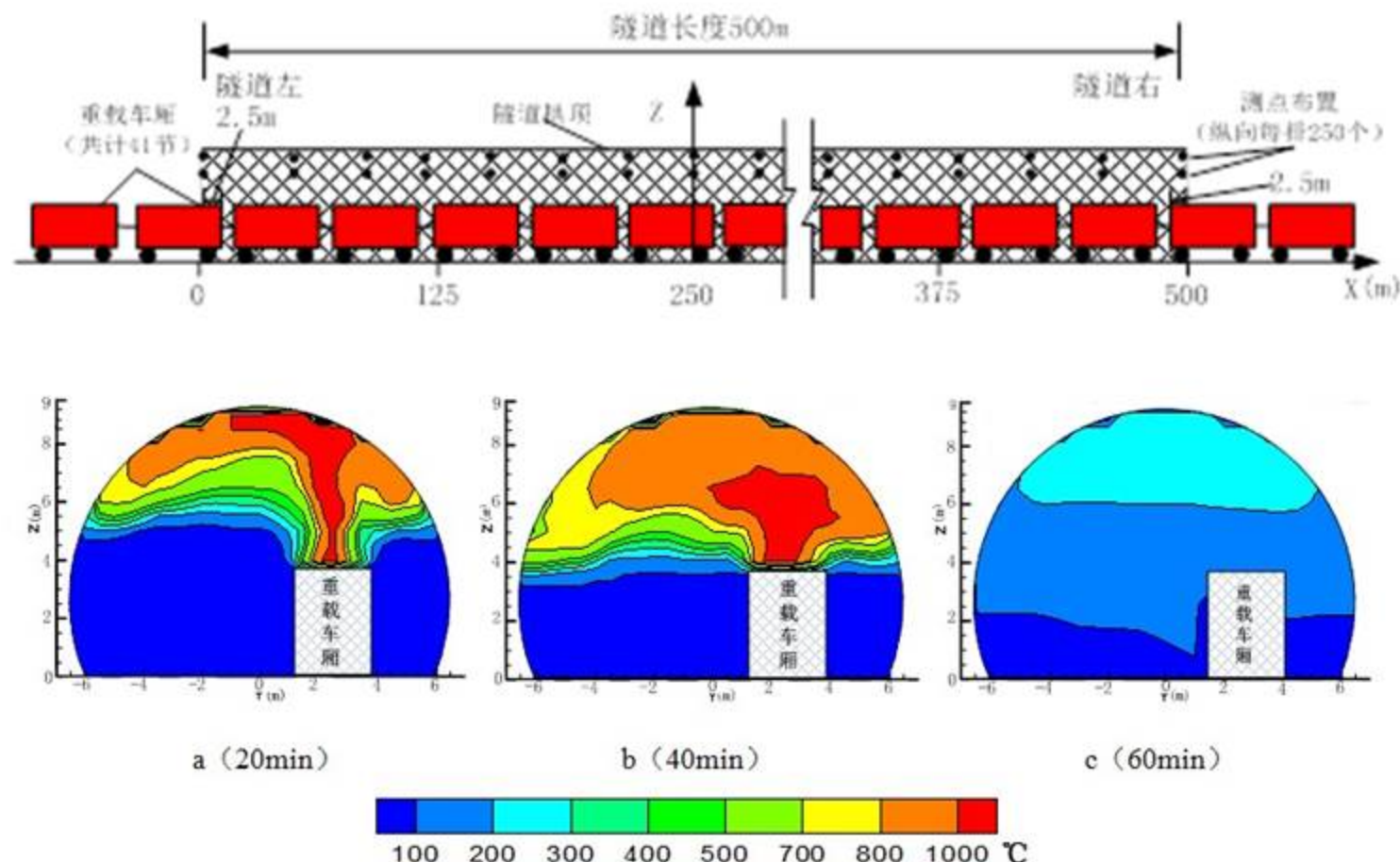


(四) 地铁隧道火灾通风排烟模型试验研究

➤ 隧道试验模型建立

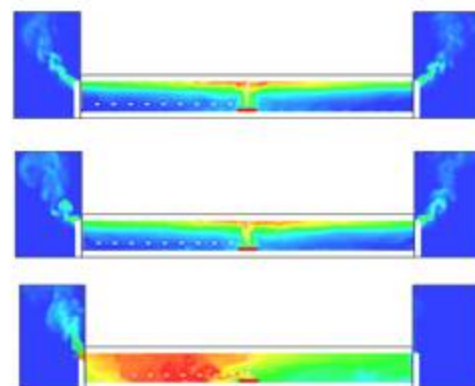
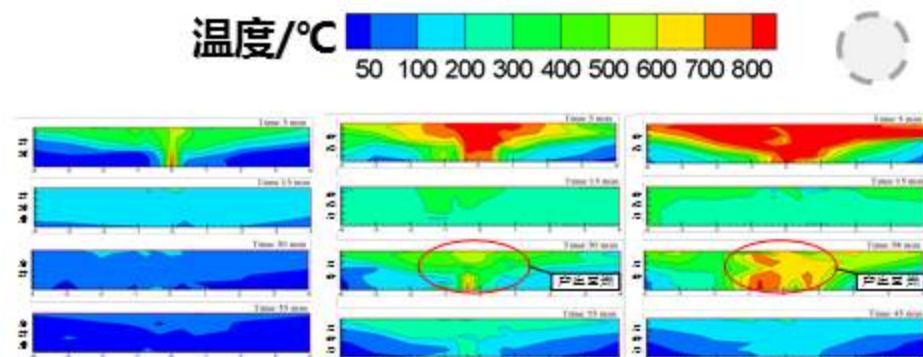


