

公路隧道火灾时的人员逃生研究

夏永旭¹ 周勇狄^{1,2} 王永东¹

(1 长安大学公路学院隧道工程安全研究所, 西安, 710061 2 广西桂能工程咨询有限公司, 南宁, 530023)

摘要: 火灾是公路隧道最为严重的灾害之一。分析了克拉尼提出的高温条件下人员逃生公式, 结合公路隧道火灾时的人员逃生情况, 对克拉尼公式进行了修正。采用有限元数值模拟方法, 详细地研究了典型隧道结构段在不同环境风速、不同火灾规模时隧道内的温度场, 以修正后的隧道火灾人员逃生公式为判别条件, 给出了隧道内人员的可能逃生的位置和消防救援的安全位置。所得研究结果对公路隧道灭火救灾预案的编制提供了重要的技术支持。

关键词: 隧道火灾, 人员逃生, 判断条件, 消防救援, 安全位置。

1. 前言

随着交通事业的发展, 车流密度的增长和行车速度的提高, 装有各种可燃物质车辆通过隧道数量和频率的增长, 隧道火灾发生的概率呈上升趋势。据日本全国统计, 每年公路隧道发生火灾事故在 4000~5000 起, 居所有灾害事故之首。1999 年法国及意大利的勃朗峰隧道火灾、奥地利的陶恩隧道火灾以及 2001 年的瑞士圣哥答隧道火灾更是令世界震惊。公路隧道内一旦发生火灾, 往往造成灾难性事故, 损失惨重。因此, 有关公路隧道火灾与逃生研究已经成为长大隧道设计及运营管理亟需解决的关键问题之一。

2. 隧道火灾时的逃生条件

2.1 克拉尼 (Cranee) 公式

对于健康的着装成年男子, 克拉尼 (Cranee) 推荐了在高温环境中其极限忍受温度与时间的关系式为^[1]

$$t = \frac{4.1 \times 10^8}{\left(\frac{T - B_2}{B_1}\right)^{3.61}} \quad (1)$$

式中, t —高温环境下的极限忍受时间 (min); T —空气温度 (°C); B_1 —常数 (一般取 1.0); B_2 —常数 (一般取 0)。此外, 该公式没有考虑空气湿度的影响, 当湿度增大时, 人的极限忍受时间降低。因为水蒸气是燃烧产物之一, 火灾烟气的湿度较大是必然的。由于人耐高温环境的能力差异很大, 在应用该公式时, 应考虑一个安全系数, 安全系数可设为 0.8。此时, 式 (1) 可表示为:

$$t = \frac{3.22 \times 10^8}{T^{3.61}} \quad (2)$$

根据式 (2), 可得出人员忍受时间与温度的关系图 1。我们把图中的曲线称之为“死亡曲线”。从图可以看出, 如果隧道发生火灾时, 当隧道内某位置的温度场随时间变化值始终位于极限忍受

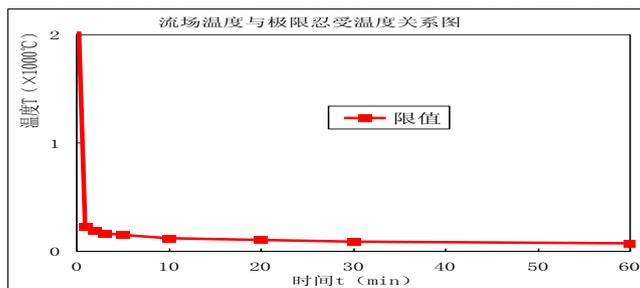


图 1 人员忍受时间与温度的关系图

温度曲线的下方，那么该位置将是安全的，当温度变化值位于曲线上方时，为死亡区域。

2.2 对克拉尼 (Crane) 公式的修正

仔细分析图 1 可以知道，对于公路隧道火灾时的人员逃生而言，假设某一时刻某人所处地点的温度值即使落在于死亡曲线上，但并不意味此人就不能生存。因为图 1 的极限忍受时间是指人在这种温度下能坚持的时间，而隧道内人员在逃生过程中并没有一直都处在该温度之中。显然，隧道内的温度曲线与死亡曲线的交点值不能作为隧道内人员能够安全逃生与否的临界值。

为了解决这个矛盾，我们必须对公式 (2) 进行修改。如果隧道的火灾发生在第 i 分钟 (取当天的 00:00:00 为 0 分钟)，取隧道内所有人员的逃生反应时间为 1 分钟，假设 $i+1$ 分钟后，在隧道内的 L_1 处某人开始准备逃生到 L_n 处。而在根据公式 (2) 他在 L_1 、 L_2 、 L_3 …… L_n 各处所能忍受的时间分别为 t_1 、 t_2 、 t_3 …… t_n ，如果我们将每段的长度取的足够小，再将此人逃生过程在不同位置所能忍受时间 t_1 、 t_2 、 t_3 …… t_n 的相邻两个时间段求和平均，最后可以得到此人从 L_1 处通过 L_2 、 L_3 …… L_{n-1} ，逃到 L_n 处均的能够忍受时间为

$$\bar{t} = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} (t_i + t_{i+1}) \quad (3)$$

而其中的 t_i ($i=1, 2, 3$ …… n) 仍然通过公式 (2) 计算。

2.3 隧道火灾时人员逃生的条件

根据 T. J. Shields 等试验得知，当隧道内发生火灾时，75% 人员在听到火灾警报后的 15~40s 才开始移动^[2]。另外，人在隧道内的正常疏散速度为 1.5m/s，但在有烟气的情况下可能只有 1m/s^[3]。由于隧道火灾中的环境比一般建筑环境要恶劣，本文取人员逃生反应时间为 60s，逃生速度为 1m/s。

发生火灾时，隧道内的高温对人体具有较强的危害性。人处在高温环境中，先是口干舌燥，软弱无力，痛苦煎熬，同时思维活动受到强烈干扰、减慢，进而眩晕心乱，直到昏迷休克猝然倒下。文献^[4, 5]曾给出了高温下人能够忍受的时间表 1。这里我们根据式 (2)，可以得出人员忍受时间与温度的关系，如表 2 所示。

