



中华人民共和国国家标准

GB/T 31593.6—2015

消防安全工程 第 6 部分：烟气层的计算要求

Fire safety engineering—
Part 6: Requirements governing algebraic equations for smoke layers

(ISO 16735:2006, Fire safety engineering—
Requirements governing algebraic equations—
Smoke layers, MOD)

2015-06-02 发布

2015-08-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	I
引言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 物理现象的描述	2
5 计算书	2
6 计算公式的局限性	3
7 计算公式的输入参数	3
8 计算公式的适用范围	3
附录 A (资料性附录) 本部分与 ISO 16735:2006 的章条编号对照情况	4
附录 B (资料性附录) 烟气层计算概述	5
附录 C (资料性附录) 满足附录 B 要求的烟气层计算公式	7
参考文献	23

前 言

GB/T 31593《消防安全工程》分为以下九个部分：

- 第1部分：计算方法的评估、验证和确认；
- 第2部分：所需数据类型与信息；
- 第3部分：火灾风险评估指南；
- 第4部分：设定火灾场景和设定火灾的选择；
- 第5部分：火羽流的计算要求；
- 第6部分：烟气层的计算要求；
- 第7部分：顶棚射流的计算要求；
- 第8部分：开口气流的计算要求；
- 第9部分：人员疏散评估指南。

本部分为 GB/T 31593 的第 6 部分。

本部分按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本部分使用重新起草法修改采用 ISO 16735:2006《消防安全工程 计算公式控制要求 烟气层》。

本部分与 ISO 16735:2006 相比在结构上有较多调整，附录 A 中列出了本部分与 ISO 16735:2006 的章条编号对照一览表。

本部分与 ISO 16735:2006 的技术性差异及其原因如下：

- 关于规范性引用文件，本部分做了具有技术性差异的调整，以适应我国的技术条件，调整的情况集中反映在第 2 章“规范性引用文件”中，具体调整如下：

- 用 GB/T 5907(所有部分)代替了 ISO 13943(见第 3 章)；
- 用修改采用国际标准的 GB/T 31593.1 代替了 ISO/TR 13387-3(见 5.1、7.3)；
- 删除了 ISO 16735:2006 当中仅被资料性附录引用的 ISO 16734:2006、ISO 16737。

- 将国际标准中 1.1~1.4 改为列项，以符合我国标准的编写习惯(见第 1 章)。

为了方便使用和符合我国相关标准编写要求，本部分还做了下列编辑性修改：

- 删除了国际标准的前言，重新起草了前言；
- 修改了国际标准的引言，将其作为本部分的引言；
- 将国际标准的“本国际标准”一词改为“本部分”；
- 将国际标准中某些标点符号修改为符合汉语习惯的标点符号；
- 调整了部分公式的编排格式；
- 增加了附录 A(资料性附录)，给出了本部分与国际标准的章条编号对照情况。

本部分由中华人民共和国公安部提出。

本部分由全国消防标准化技术委员会建筑消防安全工程分技术委员会(SAC/TC 113/SC 13)归口。

本部分起草单位：公安部天津消防研究所、公安部四川消防研究所、中国科学技术大学、中国建筑科学研究院。

本部分主要起草人：姚松经、韩伟平、毕少颖、智会强、阚强、张玉贤、陆守香、胡忠日、张向阳、邓松华、郑巍、郭歌。

引 言

本部分所讨论的计算公式适用于设定火灾场景的量化分析,专业人员无须进行繁杂的数值计算,就能够依据这些公式快速判断初步消防安全设计是否需要调整以及如何调整,以满足预期的性能指标要求。这些公式在以下方面已经得到应用:

- 测定火羽流传热,包括对流和辐射;
- 预测顶棚射流特性以调节探测器的响应时间;
- 计算通风口的排烟能力;
- 分析分隔空间内的烟气传递和轰燃等火灾危害。

对于烟气层,计算公式经常用来估算烟气充满一个分隔空间所需的时间以及烟气层的温度和浓度。

针对不同类型的烟气层,本部分的附录 B 和附录 C 分别给出了符合本部分要求的计算公式示例。附录 B 给出了烟气层的一般信息和守恒关系,附录 C 给出了计算烟气层特性的具体公式及其计算示例。

GB/T 31593.1 规定了运用数学公式进行火灾动力学计算的通用要求,本部分是这些通用要求的具体实践。如果采用数学模型计算火灾发展过程及其产生的后果,本部分所讨论的计算公式可用于对其结论进行校验。

本部分适合从事消防安全工程的专业人员使用,包括消防设计人员、消防救援人员、消防标准规范制定者、保险人、消防安全管理人员,标准使用者需要充分理解本部分给出的计算方法中相关参数的含义和应用条件。

消防安全工程

第6部分：烟气层的计算要求

1 范围

GB/T 31593 的本部分规定了火灾烟气层特征值计算公式的应用要求，提供了与烟气层计算公式应用相关的下列通用要求：

- a) 物理现象的描述；
- b) 计算书；
- c) 计算公式的局限性；
- d) 计算公式的输入参数；
- e) 计算公式的适用范围。

本部分适用于建设工程消防性能化设计和评估中烟气层的计算。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 5907(所有部分) 消防词汇

GB/T 31593.1 消防安全工程 第1部分：计算方法的评估、验证和确认(GB/T 31593.1—2015, ISO 16730:2008, MOD)

GB/T 31593.5 消防安全工程 第5部分：火羽流的计算要求(GB/T 31593.5—2015, ISO 16734:2006, MOD)

GB/T 31593.8 消防安全工程 第8部分：开口气流的计算要求(GB/T 31593.8—2015, ISO 16737:2006, MOD)

3 术语和定义

GB/T 5907 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

边界面 boundary

确定室内空间范围的表面。

3.2

火羽流 fire plume

由燃烧所产生的浮力形成的向上湍流流动，通常包括下部的燃烧区域。

3.3

火焰 flame

火羽流(3.2)的发光区域。

3.4

界面位置 interface position

烟气层高度

烟气层(3.7)相对于参考高度的高度。

注：参考高度通常为室内空间的最低边界面(3.1)高度。

3.5

准稳态 quasi-steady state

假定火源热释放速率变化引起的所有影响在流场中能立刻反映出来的状态。

3.6

烟气 smoke

烟

物质高温分解或燃烧时产生的固体和液体微粒、气体,连同夹带和混入的部分空气形成的气流。

3.7

烟气层 smoke layer

热上层 hot upper layer

热气层 hot-gas layer

由火灾引发,在室内空间的最高边界面(3.1)下面形成并聚集,相对均匀的一定量的烟气(3.6)。

3.8

烟气层界面 smoke layer interface

烟气层(3.7)与其下面无烟层的水平界面。

3.9

开口 vent

在室内空间边界面(3.1)上,空气和烟气(3.6)通过自然或机械方式而流通的孔洞。

3.10

开口气流 vent flow

通过室内空间边界面(3.1)开口(3.9)的烟气(3.6)或空气流。

4 物理现象的描述

4.1 在室内空间中,火源生成浮动烟气层是一种复杂的热物理现象。它可能是高瞬变状态,也可能是接近稳态。在有焰燃烧区域和未发生燃烧的区域,都可能出现烟气层。除了受浮力影响,烟气层还会受到通风排烟的影响。

4.2 应采用图表描述火源类型、室内空间流动边界面条件和其他场景因素。

4.3 应明确识别需要计算的烟气层特征参数及其适用范围,适当时应包括由相关计算量推导出来的特征参数(例如通过质量和能量守恒推导出的烟气浓度与升高的气体温度之间的关系)以及其他与烟气层对物体和人员的热作用相关的特征参数。

4.4 应明确识别具体计算公式适用的物理现象(如单纯的蓄烟,机械排烟等)。

4.5 不同的计算公式描述不同的烟气层特性(见 4.3)或适用于不同的火灾场景(见 4.4),当有多种方法可用于计算同一个给定量的值时,应明示其结果与选用的计算方法无关。

5 计算书

5.1 计算书的一般要求见 GB/T 31593.1。

- 5.2 计算步骤应由一系列的计算公式表述。
- 5.3 每个计算公式应由独立的条款表述,其内容应包含公式输出的详细描述,以及该公式解释性说明和限定条件。
- 5.4 应明确定义计算公式中的各变量,给出适用的 SI 单位;计算公式应优先选用量关系式。
- 5.5 应酌情通过引用公认手册、科技文献或通过推导等方法给出公式的科学依据。
- 5.6 应给出公式的应用实例,演示如何使用符合第 4 章要求的输入参数和具体计算过程。