(五) 高密度集中可燃物条件下隧道火灾发生机理与蔓延规律

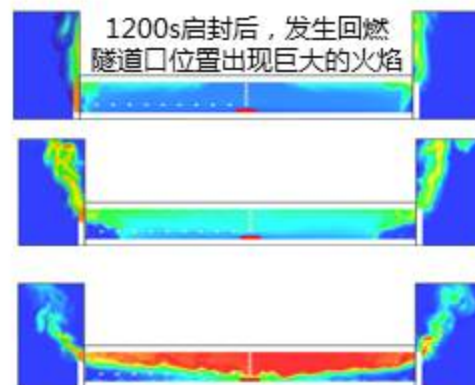


不同时刻隧道横断面(x=250m)温度分布云图

(六) 隧道火灾封洞窒息灭火过程中回燃发生机理及临界条件研究



900s时隧道口封堵窒息，隧道内火焰熄灭，仍存在高温可燃气体

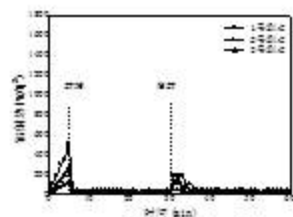
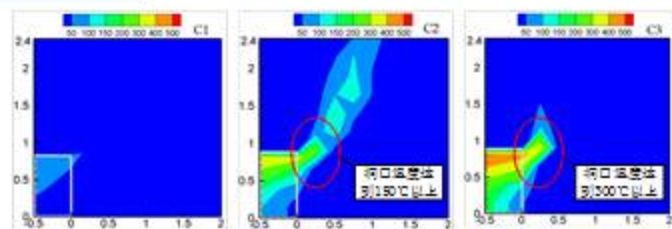


