

# 细水雾作用下烟气组分浓度变化规律的模拟研究

房玉东

(国家安全生产监督管理总局通信信息中心,北京 100013)

**[摘要]** 在ISO 9705标准房间通过模拟实验研究了细水雾与火灾烟气的相互作用,揭示了细水雾作用下烟气中氧气、一氧化碳和二氧化碳浓度的变化规律,建立了氧气、一氧化碳和二氧化碳浓度与细水雾工作压力及风机速率的数学模型。实验发现当风机速率达到1.5 kg/s时烟气组分浓度变化规律发生突变,对这一现象进行了深入分析和解释。本文为细水雾技术用于火灾烟气抑制提供了必要的理论基础和科学的参考依据。

**[关键词]** 细水雾;氧气;一氧化碳;二氧化碳

**[中图分类号]** X932 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)08-0099-07

## 1 前言

通常在建筑火灾中烟气造成的人员伤亡比例最大。研究表明,在火灾人员的伤亡中,大约50%是由烟气中一氧化碳(CO)中毒引起的,而其余50%由烧伤、爆炸及其他有毒气体引起。细水雾进入烟气层后会与之发生复杂的物理化学作用,在细水雾的作用下烟气中氧气(O<sub>2</sub>)、CO和二氧化碳(CO<sub>2</sub>)浓度都会发生变化<sup>[1,2]</sup>。中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室建成了ISO 9705全尺寸多功能热释放速率测试仪,该实验装置是参照国际标准化组织在1993年制定的ISO ROOM实验方法建设的,可同步测量火灾烟气中CO、CO<sub>2</sub>和O<sub>2</sub>浓度,同时可测量喷水灭火系统作用下上述特性参数的变化规律<sup>[3-6]</sup>。由于是全尺寸大型实验,能够模拟真实火灾条件,所以其测试结果比较可靠,为室内火灾模拟和灭火系统优化设计提供了有力的实验数据支持。本文利用上述实验平台深入研究细水雾作

用下烟气组分浓度的变化规律,为细水雾技术用于火灾烟气抑制提供了必要的参考依据。

## 2 实验描述

实验中选用柴油作为发烟材料,油盘位于房间的墙角处,油盆尺寸长×宽×高=0.4 m×0.4 m×0.05 m,利用酒精引燃柴油。利用高压泵式细水雾发生装置产生细水雾,采用两种不同类型的喷头:喷头1雾滴粒径为50~100 μm,工作压力为7~10 MPa;喷头2雾滴粒径为300~500 μm,工作压力为1~4 MPa。实验中柴油预燃60 s,每种工况施加细水雾100 s。图1给出了实验系统示意图,表1给出了实验工况。

ISO 9705的测量系统由集烟罩、排烟系统和测试段构成。集烟罩的开口尺寸为3 m×3 m,位于燃烧室出口的正上方,集烟罩上方与排烟管道系统相连,下边缘与燃烧室顶相齐,这样可以收集实验中通过门离开燃烧室的所有燃烧产物。排烟管的一

