

文章编号: 1001-1455(2004)01-0024-06

# 基于燃料可燃界限研究建筑火灾中的回燃现象\*

翁文国, 范维澄

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要: 为了研究回燃产生的临界条件和细水雾抑制回燃产生的可行性及其抑制机理, 建立了一套小尺寸回燃实验装置, 并进行了一系列的实验; 实验结果表明腔体内未燃烧燃料的质量分数是回燃产生的决定性参数, 而细水雾确实能抑制回燃的产生, 并且其抑制机理是降低腔体内未燃烧燃料的质量分数。最后利用燃料可燃界限图进行了实验结果的定性验证及分析。

关键词: 爆炸力学; 燃料可燃界限; 回燃; 火灾

中图分类号: O414.1 国标学科代码: 130·3510 文献标志码: A

## 1 引 言

回燃是在通风受限的建筑火灾进入缺氧燃烧甚至闷烧后, 由于新鲜空气的突然大量补充引起热烟气急剧燃烧的现象。回燃现象由于其突然性和强大的破坏性威胁着人类特别是消防人员的安全<sup>[12]</sup>。燃料可燃界限定义的是燃料在空气中燃烧的浓度界限, 当燃料的浓度在可燃界限内时, 燃料才能在空气 中被点燃或维持燃烧, 否则当燃料的浓度超过可燃界限的上限或者低于其下限时, 燃料就无法被点燃或无法维持燃烧而熄灭<sup>[3]</sup>。燃料可燃界限图能直观地表征燃料的可燃界限, 所以利用燃料可燃界限图可以计算出在特定状况下的燃料可燃界限<sup>[4]</sup>。

目前有关建筑火灾中的回燃现象的研究很少, 仅有 Fleischmann 等在小尺寸和全尺寸回燃实验台上做了一系列的实验工作, 实验结果表明回燃产生的决定性参数是腔体内的燃料数量(质量分数); 水喷淋能够抑制回燃的产生<sup>[59]</sup>。但是到目前为止, 这方面的研究仍处于起步阶段。所以很有必要对其进行深入的研究。本文中利用建立的一套小尺寸回燃实验装置, 研究回燃产生的临界条件和细水雾抑制回燃产生的可行性及其抑制机理。然后利用燃料可燃界限图进行实验结果的定性验证及分析。

## 2 实验装置及步骤

小尺寸回燃实验装置的系统示意图如图 1 所示。整个系统包括小尺寸腔体、燃料供给系统、细水雾供给系统、点火系统、数据采集系统。

为了安全和可重复地进行回燃实验, 小尺寸腔体限制在 1/4 房间的尺寸(1.2m×0.6m×0.6m)。小腔体的内外表面为 2mm 厚的不锈钢板, 中间用 200mm 厚的硅酸铝刺毯棉作为隔热层。在小腔体的一个长墙上安装 0.75m×0.45m 的石英玻璃作为观察窗, 以观察腔体内燃料燃烧和火焰传播状况。小腔体的一个端面的中部安装开口, 开口的底部与小腔体平行, 其尺寸为 0.2m×0.4m。为了实现定时开启开口, 小腔体的端部安装腔盖覆盖在开口上, 腔盖的开启是利用电磁的作用远程控制。小腔体上布置一些工作端口以安装点火系统、燃料供给系统、细水雾供给系统和数据测量系统。整个小尺寸腔体在实验过程中做到尽可能的密封。

燃料供给系统包括燃烧器、流量计、电磁阀(包括控制电路)、减压阀、管路和燃料气罐, 如图 1 所

\* 收稿日期: 2003-02-08; 修回日期: 2003-06-26

基金项目: 国家重点基础研究专项(2001CB409600); 国家自然科学基金项目(59936140)