1200s启封后，发生回燃
隧道口位置出现巨大的火焰

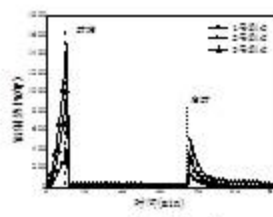
一个油盘

两个油盘

三个油盘



2个油盘

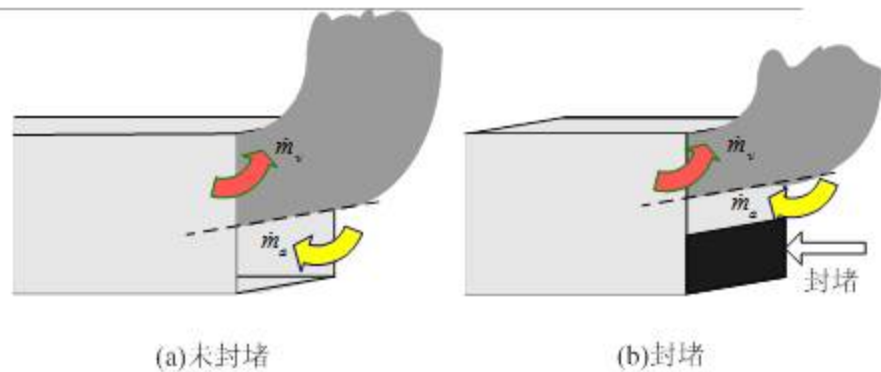


3个油盘

(七) 隧道内注水冷却烟气温度计算模型研究

- 基于隧道内能量守恒：

$$\dot{Q}_C = \dot{Q}_W + \dot{Q}_R + \dot{Q}_L + \dot{Q}_G$$



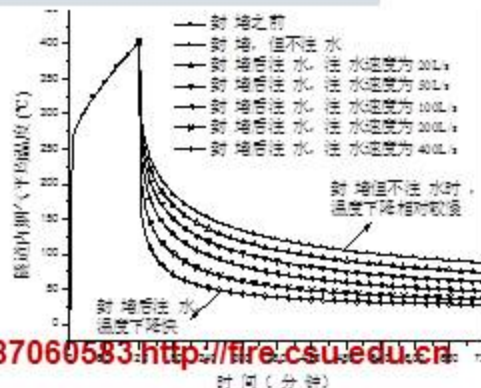
- 通过理论分析，建立了封堵后隧道内平均烟气温度的计算公式：

重载铁路隧道断面烟气溢流示意图

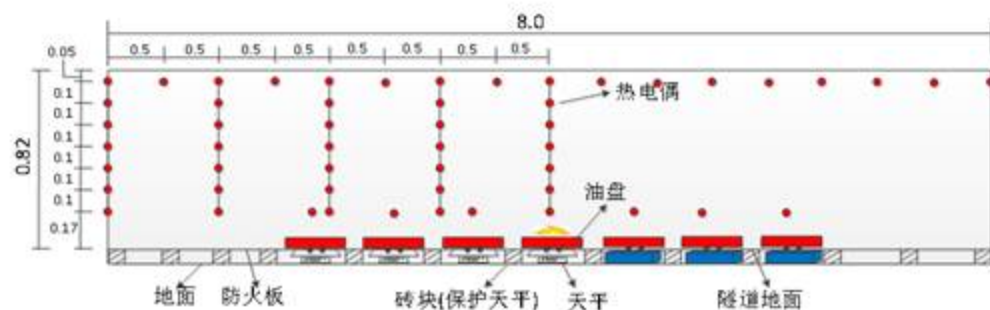
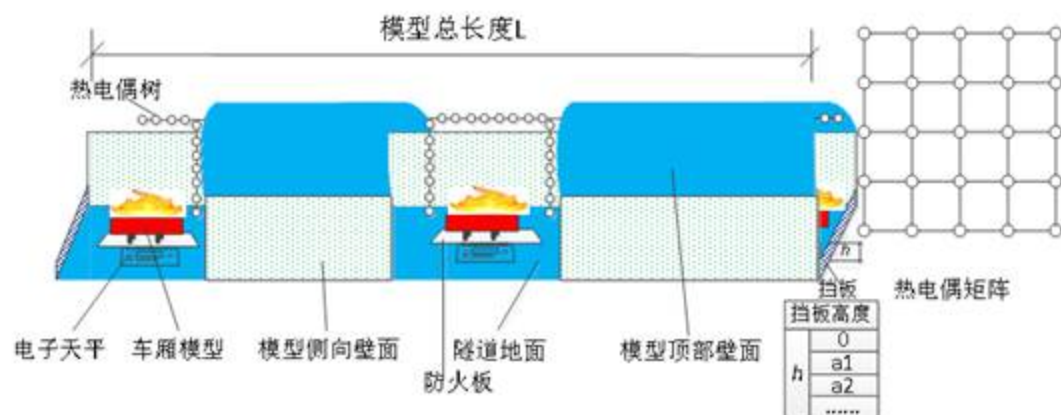
$$c_p m_u \frac{dT}{dt} = \frac{2}{3C} \Delta H_c C_d (1 - \beta) A_w \sqrt{H} \rho_0 \sqrt{\frac{2g(\rho_0 - \rho_g)}{\rho_0 (1 + (\rho_0 / \rho_{g,n})^{1/3})^3}} - A_T h (T_g - T_{ws}) \\ - A_T [1 - \exp(-KL)] \sigma (T_g^4 - T_{ws}^4) - A_w (1 - \beta) [1 - \exp(-KL)] \sigma (T_g^4 - T_0^4) \\ - \frac{2}{3} c_p C_d (1 - \beta) A_w \sqrt{H} \rho_0 \sqrt{\frac{2g(\rho_0 - \rho_g)}{\rho_0 (1 + (\rho_0 / \rho_{g,n})^{1/3})^3}} (T_g - T_0)$$

- 建立了注水后，隧道内烟气平均温度变化的计算式：

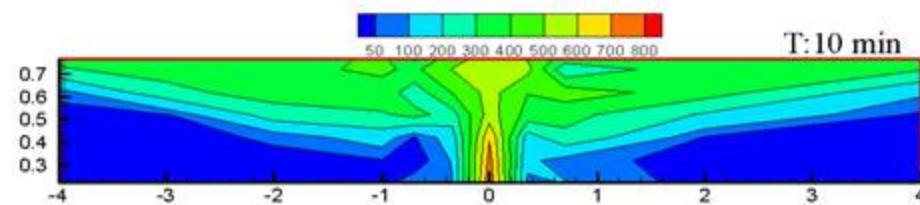
$$(c_p m_{s,n} + c_w m_{w,n}) \frac{dT}{dt} = -A_T [1 - \exp(-KL)] \sigma (T_g^4 - T_{ws}^4) - A_T h (T_g - T_{ws}) \\ - k_w \rho_w V_w [c_w (T_g - T_0) + q_w]$$