**[收稿日期]** 2012-12-21

**[基金项目]** 国家自然科学基金青年科学基金项目(50904041);中国博士后科学基金面上项目(20070410067)

**[作者简介]** 房玉东,1979年出生,男,黑龙江哈尔滨市人,高级工程师,研究方向为清洁高效灭火技术、公共安全应急技术等;

E-mail: fangyd@chinasafety.gov.cn

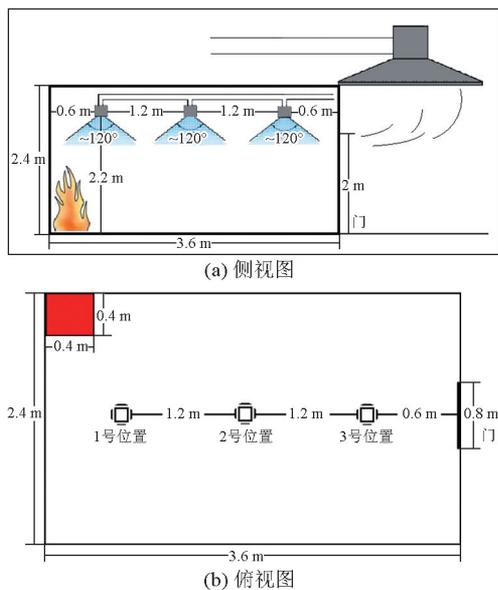


图1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

表1 实验工况

Table 1 Experimental case

工况	喷头类型	开启位置	工作压力/MPa	风机流量/(kg·s <sup>-1</sup> )
1	喷头1	3	7	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5
2	喷头1	3	8	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5
3	喷头1	3	9	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5
4	喷头1	3	10	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5
5	喷头2	3	1	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5
6	喷头2	3	2	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5
7	喷头2	3	3	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5
8	喷头2	3	4	0.5, 1, 1.5, 2, 2.5

端与集烟罩相连,另一端与变频风机相连。风机流量范围为0~4 kg/s。测试段中的气体采样设备与Servomex400气体分析仪连接,测量烟气中的O<sub>2</sub>、CO和CO<sub>2</sub>浓度。实验中用取样探针采集气体,经过碳黑过滤器过滤后,通过控制台的冷却柱进行冷却,再经过无水硅胶的干燥后通向气体分析仪,其量程为O<sub>2</sub>(0~25%)、CO(0~1%)、CO<sub>2</sub>(0~10%)。每5 s采集一次数据。图2给出了烟气采样分析的流程。

### 3 典型实验结果与分析

#### 3.1 细水雾作用下O<sub>2</sub>浓度变化规律分析

从图3可以看出,施加细水雾之后O<sub>2</sub>浓度明显上升并最终稳定在某个值附近,O<sub>2</sub>浓度的回升量随着风机速率的增大而增加。为了研究细水雾作用

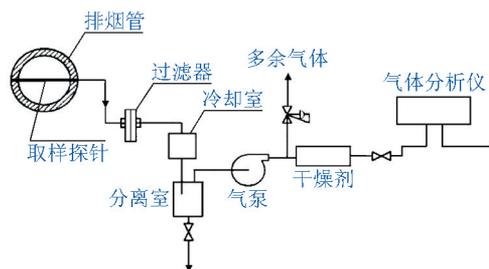


图2 烟气采样分析流程图

Fig. 2 Smoke sampling and analysis flow chart

下O<sub>2</sub>浓度的变化规律,定义一个变量,即氧气浓度回升量

$$i_n = C_{O_2}^1 - C_{O_2}^0 \quad (1)$$

式(1)中, $i_n$ 代表O<sub>2</sub>浓度回升量,%; $C_{O_2}^1$ 代表细水雾作用后O<sub>2</sub>浓度平稳时刻的浓度,%; $C_{O_2}^0$ 代表施加细水雾之前稳定燃烧阶段的O<sub>2</sub>浓度,%。

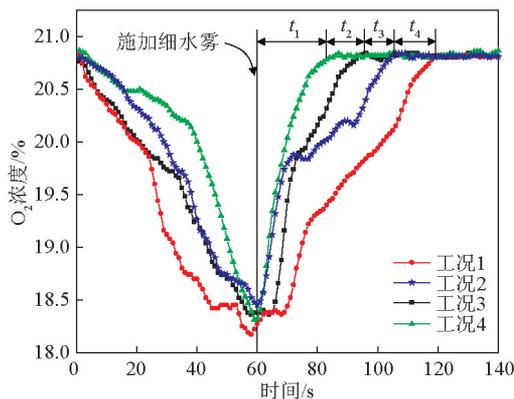


图3 O<sub>2</sub>浓度随时间变化曲线(1.5 kg/s)

Fig. 3 Time-varying curves of O<sub>2</sub> concentration (1.5 kg/s)