本文将式 (2)、(3)、图 1 和表 2 作为隧道火灾时人员逃生的判断条件。

表 1 高温下人能够忍受的时间

| 温度 (°C) | 极限忍受时间 (min) |
|---------|--------------|
| 120 | 15 |
| 140 | 5 |
| 170 | 1 |
| 300-400 | 片刻也不能停留 |

表 2 高温下人能够忍受的时间

| 温度 (°C) | 极限忍受时间 (min) |
|---------|--------------|
| 120 | 10.05 |
| 140 | 5.76 |
| 170 | 2.86 |
| 300 | 0.37 |

3. 隧道模型以及火灾规模

3.1 隧道几何模型

以某公路隧道为计算，计算域为一标准的两个逃生通道之间的长度 700m，隧道横断面高 7.25m，宽 10.98m，如图 2 所示。将火源中心所在断面取为直角坐标系中的 $z=0$ 平面，设定火灾发生在该断面。取火区上游为 z 轴负方向， $z=L_1=-200$ m 为计算通风入口，沿 z 轴正方向，火区下 $z=L_2=500$ m 为出口边界条件。

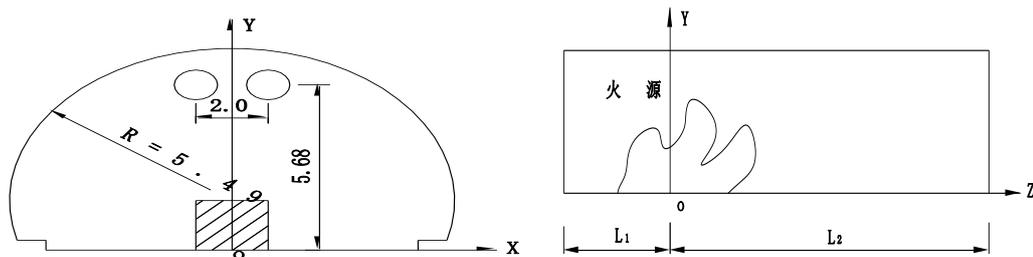


图 2 隧道横断面以及火源纵向布置图 (单位: m)

火源模型尺寸：长×宽×高=4.6m×1.7m×1.5m。

初始条件：隧道内空气密度：0.9kg/m³[5]；隧道内平均温度：20℃；壁面粗糙度：0.022m。

3.2 火灾规模

由于确定火灾规模时，要考虑的因素很多，而且大部分是非量化的，因此要全面的考虑所有因素，准确地预报或设定火灾规模是不容易的。目前国内外在研究公路隧道火灾时，各种车辆燃烧的火灾大小均由赫塞尔登提供的表3和瑞士及挪威有关部门提供的表4为参考[6]。

表3 赫塞尔登火灾规模

| 火源 | 产生热量 (MW) | 火灾规模 |
|----------|-----------|------|
| 汽车 (小客车) | 3 | 小型 |
| 货运汽车 | 10 | 中型 |
| 卡车或公共汽车 | 20 | 中型 |
| 泄漏汽油的油罐车 | 50~100 | 大型 |

表4 车辆类型与燃烧产生的热量

| 车辆类型 | 最高温度 (°C) | 最大热量释放率 (MW) |
|-----------|-----------|--------------|
| 轿车 | 400-500 | 3~5 |
| 公共汽车或有轨车辆 | 700-800 | 15~20 |
| 大货车或油罐车 | 1000-1200 | 50~100 |
| 火车车厢 | 800-900 | 15~20 |

根据火灾燃烧变化的特点，隧道火灾过程可分为初期、发展、稳定、衰减四个阶段。图3给出了不同车辆类型在隧道火灾时的最高温度随时间的变化过程的统计曲线，图4给出了目前通用的不同隧道温度火灾标准曲线。

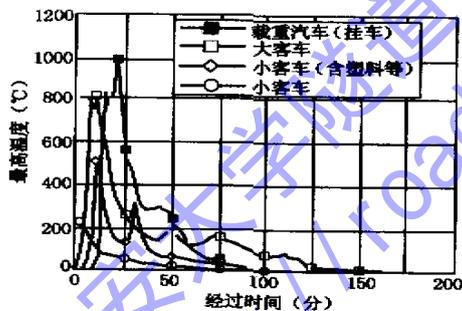


图3 不同车辆类型的火灾温度-时间统计曲线

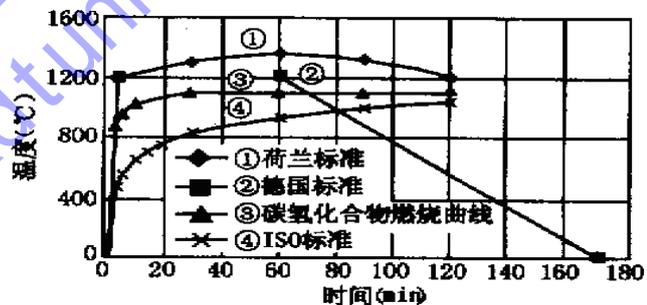


图4 公路隧道火灾温度标准曲线

根据表2、表3以及图3、图4，结合公路隧道的情况，本文分别模拟一辆小轿车着火（5MW）、一辆大卡车和两辆相撞起火（10MW）、三辆大卡车相撞发生火灾（30MW），燃烧时间维持60min，隧道入口风速分别为1m/s、2m/s、3m/s、4m/s、5m/s，出口相对压力为0Pa。

4. 模拟结果及分析

4.1 一辆小轿车燃烧（热释放率为5MW）

通过大量的数值模拟计算，可得出一辆小轿车着火时，隧道内不同位置、不同时刻的温度场和风速场。将模拟的结果与图1结合，就可以得到一辆小轿车着火时，隧道内流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图，如图5~图9。