6 计算公式的局限性

- 6.1 应给出直接应用计算公式计算输出参数的定量限制条件,并符合第 4 章所描述场景的要求。
- 6.2 应给出在更通用的计算方法中引用计算公式的注意事项,包括检查与计算方法中用到的其他关系式的一致性以及所采用的计算方案。

7 计算公式的输入参数

- 7.1 应明确识别计算公式的输入参数,如热释放速率或几何尺寸。
- 7.2 应识别或明确提供输入参数的数据来源。
- 7.3 应按 GB/T 31593.1 的规定列出输入参数的有效范围。

8 计算公式的适用范围

- 8.1 应通过一组或多组测量数据确定公式的适用范围。这些数据应通过文件化的程序或标准(参见 GB/T 6379)进行评估并达到一定的质量水平(如重复性、再现性)。
- 8.2 应按照计算方法的评估、验证和确认原则,通过与 8.1 测量数据的比对确定计算公式的适用范围。
- 8.3 应明确识别用于第 4 章特定场景的计算公式限定条件造成的潜在误差。

附 录 A
(资料性附录)

本部分与 ISO 16735:2006 的章条编号对照情况

表 A.1 给出了本部分章条编号与 ISO 16735:2006 的章条编号的对照一览表。

表 A.1 本部分与 ISO 16735:2006 的章条编号对照情况

本部分章条编号	对应的 ISO 16735:2006 的章条编号
1	1.1~1.4
3.1~3.10	A.1.1、A.1.3、A.1.4、A.1.6~A.1.12
附录 A	—
附录 B	附录 A
B.1	A.2
B.1.1~B.1.2	A.2.1~A.2.2
B.2	A.3
B.2.1~B.2.7	A.3.1~A.3.7
附录 C(各条款)	附录 B(各相应条款)
注：表中的章条以外的本部分其他章条编号与 ISO 16735:2006 其他章条编号均相同且内容相对应。	

附录 B
(资料性附录)
烟气层计算概述

B.1 物理现象的描述

B.1.1 计算方法概述

本附录旨在描述室内空间中火灾的界面位置、平均温度和边界面以下烟气层的特定化学物平均浓度的计算方法。这些计算方法基于质量、物质和能量守恒定律,适用于与热力学参考空间相同的烟气层。

燃烧时,烟会在室内空间的上部积聚。当烟气层的温度和物质浓度比较均匀时,根据烟气层的质量、物质和能量守恒定律,可计算温度平均值、烟浓度和界面位置。火羽流和开口气流的详细计算要求见 GB/T 31593.5—2015 和 GB/T 31593.8。

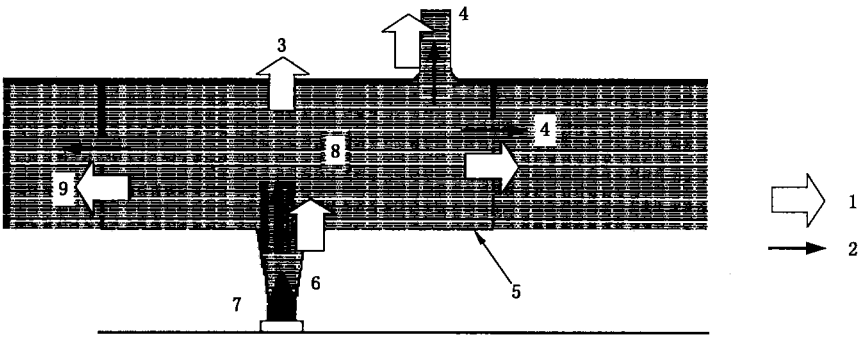
B.1.2 所需计算的烟气层特征值

所需计算的烟气层特征值为平均烟气层温度、物质浓度和界面位置。

B.2 计算书

B.2.1 概述

在室内空间的火源上方产生的烟气层如图 B.1 所示。B.2.2~B.2.4 规定了质量、能量和特定的化学物守恒。



说明:

- | | |
|----------|-----------------------------|
| 1——热流; | 6——火羽流; |
| 2——质量流; | 7——火源; |
| 3——壁吸收热; | 8——体积为 V , 温度为 T_0 的参考; |
| 4——开口气流; | 9——开口气流。 |
| 5——参考空间; | |

图 B.1 在室内空间中火源烟气层的热和质量守恒

B.2.2 质量守恒

烟气层中质量守恒应考虑选择如图 B.1 虚线所示的适当参考空间。通过各界面流入该参考空间(流出该空间的为负值)的质量流速应等于该空间烟气层的质量累积速率。必要时应考虑火羽流、开口气流和其他流动。

B.2.3 能量守恒

烟气层的能量守恒采用与质量守恒相同的方法。通过烟气层界面流入(流出的为负值)的能量流速应等于该空间烟气层的能量累积速率。除了火羽流和开口气流外,还应考虑室内空间边界面发生的辐射损失和热量吸收。

注:当无法确定火焰的辐射热损失时,质量流速可近似用附录 B 提供的热释放速率代替。

B.2.4 特定化学物的守恒

特定化学物的质量守恒采用与总的质量守恒相同的方法。如果烟气层中发生气相化学反应,应适当考虑反应速率。

B.2.5 通过界面的火羽流的质量流速

在界面(烟气层的底面)上,火羽流的质量流速应作为火的热释放速率和火源底面与烟气层界面间的垂直距离的函数给出。GB/T 31593.5—2015 给出了具有这种火羽流特性的公式示例。

B.2.6 通过开口的烟的质量流速

通过开口的质量流速应作为烟气层的温度、烟气层与相邻空间的压差、开口宽度和开口高度的函数给出。GB/T 31593.8 给出了具有这种开口特性的公式示例。

B.2.7 状态方程

状态方程表达了烟的温度和密度的关系。烟近似于理想气体,其性质等同于空气。

附录 C

(资料性附录)

满足附录 B 要求的烟气层计算公式

C.1 本附录所用的符号说明

本附录所用的符号说明见表 C.1。

表 C.1 本附录所用的符号说明

符号	说 明	单位
A	室内空间的底面面积	m^2
A_{open}	吸气(新鲜空气)口的面积	m^2
A_{vent}	排烟口的面积	m^2
A_{wall}	和烟气层接触的室内空间边界面的表面积	m^2
C_D	流量系数	
c_V	室内空间界面材料的定容热容	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
c_p	常压下空气的定压热容	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
D	火源的直径	m
D_{wall}	室内空间界面材料的厚度	m
g	重力加速度	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
H	室内空间的高度	m
H_l	开口的下边界面高度	m
H_u	开口的上边界面高度	m
h_{wall}	室内空间边界面的有效传热系数	$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
k	室内空间界面材料的导热系数	$\text{kW} \cdot \text{m} \cdot \text{K}$
L	平均火焰高度	m
$\dot{m}_a$	进入室内空间的空气的质量流速	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
$\dot{m}_e$	排烟的质量流速	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
$\dot{m}_p$	火羽流中气体的质量流速	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
$\dot{Q}$	火源的热释放速率	kW
$\dot{Q}_c$	火源的对流热释放速率, $(1-\chi)\dot{Q}$	kW
T_s	烟气层温度	K
T_0	参考温度,通常取室外温度	K
t	时间	s
t_c	室内空间界面吸收热量的特征时间	s
$\dot{V}_e$	机械排气系统的体积流速	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

表 C.1 (续)

符号	说 明	单位
x	产生热辐射的热释放份数	
Y	特定的化学物浓度	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
Y_0	参考状态下,特定的化学物浓度	$\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$
z	火源底面至界面的高度	m
α	火灾的增长速率	$\text{kW} \cdot \text{s}^{-2}$
Δp	压差	Pa
η	物质产率	kg/kJ
λ	蓄烟阶段,室内空间界面吸收热量的份数	
ρ_0	参考温度下空气的密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
ρ_s	烟密度	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

C.2 物理现象的描述

C.2.1 概述

本附录的这些计算方法适用于计算平均温度、烟浓度和不同火灾场景下的界面位置。如果能够确认和验证,也可用适用的其他方法计算这些量。

C.2.2 公式计算法适用的火灾场景

这些公式适用于静态环境下火源上方的烟气层。如果与火无关的湍流比较明显,则这些公式不适用。例如,如果采暖通风与空调系统或外部通风产生的空气流比较明显,则应注意其影响。如果洒水喷头等动作的灭火系统对烟气层具有明显的影响,则这些公式不适用。