作者简介: 翁文国(1976—), 男, 博士研究生。

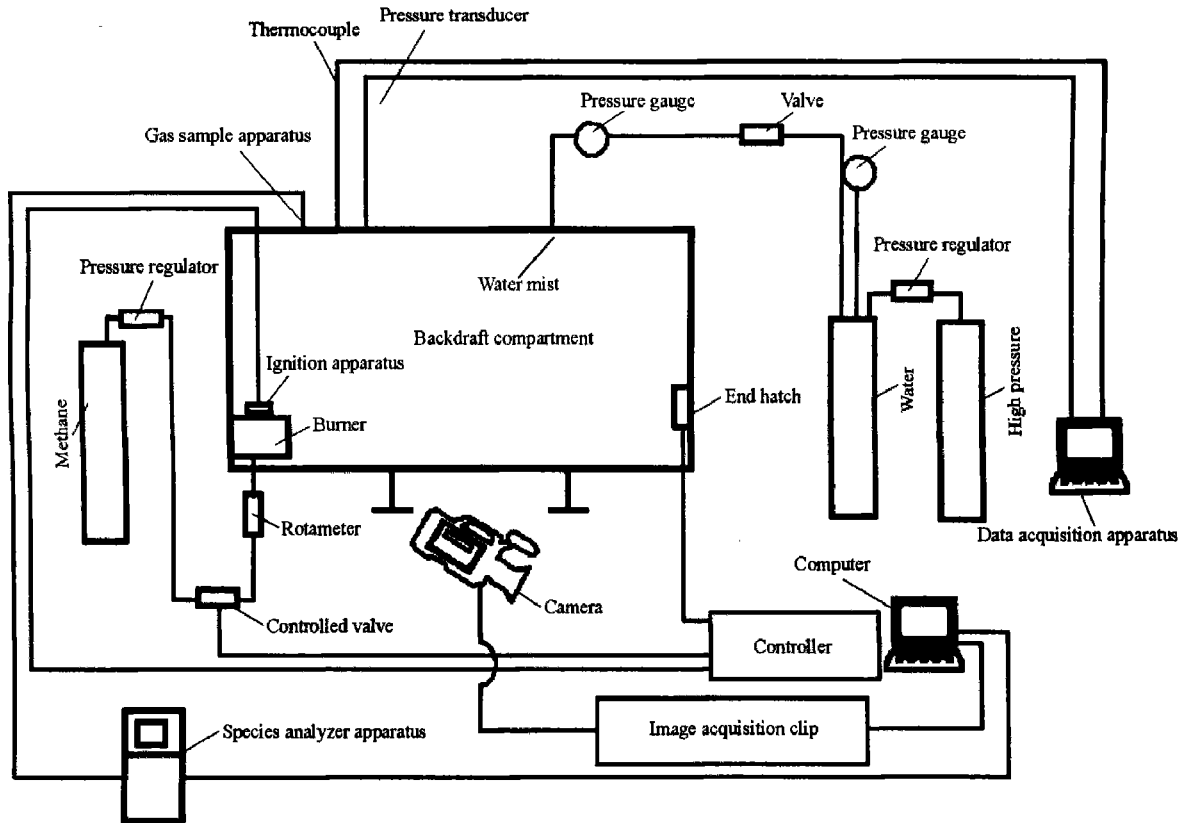


图 1 回燃实验装置的系统示意图

Fig. 1 Schematic map of backdraft experimental apparatus

示;燃烧器的尺寸是  $0.15\text{m} \times 0.15\text{m} \times 0.10\text{m}$  的敞口长方体,脚高  $0.05\text{m}$ ;燃烧器紧靠在小腔体的另一个端面的中间位置。流量计采用玻璃转子流量计,其量程范围是  $160\text{--}1600\text{L/h}$ 。通过电磁阀及其控制电路可以定时、远程控制燃料的供给。本文中采用的燃料是  $99.8\%$  纯度的甲烷。

细水雾供给系统包括细水雾喷头、管路、压力计、阀门、气液罐、减压阀和空气罐,如图 1 所示;本文中采用的细水雾喷头的型号是 212.285,它的锥角是  $60^\circ$ ,工作压力为  $0.2\text{MPa}$  时流量为大约  $3.0\text{mL/s}$ ,产生的细水雾体积平均直径为  $38\mu\text{m}$ 。喷头的安装位置是离端部开口  $0.3\text{m}$ 、离观察窗所在的墙面  $0.3\text{m}$ 、离顶部  $0.078\text{m}$ 。