从图4可以看出,O<sub>2</sub>浓度的回升量随着风机速率的增大而增加,在喷头1产生的细水雾作用下,O<sub>2</sub>浓度回升量要远大于喷头2,这表明雾滴粒径较小的细水雾更有利于O<sub>2</sub>浓度的回升。这是因为雾滴粒径较小的细水雾的比表面积更大,从而能够更加有效地吸收热量,有效地冷却烟气温度,降低烟气对火源的辐射热反馈并抑制燃烧,大大降低了燃烧反应的耗氧量。同时随着风机速率的增大,细水雾的卷吸作用被强化,大量的新鲜空气不断进入火场环境,这也加速了O<sub>2</sub>浓度的回升过程。

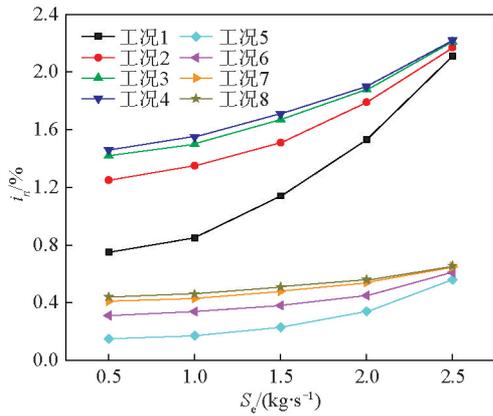


图4  $i_n$ 随 $S_e$ 变化曲线

Fig. 4 Curves of  $i_n$  with  $S_e$

下面以工况1~4为例,将 $O_2$ 浓度回升量与风机速率按如下函数形式进行多项式拟合

$$i_n = k_1 + k_2 S_e + k_3 S_e^2 \quad (2)$$

式(2)中, $S_e$ 为风机速率; $k_i$  ( $i=1, 2, 3$ )为多项式系数。表2给出了拟合函数的 $k_i$ 系数。

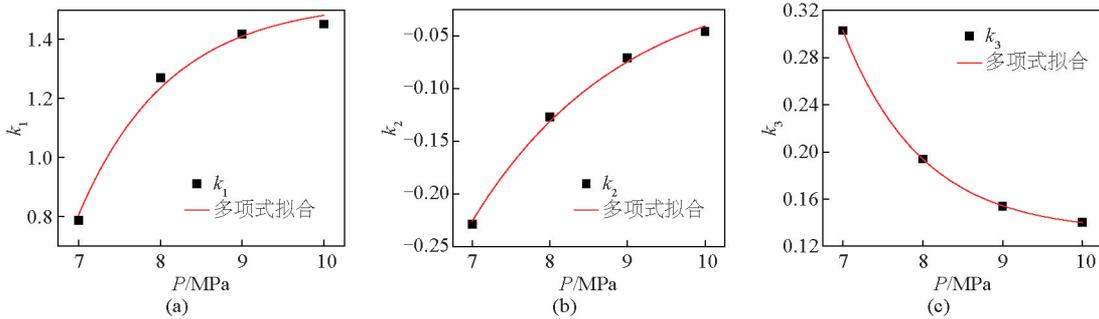


图5  $k_i$ 系数与 $P$ 的相关曲线

Fig. 5 Correlation curves of  $k_i$  with  $P$

从图6可以看出, $O_2$ 浓度的回升量随着细水雾工作压力的增大而增加,随着风机速率的增大而增加,当风机速率超过1.5 kg/s时, $O_2$ 浓度回升量的增加速率加快。这是因为通风使得火灾环境 $O_2$ 浓度增大,这有助于燃烧反应的进行;同时通风扰动火灾环境的流场,使燃烧变得不稳定,这有助于火焰的熄灭。当风速超过一定值后,通风对火焰的熄灭作用占主导地位。根据实验数据和计算曲面可以判定,实验中 $O_2$ 浓度快速上升的临界风机速率为1.5 kg/s。