火源必须足够小,以保证主要火焰高度低于界面位置和火羽流的特征宽度比室内空间窄(具有火羽流特征的公式所需的附加条件)。

烟气层条件的计算方法有两个限定阶段。一个是在火初期(t^2 型火),控烟设备尚未启动时,单一的室内空间蓄烟阶段;另一个是烟的产出率等于烟气层流出率的准稳态排放阶段。本附录不涉及中间阶段(即排烟系统启动后,继续充烟的阶段)。

C.2.3 采用公式计算的烟气层特性

采用公式可计算气体温度、物质浓度和界面位置。

C.2.4 公式适用的烟气层条件

给定的公式适用于没有排烟以及在机械或自然排烟达到准稳态的情况下,室内空间中蓄烟的短暂阶段。

C.2.5 公式的协调一致性

公式具有自身一致性。

C.2.6 采用这些公式的标准和其他文件

无。

C.3 计算书

C.3.1 公式的范围

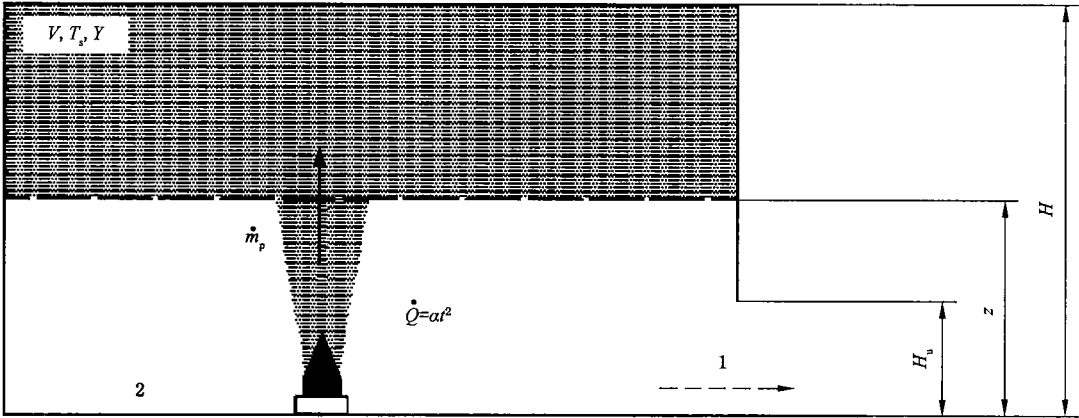
本附录提供了四组公式。一组用于火的初发期单一的室内空间中蓄烟过程；其余三组用于稳态下通过机械排风或自然开口进行的烟气控制。

C.3.2 室内空间的蓄烟过程

C.3.2.1 公式在过程中的应用

如图 C.1 所示，烟在室内空间的上部累积，直到烟气层界面下移到垂直开口的上边缘为止。由于热膨胀，过量的空气被挤出室内空间。

注：这个前提在烟气层的底部位于开口上界面的以上位置时是成立的。当烟气层降低到开口上界面以下位置时，随着新鲜空气的进入，烟气会流出室内空间。



说明：

- 1——由于热膨胀而过量的空气；
- 2——底部面积。

图 C.1 在蓄烟过程中的质量守恒

热释放速率见式(C.1)：

$$\dot{Q}(t) = at^n \dots\dots\dots (C.1)$$

当 $n=0$ 时，表示稳定燃烧的火； $n=2$ 时，表示正在增大的火与时间成平方关系。当辐射释放的份数为 χ ，则对流热释放速率见式(C.2)：

$$\dot{Q}_c = (1 - \chi) \dot{Q} = (1 - \chi) at^n \dots\dots\dots (C.2)$$

参考文献[4]中给出了火源上方高度为 z 处的火羽流质量流速公式，见式(C.3)：

$$\dot{m}_p = 0.076 (1 - \chi)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \dots\dots\dots (C.3)$$

注：在 GB/T 31593.5—2015 的附录 B 中，该公式可近似用作火羽流公式。该公式只适用于平均火焰高度以上的情况；如果界面低于平均火焰高度，则计算结果可能不正确。

C.3.2.2 界面位置

计算界面的位置[见式(C.4)和式(C.5)],以便在具有均匀密度的上层累积火羽流的质量流量。

$$z(t) = \left(\frac{0.076}{\rho_s} \frac{(1-\chi)^{1/3} \alpha^{1/3}}{A} \frac{2}{n+3} t^{(1+n/3)} + \frac{1}{H^{2/3}} \right)^{-3/2} \dots\dots\dots (C.4)$$

注:为了计算界面位置,必须设定烟密度。在实际应用中,对大体积室内空间初期的蓄烟过程取 $\rho_s=1.0$ 会得到保守的结果(见参考文献[5])。在稍后的蓄烟过程中,具有明显的热膨胀。在这种情况下,由参考文献[6]和[4]给出的下列公式适用于 t^2 型火(即 $\dot{Q} = \alpha t^n$)。

$$z(X) = H_1 - \left(\frac{\Delta X^{9/5}}{1 - T_s/T_0} \right) \dots\dots\dots (C.5)$$

其中:

$$X = 0.0268 \frac{H^{2/3}}{A} \alpha^{1/3} (1-\chi)^{1/3} t^{5/3} \dots\dots\dots (C.6)$$

$$\Delta = 0.754 \frac{A^{4/5}}{H^{11/5}} \frac{(1-\lambda) \alpha^{2/5}}{(1-\chi)^{3/5}} \dots\dots\dots (C.7)$$

烟气层温度 T_s 由式(C.9)计算得出。

C.3.2.3 烟气层温度

计算烟气层的温度[见式(C.8)],使得火释放的热量对体积为 $A(H-z)$ 的烟气层加热。此时,可忽略室内空间界面的热量吸收。

$$T_s = \frac{(1-\lambda)}{c_p \rho_s A (H-z)} \frac{\alpha t^{n+1}}{n+1} + T_0 \dots\dots\dots (C.8)$$

注1:符号 λ 表示室内空间界面吸收的热量的份数。除非火羽流、烟气层和室内空间之间的辐射热交换相互叠加,否则,推荐设定 $\lambda=0$,即所有的热量均用来加热烟气层。

注2:在实际应用中,对大体积室内空间初期的蓄烟过程取 $\rho_s=1.0$ 会得到可接受的结果。

注3:在稍后的蓄烟过程中,当烟气层的热膨胀比较明显时, t^2 型火的烟气层温度由式(C.9)计算:

$$T_s(X) = T_0 \exp \left(- \frac{\Delta X^{9/5}}{1 - (1+X)^{-3/2}} \right) \dots\dots\dots (C.9)$$

其中 Δ 和 X 由式(C.6)和式(C.7)计算得到。

C.3.2.4 特定的化学物的浓度

计算特定的化学物的浓度[见式(C.10)],使得生成物的质量在烟气层中均匀分布。

$$Y(t) = \frac{\eta}{\rho_s A (H-z)} \frac{\alpha t^{n+1}}{n+1} + Y_0 \dots\dots\dots (C.10)$$

C.3.2.5 计算举例

——火源 $\dot{Q} = 0.05 t^2$ ($\alpha = 0.05 \text{ kW/s}^2$, $n=2$, $D=1 \text{ mm}$) 位于图 C.1 所示的室内空间内;

——室内空间的底面面积 A 为 100 m^2 ;

——室内空间高度 H 为 8 m ,门的开口高度 H_u 为 2 m ;

——假设辐射热所占份数 χ 为 0.333 ;

——忽略室内空间界面的热吸收($\lambda=0$);

—— CO_2 的产率 η 为 $7.61 \times 10^{-5} \text{ kg/kJ}$;

——计算界面高度、温度和 60 s 时 CO_2 的浓度。

采用式(C.4),界面高度为:

$$z = \left(\frac{0.076}{\rho_s} \frac{(1-\chi)^{1/3} \alpha^{1/3}}{A} \frac{2}{n+3} t^{(1+n/3)} + \frac{1}{H^{2/3}} \right)^{-3/2}$$

$$= \left[\frac{0.076}{1.0} \frac{(1-0.333)^{1/3} \times 0.05^{1/3}}{100} \frac{2}{2+3} 60^{(1+2/3)} + \frac{1}{8^{2/3}} \right]^{-3/2} = 5.04 \quad \dots\dots (C.11)$$