点火系统包括电热丝和控制电路;电热丝的功率是  $1200\text{W}$ ,其长度为  $0.6\text{m}$  并缠绕在一个直径  $0.05\text{m}$  的陶瓷棒上,陶瓷棒水平固定在燃烧器上。点火系统在实验过程中一直作用。

数据采集系统包括热电偶、压力传感器、HP 数据采集设备、Siemens 组分分析仪(包括组分采集设备和组分分析设备)、采集计算机和 Panasonic DS28 摄像机(包括图像采集卡)。

温度测量采用 10 支热电偶加工成热电偶树的形式垂直固定在腔体内,10 支热电偶均匀分布,间隔  $0.05\text{m}$ ,最高和最低的热电偶分别离小腔体顶面和底面  $0.075\text{m}$ ,热电偶树安装位置为顶面的中心位置。热电偶的型号是  $0.2\text{mm}$  K 型铠装热电偶(镍铬镍硅),其外层是直径  $1\text{mm}$  的不锈钢包层。根据 T. J. Quintiere 等<sup>[10]</sup>的研究成果:建筑火灾中应用区域模拟时的烟气层高度可以利用热电偶树的测量值进行计算。如果假设底层温度为最低两个热电偶测量值的算术平均值<sup>[2]</sup>,也可以计算出高层的温度。

$$\int_0^{h_1} \frac{1}{T} dx = \frac{h_1 - h_L}{T_U} + \frac{h_L}{T_L} \quad (1)$$

$$\int_0^{h_1} T dx = (h_1 - h_L) T_U + h_L T_L \quad (2)$$

式中:  $T_U$  和  $T_L$  分别是腔体高层和低层的温度,  $h_1$  和  $h_L$  分别是腔体和热烟气层的高度。

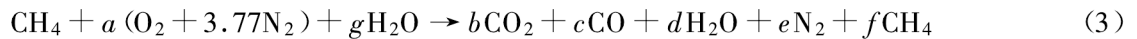
腔体压力采用电子压力传感器测量,其安装位置是观察窗对面的长墙的中间位置,但与底面平行。压力传感器的压力范围是  $-150\text{--}300\text{Pa}$ ,响应时间是  $500\mu\text{s}$ 。

热电偶和压力传感器数据采集利用 HP E1413 数据采集系统进行采集,它能在  $1\text{s}$  内扫描 100000 个

通道。本文中的实验数据间隔为 0.5s。

测量组分浓度采用的是西门子在线组分分析仪,它能同时测量氧气、二氧化碳和一氧化碳。相应的量程分别是 0.25%、0.25%和 0.3%。并由采集计算机以 1s 间隔的速度采集组分浓度数据。气体组分是利用直径 1cm 的不锈钢管连续采集,组分的采集口位置离开口端面 0.9m,离观察窗所在的墙面 0.1m,离顶面 0.1m。

腔体内未燃烧燃料(甲烷)的质量分数可以基于化学反应方程式进行计算。由于腔体内的热烟气是通过燃烧器燃烧的甲烷扩散火焰形成的,所以可以假设:(1)高层热烟气混合均匀;(2)化学反应方程式为



通过方程式中碳、氢和氧元素的平衡,未燃烧燃料的质量分数可以定义为

$$\varphi_f = \frac{m_{\text{CH}_4}}{m_t} - \frac{4}{11} \omega_{\text{CO}_2} - \frac{4}{7} \omega_{\text{CO}} \quad (4)$$

式中: $m_{\text{CH}_4}$ 是燃料的输入量; $m_t = m_{\text{CH}_4} + m_0 + m_{\text{H}_2\text{O}}$ 是腔体内气体总质量,其中  $m_0$  是腔体内初始气体总质量, $m_{\text{H}_2\text{O}}$ 为细水雾喷射量; $\varphi_f$ 、 $\omega_{\text{CO}_2}$ 、 $\omega_{\text{CO}}$ 分别是未燃烧燃料、二氧化碳和一氧化碳的质量分数。