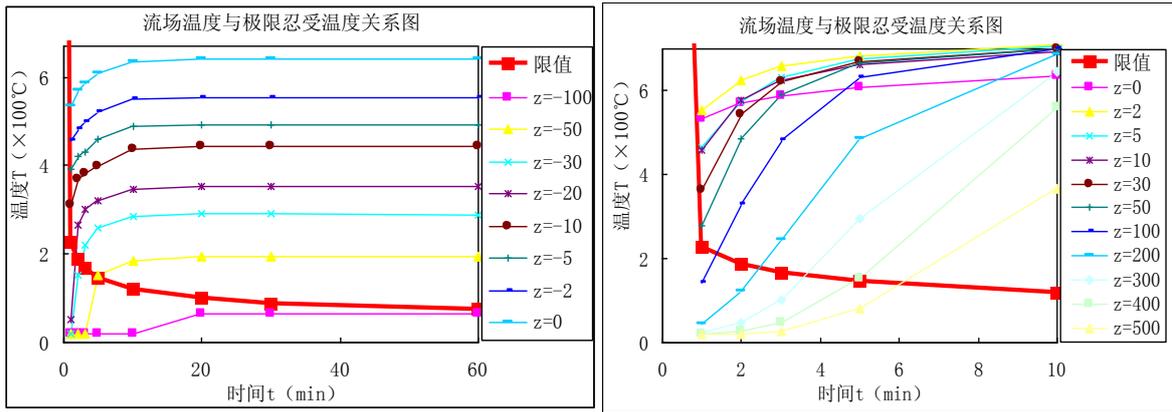


图5 $v=1\text{m/s}$, 隧道流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图

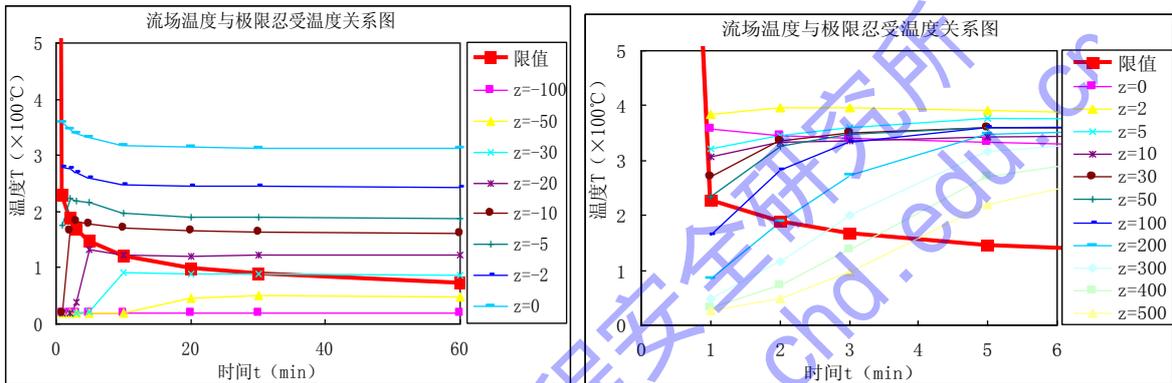


图6 $v=2\text{m/s}$, 隧道流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图

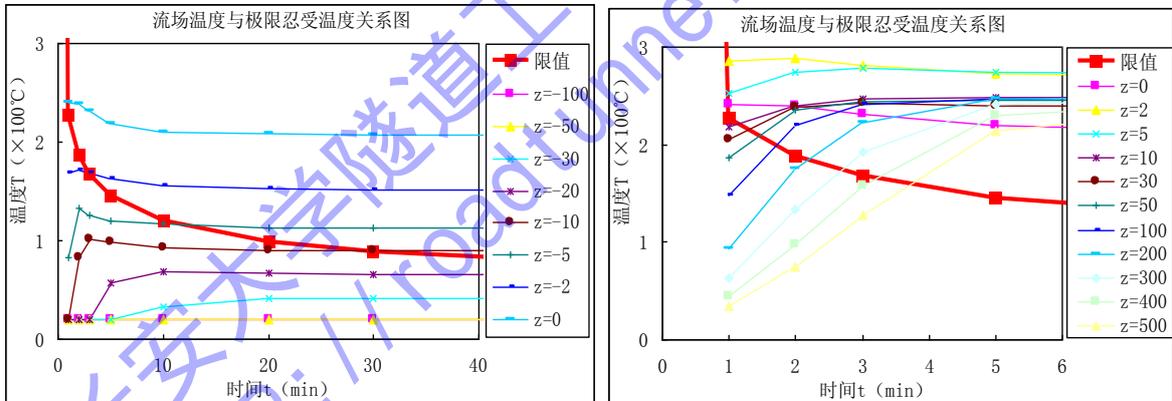


图7 $v=3\text{m/s}$, 隧道流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图

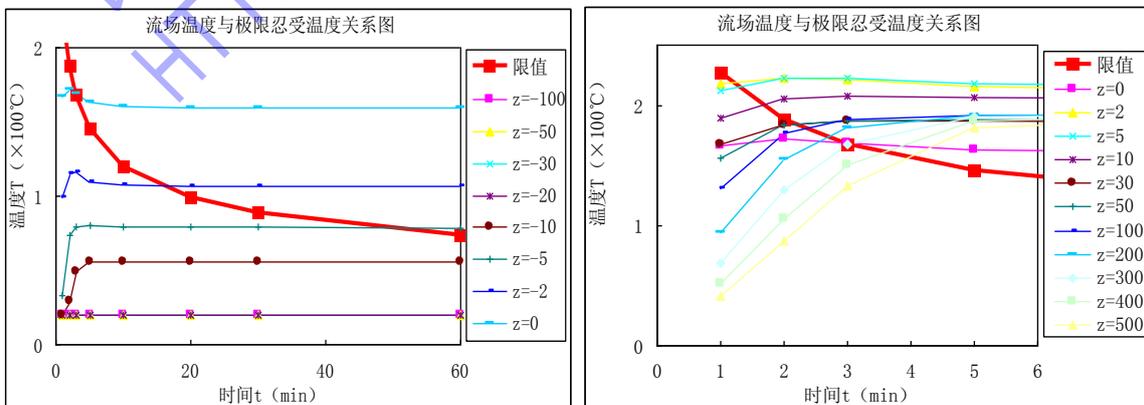


图8 $v=4\text{m/s}$, 隧道流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图

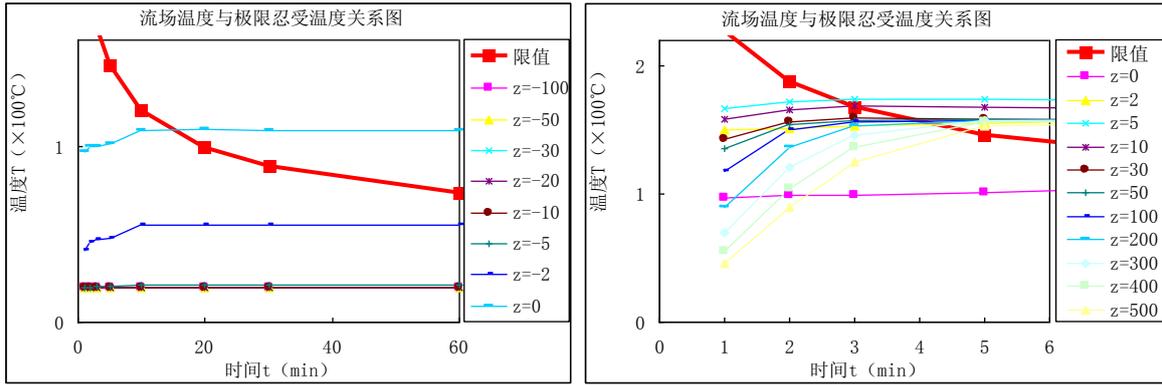


图9 $v=5\text{m/s}$, 隧道流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图

仔细分析图5~9, 我们可以得到不同隧道风速情况下, 隧道内人员得安全逃生和救援位置。表5给出了在火灾发生1min后, 火源上、下游有可能逃生的区域, 而火灾下游人员能够安全逃离的距离见表6, 其中黑体数字表示可以逃到到下一个逃生通道的人群。表7是不同风速下隧道内的消防救援安全位置和安全时间。表中3min、5min 分别表示火灾发生后的时间, 忍受时间表示消防人员在该救援位置能够持续的时间。

表5 1min后火灾上、下游人员有可能逃生的区域 (m)

| 位置 (m) \ 风速 (m/s) | v=1 | v=2 | v=3 | v=4 | v=5 |
|-------------------|------|-----|-----|-----|-----|
| 上游 | <-10 | <-2 | <0 | <0 | <0 |
| 下游 | >50 | >50 | >10 | >0 | >0 |

表6 1min后火灾下游人员可以逃离的距离 (m)