将结果带入式(C.8)和式(C.10),则界面温度和 CO_2 的浓度为:

$$T_s = \frac{(1-\lambda)}{c_p \rho_s A (H-z)} \frac{\alpha t^{n+1}}{n+1} + T_0 = \frac{(1-0.0)}{1.0 \times 1.0 \times 100 \times (8-5.04)} \frac{0.05 \times 60^{2+1}}{2+1} + 20 = 32.2 \dots\dots (C.12)$$

$$Y = \frac{\eta}{\rho_s A (H-z)} \frac{\alpha t^{n+1}}{n+1} + Y_0 = \frac{7.61 \times 10^{-5}}{1.0 \times 100 \times (8-5.04)} \frac{0.05 \times 60^{2+1}}{2+1} + 0.0003 = 0.00123 \dots\dots (C.13)$$

火焰高度必须低于界面的高度,火羽流的式(C.3)才适用。此例中,火焰的平均高度低于界面高度,这样:

$$L = -1.02D + 0.235\dot{Q}^{2/5} = -1.02 \times 1.0 + 0.235 \times (0.05 \times 60^2)^{2/5} = 0.86 \dots\dots (C.14)$$

该计算的依据为 GB/T 31593.5—2015 的附录 B。

同样,烟气层高度、温度和 CO_2 浓度计算示例见图 C.2。为使公式有效,烟气层的底面必须高于火焰的平均高度和门的开口上边缘高度。该例在 126 s 时平均火焰高度和烟气层高度近似相等,此时:

$$z = \left[\frac{0.076}{1.0} \frac{(1-0.333)^{1/3} \times 0.05^{1/3}}{100} \frac{2}{2+3} 126^{(1+2/3)} + \frac{1}{8^{2/3}} \right]^{-3/2} = 2.39 \dots\dots (C.15)$$

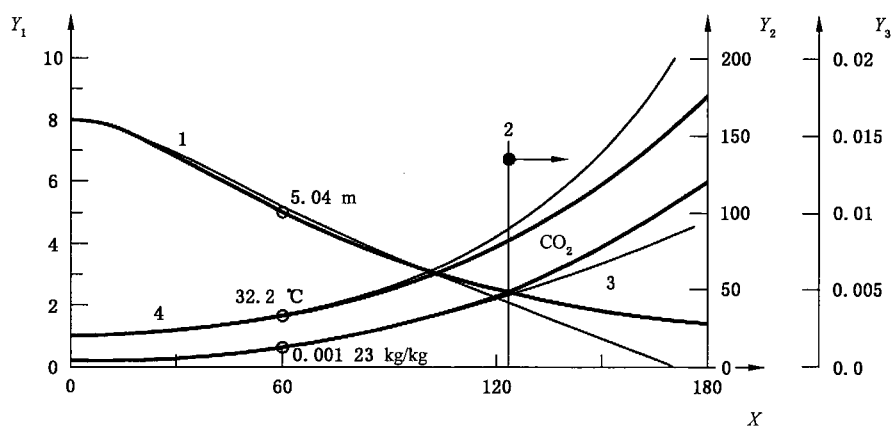
$$L = -1.02D + 0.235\dot{Q}^{2/5} = -1.02 \times 1.0 + 0.235 \times (0.05 \times 126^2)^{2/5} = 2.38 \dots\dots (C.16)$$

在 142 s,烟气层高度与门的开口上边缘高度近似相等,此时:

$$z = \left[\frac{0.076}{1.0} \frac{(1-0.333)^{1/3} \times 0.05^{1/3}}{100} \frac{2}{2+3} 142^{(1+2/3)} + \frac{1}{8^{2/3}} \right]^{-3/2} = 2.01 \dots\dots (C.17)$$

因此,该公式适用于 126 s 之前的阶段。

图 C.2 中的计算有效范围为: $A = 100 \text{ m}^2$, $H = 8 \text{ m}$, $\dot{Q} = 0.05 t^2$, $\chi = 0.333$, $\lambda = 0.0$ 。粗线是根据式(C.4)、式(C.8)和式(C.10)的计算结果。细线是考虑烟气层的热膨胀而根据式(C.5)、式(C.9)和式(C.11)得出的计算结果。



说明:

X——时间,单位为分(min);

Y_1 ——界面高度,单位为米(m);

Y_2 ——烟气层温度,单位为摄氏度($^{\circ}\text{C}$);

Y_3 —— CO_2 浓度,单位为千克每千克(kg/kg);

1——界面高度;

2——无效范围($t > 126 \text{ s}$);

3—— CO_2 浓度;

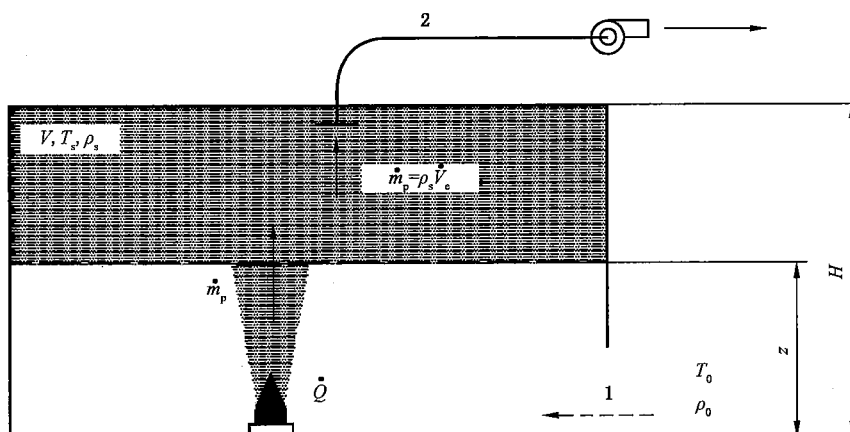
4——烟气层及 $32.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 点。

图 C.2 在室内空间的蓄烟过程中,界面高度、烟气层温度和 CO_2 浓度的计算结果

C.3.3 通过机械排气系统进行烟气控制的稳态

C.3.3.1 公式适用的过程

如图 C.3 所示,在烟气控制状态下,烟通过机械排气系统排放。烟气层的性质通过产烟和排烟达到平衡的准稳态进行计算。假设室内空间边界在较低的部分具有足够的开口能使空气容易流动并且公式中的热释放速率为常数,式(C.3)给出了火羽流的质量流速。把体积流速作为试验设计参数,排烟的质量流速用式(C.18)计算:



说明:

1——吸入空气;

2——排气系统。

图 C.3 通过机械排气系统进行烟气控制的质量守恒

$$\dot{m}_e = \rho_s \dot{V}_e \quad \text{..... (C.18)}$$

计算界面高度,使排烟的质量流速等于火羽流的质量流速。

$$\dot{m}_e = \dot{m}_p \quad \text{..... (C.19)}$$

C.3.3.2 界面位置

计算界面位置,使火羽流的质量流速等于排烟的质量流速。

$$z = \left[\frac{\dot{m}_e}{0.076 \dot{Q}^{1/3}} \right]^{3/5} \quad \text{..... (C.20)}$$

注:为了计算界面位置,需要知道烟气层的密度(也就是温度),可以通过适当推测获得,或者结合下面提供的公式进行计算。

C.3.3.3 烟气层密度

烟气层密度由下式计算:

$$\rho_s = \frac{353}{T_s} \quad \text{..... (C.21)}$$

注:对大多数工程计算,烟气层近似为理想气体。烟气层的温度由下条的公式计算。

C.3.3.4 烟气层温度

计算烟气层温度,使烟气层的热流量等于排放和室内空间表面吸收的热量损失之和。

$$T_s = \frac{\dot{Q}}{c_p \dot{m}_p + h_{\text{wall}} A_{\text{wall}}} + T_0 \quad \text{..... (C.22)}$$

C.3.3.5 有效传热系数

有效传热系数的计算取决于室内空间边界面的建筑材料。传热既可近似为厚壁热行为(近似为半无限体)也可近似为薄壁热行为(近似薄材料稳态下的温度分布)。

$$h_{\text{wall}} = \begin{cases} \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{k c_v}{t_c}} & \left(D_{\text{wall}} \geq 4 \sqrt{\frac{k t_c}{c_v}} \right) \\ \frac{k}{D_{\text{wall}}} & \left(D_{\text{wall}} < 4 \sqrt{\frac{k t_c}{c_v}} \right) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (\text{C.23})$$