图像数据由 Panasonic DS28 经图像采集卡 BS394 采集,帧频为  $25\text{s}^{-1}$ 。利用图像数据可以得到回燃产生时火焰传播和产生的火球尺寸,以及若回燃不产生时是否产生着火。

在每个实验前,各种数据采集设备先采集 60s 以确定初始状况;小腔体内的燃料点燃后,腔盖关闭,时钟设置为 0;确定的时间段内供入燃料,在此期间,如果需要施加细水雾,需在火焰未熄灭前施加;燃料停止供入的同时,开启腔盖;实验结束后,关闭点火系统和数据采集系统。

### 3 实验结果及讨论

表 1 是小尺寸回燃实验结果。表 1 中,火球尺寸档中“着火”表示腔体内仅发生着火现象,并无火球出现;“无着火”表示既无火球出现,也未发生着火现象。腔体的压力峰值和火球尺寸被认为是回燃强度的标志,腔体压力越大,火球尺寸越大,回燃强度越大。

表 1 小尺寸回燃实验结果

Table 1 Reduced-scale backdraft experimental data

实验条件	实验编号	大气温度/K	燃料流速/(g/s)	供气时间/s	细水雾喷射		组分质量分数/%				腔体温度/K		烟气层高度/ $h_L$ /m	压力峰值/Pa	火球尺寸/m	
					时间区/段/s	质量/g	$\omega_{\text{O}_2}$	$\omega_{\text{CO}_2}$	$\omega_{\text{CO}}$	$\varphi_f$	$T_U$	$T_L$			长度	高度
未施加细水雾	1	297	0.2370	240			15.0	0.8	0.49	9.54	374	339	0.25	1.28	0.71	0.99
	2	297	0.2509	300			14.5	0.5	0.30	12.24	374	339	0.25	1.61	1.24	1.24
	3	298	0.2589	180			15.0	0.4	0.50	8.01	391	347	0.30	0.97	无着火	
	4	298	0.2529	360			14.0	1.5	0.26	14.57	388	338	0.29	1.56	2.42	1.98
	5	296	0.1603	360			14.0	0.8	0.24	9.82	399	344	0.29	0.96	0.80	0.99
	6	296	0.1553	450			13.5	0.8	0.19	11.75	407	343	0.28	0.90	1.27	1.08
	7	297	0.1613	320			16.5	0.5	0.24	8.95	382	335	0.28	0.72	0.40	0.40
	8	297	0.1603	420			15.8	0.4	0.20	11.49	377	337	0.25	0.58	1.10	0.96
施加细水雾	1	293	0.1995	300	3050	54.0	12.2	3.0	0.32	8.39	371	327	0.25	1.04	着火	
	2	294	0.1985	300	3040	34.0	14.2	2.1	0.12	9.11	371	327	0.25	2.02	0.60	0.72
	3	296	0.1991	300	3040	30.8	14.0	2.1	0.10	9.20	370	333	0.29	2.17	0.62	0.83
	4	295	0.1981	300	2040	54.2	10.5	2.8	0.52	8.29	391	333	0.27	0.66	着火	
	5	295	0.1991	300	2030	39.7	14.4	2.1	0.14	9.04	385	343	0.31	1.94	0.60	0.77

从表 1 中可以发现,腔体内的高层温度、低层温度和烟气层高度,以及氧气、一氧化碳和二氧化碳的质量分数对回燃的产生与否无决定作用,所以他们都不是回燃产生的决定性参数。然而腔体的压力峰值和火球尺寸随着腔体内未燃烧燃料的质量分数的增加而增加,也就是说,未燃烧燃料的质量分数越大,回燃强度越大,所以可以得出结论:腔体内未燃烧燃料的质量分数是回燃产生的决定性参数,当它达

到一定的临界值时,回燃就会产生。这从图 2 也可以看出,图 2 是各个实验工况的未燃烧燃料的质量分数,其中方形和圆形标注分别表示回燃产生和不产生,直线表示相应的回燃产生时腔体内未燃烧燃料的质量分数  $\omega$  的估计临界值,通过计算,其估计临界值为 8.8%。

