

工程与实践

6-7

# 地下建筑火灾中火烟温度、 火风压沿程变化及其防治措施\*

黄恒栋  
(华中理工大学)

TU967  
TU995.12

**A 摘要** 首先从地下巷道空间起火点处因起火前后时序变化而引起起火点处的温度变化出发,提出了作为高温火烟沿地下巷道流动动力的“火风压”(The high temperature smoke pressure)概念,并仿照热风压而提出了火风压表达式。然后,根据火烟气流与巷道壁面之间热量交换中的守恒原理推证出了高温火烟沿地下巷道流动时,其温度沿程变化的规律,进而推证出了地下建筑火灾中,高温火烟沿地下巷道流动时所产生的火风压沿程变化的表达式。最后,在上述理论指导下,对地下建筑的建筑设计、消防安全管理和防、排烟正压送风等方面提出了相应的防治措施。

**关键词** 火烟温度,火风压,防治措施

**中图法分类号** TU92

在我国,由于地下空间的大量开发与利用,许多地下商场、地下旅馆、地下饭店、地下游乐场不断涌现。不仅增加了国家的经济效益,而且也扩展了人们的活动空间、丰富了人们的生活,同时也解决了现代化城市的地面交通等问题。但是,地下商场火灾时有发生,给国家造成巨大的经济损失。例如,1988.9.15凌晨0:45南昌老福山地下商场火灾,烧毁整个地下商场的百分之三,火灾扑救持续了十几个小时,庆幸的是深夜凌晨发生火灾而无一人员伤亡。

由于地下商场中流动人员多(假节日超过十几万人),可燃、易燃物质多,一旦起火,导致地下巷道中火烟大、毒性大,给安全疏散与灭火扑救造成极大困难。因此,研究地下建筑火灾中的火烟沿地下巷道的运动变化以及由此所产生的火风压变化,有着重要的理论与实践意义,更为安全疏散与灭火扑救提供一些理论根据。

## 1 地下巷道火灾中的火风压

众所周知,地下巷道中,由于地下巷道与地面的空间位置变化,而引起地下巷道中空气

\* 收稿日期:1993-10-07

黄恒栋,男,1937年生,副教授,华中理工大学建筑工程学院(430074)

国家自然科学基金资助项目

与地面空气之间的温度差异,从而产生了促使空气从进风口流入而从出风口流出的热风压并以 $\Delta h_r$ 表示。热风压 $\Delta h_r$ 由下式确定:

$$\Delta h_r = \frac{t_1 - t_0}{T_1} r_0 h = \frac{\Delta t_1}{T_1} r_0 h \quad (1)$$

式中  $t_1$ ——地下巷道中的空气温度(°C);  
 $t_0$ ——地面空气温度(°C);  
 $T_1$ ——地下巷道中空气温度的绝对温度(K),且 $T_1 = 273 + t_1$ ;  
 $r_0$ ——地面空气的容重(N/m<sup>3</sup>);  
 $h$ ——地下巷道的净空高度(m)。

同理,在地下巷道火灾中,由于起火点处起火前后的时序变化,而造成该起火点处的空气与火烟之间的温度不同,从而产生了促使高温火烟自起火点处向地下巷道的两个方向流动的局部压力,为了区别上述因空间序列变化而引起的温差所产生的热风压 $\Delta h_r$ ,我们称此种因时间序列变化而引起的温差所造成的局部压力为火风压,并以 $\Delta h_f$ 表示。

火风压 $\Delta h_f$ 由下式确定:

$$\Delta h_f = \frac{t_f - t_r}{T_r} r_r h = \frac{\Delta t_f}{T_r} r_r h \quad (2)$$

式中  $t_f$ ——地下巷道中起火点处的火烟温度(°C);  
 $t_r$ ——地下巷道中起火点处的起火前的空气温度(°C);  
 $r_r$ ——地下巷道中起火点处的起火前的空气容重(N/m<sup>3</sup>);  
 $h$ ——地下巷道的高度(m);  
 $T_r$ ——地下巷道中起火点处火烟温度的绝对温标(K),且 $T_r = 273 + t_r$ 。