注：特征时间 t_c 通常取 1 000 s。

C.3.3.6 特定化学物的浓度

计算特定化学物的浓度,使其产出速率等于排放速率。

$$Y = \frac{\dot{m}_p}{m_e} + Y_0 \quad \dots\dots\dots (\text{C.24})$$

C.3.3.7 计算示例

火源位于图 C.3 所示的室内空间中心,相关计算参数为:

- 室内空间底面面积 A 为 100 m² (10 m×10 m);
- 室内空间高度 H 为 8 m,火源的热释放速率 $\dot{Q}$ 为 300 kW;
- 火源的热辐射份额 x 为 0.333;
- 火源直径 D 为 1.0 m;
- 机械排气的体积流速 $\dot{V}_e$ 为 4 m³/s;
- 室内空间边界面由 100 mm 厚的混凝土板制成;
- 混凝土的导热系数取 $k=0.0015$ kW/(m·K),热容量 $c_v=2026$ kJ/(m³·K);
- 空气的参考温度 T_0 为 20 °C (293 K),相对应的参考密度 ρ_0 为 1.205 kg/m³。

界面位置与温度的公式相关联,采用迭代法求解。计算出界面位置与温度后,可以直接计算物质的浓度。

- 1) 假设界面高度是室内空间高度的 50%,即:

$$z = \frac{H}{2} = 4.0 \quad \dots\dots\dots (\text{C.25})$$

- 2) 由式(C.3)计算界面高度的火羽流质量流速:

$$\dot{m}_p = 0.076(1-x)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z_1^{5/3} = 0.076 \times (1-0.333)^{1/3} \times 300^{1/3} \times 4^{5/3} = 4.48 \quad \dots\dots (\text{C.26})$$

- 3) 由式(C.23)计算有效热传导系数:

假设室内空间边界面具有厚壁热行为,即:

$$4 \sqrt{\frac{k}{c_v t_c}} = 4 \sqrt{\frac{0.0015}{2026} \times 1000} = 0.108 \geq 0.1(\text{m}) \quad \dots\dots\dots (\text{C.27})$$

因此,有效热传导系数为:

$$h_{\text{wall}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{k c_v}{t_c}} = \frac{\sqrt{3.14}}{2} \sqrt{\frac{0.0015 \times 2026}{1000}} = 0.049 \quad \dots\dots\dots (\text{C.28})$$

- 4) 由式(C.22)计算烟气层温度:

$$A_{\text{wall}} = 100 + 40 \times (8 - 4) = 260 \quad \dots\dots\dots (\text{C.29})$$

$$T_s = \frac{\dot{Q}}{c_p m_p + h_{\text{wall}} A_{\text{wall}}} + T_0 = \frac{300}{1.0 \times 4.48 + 0.049 \times 260} + 20 = 37.4 \quad \text{.....(C.30)}$$

5) 由式(C.21)计算烟密度:

$$\rho_s = \frac{353}{T_s} = \frac{353}{37.4 + 273} = 1.137 \quad \text{.....(C.31)}$$

6) 由式(C.18)计算机械排气系统的质量流速:

$$\dot{m}_e = \rho_s \dot{V}_e = 1.137 \times 4.0 = 4.55 \quad \text{.....(C.32)}$$

7) 由式(C.20)校正界面高度,以使火羽流的质量流速等于排放的质量流速:

$$z = \left[\frac{\dot{m}_e}{0.076(1-x)^{1/3} \dot{Q}^{1/3}} \right]^{3/5} = \left[\frac{4.55}{0.076 \times (1-0.333)^{1/3} \times 300^{1/3}} \right]^{3/5} = 4.04 \quad \text{.....(C.33)}$$

8) 重复步骤 2)~7),直到火羽流的质量流速与排放的质量流速一致。此例中,经过 3 次迭代,得出以下满意结果:

$$z = 4.04 \text{ (m)} \quad \text{.....(C.34)}$$

$$T_s = 37.4 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \text{.....(C.35)}$$

$$\dot{m}_p = \dot{m}_e = 4.45 \text{ (kg/s)} \quad \text{.....(C.36)}$$

9) 为了满足火羽流式(C.3),平均火焰高度必须小于界面高度。此例中,依据 GB/T 31593.5—2015 的附录 B 进行计算,结果符合要求。

$$L = -1.02D + 0.235\dot{Q}^{2/5} = -1.02 \times 1.0 + 0.235 \times 300^{2/5} = 1.28 < 4.04 \quad \text{.....(C.37)}$$

10) 将已知值带入式(C.24)计算物质浓度。在通风良好的条件下,二氧化碳的产率 $\eta = 7.61 \times 10^{-5} \text{ kg/kJ}$ 。

$$Y = \frac{\eta \dot{Q}}{\dot{m}_e} + Y_0 = \frac{(7.61 \times 10^{-5}) \times 300}{4.55} + 0.0003 = 0.00532 \quad \text{.....(C.38)}$$

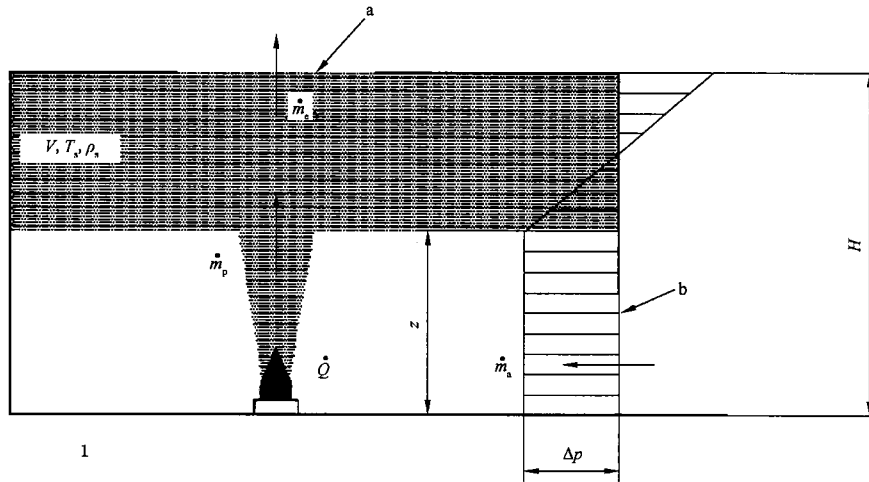
C.3.4 水平开口稳态下的烟气控制

C.3.4.1 公式适用的过程

烟气由图 C.4 所示的自然开口排放。假设新鲜空气可流入室内空间底部,通过准稳态下热量和质量平衡来计算烟气层特性。质量流速的平衡由式(C.39)给出:

$$\dot{m}_a = \dot{m}_p = \dot{m}_e \quad \text{.....(C.39)}$$

在这个公式中,假设热释放速率始终为常量。火羽流的质量流速在式(C.3)中给出,通过开口的质量流速按照 GB/T 31593.8 计算。



说明:

1——底面面积 A ;

a—— A_{vent} ;

b—— A_{open} 。

图 C.4 水平开口烟气控制期间的质量守恒

C.3.4.2 界面位置

采用式(C.20)计算界面位置。

注: 排放的质量流速由式(C.40)计算。

C.3.4.3 烟气层密度

采用式(C.21)计算烟气层密度。

C.3.4.4 烟气层温度

采用式(C.22)计算烟气层温度。

C.3.4.5 有效传热系数

采用式(C.23)计算有效传热系数。

C.3.4.6 通过水平开口排烟的质量流速

排烟的质量流速由开口流速的常规公式计算。

$$\dot{m}_e = C_D A_{\text{vent}} \sqrt{2\rho_s [(\rho_0 - \rho_s) g (H - z) - \Delta p]} \quad \dots\dots\dots (C.40)$$

C.3.4.7 地板面的压差

地板面的压差由适用于较低开口流速的常规公式计算。

$$\Delta p = \frac{1}{2\rho_0} \left(\frac{\dot{m}_p}{C_D A_{\text{open}}} \right)^2 \quad \dots\dots\dots (C.41)$$

C.3.4.8 化学物的浓度

采用式(C.24)计算化学物的浓度 Y 。

C.3.4.9 计算举例

火源位于图 C.4 所示的室内空间内,相关计算参数为:

——室内空间地板面积 A 为 100 m^2 ($10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$);室内空间高度 H 为 8 m ;

——水平开口的面积 A_{vent} 为 2 m^2 ;

——较低的进气开口面积 A_{open} 为 4 m^2 ;

——火源的热释放速率 $\dot{Q}$ 为 300 kW ;