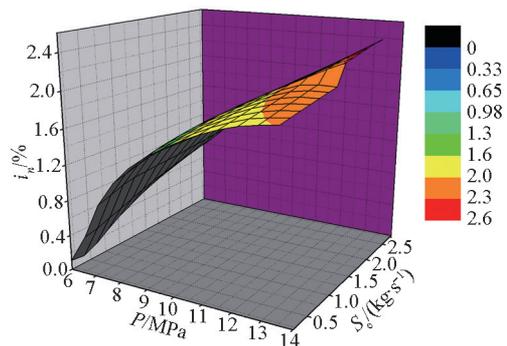


图6  $i_n$ 与 $P$ 和 $S_e$ 的相关曲面

Fig. 6 Correlation surface of  $i_n$  with  $P$  and  $S_e$

表2 拟合函数的 $k_i$ 系数

Table 2 The coefficient  $k_i$  of fitting function

工作压力/ MPa	$k_1$	$k_2$	$k_3$
7	0.786	-0.229	0.303
8	1.270	-0.127	0.194
9	1.418	-0.071	0.154
10	1.452	-0.046	0.14

从图5可看出 $k_i$ 系数与工作压力之间满足一定的函数关系,将 $k_i$ 系数和工作压力 $P$ 按如下函数形式进行曲线拟合

$$k = a + b \cdot e^{-P/C} \quad (3)$$

式(3)中, $a$ 、 $b$ 、 $C$ 均为多项式拟合系数。则可给出 $k_i$ 系数与工作压力 $P$ 之间的函数关系如下

$$k_1 = 1.53 - 392e^{-P/1.11} \quad (4)$$

$$k_2 = 0.01 - 8.54e^{-P/1.95} \quad (5)$$

$$k_3 = 0.132 + 205.9e^{-P/0.99} \quad (6)$$

将式(4)~式(6)带入式(2)可得如下函数关系

$$i_n = 1.53 - 392e^{-P/1.11} + (0.01 - 8.54e^{-P/1.95}) \cdot S_e + (0.132 + 205.9e^{-P/0.99}) \cdot S_e^2 \quad (7)$$

### 3.2 细水雾作用下CO浓度变化规律分析

从图7可以看出,在没有细水雾作用的情况下,CO浓度缓慢上升,并最终维持在120  $\mu\text{L/L}$ 左右。施加细水雾之后,CO浓度上升速度加快;细水雾作用一段时间后,CO浓度恒定在某个值附近,此时CO浓度要大于无细水雾作用时的CO浓度。造成CO浓度上升的原因是细水雾有效抑制了燃烧,使燃烧不充分,从而加快了CO的生成速率,使其浓度快速上升。由于细水雾无法直接进入火焰区域,只能通过冷却烟气和蒸发吸热来抑制燃烧,作用一定时间后,燃烧系数进入稳定状态,此时CO浓度上升缓慢,并最终恒定在某个值附近。

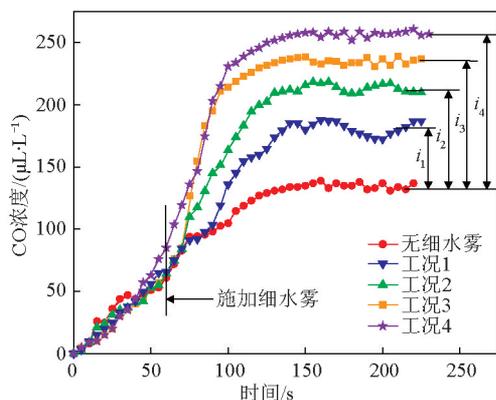


图7 CO浓度随时间变化曲线(1.5 kg/s)

Fig. 7 Time-varying curves of CO concentration (1.5 kg/s)

为了研究细水雾作用下CO浓度的变化规律,定义一个无量纲参数,即CO浓度增大倍数

$$\ln C_{\text{CO}} = (C_{\text{CO}}^1 - C_{\text{CO}}^0) / C_{\text{CO}}^0 \quad (8)$$