从表 1 中也可以发现,细水雾作用与否对腔体内的高层温度、低层温度和烟气层高度,以及氧气、一氧化碳和二氧化碳的质量分数的影响不大。然而细水雾作用与否却对腔体内未燃烧燃料的质量分数的影响重大,在表 1 中,细水雾喷射质量越大,未燃烧燃料的质量分数越低,相应的腔体压力和火球尺寸越小,有的细水雾作用后甚至不产生回燃。所以细水雾确实对回燃的产生有抑制作用,而且其抑制机理是降低腔体内未燃烧燃料的质量分数。这从图 3 中也可以看出,图 3 是不同细水雾质量  $m_w$  的未燃烧燃料的质量分数,其中方形和圆形标注分别表示回燃产生和不产生,直线表示从图 2 中得到的回燃产生时未燃烧燃料的质量分数的估计临界值。

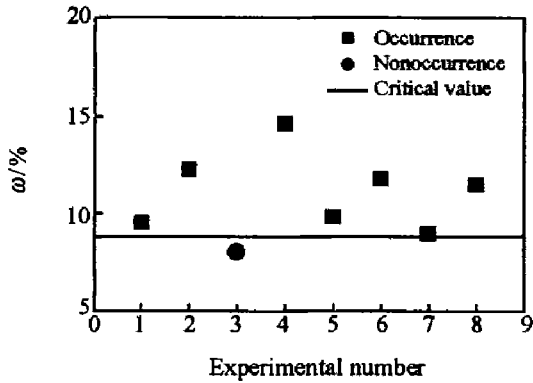


图 2 各个实验工况的腔体内未燃烧燃料的质量分数

Fig. 2 Unburned fuel mass fraction in the compartment

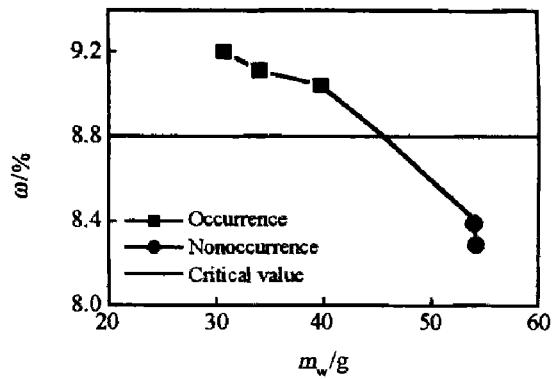


图 3 不同细水雾质量的腔体内未燃烧燃料的质量分数

Fig. 3 Unburned fuel mass fraction in the compartment for different water mist mass

#### 4 基于燃料可燃界限的研究

从上面的分析可以得知:腔体内未燃烧燃料的质量分数是回燃产生的决定性参数;细水雾对回燃产生的抑制机理是降低腔体内未燃烧燃料的质量分数。这个结论也可以利用燃料可燃界限图进行定性研究,图 4 就是常温常压下的燃料(甲烷)可燃界限图。燃料可燃界限图包括三个坐标:燃料(本文中用的燃料是甲烷)、氧气和氮气,为了符合本文中的质量分数的计算,图 4 的坐标单位都采用质量分数,它是由文献[4]的体积分数数据演算得来的。从体积分数换算到质量分数的过程中,CA 线实际上应是个稍微有点弯曲的曲线,但为了研究的方便,非线性可以忽略<sup>[6]</sup>。图 4 包络线内的混合气都是可燃的。A 点表示混合气中没有燃料,仅含有空气的情况。

考虑一个建筑火灾由于消耗完氧气后而熄灭,但建筑物内由于不完全的燃烧产生大量的可燃成分,这种情况可以利用图 4 的燃料可燃界限图进行研究。假设建筑火灾中的氧气消耗完,并且燃烧产物仅用氮气来表示,也就是说建筑物内仅含有燃料和氮气。B 点代表的是 10%燃料和 90%氮气组成的混合气,BA 线表示腔盖开启后新鲜空气的流入并与其混合,由于 BA 与包络线并没有交点,所以混合气与空气混合后并不能被点燃。C 点代表的是 12.5%燃料和 87.5%氮气组成的混合气,CA 线表