——火源的热辐射份额 x 为 0.333 ;

—— CO_2 的产率为 η 为 $7.51 \times 10^{-5} \text{ kg/kJ}$;

——燃料直径 D 为 1.0 m ;

——参考温度 T_0 为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ (293 K)。

室内空间界面由等同于示例 C.3.3.7 的混凝土制成。

界面位置与温度的公式相关联,采用迭代法求解。计算出界面位置与温度后,可以直接计算物质的浓度。

- 1) 假设界面高度是室内空间高度的 50% ,即:

$$z = \frac{H}{2} = \frac{8.0}{2} = 4.0 \quad \dots\dots\dots (\text{C.42})$$

- 2) 由式(C.3)计算界面高度的火羽流质量流速:

$$\dot{m}_p = 0.076(1-x)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z_1^{5/3} = 0.076 \times (1-0.333)^{1/3} \times 300^{1/3} \times 4.0^{5/3} = 4.48 \quad \dots\dots\dots (\text{C.43})$$

- 3) 采用和 C.3.3.7 的 3) 相同的步骤由式(C.23)计算有效热传导系数:

$$h_{\text{wall}} = 0.049 \quad \dots\dots\dots (\text{C.44})$$

- 4) 由式(C.22)计算烟气层温度:

$$A_{\text{wall}} = 100 + 40 \times (8 - 4.0) - 2.0 = 258 \quad \dots\dots\dots (\text{C.45})$$

$$T_s = \frac{\dot{Q}}{c_p \dot{m}_p + h_{\text{wall}} A_{\text{wall}}} + T_0 = \frac{300}{1.0 \times 4.48 + 0.049 \times 258} + 20 = 37.5 \quad \dots\dots\dots (\text{C.46})$$

- 5) 由式(C.21)计算烟密度:

$$\rho_s = \frac{353}{T_s} = \frac{353}{37.5 + 273} = 1.137 \quad \dots\dots\dots (\text{C.47})$$

- 6) 由式(C.41)计算参考高度的压差:

$$\Delta p = \frac{1}{2\rho_0} \left(\frac{\dot{m}_p}{C_D A_{\text{open}}} \right)^2 = \frac{1}{2 \times 1.205} \times \left(\frac{4.48}{0.7 \times 4.0} \right)^2 = 1.06 \quad \dots\dots\dots (\text{C.48})$$

- 7) 由式(C.40)计算通过水平开口的质量流速:

$$\begin{aligned} \dot{m}_e &= C_D A_{\text{vent}} \sqrt{2\rho_s [(\rho_0 - \rho_s) g(H-z) - \Delta p]} \\ &= 0.7 \times 2.0 \times \sqrt{2 \times 1.137 \times [(1.205 - 1.137) \times 9.8 \times (8.0 - 4.0) - 1.06]} = 2.68 \quad \dots\dots\dots (\text{C.49}) \end{aligned}$$

- 8) 由式(C.20)校正界面高度,以使火羽流的质量流速等于排放的质量流速:

$$z = \left[\frac{(\dot{m}_e + \dot{m}_p)/2}{0.076(1-x)^{1/3} \dot{Q}^{1/3}} \right]^{3/5} = \left[\frac{(2.68 + 4.48)/2}{0.076 \times (1-0.333)^{1/3} \times 300^{1/3}} \right]^{3/5} = 3.50 \quad \dots\dots\dots (\text{C.50})$$

注:为了数值的稳定性,在迭代计算中,式(C.20)中的排放质量流速 $\dot{m}_e$ 由 $(\dot{m}_e + \dot{m}_p)/2$ 代替。收敛后,依然保持质量平衡 $\dot{m}_e = \dot{m}_p$ 。这一变更对最终结果没有影响。

- 9) 重复步骤 2)~8),直到火羽流的质量流速与排放的质量流速一致,即 $\dot{m}_p = \dot{m}_e$ 。此例中,经过

4 次迭代,得出以下满意结果:

$$z = 3.35 \text{ (m)} \quad \dots\dots\dots (\text{C.51})$$

$$T_s = 37.4 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \dots\dots\dots (\text{C.52})$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_p = \dot{m}_a = 3.34 \text{ (kg/s)} \quad \dots\dots\dots (\text{C.53})$$

10) 为了满足火羽流式(C.3),火焰高度必须小于界面高度。此例中,火焰的平均高度为 1.28 m,与 C.3.3.7 的 9)相同。

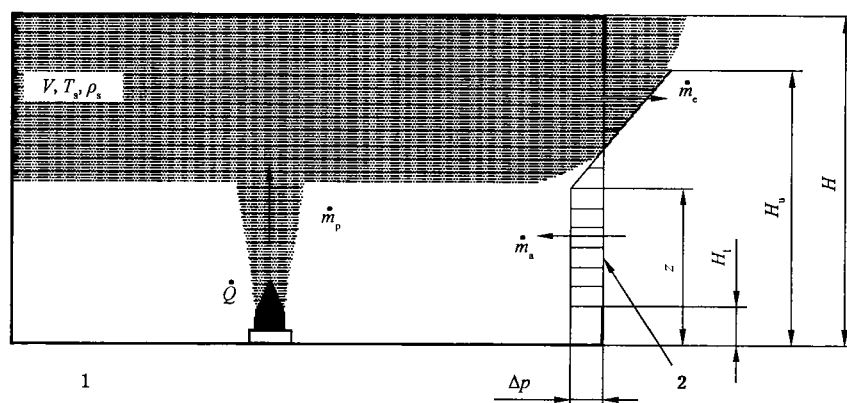
11) 将上述 7)中的结果带入式(C.24)计算物质浓度:

$$Y = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_e} + Y_0 = \frac{(7.61 \times 10^{-5}) \times 300}{3.34} + 0.0003 = 0.00716 \quad \dots\dots\dots (\text{C.54})$$

C.3.5 垂直开口稳态下的烟气控制

C.3.5.1 公式适用的过程

在烟气控制状态,烟气通过图 C.5 所示的垂直开口排放。假设新鲜空气从开口的下部流入,而烟气从开口的上部流出,烟气层的特性通过准稳态下烟/热的产生和排放/流出速率的平衡进行计算。在该公式中,假设热释放速率始终为常量。式(C.3)给出了火羽流的质量流速,通过开口的质量流速按照 GB/T 31593.8 计算。



说明:

1——底面面积 A ;

2——开口宽度 B 。

图 C.5 垂直开口烟气控制期间的质量守恒

C.3.5.2 界面位置

采用式(C.20)计算界面位置。

注:该公式中,界面位置的计算是隐含的,它要满足稳态的质量平衡 $\dot{m}_e = \dot{m}_p = \dot{m}_a$,详见本条下面的示例。

C.3.5.3 烟气层密度

采用式(C.21)计算烟气层密度。

C.3.5.4 烟气层温度

采用式(C.22)计算烟气层温度。

C.3.5.5 有效传热系数

采用式(C.23)计算有效传热系数。

C.3.5.6 开口下部水平方向上的压差

计算开口下部水平方向上的压差,使物质排出速率 $\dot{m}_e$ 等于火羽流的质量流速 $\dot{m}_p$ 。

$$\Delta p = (\rho_a - \rho_s) g (H_u - z_1) - \left[\frac{3}{2} \frac{(\rho_a - \rho_s) g}{C_D B \sqrt{2\rho_s}} \dot{m}_p \right]^{2/3} \dots\dots\dots (C.55)$$

C.3.5.7 通过开口下部的空气质量流速

将式(C.55)计算出的压差代入,计算通过开口下部的空气质量流速。

$$\dot{m}_a = C_D B (z_1 - H_1) \sqrt{2\rho_a \Delta p} + \frac{2}{3} C_D B \sqrt{2\rho_a (\rho_a - \rho_s) g} \left[\frac{\Delta p}{(\rho_a - \rho_s) g} \right]^{3/2} \dots\dots\dots (C.56)$$

C.3.5.8 特定化学物浓度

采用式(C.24)计算特定化学物浓度。

C.3.5.9 计算步骤和示例

火源位于图 C.5 所示的室内空间内,该空间具有垂直开口,相关计算参数为:

- 室内空间地板面积 A 为 100 m^2 ;
- 垂直开口的高度为 5 m ,在地板上方 1 m 处($H_1 = 1 \text{ m}$, $H_u = 6 \text{ m}$);
- 开口宽度 B 为 4 m ;
- 火源的热释放速率 $\dot{Q}$ 为 300 kW ;
- 火源的热辐射份额 χ 为 0.333 ;
- CO_2 的产率 η 为 $7.51 \times 10^{-5} \text{ kg/kJ}$;
- 火源直径 D 为 1.0 m 。