式(8)中,  $\ln C_{\text{CO}}$ 代表CO浓度增大倍数;  $C_{\text{CO}}^1$ 代表细水雾作用下稳定阶段的CO浓度,  $\mu\text{L/L}$ ;  $C_{\text{CO}}^0$ 代表无细水雾作用下稳定阶段的CO浓度,  $\mu\text{L/L}$ 。

从图8可以看出,CO浓度同风机速率之间满足一定的函数关系,将  $\ln C_{\text{CO}}$ 与  $S_e$ 按照式(9)进行多项式拟合。表3给出了拟合函数的  $k_i$ 值。

$$\ln C_{\text{CO}} = k_1 + k_2 S_e + k_3 S_e^2 \quad (9)$$

从图9可看出,  $k_i$ 系数与工作压力  $P$ 之间满足一定的函数关系。利用二次多项式的函数形式对  $k_i$ 值和  $P$ 进行多项式拟合,可给出  $k_i$ 与  $P$ 的数学关系

$$k_1 = -3.67 + 0.88P - 0.041P^2 \quad (10)$$

$$k_2 = -4.28 + 1.07P - 0.054P^2 \quad (11)$$

$$k_3 = 1.49 - 0.364P + 0.018P^2 \quad (12)$$

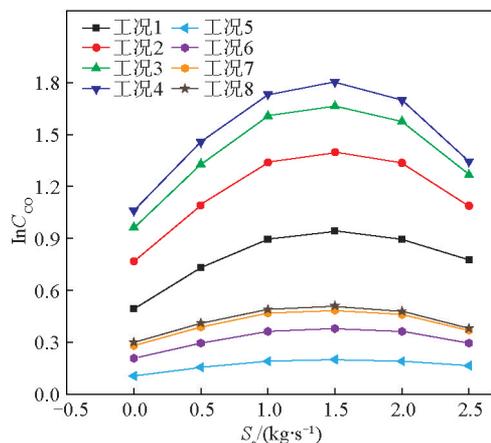


图8  $\ln C_{\text{CO}}$ 随  $S_e$ 变化曲线

Fig. 8 Curves of  $\ln C_{\text{CO}}$  with  $S_e$

表3 拟合函数  $k_i$ 系数

Table 3 The coefficients  $k_i$  of fitting function

工作压力/ MPa	$k_1$	$k_2$	$k_3$
7	0.494	0.580	-0.187
8	0.755	0.867	-0.290
9	0.948	0.996	-0.345
10	1.045	1.069	-0.377

将式(10)~式(12)带入式(9)可得CO浓度增大倍数  $\ln C_{\text{CO}}$ 与工作压力  $P$ 和风机速率  $S_e$ 之间的数学关系

$$\begin{aligned} \ln C_{\text{CO}} = & 0.88P - 3.67 - 0.041P^2 + \\ & (1.07P - 4.28 - 0.054P^2)S_e + \\ & (1.49 - 0.364P + 0.018P^2)S_e^2 \end{aligned} \quad (13)$$

从图10可以看出,当风机速率小于1.5 kg/s时,CO浓度增大倍数  $\ln C_{\text{CO}}$ 随着细水雾工作压力  $P$ 的增大而增加;当风机速率大于1.5 kg/s时,  $P$ 增大到10 MPa后,  $\ln C_{\text{CO}}$ 开始下降。这是因为当风机速率超过1.5 kg/s时,通风对火焰的熄灭作用占主导地位;同时工作压力增大到10 MPa后,细水雾的冷却和蒸发吸热作用得到强化,在细水雾和通风的耦合作用下,火焰尺寸明显变小,燃烧强度明显减弱,使得CO浓度的上升速度开始下降。

### 3.3 细水雾作用下CO<sub>2</sub>浓度变化规律分析

从图11可看出,进入稳定燃烧阶段CO<sub>2</sub>浓度恒定在1.8%左右,施加细水雾之后CO<sub>2</sub>浓度快速下降,CO<sub>2</sub>浓度下降幅度随着工作压力的增大而增加,并最终恒定在某个值附近。这主要是因为施加细