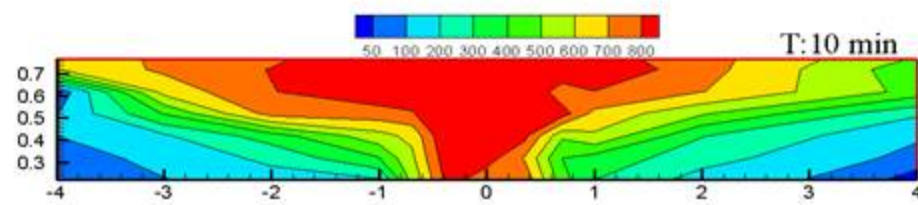
(八) 高荷载可燃物隧道火灾模型实验研究



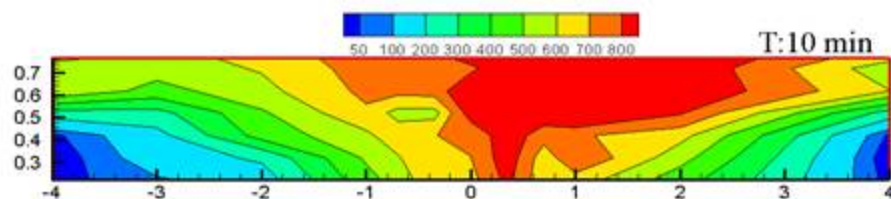
不同火源功率下，隧道火灾的实验研究



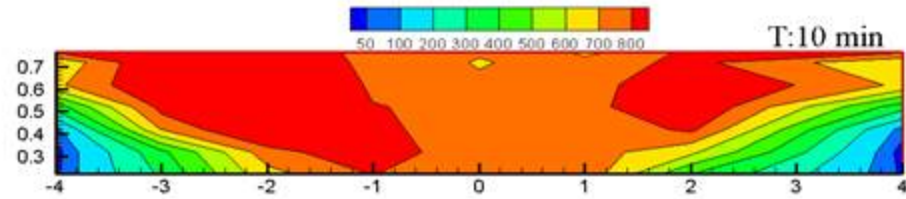
(a) 1个油盘



(b) 2个油盘



(c) 4个油盘



(d) 6个油盘

不同火源面积下隧道内温度在各时间点的分布云图（部分工况）

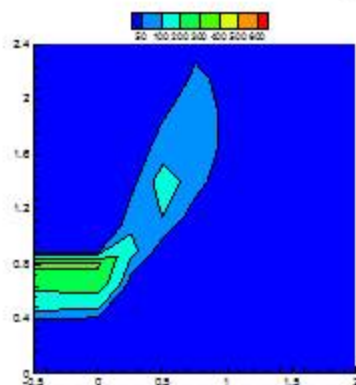
不同火源功率下，隧道火灾的实验研究



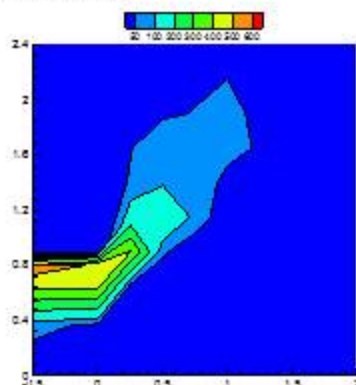
紊乱状态羽流