通常,地下巷道的高度 $h = 4.0$  m,巷道中的起火前的空气温度 $t_r = 25$  °C,其相应的空气容重 $r_r = 11.60$  N/m<sup>3</sup>。如果出现火灾,当火灾旺盛期时火烟温度 $t_f = 1000$  °C,则在巷道起火点处所产生的火风压值为:

$$\Delta h_f = 360 \text{ Pa}$$

上述式(2)表明:当地下巷道尺度、空气温度一定时,火灾中火烟所产生的火风压 $\Delta h_f$ 在起火点处的数值,主要取决于巷道起火段处的易燃、可燃物数量多少及其燃烧特性空间分布状态。由此,我们可得出在消防安全管理上的下面几点重要启示:

● 限制巷道中的可燃物数量(火荷),并使其难燃化处理,即使发生火灾,也可使其燃烧所产生的火风压 $\Delta h_f$ 大为降低。

● 在地下巷道空间序列上,可燃物的空间分布应由巷道进(出)口处向内,宜按易燃、可燃、难燃、不燃特性分布物品。尤其在地下巷道出口段(即上行巷道段)更为有利。此时,可燃物起火后,火烟在热风压 $\Delta h_r$ 和火风压 $\Delta h_f$ 共同作用下,可由上行巷道口(自然出风口)排除到地面,以减少火烟对地下巷道深部区域的污染。

● 在下行巷道口(自然进风口),或上行巷道口(自然出风口)附近发生火灾时,可由巷道中部,所设置的正压送风设备送风,再由巷道口所设置的负压排烟设备(或上行巷道的自然出风口)将火烟排除到地面,以确保地下巷道不受火烟的烟、热污染,从而赢得安全疏散和灭火扑救时间。

## 2 地下巷道火灾中火烟温度的沿程变化

地下巷道发生火灾时,因可燃物燃烧所析出的高温有毒火烟,在巷道中热风压  $\Delta h_T$  和火风压  $\Delta h_f$  的共同作用下,则沿地下巷道蔓延扩散运动。为使火烟运动研究简化,可假设地下巷道的长度为  $L$ 、地下巷道的截面尺度:巷道高度为  $h$ ,巷道宽度为  $b$ ,且  $L \gg h, L \gg b$ 。在此条件下,可视上述高温火烟气流沿地下巷道的扩散蔓延运动为一维流动。

此时,若地下巷道截面的周长为  $P$ (对通常情况下的矩形截面,则  $p = 2(h + b)$ ),火烟在起火点处所引起的温度变化为  $\Delta t_s$ ( $\Delta t_s = t_s - t_s$ ),火烟自起火点沿巷道流经  $x$  距离并在点  $x$  处所引起的温度变化为  $\Delta t_x$ ( $\Delta t_x = t_x - t_s$ ),火烟自起火点沿巷道流经  $x$  距离并在点  $x$  处所引起的温度变化为  $\Delta t_x$ ( $\Delta t_x = t_x - t_s$ ),则当此高温火烟自点  $x$  处沿巷道流经微小距离  $dx$  时,在沿程  $dx$  所引起的温度变化便为  $d(\Delta t_x)$ 。因此,在单位时间(一秒钟)内,该高温火烟在沿程  $dx$  路径上向巷道壁面放出的热量  $dQ$  为:

$$dQ = - GC_p d(\Delta t_x) \quad (3)$$

式中  $G$ ——高温火烟气流的质量流量 (kg/s);