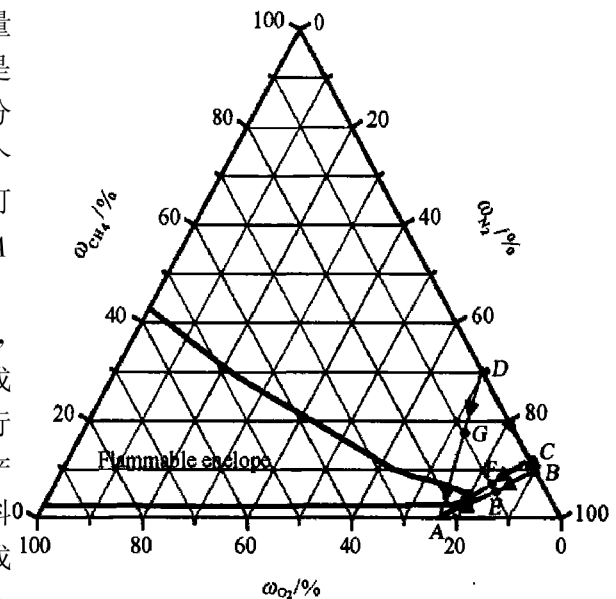


图 4 燃料(甲烷)可燃界限图

Fig. 4 Flammability diagram of fuel (methane)

示腔盖开启后新鲜空气的流入并与之混合,由于  $CA$  与包络线相切,说明 12.5% 是可燃气点燃的最低燃料质量分数,如果混合气被点燃后火焰能够传播到开口处形成火球,就可以产生回燃现象。因此在建筑火灾中,如果混合气仅含有氮气和燃料,  $C$  点就是回燃产生的临界点。  $D$  点的燃料质量分数大于临界值,它所表示的混合气在腔盖开启后也能被点燃,如果火焰能传播到开口处形成火球,也会产生回燃,图 4 中  $DA$  与包络线的相交也说明了这一点。

上面的讨论是基于建筑物内仅含有燃料和氮气(燃烧产物)的情况,而实际的回燃现象中建筑物内还会含有一定量的氧气,在这种情况下与  $B$ 、 $C$ 、 $D$  点对应的是  $E$ 、 $F$ 、 $G$  点,他们所表示的可燃气中含有 10% 的氧气。此时回燃产生的临界燃料质量分数大约是 7.06%,  $E$  点的燃料质量分数低于 7.06%,混合气不能被点燃,建筑火灾中也就无法产生回燃现象;  $G$  点的燃料质量分数高于 7.06%,建筑火灾必然产生回燃现象。观察图 4 也可以知道,建筑物内氧气质量分数越高,回燃产生的燃料质量分数的临界值就越低。

当喷射入一定量的细水雾(假设细水雾能完全变为水蒸气与热烟气充分混合),并把它归类于惰性气体(这里是氮气),这样氮气质量分数升高,如  $DCB$ ,如果细水雾喷射质量不大,  $D$  点仅演变成  $C$  点,混合气照样可以被点燃,可能产生回燃现象,如果细水雾喷射质量足够大使  $D$  点演变成  $B$  点,回燃现象就不可能产生,这也就是细水雾抑制回燃产生的抑制机理,并且细水雾喷射质量越大,腔体内未燃烧燃料的质量分数越低。当然上面的讨论是基于建筑物内仅含有燃料和氮气(燃烧产物)的情况,而实际的回燃现象中建筑物内还会含有一定量的氧气,在这种情况下与  $B$ 、 $C$ 、 $D$  点对应的是  $E$ 、 $F$ 、 $G$  点,他们所表示的可燃气中含有 10% 的氧气。此时所表示细水雾抑制回燃产生的是  $GFE$ ,它与  $DCB$  有着一样的抑制机理。这里需要指出的是,本文中实验得到的腔体内未燃烧燃料的质量分数是腔盖开启时刻腔体内的燃料质量分数,而不是上面所分析的可燃混合气的燃料质量分数,这两者的区别是重力流的产生,所以可燃混合气的燃料质量分数比回燃产生时腔体内未燃烧燃料的质量分数要低。