| 开始逃生位置 (m) \ 风速 (m/s) | v=1 | v=2 | v=3 | v=4 | v=5 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|
| Z=2 | | | | <200 | <300 |
| Z=5 | | | <100 | <200 | <300 |
| Z=10 | | | <100 | <200 | <300 |
| Z=30 | | | <100 | <200 | <300 |
| Z=50 | <100 | <100 | <200 | <300 | <400 |
| Z=100 | >500 | <200 | <300 | <400 | <500 |
| Z=200 | >500 | >500 | >500 | >500 | >500 |

表7 不同风速下的安全救援位置以及安全时间

| 对应项目 | | 风速 (m/s) | v=1 | v=2 | v=3 | v=4 | v=5 |
|----------------|--------|--------------|------|------|-------|-------|-----|
| 上游安全位置以及安全时间 | 3min 时 | 救援位置 z (m) | -30 | -10 | -5 | -5 | -2 |
| | | 忍受时间 (min) | 1.1 | 2.17 | 8.45 | 45.13 | >60 |
| | 5min 时 | 安全位置 z | -50 | -20 | -10 | -5 | -2 |
| | | 忍受时间 (min) | 4.38 | 7.2 | 20.03 | 45.29 | >60 |
| | | 绝对安全位置 z (m) | -100 | -50 | -20 | -10 | -2 |
| 下游安全逃生位置 z (m) | | | 100 | 200 | 200 | 200 | 200 |

4.2 一辆大卡车着火（热释放率为 10MW）

类似地可以得出了一辆大卡车着火时，隧道内流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图，如图 10~14 所示。表 8 给出了在不同隧道环境风速下，火灾发生 1min 后，火源上、下游有可能逃生的区域，而火灾下游人员能够安全逃离的距离见表 9，其中黑体数字表示可以逃到到下一个逃生通道人群。表 10 是不同风速下隧道内的消防救援安全位置和安全时间，表中 3min、5min 分别表示火灾发生后的时间，忍受时间表示消防人员在该救援位置能够持续的时间。