$C_p$ ——高温火烟气流的比热 (KCal/kg · °C)。

式(3)中右边冠以符号“-”是因为高温火烟向巷道壁面放出热量的缘故。

另一方面,在同样的单位时间(一秒钟)内沿程  $dx$  段的巷道壁面从高温火烟所吸收的热量  $dQ'$  为:

$$dQ' = \frac{K}{3600} (P dx) \cdot \Delta t_x \quad (4)$$

式中  $K$ ——高温火烟与巷道壁面之间的对流换系数 (KCal/m<sup>2</sup> · °C h)。在此情况下,  $K$  值一般由经验公式:  $K = 2K' \sqrt{V}$  确定。

其中  $K' = 5 \sim 10, V$ ——火烟流动速度 (m/s)。

高温火烟流经巷道微段  $dx$  所放出的热量应全部为此段巷道壁面所吸收。因此,根据火烟与壁面之间的放热、吸热能量守恒定律有:  $dQ = dQ'$ 。根据式(3)、式(4)有:

$$-\frac{kp}{3600 GC_p} dx = \frac{d(\Delta t_x)}{\Delta t_x} \quad (5)$$

上式中,令  $\frac{kp}{3600 GC_p} = C$ ,对式(5)进行积分并代入初始条件:当  $x = 0$  时,则  $\Delta t_x = \Delta t_s$ 。最后得到:

$$\Delta t_x = \Delta t_s e^{-C/G x} \quad (6)$$

或

$$\Delta t_x = \Delta t_s \exp[-(C/G)x] \quad (6')$$

式(6)或式(6')表明:由于地下巷道壁面对高温火烟具有冷却降温作用,故使得高温火烟沿地下巷道扩散流动过程中,其温度沿程以  $e$  为底指数形式而降低。

根据式(6),地下建筑火灾中因可燃物燃烧所产生的不同温度的高温火烟沿不同巷道截面尺度( $h, b$ ),以不同的水平流动速度( $V$ )流经  $x$  距离,并在起火层和  $x$  点所引起不同的温度变化相对比值( $\Delta t_x/\Delta t_s$ )条件下,所求得的高温火烟需流经的最小距离( $x$ )如表 1 所示。

根据式(6)我们可得出下面几点重要结论:

● 为使自巷道起火点开始,流经巷道  $x$  距离的高温火烟在该点所引起的温度变化  $\Delta t$  减小,则必须首先减小在起火点因可燃物燃烧所引起的温度变化  $\Delta t_0$ 。因此,应依燃烧特性限制巷适中易燃、可燃物的数量及其分布状态,同时应使之经过阻燃处理。此点结论与降低火风压的结论是一致的。在地下商场等人流密集的地下建筑中在消防安全管理上特别加以重视。也是“预防为主”的重要体现。

● 同理,欲使高温火烟沿程所引起的温度变化  $\Delta t$  减小,则应减小进入巷道中高温火烟的质量流量  $G$ 。此点在此下巷道的防火隔断上,应采用增加该巷道风阻的措施。在人流密集的地下市场、娱乐场所宜增设防火隔烟水幕墙,它既有隔烟,冷却高温火烟作用,又便于地下人员的安全疏散和消防人员的灭火扑救。

● 欲使高温火烟沿程所引起的温度变化  $\Delta t$  减小,尚须使地下巷道截面的周长  $P$  尽可能在建筑设计时增大,即增加巷道壁面的冷却,降温作用。因此,在建筑设计上应采用宽而矮的矩形巷道截面。此时,不但有利增加壁面的冷却,降温作用,而且也有利于安全疏散。此点应引起建筑师们的充分注意。

表 1 当巷道宽度  $b$ ,高度  $h$ ,起火点温度  $t_0$  及火烟流速  $V$  不同时,火烟引起巷道某点温度  $t$  下降程度所需自起火点起的最小流经距离  $x$  (m)