室内空间界面由等同于示例 C.3.3.7 的混凝土制成。

界面位置与温度的公式相关联,采用迭代法求解。计算出界面位置与温度后,可以直接计算物质的浓度。

- 1) 假设界面高度的下限 z_1 是整个开口高度的 $1/3$:

$$z_1 = H_1 + \frac{H_u - H_1}{3} = 1.0 + \frac{6.0 - 1.0}{3} = 2.67 \dots\dots\dots (C.57)$$

- 2) 由式(C.3)计算界面高度的火羽流质量流速:

$$\dot{m}_p = 0.076(1 - \chi)^{1/3} \dot{Q}^{1/3} z_1^{5/3} = 0.076 \times (1 - 0.333)^{1/3} \times 300^{1/3} \times 2.67^{5/3} = 2.28 \dots\dots\dots (C.58)$$

- 3) 采用和 C.3.3.7 的 3) 相同的步骤由式(C.23)计算有效热传导系数:

$$h_{\text{wall}} = 0.049 \dots\dots\dots (C.59)$$

- 4) 由式(C.22)计算烟气层温度:

$$A_{\text{wall}} = 100 + 40 \times (8 - 2.67) - 4 \times (6 - 2.67) = 300$$

$$T_s = \frac{\dot{Q}}{c_p \dot{m}_p + h_{\text{wall}} A_{\text{wall}}} + T_0 = \frac{300}{1.0 \times 2.28 + 0.049 \times 300} + 20 = 37.7 \dots\dots\dots (C.60)$$

- 5) 由式(C.21)计算烟密度:

$$\rho_s = \frac{353}{T_s} = \frac{353}{37.7 + 273} = 1.136 \quad \dots\dots\dots (C.61)$$

6) 由式(C.55)计算开口下部水平方向上的压差:

$$\begin{aligned} \Delta p &= (\rho_a - \rho_s) g (H_u - z_1) - \left[\frac{3}{2} \frac{(\rho_a - \rho_s) g}{C_D B \sqrt{2\rho_s}} \dot{m}_p \right]^{2/3} \\ &= (1.205 - 1.136) \times 9.8 \times (6.0 - 2.67) - \left[\frac{3}{2} \frac{(1.205 - 1.136) \times 9.8}{0.7 \times 4.0 \times \sqrt{2 \times 1.136}} \times 2.28 \right]^{2/3} = 1.58 \dots\dots (C.62) \end{aligned}$$

7) 由式(C.56)计算通过开口下部的空气质量流速:

$$\begin{aligned} \dot{m}_a &= C_D B (z_1 - H_1) \sqrt{2\rho_a \Delta p} + \frac{2}{3} C_D B \sqrt{2\rho_a (\rho_a - \rho_s) g} \left[\frac{\Delta p}{(\rho_a - \rho_s) g} \right]^{3/2} \\ &= 0.7 \times 4.0 \times (2.67 - 1.0) \times \sqrt{2 \times 1.205 \times 1.58} + \frac{2}{3} \times 0.7 \times \\ &\quad 4.0 \sqrt{2 \times 1.205 \times (1.205 - 1.136) \times 9.8} \times \left[\frac{1.58}{(1.205 - 1.136) \times 9.8} \right]^{3/2} = 17.6 \dots\dots (C.63) \end{aligned}$$

8) 计算质量流速的误差:

$$\dot{m}_{\text{error},1} = \dot{m}_p - \dot{m}_a = 2.28 - 17.6 = -15.3$$

9) 火羽流的质量流速应等于空气的质量流速。为了得到正确的结果,将界面高度取上限 z_2 重复步骤 2)~8) 的计算。初算时 z_2 取开口高度的 2/3:

$$z_2 = H_1 + \frac{2}{3} (H_u - H_1) = 1.0 + \frac{2}{3} (6.0 - 1.0) = 4.33 \quad \dots\dots\dots (C.64)$$

采用上述界面高度,计算出以下结果:

$$\dot{m}_p = 5.13 \text{ (kg/s)} \quad \dots\dots\dots (C.65)$$

$$T_s = 37.8 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad \dots\dots\dots (C.66)$$

$$\rho_s = 1.136 \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad \dots\dots\dots (C.67)$$

$$\Delta p = -0.022 \text{ (Pa)} \quad \dots\dots\dots (C.68)$$

这个假设的界面高度过高,致使压差为负值。这种情况下,没有空气进入室内空间:

$$\dot{m}_a = 0.0 \quad \dots\dots\dots (C.69)$$

注:对质量达到平衡的稳态,这种情况是不存在的。在迭代的过程中,当压差为负值时, $\dot{m}_a$ 取零值,以满足质量平衡。

质量流速的误差为:

$$\dot{m}_{\text{error},2} = \dot{m}_p - \dot{m}_a = 5.13 - 0.0 = 5.13 \quad \dots\dots\dots (C.70)$$

10) 在界面高度两次取值之间插入以下估算新值:

$$\begin{aligned} z_3 &= z_1 - \frac{\dot{m}_{\text{error},1}}{\dot{m}_{\text{error},2} - \dot{m}_{\text{error},1}} (z_2 - z_1) = 2.67 - \frac{-15.3}{5.13 - (-15.3)} \times (4.33 - 2.67) \\ &= 3.92 \quad \dots\dots\dots (C.71) \end{aligned}$$

注:计算步骤如图 C.6 的虚线所示。

11) 重复步骤 2)~8),计算 z_3 值下质量流速的误差:

$$\dot{m}_{\text{error},3} = -1.61 \quad \dots\dots\dots (C.72)$$

12) 由于 $\dot{m}_{\text{error},3}$ 为负值,将式(C.71)中的 z_1 值换成 z_3 ,重复步骤 2)~11),直到 $\dot{m}_{\text{error},3}$ 足够小。在迭代过程中,如果 $\dot{m}_{\text{error},3}$ 为正值,则用 z_3 代替 z_2 进行计算。此例中,共进行了 7 次迭代才

得出如下所示的收敛值：

$$z = 4.19 \text{ (m)}$$
$$T_s = 37.8 \text{ (}^\circ\text{C)}$$
$$\dot{m}_e = \dot{m}_p = \dot{m}_a = 4.85 \text{ (kg/s)}$$

.....(C.73)

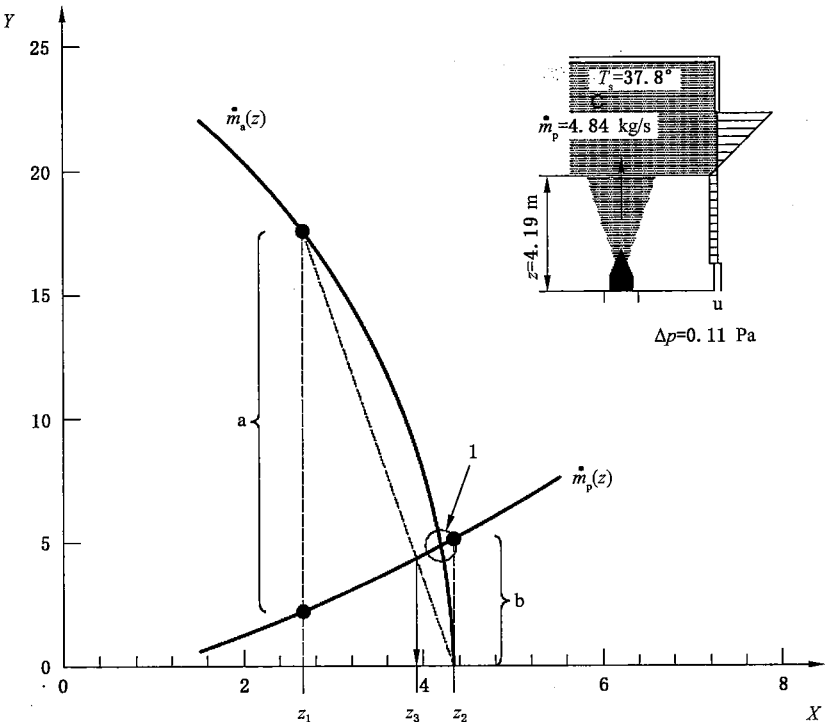
.....(C.74)

