自然通风的倾斜平顶隧道中顶棚射流的温度分布

Yasushi Oka，Osamu Imazeki

##### 摘要

在这项研究中，我们对在具有矩形横截面的隧道中形成的稳定火焰式顶棚射流内的温度分布进行了详细的测量。然后，我们将测量的温度分布与无约束平滑顶棚射流的温度分布进行比较，并估计它们之间的相对误差。结果表明，水平隧道中比无侧限顶棚下顶棚射流的温度分布具有更大的凸起，随着隧道倾角的增加，凸起形状与指数形状不同。我们新提出一种考虑隧道倾角的相关性来表示温度分布，并且由指数函数和具有协调变换的三次函数组成。

##### 关键词

温度分布 顶棚射流 倾斜平顶隧道 自然通风

##### 正文

###### 1.引言

隧道是高速货运、客运公共交通网络中不可或缺的。在空间特性方面，隧道可以被定义为相对于其横截面的宽度和高度具有轴向细长的长度。不幸的是，每年都会发生重大和致命的意外隧道火灾。随着新的、更长的隧道的建造和交通密度的增加，这种火灾在未来可能变得更频繁。考虑到结构因素、通风效果、火焰形状、热电流和其他参数的隧道火灾的行为与普通建筑火灾有很大不同。

基于全尺寸和小尺度实验中获得的早期数据以及数值计算，研究人员已经得出了无限大顶棚下气体温度、位置、临界速度、沿隧道轴线的温度衰减、背层长度之间的实用关系。

大多数隧道火灾的研究是在水平隧道中进行的。然而，将地面连接到在相当大的深度处构造以充分利用城市地区中地下空间的地下隧道的斜坡必须急剧倾斜。因此，在这些倾斜隧道中的顶棚射流内温度分布将与在水平隧道中的顶棚射流内温度分布不同，并且与大倾角隧道下顶棚射流内的温度分布不同。以前的研究集中在无约束的水平或倾斜平天花板下顶棚射流内的温度分布。然而，这些相关性是否可应用于径向膨胀导致侧壁破坏的隧道中的顶棚射流还不清楚。

本项研究中，我们的目标是准确和系统地测量倾斜隧道中顶棚射流沿隧道轴线传播的温度分布，并得到隧道倾角与温度分布之间的关系。

###### 2.实验过程

我们在内部尺寸为的试验箱进行了一系列的耐火试验。如图1(a)所示，构造尺寸为的矩形横截面的模型隧道。我们用厚度为12mm毫米的硅酸钙板构造了表面光滑的隧道顶棚。侧壁是厚度为10mm的透明有机玻璃板（聚甲基丙烯酸甲酯，PMMA），我们能透过它观察内部的热气流和新鲜空气逆流。火源附近的地面采用厚度为12mm的硅酸钙板，除此之外的地面为9.5mm厚的胶合板。隧道的两端保持完全开放，热气流和新鲜空气都能无阻碍地分别流出和被吸入。隧道的倾角设定为0°，3°，5°，8°和10°。

该实验使用两种燃料：甲醇和液化石油气（LPG），后者的主要成分是丙烷。我们使用两个由2mm厚不锈钢制成的燃料盘来燃烧甲醇。其中一个的尺寸为，另一个为，凹陷深度均为30mm。将燃料盘放在电子天平（LP 8200S，Sartorius；精度：0.01g）上可以准确测量质量损失。对于使用LPG的实验，燃料通过质量流量控制器（M100B，MKS Instruments）供给到扩散气体燃烧器。我们使用了一个尺寸为填充了多孔细骨料的气体燃烧器。倾斜隧道中的燃料盘和气体燃烧室的布置如图1(b)所示。在甲醇燃烧的实验中，我们用支架将燃料盘与电子天平分开一定距离，并保持燃料盘水平。燃料盘下面有一个小孔来固定支架。对于使用液化石油气的实验，我们设置了正方形多孔燃烧器，它的上表面与隧道地板处于同一水平。