火烟流速 $v$ (m/s)		0.3											
通道宽度 $b$ (m)		1.30						1.40					
通道净高 $h$ (m)		2.60			2.00			2.60			2.00		
起火点火烟温度 $t_0$ (°C)		400	600	800	400	600	800	400	600	800	400	600	800
火烟温度降低比值 ( $\Delta t_0/\Delta t$ ) (%)	0.1	23.25	17.92	14.60	23.82	18.33	14.92	26.45	20.35	16.57	26.72	19.75	16.90
	0.05	30.24	23.31	18.99	30.99	23.85	19.41	34.40	26.21	21.55	33.37	25.69	20.93
	0.01	46.49	35.83	29.10	48.50	36.66	29.84	52.88	40.70	33.13	51.29	36.60	32.17
	0.001	67.74	53.74	43.78	71.45	54.99	44.76	79.32	61.05	49.70	76.94	59.23	48.26

火烟流速 $v$ (m/s)		0.5											
通道宽度 $b$ (m)		1.30						1.40					
通道高度 $h$ (m)		2.60			2.00			2.80			2.80		
起火点火烟温度 $t_0$ (°C)		400	600	800	400	600	800	400	600	800	400	600	800
火烟温度降低比值 ( $\Delta t_0/\Delta t$ ) (%)	0.1	32.50	25.07	20.42	33.36	25.65	20.90	34.74	26.33	21.45	35.91	27.63	22.51
	0.05	42.38	32.64	26.57	43.40	33.36	27.19	44.53	34.25	27.91	46.70	35.95	29.23
	0.01	65.15	50.16	40.84	66.70	51.28	41.79	68.47	52.64	42.92	71.70	52.56	45.00
	0.001	97.73	75.25	61.26	100.06	76.93	62.70	102.71	78.96	64.35	107.70	82.87	67.51

最后,必须强调,由式(6)所揭示的高温火烟沿地下巷道扩散运动规律,同样适用于高层建筑火灾时的高温火烟沿其安全疏散通道蔓延,扩散运动情况。

### 3 地下巷道中火风压沿程变化

由前述高温火烟沿地下巷道流动规律的论证中可知:高温火烟沿巷道流动所到之处,在沿程各点均引起温度变化,从而高温火烟在相应各点也产生火风压,若高温火烟自起火点起,沿巷道流经  $x$  距离并在该点处所产生的火风压为  $\Delta h_{f,x}$ ,则由式(2)有:

$$\Delta h_{f,x} = \frac{\Delta t_x}{T_x} r_1 h \quad (7)$$

式中,  $\Delta t_x$  为高温火烟流经点  $x$  处,在该点所引起的温度变化,其大小由式(6)确定。将式(6)代入式(7)中,最后得:

$$\Delta h_{f,x} = \frac{\Delta t_x}{T_x} r_1 h e^{-(C/G)x} \quad (8)$$

或者

$$\Delta h_{f,x} = \frac{\Delta t_x}{T_x} r_1 h \exp[-(C/G)x] \quad (8')$$

式中,  $T_x$  为高温火烟流经点  $x$  处的绝对温度值[K]。

上式表明:由于地下巷道壁面对高温火烟具有冷却降温作用,高温火烟沿巷道流动在巷道各点所产生的火风压  $\Delta h_{f,x}$ ,沿程以  $e$  为底的指数函数形式减少的变化规律。

显然,式(8)中,当  $x = 0$ ,即当火烟产生于起火点时,则有:  $e^{-(C/G)x} = 1$ ,且  $T_x = T_0$ 。从而式(8)变为式(2)。故式(2)所示的火风压  $\Delta h_f$ ,即为地下巷道火灾中起火点处所产生的火风压,则为高温火烟流经巷道各点并在该处所产生的火风压的最大火风压,即  $\Delta h_{f,x=0} = \Delta h_f$ 。