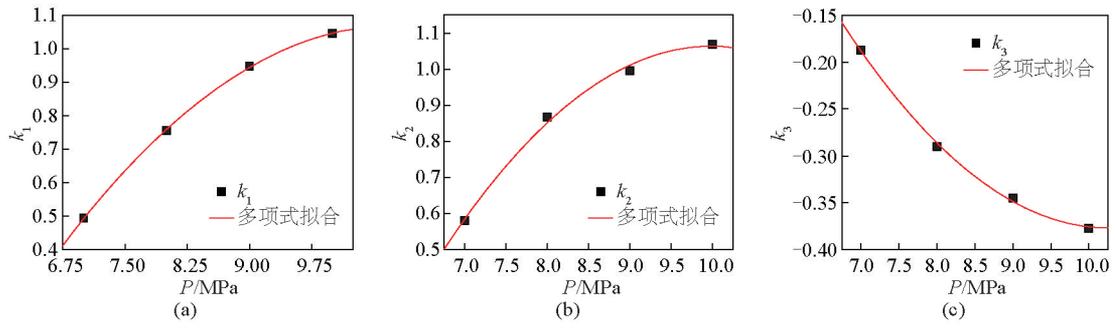


图9  $k_i$ 系数与 $P$ 相关曲线

Fig. 9 Correlation curves of  $k_i$  with  $P$

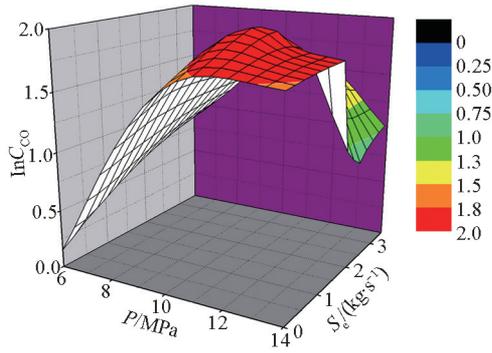


图10  $\ln C_{CO}$ 与 $S_e$ 和 $P$ 的相关曲面

Fig. 10 Correlation surface of  $\ln C_{CO}$  with  $S_e$  and  $P$

水雾之后,有效地降低了火灾环境的温度,抑制了燃烧反应,导致 $CO_2$ 的生成速率减小。同时大量的 $CO_2$ 吸附在烟颗粒表面,还有部分 $CO_2$ 溶解在空间中的细水雾颗粒中,随着工作压力的增大细水雾冲刷烟气的效率被强化,这也加快了火灾环境中 $CO_2$ 浓度的下降。

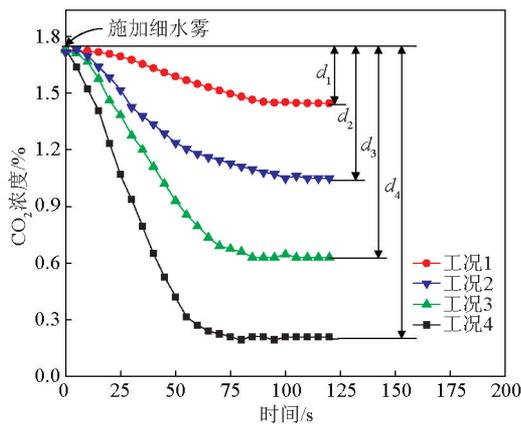


图11  $CO_2$ 浓度随时间变化曲线(1.5 kg/s)

Fig. 11 Time-varying curves of  $CO_2$  concentration (1.5 kg/s)