## 5 结论及进一步工作

腔体内未燃烧燃料的质量分数是回燃产生的决定性参数,当它达到某个临界值时,回燃必然产生,而且腔体内未燃烧燃料的质量分数越高,回燃强度越大;细水雾确实能抑制回燃的产生,它的抑制机理是降低腔体内燃烧燃料的质量分数,从而达到抑制回燃产生的效果,并且细水雾喷射质量越大,未燃烧燃料的质量分数越低,相应的腔体压力和火球尺寸越小,有的细水雾作用后甚至不产生回燃。利用燃料可燃界限图进行实验结果的定性验证及分析,结果表明实验结果的正确性,而且建筑物内氧气质量分数越高,回燃产生的燃料质量分数的临界值就越低,这样如果利用细水雾抑制回燃的产生,细水雾的质量就越小。

基于燃料可燃界限的研究中假设建筑物内的组分只有燃料、氧气和氮气,燃烧产物和喷射入的细水雾都归类为氮气来表示,这对于定量研究建筑火灾中回燃产生的临界条件和细水雾抑制回燃产生的抑制机理显然不是很准确的。进一步的工作是建立包括氮气、燃烧产物(主要是二氧化碳、一氧化碳和水蒸气)、细水雾、氧气和燃料的燃料可燃界限图,这有利于定量研究建筑火灾中回燃产生的临界条件和细水雾抑制回燃产生的抑制机理。

## 参考文献:

- [1] Bukowski R W. Modeling backdraft: the fire at 62 watts street[J]. National Fire Protection Association Journal, 1995, 89: 85-89.
- [2] Fleischmann C M. Backdraft phenomena[R]. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, NIST-GCR-94-646, 1994.
- [3] 傅维镛, 张永廉, 王清安. 燃烧学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988: 270-376.
- [4] Beyler C L. Flammability limits of premixed and diffusion flames[A \ \]. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering[Z]. Massachusetts: National Fire Protection Association, 1995, 2: 147-159.
- [5] Bolliger I B. Full residential-scale backdraft[R]. New Zealand: University of Canterbury, Fire Engineering Research Report 95/1, 1995.

- [6] Gottuk D T, Peatross M J, Farley J P, et al. 1995 class B firefighting doctrine and tactics: final report[R]. Washington, DC: Naval Research Laboratory, NRL/MR/6180/97/7909, 1997.
- [7] Gojkovic D. Initial backdraft experiments[R]. Sweden: Lund University, Report 3121, 2000.
- [8] Fleischmann C M, McGrattan K B. Numerical and experimental gravity currents related to backdrafts[J]. Fire Safety Journal. 1999, 33: 21—34.
- [9] Gottuk D T, Peatross M J, Farley J P, et al. The development and mitigation of backdraft: a real-scale shipboard study [J]. Fire Safety Journal, 1999, 33: 261—282.
- [10] Quintiere J G, Steckler K, Corley D. An assessment of fire induced flows in compartments[J]. Fire Science and Technology, 1984, 4: 1—14.

## Study on backdraft in building fires based on flammable limits of fuel

WENG Wen-guo<sup>\*</sup>, FAN Wei-cheng

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science  
and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

**Abstract:** Backdraft in building fires is hazardous to the safety of people, especially to firefighters, because of its abruptness and powerful destruction. In this paper, a set of reduced-scale backdraft experimental apparatus was established and a series of experiments were conducted in order to study the critical condition of occurrence of backdraft and the feasibility and mitigation mechanism of water mist mitigating backdraft. The experimental results show that the mass fraction of unburned fuel in the compartment is the key parameter determining the occurrence of backdraft, and water mist assuredly mitigates backdraft and the mitigation mechanism is by means of diluting gases in the compartment and reducing the mass fraction of fuel. At last the experimental results are qualitatively validated and analyzed based on flammability diagram of fuel.

**Key words:** mechanics of explosion; flammable limits of fuel; backdraft; building fires

---

\* Corresponding author; WENG Wen-guo; E-mail address: wgweng@ustc.edu.cn; Telephone: 0551-3601657