我们基于通过假设完全燃烧计算出的值，估计从质量损失或流量以及燃料燃烧产生的热量的热释放速率。通常认为顶棚射流的驱动力来源是总燃烧热的对流换热分量，因此，我们通过对流热释放速率来分析实验数据。我们假设甲醇和液化石油气燃烧产生的对流换热分别为16.1MJ/kg和31.2MJ/kg，燃烧热分别为19.1MJ/kg和43.7MJ/kg。

隧道顶棚的中心线下方10mm处悬挂了57个热电偶，如图1(c)所示。在相对于火源中心-0.6m到-3.5m之间，每隔0.1m就安装了一个铜-康铜（T型）热电偶，共30个。在-0.5m到+0.55m之间的-0.5m、-0.4m、-0.3m、-0.2m、-0.1m、0m、0.05m、0.1m、0.15m、0.2m、0.25m、0.3m、0.4m和0.55m处分别安装了一个铬镍-铝镍（K型）热电偶，共14个。在+0.9m到6.3m之间的0.9m、1.35m、1.8m、2.25m、2.7m、3.15m、3.6m、4.05m、4.4m、4.95m、5.4m、5.85m和6.3m处分别安装了一个T型热电偶，共13个。所采用热电偶的绞线直径均为0.2mm。

我们使用带有K型和T型热电偶的耙式热电偶组，来测量垂直于隧道顶棚中心平面上的顶棚射流温度分布。距离火源较近的区域设置的是K型热电偶，较远区域的则是T型热电偶。每套耙式热电偶组拥有十二个热电偶，分别安装在距离隧道顶棚的5mm、10mm、20mm、30mm、40mm、55mm、70mm、100mm、140mm、180mm、230mm处，如图1(d)所示。我们在相同的条件下进行两次温度测量，但每次耙式热电偶组放置的位置不一样。对于第一种放置方案，记为“耙1”，耙式热电偶组分别放置在距离火源中心0.75m、1.5m、3.5m和5.5m处。第二种放置方案，记为“耙2”，耙式热电偶装置分别放置在距离火源中心1.0m、2.0m、3.0m和4.4m处。

测量的温度所受影响包括火焰的热辐射和隧道受热处侧面与顶棚的传热。我们使用数据记录器（MX110，Yokogawa）以每秒1次的频率记录温度和燃料质量损失数据，并将这些数据存储在PC上用来进一步分析。

燃料点燃前60秒开始数据采集。每组实验进行了至少10分钟。实验过程中，我们关闭了实验室的强制通风，并关上了测试室所有的门。

###### 3.结论与分析

3.1.热释放速率

表1列出了热释放速率的测量结果，其误差在以内。我们使用点火后420~520秒内准稳态下获得的数据，采用道格拉斯-阿瓦奇数值微分法计算甲醇的热释放速率。对于LPG的燃烧，其热释放速率有4.48 kW和8.89 kW两个不同值。根据弗劳德模型，该模型3.40~8.89KW的热释放速率，对应到高度为7m的真实隧道为3.2~8.5MW。这近似于客车火灾中释放的热量。

3.2.倾斜隧道中烟气逆流的温度衰减与其位置的相关性

图2(a)和(b)展示了倾斜隧道中，烟气逆流往低处流动时对其温度衰减的影响。我们证实随着隧道倾斜度的增加，随着距离的背层的温度降低的斜率变得更陡峭。这意味着从火源中心到烟气逆流顶端的距离随着隧道倾角的增加而减小。将烟气逆流中温度上升到2K的位置定义为其顶端，则其顶端的偏移值与隧道倾角之间的关系如图3所示。烟气逆流顶端的偏移值的原点是火源中心。由表可以看出，烟气逆流顶端仍然在倾斜隧道内，即，它不会溢出底部。在同一倾角下进行至少两次实验，同时改变热释放速率和燃料类型，然后绘制结果。