为了研究细水雾作用下 $CO_2$ 浓度的变化规律,定义一个无量纲参数,即二氧化碳浓度衰减比例

$$D_{CO_2} = (C_{CO_2}^I - C_{CO_2}^0) / C_{CO_2}^I \quad (14)$$

式(14)中, $D_{CO_2}$ 代表细水雾作用后 $CO_2$ 浓度的衰减比例; $C_{CO_2}^I$ 代表稳定燃烧阶段的 $CO_2$ 浓度,%; $C_{CO_2}^0$ 代表细水雾作用后 $CO_2$ 的最终浓度,%。

图12给出了 $CO_2$ 浓度衰减比例 $D_{CO_2}$ 与风机速率 $S_e$ 之间的曲线关系。从图12中可以看出,喷头1抑制 $CO_2$ 的效果要好于喷头2。这是因为喷头1产生细水雾的粒径要小于喷头2,因此喷头1的冷却作用和全淹没效果要好于喷头2,随着细水雾工作压力的增大,其对火焰的抑制程度加强。 $CO_2$ 浓度的衰减比例随着细水雾工作压力的增大而增加,从图12可看出, $CO_2$ 浓度衰减比例 $D_{CO_2}$ 随着风机速率 $S_e$ 的增大先增大后减小。对 $D_{CO_2}$ 和 $S_e$ 按式(15)进行多项式拟合

$$D_{CO_2} = k_1 + k_2 S_e + k_3 S_e^2 + k_4 S_e^3 \quad (15)$$

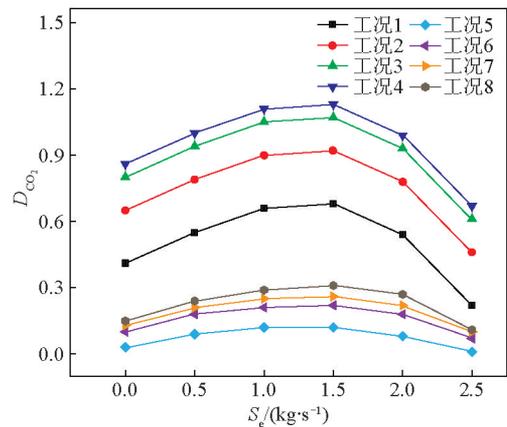


图12  $D_{CO_2}$ 随 $S_e$ 变化曲线

Fig. 12 Curves of  $D_{CO_2}$  with  $S_e$

表4给出了拟合函数的 $k_i$ 系数。从表4可以看出,在不同工作压力下, $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$ 基本为常数,只有 $k_1$ 随着工作压力的增大而增加。图13给出了 $k_1$ 与压力 $P$ 之间的二次多项式拟合曲线, $k_1$ 与 $P$ 之间满足如下数学关系

$$k_1 = -3.8 + 0.92P - 0.045P^2 \quad (16)$$

表4 拟合函数 $k_i$ 系数

Table 4 The coefficients  $k_i$  of fitting function

工作压力/ MPa	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
7	0.41	0.29	0.031	-0.071
8	0.65	0.29	0.03	-0.07
9	0.8	0.29	0.03	-0.071
10	0.86	0.29	0.031	-0.071

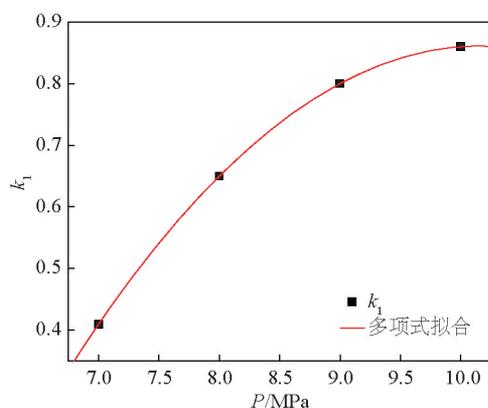


图13  $k_1$ 与 $P$ 相关曲线

Fig. 13 Relation curve of  $k_1$  and  $P$

将式(16)和 $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$ 的平均值带入式(15)可得 $D_{CO_2}$ 与 $S_e$ 之间的数学关系如下

$$D_{CO_2} = 0.92P - 3.8 - 0.045P^2 + 0.29S_e + 0.031S_e^2 - 0.071S_e^3 \quad (17)$$