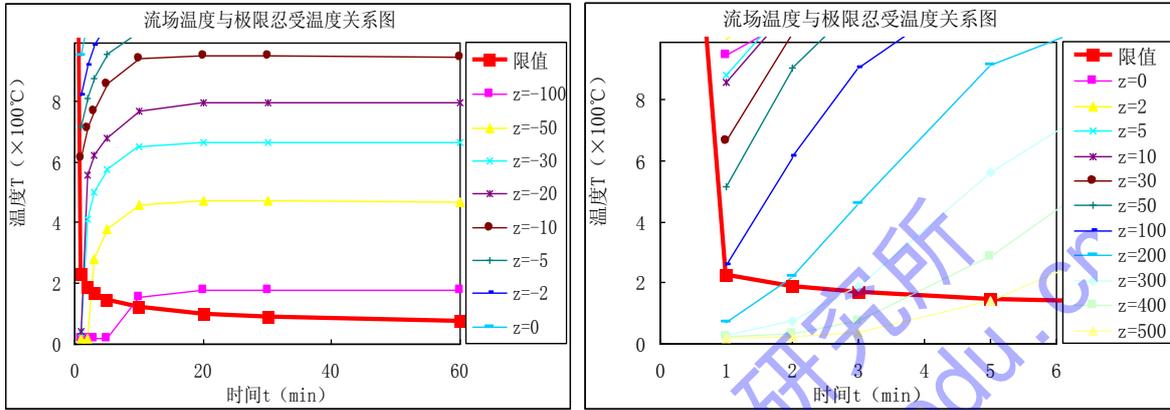


图 10 $v=1\text{m/s}$ ，隧道流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图

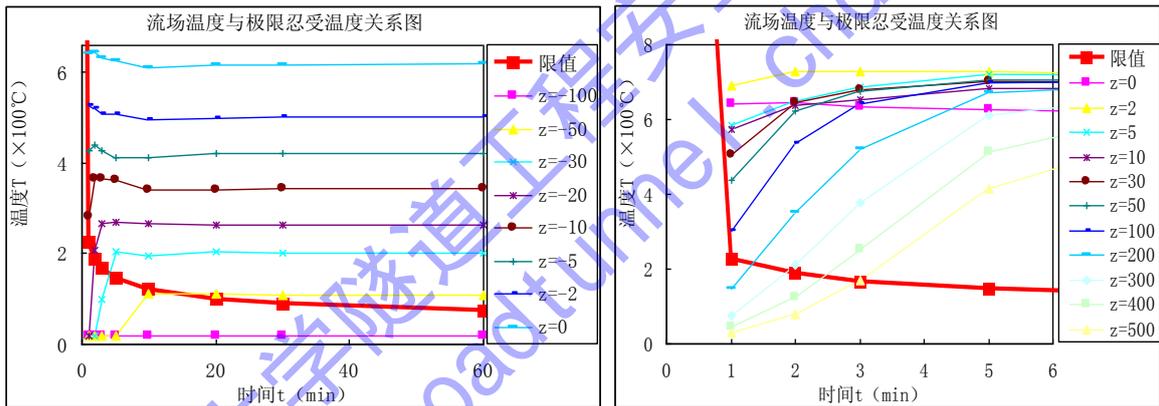


图 11 $v=2\text{m/s}$ ，隧道流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图

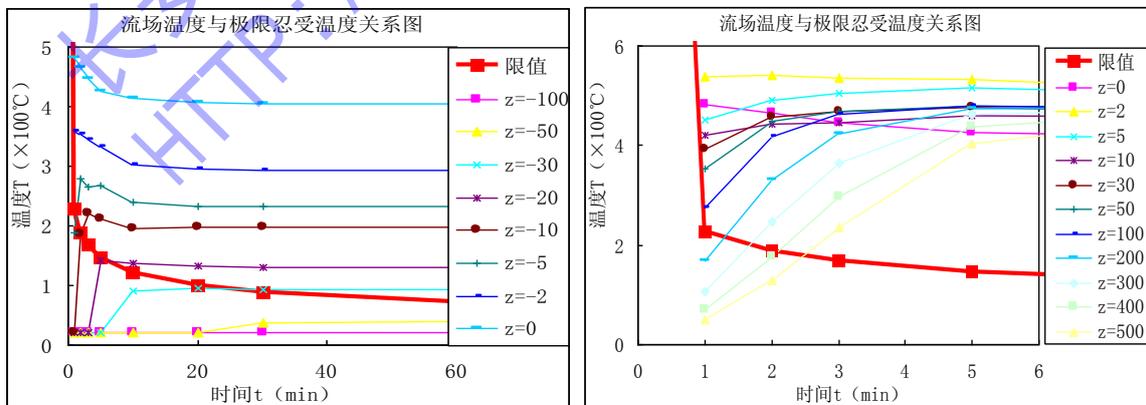


图 12 $v=3\text{m/s}$ ，隧道流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图

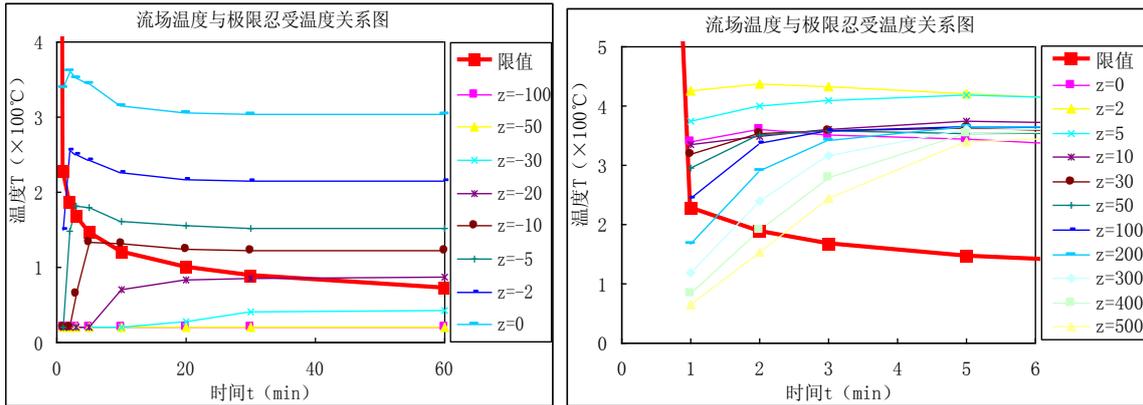


图 13 $v=4\text{m/s}$, 隧道流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图

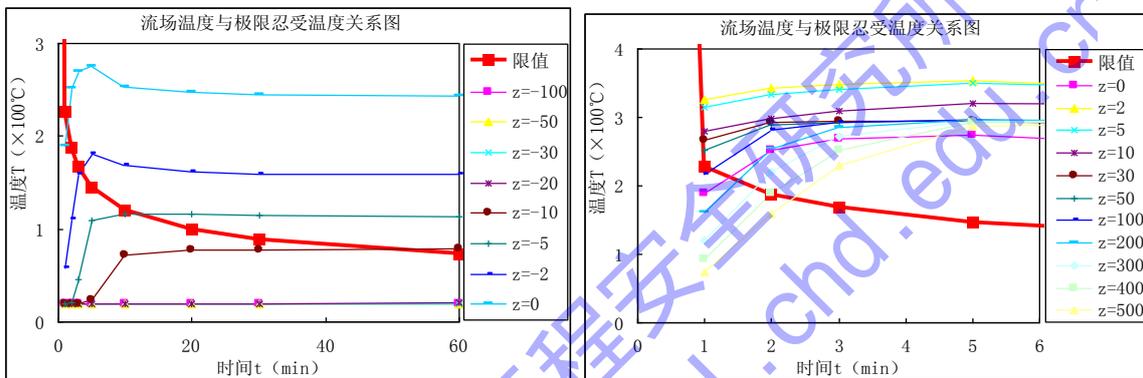


图 14 $v=5\text{m/s}$, 隧道流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图

表 8 1min 后火灾上、下游人员有可能逃生的区域 (m)