根据上面讨论,地下巷道火灾中所需正压送风的风压  $\Delta p$  应根据下行巷道段发生火灾的最不利气流条件确定。即正压送风为  $\Delta p$ ,热风压  $\Delta h_r$ 、火风压  $\Delta h_f$ ,在不计地面风压情况下应满足下面不等式:

$$\Delta p \geq \Delta h_r - \Delta h_f \quad (9)$$

才能阻止高温火烟由自然进风口向地下巷道深部方向流动(当起火点位于进风口段附近时,则防止高温火烟对地下巷道深部的火烟污染)。

显然,当火灾发生在上行巷道段(即自然出风口附近)时,式(9)所确定的正压送风风压为  $\Delta p$  更促使高温火烟自起火点向出风口排除于地面,避免其对巷道深部的火烟污染。

为了防止火灾发生在地下巷道深部段时,高温火烟对整个地下巷道的火烟污染,在地下巷道深部段应设置通风、排气竖井。平时用作通风、换气,起火时用作进风、排烟。

此外,尚可在地下巷道的进风口、出风口,深部排井加设负压排烟设备,分别对上述各区域火灾所产生的火烟加速排出地面。

## 4 地下建筑火灾防治措施

上述有关火烟温度、火风压沿程变化的论证为地下建筑火灾的防治提供了科学依据。归纳如后:

● 为降低巷道中的火风压和沿程温度,必须限制地下巷道中的易燃、可燃物的数量,以减少因其燃烧而在起火点所引起的温度变化  $\Delta t_s$ 。

● 在不同的巷道区段,应根据易燃、可燃物的燃烧特性使其分布状态有利于减少火烟对巷道深部区段的热污染和烟污染。即自地下巷道的进、出口区段至巷道深部,按易燃、可燃、难燃、不燃等燃烧特性物质进行分布。同时还应使燃烧发烟系数大的物质分布在靠近进、出口附近区段。此点在地下商场、地下物资贮存仓库中尤为重要。

● 在地下商场、地下娱乐场所,应严禁吸烟并限制生活用火、用电以减少火灾隐患。

● 在地下建筑设计中,地下巷道截面形状选择应选取其截面周长尽可长的矩形截面,即选取高度低而宽度大的矩形截面,以增加巷道壁面对高温火烟的冷却、降温作用。

● 为降低巷道各点的火烟温度和火风压,应阻止起火段中的高温火烟进入非起火区段巷道的高温火烟质量流量。即在巷道防火隔断中采用防火隔烟水幕屏设施,它既有隔烟、冷却作用又有利于地下人员的安全疏散和消防人员的灭火扑救。尤其有利于防止火烟对整个地下巷道深部的火烟污染。

● 在地下建筑火灾中,为提高其火灾安全性,在巷道深部应设置正压道风防烟设施而在巷道进、出口以及排气竖井处应设置负压排烟设施。确保巷道各区段发生火灾时,其深部不受火烟污染。其正压送风压力应由井风段的热风压  $\Delta h_r$  和火风压  $\Delta h_f$  按(9)式确定。

最近还应指出,上面论证的规律也适合于高层建筑安全疏散通道的情况。

### 参 考 文 献

- 1 黄恒栋. 高层建筑中火烟沿通道蔓延及防治. 全国高层建筑防火技术研讨会论文集《建筑防火设计与应用》,海洋出版社,1991
- 2 黄恒栋. 高层建筑火灾中的热风压与火风压. 全国高层建筑防火技术研讨会论文集《建筑防火设计与应用》,海洋出版社,1991
- 3 黄恒栋. 地下建筑火灾中火风压及其防治. 《自动消防灭火系统论文集》第二卷,全国自动消防水泥工程标准技术委员会,1991
- 4 黄恒栋. 地下巷道风流逆转理论及其在安全疏散与灭火扑救中的应用. 国家自然科学基金资助项,湖北省消防协会优秀论文,1991
- 5 黄恒栋. The Moving of High Temperature smoke in fire along save passageway of underground buildings. International symposium on multidisciplines, July-3, 1992
- 6 黄恒栋. The countermeasures to the pollutions of smoke of high temperature in passageway of underground buildings. Asian conference on Fire Science and Technology, 9-13 th october, 1992

(编辑:胡玲)