3.3. 顶棚射流的最大温升与其相对隧道轴线的位置

顶棚射流中最大温升的位置，是火源中心到沿着隧道轴线出现气体温度峰值处的距离，记为L\_ΔTmax。除了直接读取在隧道顶棚以下10毫米处测量的最大温升，还对包括最大温升的三个点的测量数据进行二次拟合，采用估算的最大温升和其位置。该修正最大温升记为ΔTmax\_ceiling。最高温升的修正精度及其位置取决于安装在隧道顶棚下方10mm处热电偶的密集程度。靠近火源区域的热电偶的安装间隔为50毫米。图4展示了隧道倾角与L\_ΔTmax的典型变化。由此可见，隧道顶棚下方10毫米处射流气体的温度峰值的位置，随着隧道倾角的增加，从火源中心向上游偏移。该位置可以表示为热释放速率、来流速度和隧道几何特征长度的函数。

图5(a)展示了平均无量纲温升和隧道倾角之间的关系。这里，“平均温升”是指羽流轨迹撞击隧道顶棚时的代表温升。这是根据安装在-0.2<x/H<0.2范围内的热电偶测量的温度估算的。在此，x是沿着隧道轴线出现ΔTmax\_ceiling处的距离。我们假设ΔTmax\_ceiling与羽流轨迹撞击隧道顶棚的位置一致。无量纲温升随着隧道倾角的增加而减小。这是由于火焰的倾角随着隧道倾角而增加。其中，火焰的倾角定义为隧道底部倾斜面与竖直平面的夹角。图5(b)表示倾斜隧道的与水平隧道的代表温升的温度比随着隧道倾角的增加而呈指数下降。

3.4.可重复性

图6比较了相同条件下两次实验中获得的温度分布，即使用“耙1”放置方案的耙式热电偶组和尺寸为的燃料盘。我们的实验拥有良好的可重复性。在此，x是测点与出现ΔTmax\_ceiling之间的距离。我们认为，下面描述的用于预测顶棚气体温度分布的经验公式是可靠的。

3.5.隧道垂直方向的温度分布

图7(a)展示了隧道顶棚垂直方向上的四个典型测点的温度分布。根据每个测点顶点处的最大温升，温度分布呈现出凸起形状。我们使用从三次拟合得到的修正温度峰值以及对三点的测量数据进行二次拟合得到的位置，代替从测量的温度分布直接获取的最大温升。这里，将二次函数的顶点定义为ΔTmax。随着顶点的位置逐渐向隧道底部偏移、与火源距离的增加，ΔTmax减小，温度分布的凸起逐渐减小。我们观察到倾斜隧道中相似的温度分布变化，如图7(b~e)所示。

对湍流附壁射流中速度分布的研究表明，通过速度分布中的最大速度和附壁射流中每个测点进行半宽度归一化测量的速度，可以保持速度分布的相似性。类似的，为了消除分布形状与距离差异的影响，对于每个温度分布的测点，将其温升及与顶棚的垂直距离进行归一化，分别记为ΔTmax和热厚度LT。LT的定义如图8所示。热边界层的厚度δTmax，对应于温度从壁温变化到ΔTmax的顶棚射流的那一段。热厚度LT，由热边界层厚度与从顶点到温度升高超过环境值的点降至ΔTmax的1 / e的长度之和表示。我们还通过对ΔTmax的1 / e处的三个测量点进行线性拟合，估计了1 / e的ΔTmax的位置。归一化的温度分布与出现ΔTmax\_ceiling处之间的距离无关，并重合于相同曲线，如图9(a)所示。这个趋势对于不同倾角的隧道是相同的，如图9(b~e)所示。在图10中，使用与图9中类似的分析方法，将不同的热释放速率，叠加在垂直于隧道顶棚方向上得到的归一化温度分布。我们证实归一化的温度分布重合于一条曲线上，而不依赖于测点距离或热释放速率。此外，我们可以看到，这个结论不会受到倾角的影响。

##### 致谢

本研究在东京科技大学的火灾科学技术中心——“消防安全科学研究中心”的联合应用与研究中心的支持下进行。其中一部分是在科学研究助理的支持下进行的（基本研究B，No.23310108）。 同时，要感谢国立横浜大学的研究生稻垣浩介先生和恭子神谷女士在实验中的贡献。