| 风速 (m/s) | 位置 (m) | | | | |
|----------|--------|------|------|------|-----|
| | v=1 | v=2 | v=3 | v=4 | v=5 |
| 上游 | <-10 | <-10 | <-2 | <0 | <0 |
| 下游 | >100 | >100 | >100 | >100 | >50 |

表 9 1min 后火灾下游人员可以逃离的距离 (m)

| 风速 (m/s) | v=1 | v=2 | v=3 | v=4 | v=5 |
|------------|------|------|------|------|------|
| 开始逃生位置 (m) | | | | | |
| Z=50 | | | | | <100 |
| Z=100 | <200 | <200 | <200 | <200 | <200 |
| Z=200 | >500 | <400 | <400 | <400 | <300 |
| Z=300 | >500 | >500 | >500 | >500 | >500 |

表 10 不同风速下的安全救援位置以及安全时间

| 风速 (m/s) | | v=1 | v=2 | v=3 | v=4 | v=5 | |
|--------------|--------|------------|------|-------|------|-------|--------|
| 对应项目 | | | | | | | |
| 上游安全位置以及安全时间 | 3min 时 | 救援位置 z (m) | -50 | -30 | -20 | -10 | -5 |
| | | 忍受时间 (min) | 0.46 | 20.87 | 5.47 | 91.53 | 313.17 |
| | 5min 时 | 救援位置 z (m) | -100 | -50 | -30 | -20 | -5 |

| | | | | | | |
|--|------------------|-------|------|-------|-------|-------|
| | 忍受时间 (min) | 8.91 | 18.1 | 26.39 | 72.01 | 14.03 |
| | 绝对安全位置 z | <-100 | -100 | -50 | -30 | -20 |
| | 下游安全逃生位置 z (m) | 200 | 300 | 300 | 300 | 300 |

4.3 二辆或者三辆大卡车相撞（热释放率为 30MW）

类似可得出了二辆或者三辆大卡车相撞着火时，隧道内流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图，如图 15~19 所示。表 11 给出了在不同隧道环境风速下，火灾发生 1min 后，火源上、下游有可能逃生的区域，而火灾下游人员能够安全逃离的距离见表 12，其中黑体数字表示可以逃到到下一个逃生通道人群。表 13 是不同风速下隧道内的消防救援安全位置和安全时间，表中 3min、5min 分别表示火灾发生后的时间，忍受时间表示消防人员在该救援位置能够持续的时间。