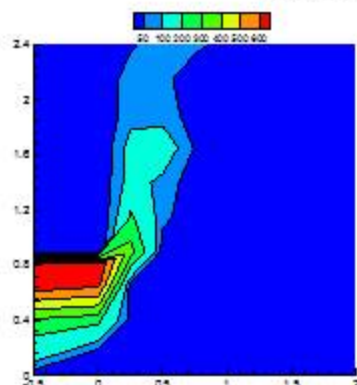
稳定状态羽流



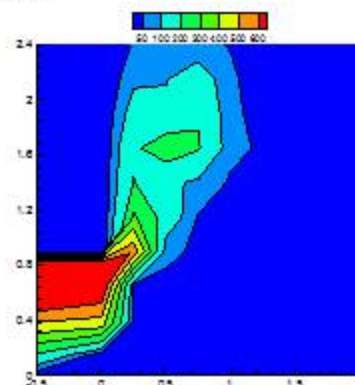
(a) 1个油盘



(b) 2个油盘



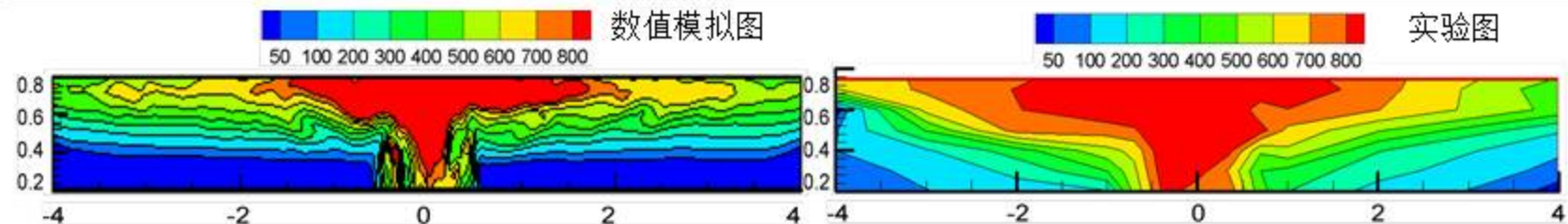
(c) 4个油盘



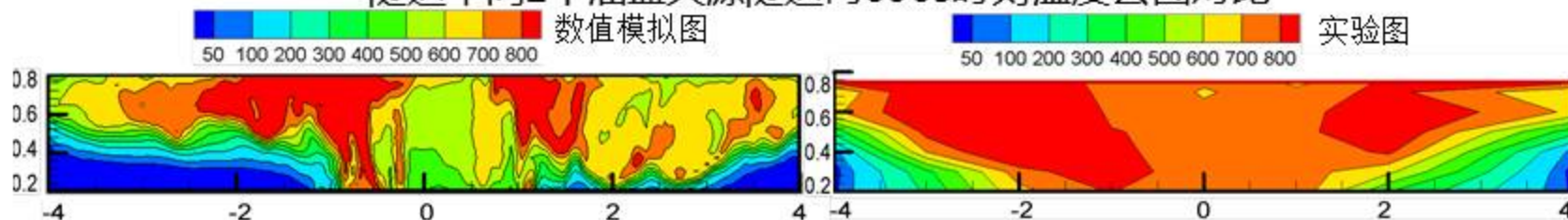
(d) 6个油盘

不同火源面积下隧道洞口处火羽流分布（部分工况）

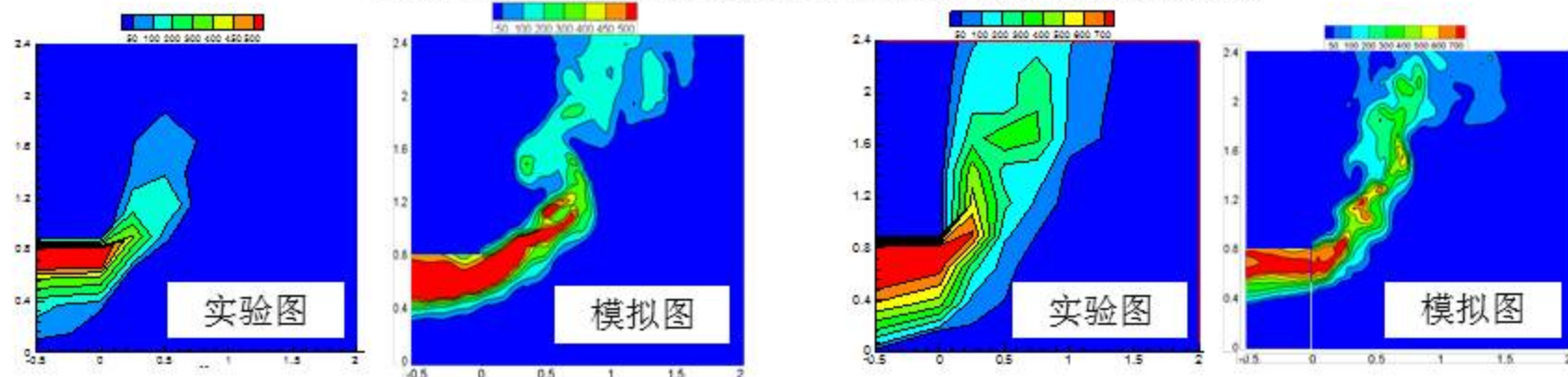
不同火源功率下，隧道火灾的实验研究



隧道中间2个油盘火源隧道内600s时刻温度云图对比



隧道中间6个油盘火源隧道内600s时刻温度云图对比

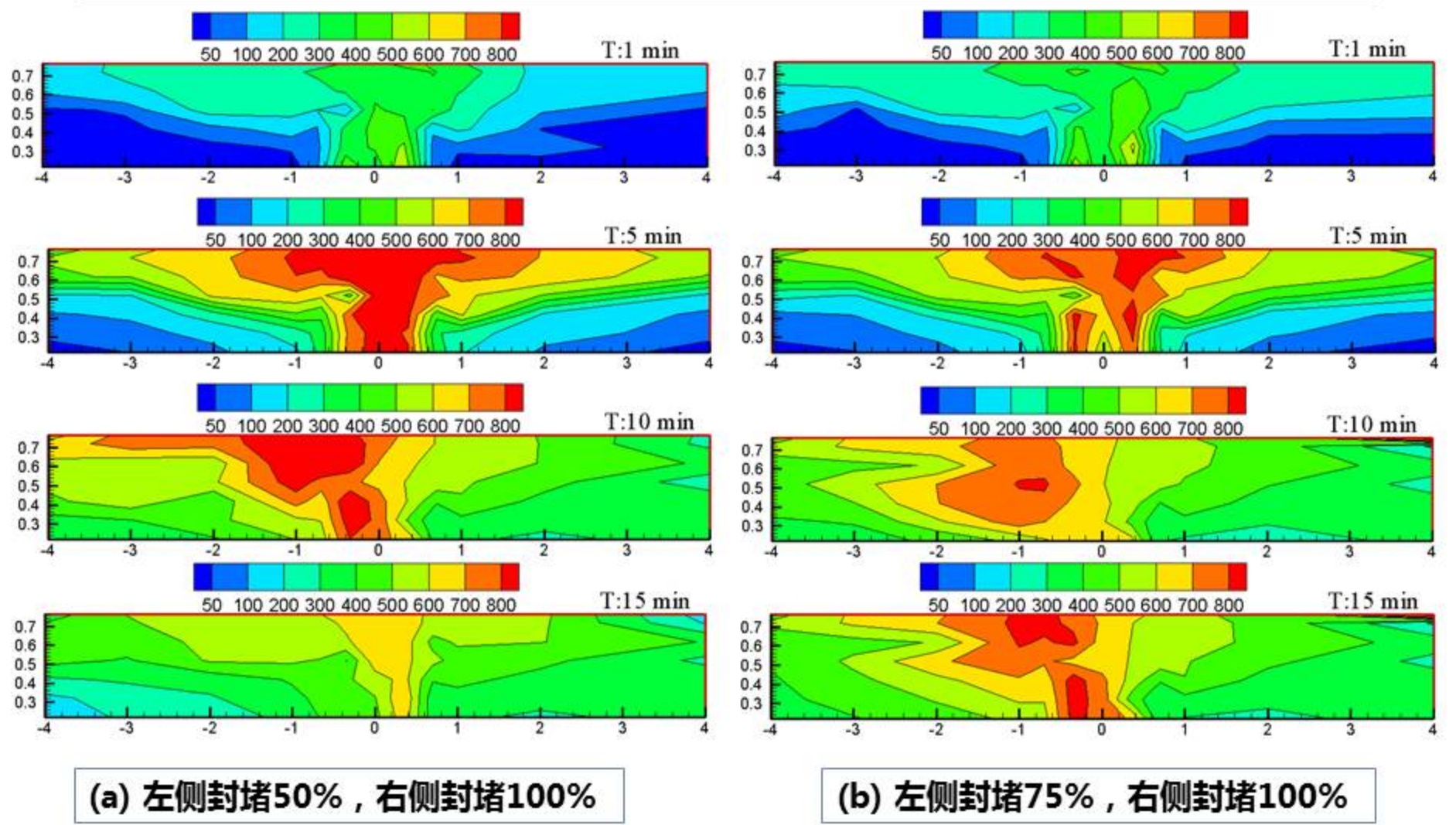