.....(C.75)

- 注：如图 C.6 所示，最终结果为 $\dot{m}_p(z)$ 和 $\dot{m}_a(z)$ 的交差点开圆。
- 13) 为了满足火羽流式(C.3)，火焰高度必须小于界面高度。此例中，火焰的平均高度为 1.28 m，与 C.3.3.7 的 9)相同。
- 14) 将步骤 12)中计算结果带入式(C.24)，计算物质浓度：

$$Y = \frac{\eta \dot{Q}}{\dot{m}_e} + Y_0 = \frac{(7.61 \times 10^{-5}) \times 300}{4.85} + 0.000\ 3 = 0.005\ 0$$

.....(C.76)



说明：

X——界面高度 z ，单位为米(m)；

Y——质量流速，单位为千克每秒(kg/s)；

1——计算结果；

a—— $\dot{m}_{\text{error},1}$ ；

b—— $\dot{m}_{\text{error},2}$ 。

图 C.6 垂直开口的烟气控制图解结果

C.4 计算公式的依据

公式基于附录 B 给出的通用的热和质量守恒定律。蓄烟过程的研究可追溯到 Turner 等人(参见参考文献[5])对具有明显密度分界形成的室内空间所做的流体动力学基础研究。针对火灾初期蓄烟过程,Zukoski(参见参考文献[6]、[7])提出了类似的具体公式。在 Zukoski 的理论研究之后,Mulholland

等人(参见参考文献[8])进行了实验研究,验证了小的密度变化下的假设。Tanaka 等人(参见参考文献[2])的实验工作发现如果将小的密度变化带入计算,则测量数据具有很好的复现性。[Delichatsios(参见参考文献[3]、[4])]

C.5 计算公式的局限性

C.5.1 火羽流

本部分的质量流速公式与 GB/T 31593.5—2015 中有关火源、火焰尺寸、边界、气流扰动等的限定条件相同。

C.5.2 烟气层的均匀性

公式的前提是烟气层具有均匀的特性。相对于平均值,如果烟气层特性具有重大变化,例如竖长、杆状的室内空间和长廊,则不推荐使用这些公式。

C.6 公式的输出参数

公式的输出参数为界面位置、烟气层温度和物质浓度。另外,公式还给出了有关火羽流的质量流速和开口流量信息。

C.7 计算公式的输入参数

C.7.1 火的热释放速率

参数 Q 是特定环境条件下火的实际热释放速率。该参数可通过热量计测量,即测量收集到的气体产物而确定氧气、二氧化碳和一氧化碳的生成速率;也可采用其他指定的方法测量。该参数通常可由设定火灾场景中获得。

C.7.2 热释放的辐射份数

参数 x 取决于燃料的种类,典型的取值范围为 0.3~0.4。更多的信息可参见 GB/T 31593.5—2015 的 B.6.2。

C.7.3 室内空间边界面初期吸收热量份数

参数 λ 是计算蓄烟过程必需的。对于稳态下烟气控制(机械通风、屋顶或侧面开口)的计算,可采用不同的方法计算室内空间的热量吸收。参数的值主要取决于室内空间边界面的建筑。对具有大的热惯性(如混凝土结构)或轻型、非隔热的建筑物(如玻璃房)形成的室内空间,热量吸收可能是重要的。为了计算精确值,需要详细的室内空间的热辐射传导资料。在实际应用中,推荐取 $\lambda=0$ 。

C.7.4 机械排烟的效果

在 C.3.3 中,假设机械排烟系统只排出烟。然而,如果烟气层不十分厚,较低的空气层将被排烟系统排出(见参考文献[12]),这种情况下,应根据夹带空气的比率而减小排放速率的值(参见参考文献[13])。

C.7.5 物质的产率

参数 η 取决于燃料的种类和燃料/空气的比率。由于公式中假设火相对于室内空间比较小, η 可取通风良好的值(参见参考文献[14])。

C.8 计算公式的适用范围

日本建筑研究所的 Tanaka 和 Yamana 见参考文献[2]在大尺寸的中庭对公式已经进行了一系列的比对实验。实验房间的地板面积为 720 m², 室内净高为 26.3 m, 热释放速率约为 130 kW。另外, Karlsson 等人(参见参考文献[15])与 Hägglund 等人(参见参考文献[16])对蓄烟过程的公式进行了比对, 房间的尺寸为 5.62 m×5.62 m, 净高 6.15 m(有效高度为 5.95m), 采用煤油油盘火源, 热释放速率为 186 kW。两个比对均证明公式具有适当的准确度。对多房间的烟扩散, 可用一组相似的公式求解(参见参考文献[17]、[18]、[19])。

参 考 文 献

- [1] GB/T 6379(所有部分),测量方法与结果的准确度
- [2] ISO/TR 13387-3:1999 Fire safety engineering—Part 3: Assessment and verification of mathematical fire models
- [3] ISO 13943:2008 Fire safety—Vocabulary
- [4] ZUKOSKI, E.E., Mass Flux in Fire Plumes, Fire Safety Science—Proc. Fourth Int. Symposium (ed. T. Kashiwagi), International Association for Fire Safety Science, pp.137-147, 1994.
- [5] TANAKA, T. and YAMANA, T., Smoke Control in Large Scale Spaces (Part 1/Part 2), Fire Science and Technology, 5, No.1, Science University of Tokyo, 1985.
- [6] DELICHATSIOS, M.A., Closed form approximate solutions for smoke filling in enclosures including the volume expansion term, Fire Safety Journal, 38, pp.97-101, 2003.
- [7] DELICHATSIOS, M.A., Tenability Conditions and Filling Times for Fires in Large Spaces, Fire Safety Journal, 39, pp.643-662, 2004.
- [8] BAINES, W.D. and TURNER, J.S., Turbulent Buoyant Convection from a Source in a Confined Region, Journal of Fluid Mechanics, 37(1), pp.51-80, 1969.
- [9] ZUKOSKI, E.E., Development of a Stratified Ceiling Layer in the Early Stages of a Closed-room Fire, Fire and materials, 2(2), pp.54-62, 1978.
- [10] ZUKOSKI, E.E., Two-Layer Modeling of Smoke Movement in Building Fires, Fire and materials, 4(1), pp.17-27, 1980.
- [11] MULHOLLAND, G., HANDA, T., SUGAWA, O. and YAMAMOTO, H., Smoke Filling in an Enclosure, 20th Joint ASME/AIChE National Heat Transfer Conference, 81-HT-B, 1981.
- [12] SPRATT, D. and HESELDEN, A.J.M., Efficient Extraction of Smoke from a Thin Layer under a Ceiling, Fire Research Note, No.1001, Building Research Establishment, 1974.
- [13] NII, D., NITTA, K., HARADA, K. and YAMAGUCHI, J., Air Entrainment into Mechanical Smoke Vent on Ceiling, Proceedings of the 7th International Symposium on Fire Safety Science, (Worcester, June 2002), pp.729-740, 2003.
- [14] TEWARSON, A., Generation of Heat and Chemical Compounds in Fires, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed., National Fire Protection Association, 1995.
- [15] KARLSSON, B. and QUINTIERE, J., G., Conservation Equations and Smoke Filling, Chapter 8 in Enclosure Fire Dynamics, CRC Press LLC, 2000.
- [16] HÄGGLUND B., JANSSON R. and NIREUS K., Smoke Filling Experiments in 6x6x6 meter Enclosure, FOA Report C20585-D6, National Defence Research Establishment, Sweden, 1985.
- [17] TANAKA, T., A Model of Multiroom Fire Spread, NBSIR 83-2718, US Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1983.
- [18] TANAKA, T., A Model on Fire Spread in Small Scale Buildings, BRI Research Paper, No. 79 and 84, Building Research Institute, 1978, 1980.
- [19] PEACOCK, R., JONES, W., W., FORNEY, G., P., RENEKE, P., A., BUKOWSKI, R. and W., KLOTE J., H., An Update Guide for HAZARD I version 1.2, NISTIR 5410, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, 1994.

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
消防安全工程
第 6 部分:烟气层的计算要求
GB/T 31593.6—2015

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲 2 号(100029)
北京市西城区三里河北街 16 号(100045)
网址 www.spc.net.cn
总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238
读者服务部:(010)68523946
中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 1.75 字数 46 千字
2015 年 7 月第一版 2015 年 7 月第一次印刷

*

书号: 155066·1-51309 定价 27.00 元



GB/T 31593.6—2015

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107