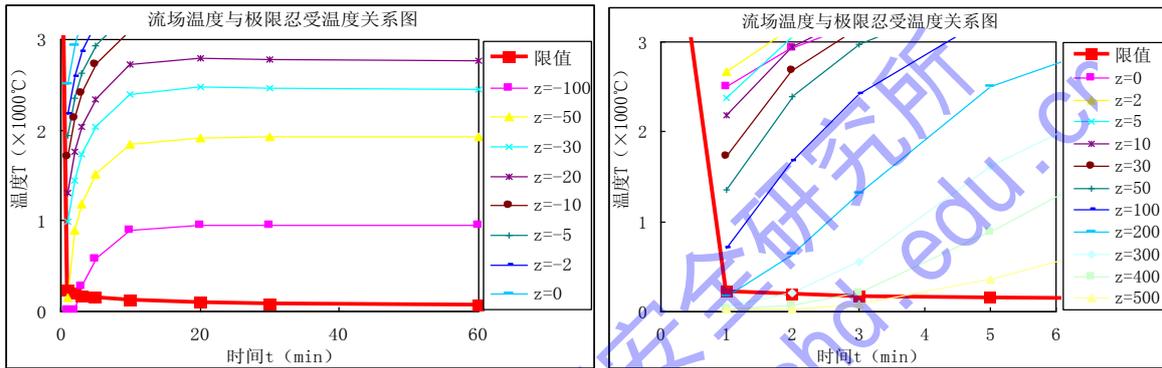


图 15 $v=1\text{m/s}$ ，隧道温度与逃生人员极限忍受温度关系图

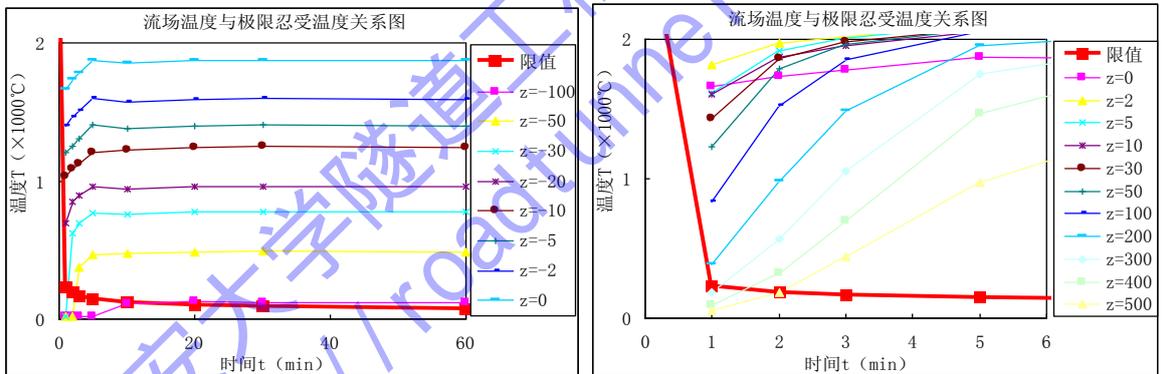


图 16 $v=2\text{m/s}$ ，隧道流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图

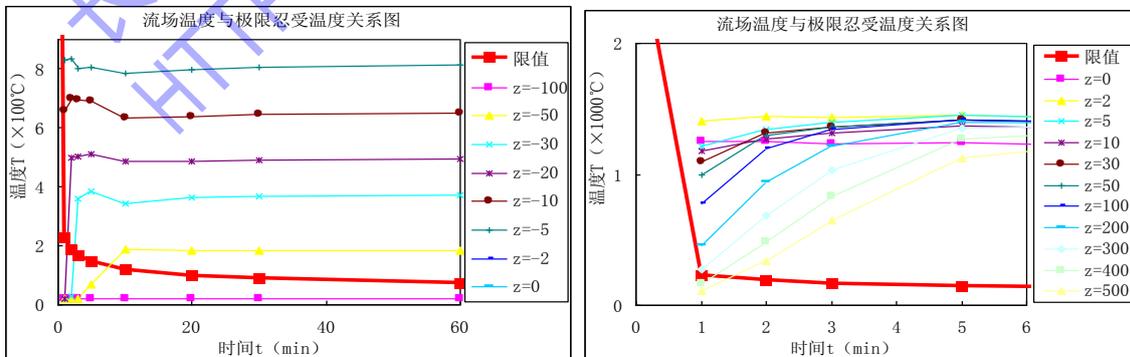


图 17 $v=3\text{m/s}$ ，隧道流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图

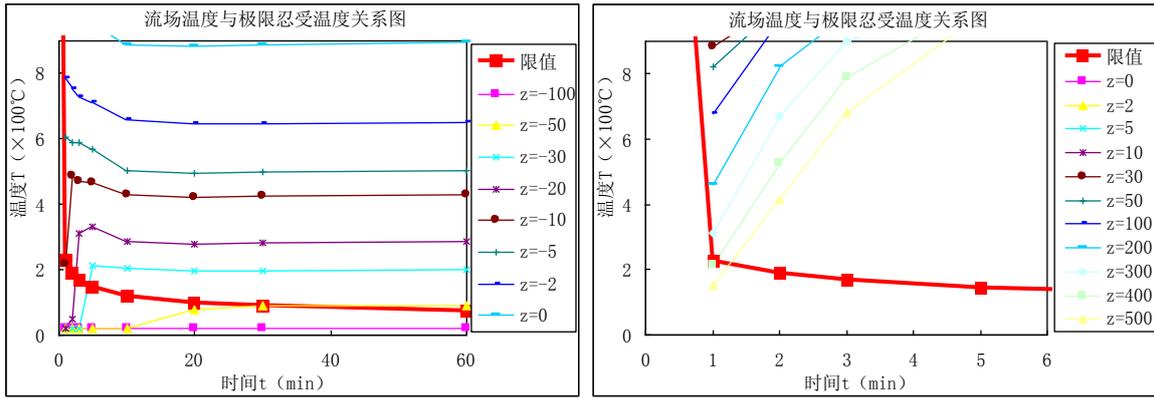


图 18 $v=4\text{m/s}$, 隧道流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图

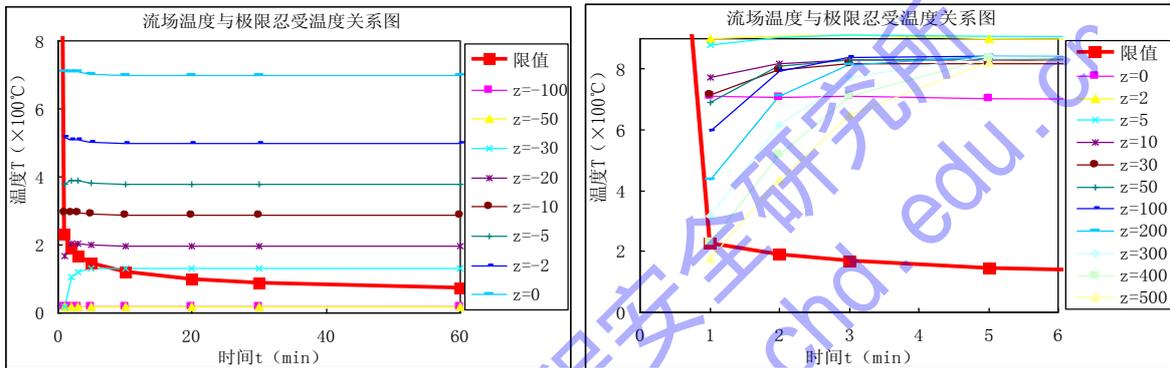


图 19 $v=5\text{m/s}$, 隧道流场温度与逃生人员极限忍受温度关系图

表 11 1min 后火灾上、下游人员有可能逃生的区域 (m)

| 位置 (m) | 风速 (m/s) | | | | |
|--------|----------|------|------|------|------|
| | v=1 | v=2 | v=3 | v=4 | v=5 |
| 上游 | <-30 | <-20 | <-10 | <-5 | <-10 |
| 下游 | >100 | >200 | >300 | >300 | >400 |

表 12 1min 后火灾下游人员可以逃离的距离 (m)

| 开始逃生位置 (m) | 风速 (m/s) | | | | |
|------------|----------|------|------|------|------|
| | v=1 | v=2 | v=3 | v=4 | v=5 |
| Z=50 | <200 | | | | |
| Z=100 | <400 | <300 | | | |
| Z=200 | >500 | <400 | <400 | <400 | |
| Z=300 | >500 | >500 | <500 | <500 | <500 |