2个油盘时洞口火羽流图（540s）

6个油盘时洞口火羽流图（540s）

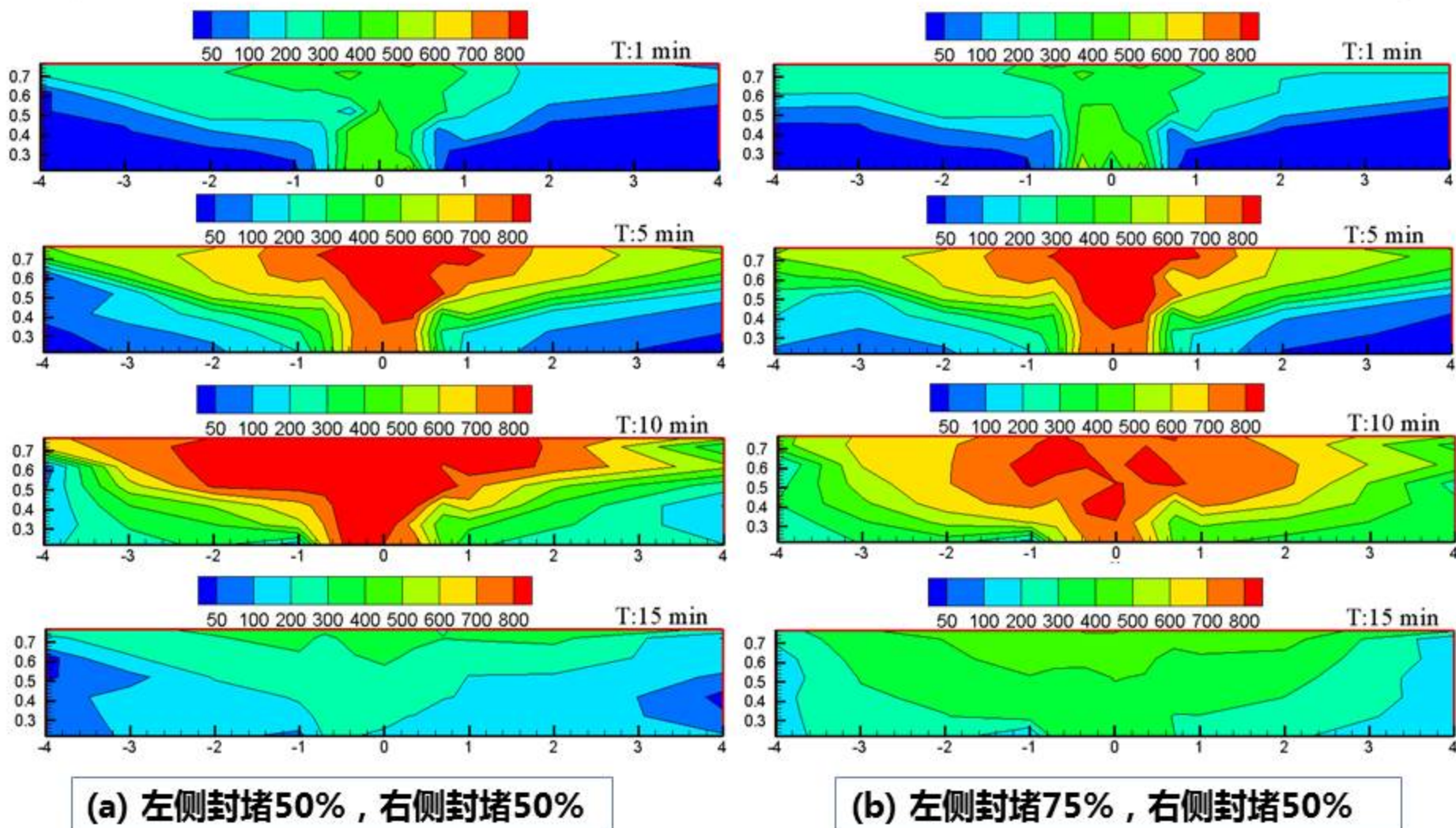
数值模拟与实验结果对比（部分工况）

隧道口非对称封堵过程模型实验研究



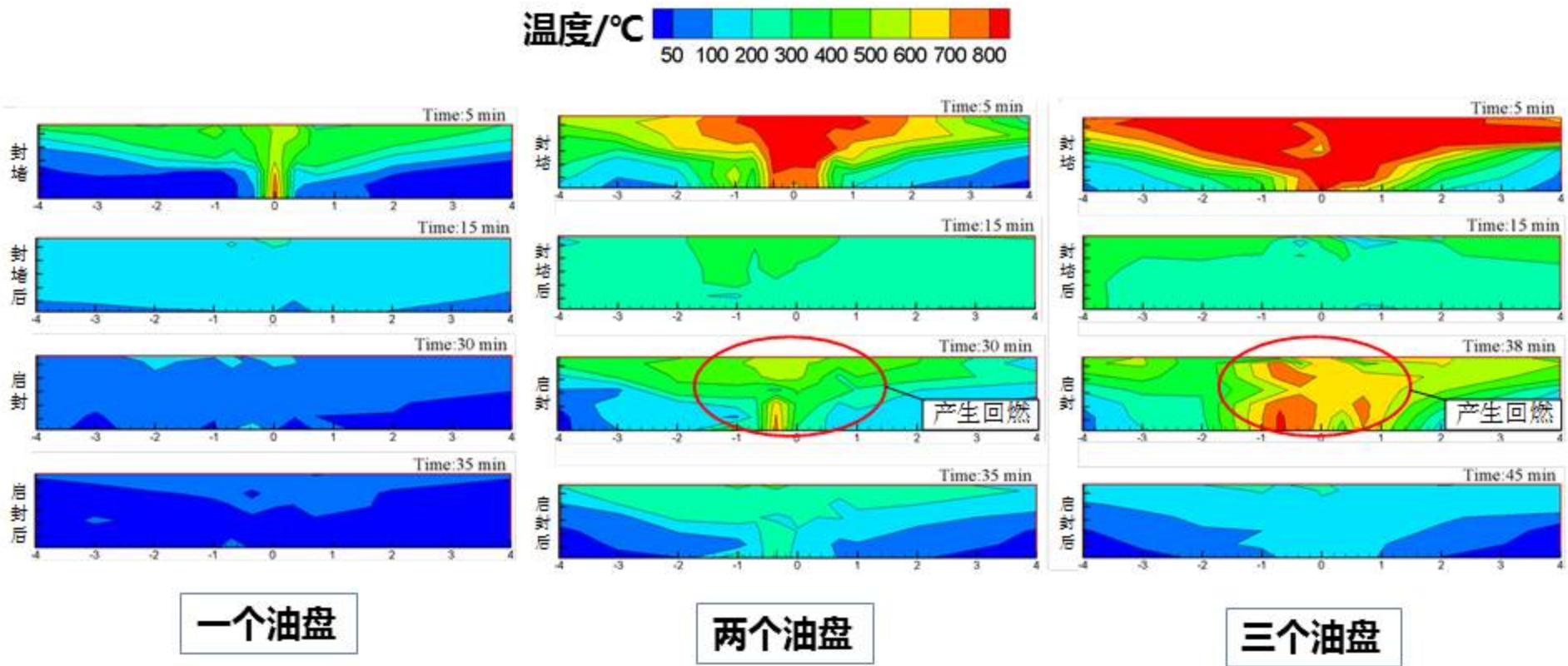
非对称封堵过程隧道内的温度场分布图（2个油盘）

隧道口非对称封堵过程模型实验研究



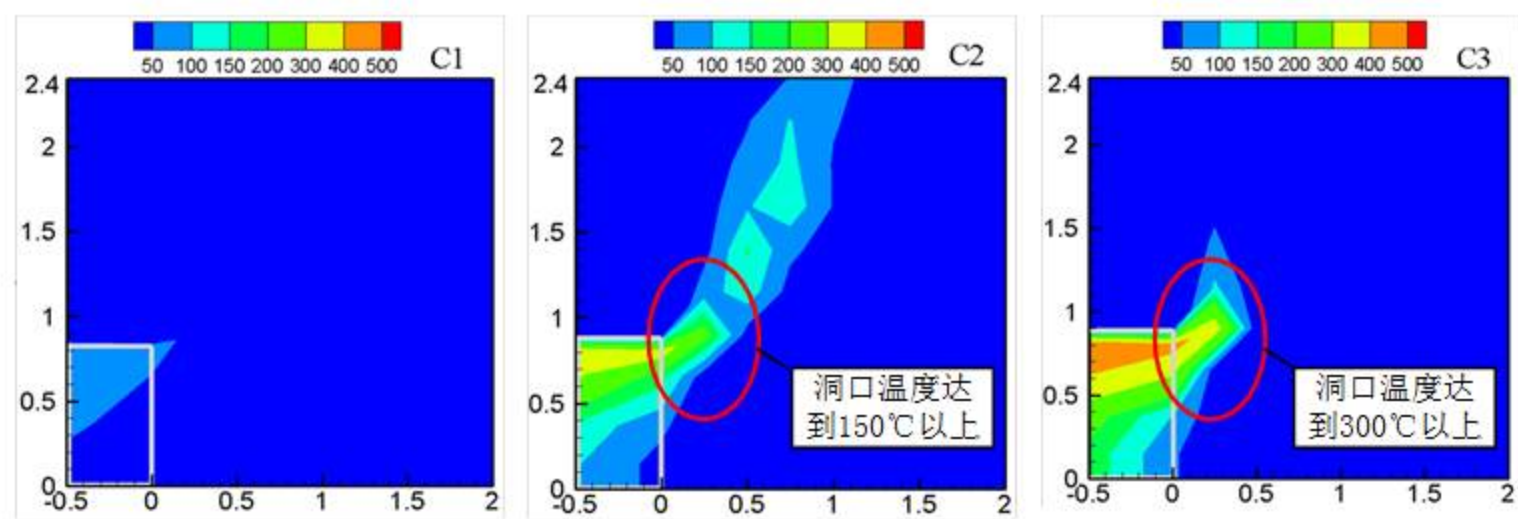
对称封堵过程隧道内的温度场分布图（2个油盘）

重载铁路隧道回燃实验研究

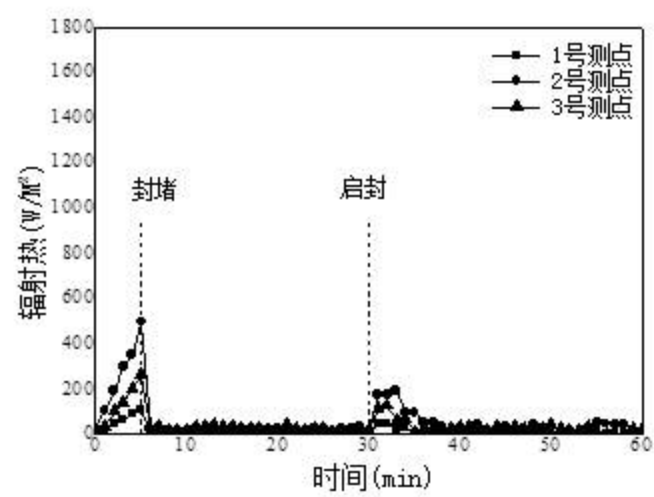


不同火源面积下不同阶段隧道内的温度分布云图