图14给出了 $CO_2$ 浓度衰减比例与工作压力和风机速率之间的曲面关系。从图14中可以看出,当风机速率达到1.5 kg/s时,工作压力超过10 MPa后, $CO_2$ 浓度衰减比例下降。这是因为在通风和细水雾的耦合作用下,火焰尺寸变小,燃烧强度减弱,此时火焰逐步开始熄灭,使得 $CO_2$ 生成速率快速下降,从而导致了 $CO_2$ 浓度衰减比例下降。

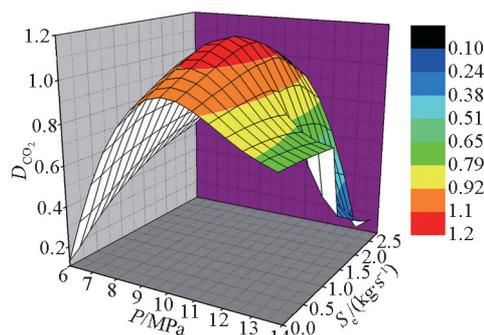


图14  $D_{CO_2}$ 与 $P$ 和 $S_e$ 相关曲面

Fig. 14 Correlation surface of  $D_{CO_2}$  with  $P$  and  $S_e$

## 4 结语

本文通过实验研究和计算分析得出如下结论。

1)施加细水雾后,烟气中的 $O_2$ 浓度快速回升, $CO$ 浓度上升速度加快, $CO_2$ 浓度快速下降。随着细水雾工作压力的增大, $O_2$ 浓度回升速度加快, $CO$ 浓度上升速度减慢, $CO_2$ 浓度下降速度加快。

2)通风作用既可以提高火场 $O_2$ 浓度,助燃火焰,又可以破坏火焰燃烧的稳定性,加速火焰熄灭。实验发现,当风机速率小于1.5 kg/s时,通风造成的助燃火焰发挥主导作用;当风机速率大于1.5 kg/s时,通风造成的熄灭火焰发挥主导作用。

3)利用实验数据建立了 $O_2$ 浓度回升量、 $CO$ 浓度增大倍数和 $CO_2$ 浓度衰减比例随风机速率和细水雾工作压力变化的数学模型。

## 参考文献

- [1] 刘江虹,廖光焯,范维澄,等.受限空间中固体可燃物的热释放速率[J].材料研究学报,2002,16(4):418-420.
- [2] 陈长坤,汪箭,廖光焯,等.受限空间火灾环境固体可燃物热释放速率模拟研究[J].燃烧科学与技术,2002,8(2):122-125.
- [3] 王蔚,张和平,杨昀,等.全尺寸多功能热释放速率实验台的设计[J].消防科学与技术,2004,23(6):521-524.
- [4] 张和平,聂磊,张军,等.建筑装饰板材的ISO ROOM大型热释放速率测试与研究[J].火灾科学,2003,12(2):105-114.
- [5] 钟委,霍然,史聪灵.热释放速率设定方式的几点讨论[J].自然灾害学报,2004,13(2):64-69.
- [6] 范维澄,王清安,姜冯辉,等.火灾学简明教程[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1999.

# Study on variation of smoke component concentration with water mist applying

Fang Yudong

(Communication and Information Center, State Administration of Work Safety, Beijing 100013, China)

**[Abstract]** Interaction between water mist and fire smoke is studied by experiments in an ISO 9705 room. The variation of oxygen, carbon monoxide and carbon dioxide concentration is disclosed, and the mathematics models of smoke component concentration with water mist pressure and ventilation speed are established according to the experimental results. It is found in the experiment that when ventilation speed exceeds 1.5 kg/s, the smoke component concentration will break. This paper provides necessarily theory for water mist technology using in smoke restraining.

**[Key words]** water mist; oxygen; carbon monoxide; carbon dioxide