表 13 不同风速下的安全救援位置以及安全时间

| 对应项目 | | 风速 (m/s) | | | | | |
|--------------|--------|------------|------|-------|------|-------|------|
| | | v=1 | v=2 | v=3 | v=4 | v=5 | |
| 上游安全位置以及安全时间 | 3min 时 | 救援位置 z (m) | -100 | -50 | -50 | -30 | -30 |
| | | 忍受时间 (min) | 0.47 | 0.16 | 8.99 | 3.31 | 9.87 |
| | 5min 时 | 救援位置 z (m) | | -100 | -50 | -50 | -30 |
| | | 忍受时间 (min) | | 12.81 | 6.99 | 59.09 | 7.04 |

| | | | | | | |
|--|----------------|-------|-------|------|------|------|
| | 绝对安全位置 z | <-100 | <-100 | -100 | -100 | -50 |
| | 下游安全逃生位置 z (m) | 100 | 300 | 400 | >400 | >400 |

4.4 隧道风速和火灾规模对逃生和救援的影响

对比上述三种火灾规模的数值模拟结果，我们可以看到：

(1) 火灾上游人员的可能逃生位置，随着风速的增大距火源越近，随着火灾规模增大距离火源越来越远，表 14；

(2) 火灾下游可能逃生位置，随着风速和火灾规模增大距火源越远，表 15。但事实上，当隧道火灾发生后，由于隧道内温度和烟雾的向下扩展速度远远小于汽车的速度，所以火灾下游的人员都能很快逃离危险区。

(3) 消防安全救援的具体位置，随着风速的增大距离火源越来越近，随着火灾规模的增大距离火源越来越远，表 16。

表 14 火源上游有可能逃生区域随热释放率以及入口风速的变化 (m)

| 风速 (m/s) \ 热释放率 (MW) | v=1 | v=2 | v=3 | v=4 | v=5 |
|----------------------|------|------|------|-----|------|
| 5 | <-10 | <-2 | <0 | <0 | <0 |
| 10 | <-10 | <-10 | <-2 | <0 | <0 |
| 30 | <-30 | <-20 | <-10 | <-5 | <-10 |

表 15 火源下游安全逃生区域随热释放率以及入口风速的变化 (m)

| 风速 (m/s) \ 热释放率 (MW) | v=1 | v=2 | v=3 | v=4 | v=5 |
|----------------------|-----|-----|-----|------|------|
| 5 | 100 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| 10 | 200 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| 30 | 100 | 300 | 400 | >400 | >400 |

表 16 消防安全救援位置随热释放率以及入口风速的变化 (m)

| 风速 (m/s) \ 热释放率 (MW) | v=1 | v=2 | v=3 | v=4 | v=5 |
|----------------------|-------|-------|------|------|-----|
| 5 | -100 | -50 | -20 | -10 | -2 |
| 10 | <-100 | -100 | -50 | -30 | -20 |
| 30 | <-100 | <-100 | -100 | -100 | -50 |

5 结语

(1) 深入研究了隧道内人员在高温下的逃生过程，修正了传统的克拉尼公式，给出了一个更合理的隧道火灾人员逃生判断条件；

(2) 以修正的克拉尼公式为基础，采用有限元数值模拟方法，详细地研究了不同隧道风速、不同火灾规模时隧道内人员的安全逃生区域和消防救援的安全位置。研究表明：

① 为了保证火源上游的人员逃生，应该尽可能加大隧道内的环境风速；

② 火灾的消防救援位置必须在火源上游进行，并且应该尽可能加大隧道内的环境风速；

③ 虽然隧道内的风速对于火源下游的人员逃生不利，但由于隧道内温度和烟雾的扩展速度远远小于汽车的速度，所以火灾下游的人员都能很快逃离危险区。

参考文献

- [1] 谢旭阳、周心权、谢续程、陈桦, 高层建筑火灾人员疏散和人员伤亡的模拟, 中国安全科学学报, 2002 年 03 期
- [2] 陈智明、霍然、王浩波、曾德云, 某教学楼火灾中人员安全疏散时间的预测, 火灾科学, 2003 年 01 期
- [3] 古晋, 地铁隧道火灾的疏散与救援, 劳动保护, 2004 年 11 期
- [4] 童庆杰、权高峰、邵力, 火灾事故中人的心理及行为分析, 合肥工业大学学报, 2004 年 03 期
- [5] 周勇狄, 长大公路隧道火灾数值模拟及逃生研究, 长安大学硕士学位论文, 2006.6
- [6] J. A. Gonzalez and N. H. Danziger, Tunnel Ventilation Design For Fire Safety 6th International symposium on the aerodynamics and ventilation of vehicle tunnels[M].England, sept 1988, p575-592.
- [7] 邓念兵, 公路隧道防火救灾对策研究, 长安大学硕士学位论文, 2003.6
- [8] Jamie Vistnes, Validation of Phoenics 3.5 for Modelling Tunnel Ventilation Systems Under Fire Conditions; 10th International PHOENICS Conference; Melbourne, Australia; March, 2004
- [9] Dr. Qian Wang, Kenneth Ma & Micael Lundqvist; CFD Applications of PHOENICS on Building Environment and Fire Safety Design; 10th International PHOENICS Conference; Melbourne, Australia; March, 2004

Research of People Escaping in Highway Tunnel Fires

Xia Yongxu¹ Zhou Yongdi^{1, 2} Wang Yongdong¹

1 Tunnel Safety Research Center, College of highway, Chang'an University, Xi'an, 710061

2 Guangxi Gui Neng engineering consultation company, Nanning, 530023

Abstract: Fire is definitely the severest accidents happened in highway tunnels. In this paper, the Crane's formula which is used in high temperature cases is analyzed and modified combining the actual conditions in fires. Using the finite element method, the temperature field of a typical tunnel length segment under different wind speed in the tunnel and different scales of fires is studied in detail. With the modified Crane's formula adopted as the judging rule, the probable escaping area and the safe area for the fire control and rescuing are calculated out. These studying results have provided some important technical support for the constitution of the counterplan for fire control and rescue operation in highway tunnels.

Key Words: highway tunnel fire, people escaping, judging rules, fire control and rescue operation, safe locations.

夏永旭, 男, 1954 年生, 陕西武功人, 长安大学教授, 博士生导师。研究方向: 隧道工程安全、公路隧道通风与防火救灾。

联系电话: 029-88498307, Email: yongxuxia@126.com