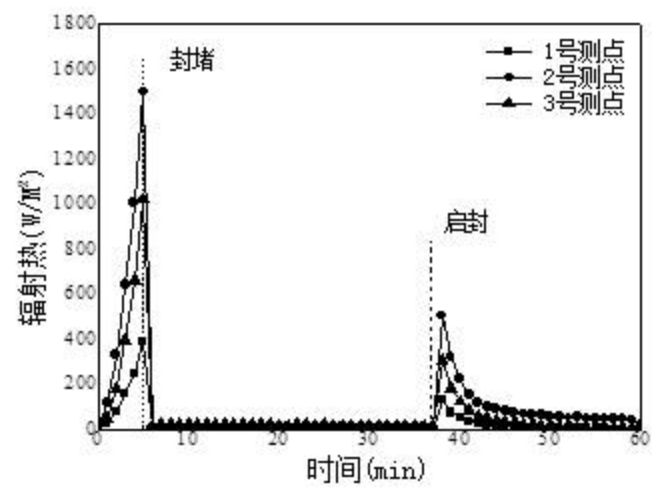
重载铁路隧道回燃实验研究



不同火源面积下启封时隧道洞口附近的温度分布云图



2个油盘

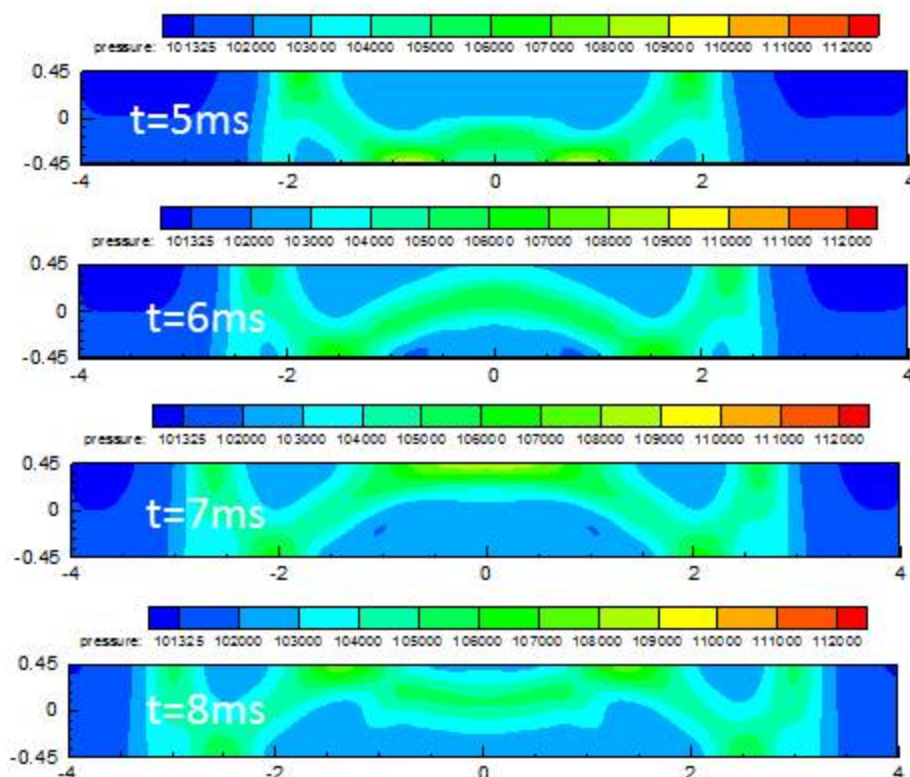
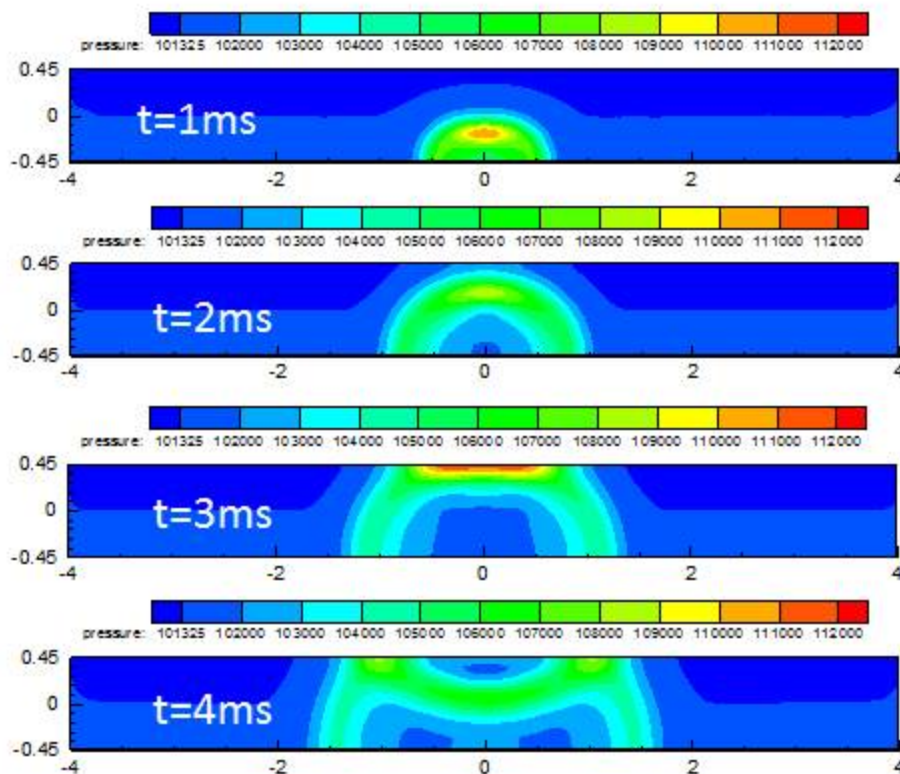


3个油盘

隧道洞口处热辐射

(九) 隧道内可燃蒸气爆燃机理及火焰传播特性模拟研究

甲醇蒸汽爆燃后冲击波传播规律 (前16ms)



四、关键基础科学问题及前沿

- 随着我国化工和石油工业的发展，石油、天然气以及其他危险化学品等物资的运输量也急剧增大，**长途油气及危化品运输经过隧道的概率也大大增加**，这也为灾害防治带来了新问题。特别地，由于运输的可燃气体和易挥发液体的泄漏、车辆追尾等原因，**隧道内爆燃事故频发**。近二十年来，我国隧道中发生了多次重大的油罐车爆燃事故造成了巨大的人员伤亡和经济损失。**特别的，2011年以来，国内隧道内的大型爆燃事故就发生了16起，而2014年就已经发生了4起。**
- 隧道内爆燃导致的安全问题日益突出，研究在**隧道环境下爆燃的发生条件与特性**，对于保证隧道的安全运输及消防救援具有重大意义。

四、关键基础科学问题及前沿

- 隧道火灾动力学问题：隧道高度集中可燃物所引发的重大火灾热环境的形成特点及对周围结构的传热特性。
- 隧道爆燃问题：隧道环境下可燃气体爆燃、可燃液体液气两相耦合爆燃特性、机理及抑爆条件
- 隧道封堵窒息灭火过程中回燃事故发生问题：隧道火灾封堵窒息灭火过程中回燃发生机理、临界条件及抑制机制。
- 隧道结构安全问题：强变热流环境中热-力耦合作用下隧道结构失效及破坏的条件与模式。

谢谢！