

基于火灾安全工程理论的安全疏散分析*

王 凌 东

(重庆大学城市建设与环境工程学院,重庆 400030)

摘要:建筑内部一旦发生火灾,人员进行安全疏散的距离有一定要求。事实上其距离的规定,均是按规范进行规格式执行。目前,国内外均提出了拟将现行规范模式改革为性能化规范模式,但在建筑安全疏散距离的性能化设计上还有待进一步研究。为此,在对现行规范条文存在的不足进行剖析基础上,结合火灾安全工程理论,提出了应根据火灾产生的烟、热以及火灾环境对人员安全疏散时间、疏散速度的影响,来评估满足人员疏散的安全距离要求,并建立了安全疏散模拟模型。

关键词:火灾;安全疏散;模型;性能化

中图分类号: TU976

文献标识码:A

建筑物内发生火灾后,首要的问题是被困人员如何及时、顺利地到达地面,疏散至安全地带得以逃生。由于各类建筑内部具有特殊的结构和复杂的使用功能,实践证明,人员能在火灾中安全疏散逃生是相当困难的,但能从内部进行自救和安全疏散则是避免人员伤亡最有效途径。这其中安全疏散通道长短、通道路径、通道层高是关键。其次建筑消防安全疏散设施也起到重要的辅助作用,它包括安全出口、疏散出口、房门(户门)、疏散走道、避难层(间)和防排烟设施、防火门、火灾应急照明、疏散指示标志、火灾应急广播等。笔者在综合分析这些因素之后,利用火灾安全工程理论建立疏散模型,并结合实例得出了安全疏散距离。

1 建筑内安全疏散存在的问题

1.1 疏散距离超长

例如:某高层办公楼内走道设计图 1,按《高层民用建筑设计防火规范》第 6.1.5 条的规定,位于 1#、2# 房间处于袋形走道尽端,房间门至最近的出口不大于 20 m,位于 3#至 10#房间任一房间门至最近的出口均不大于 40 m,满足规范要求^[1]。但在火灾实际过程中,受困人员往往由于惊慌失措、盲目性失去方向、趋光性而向有光方向逃生,假设 3#房间起火,4#房间内

的人员出门有可能向右方向疏散逃生,这样人员疏散距离可能近 80 m。这是时间所不能允许的,势必造成人员重大伤亡。

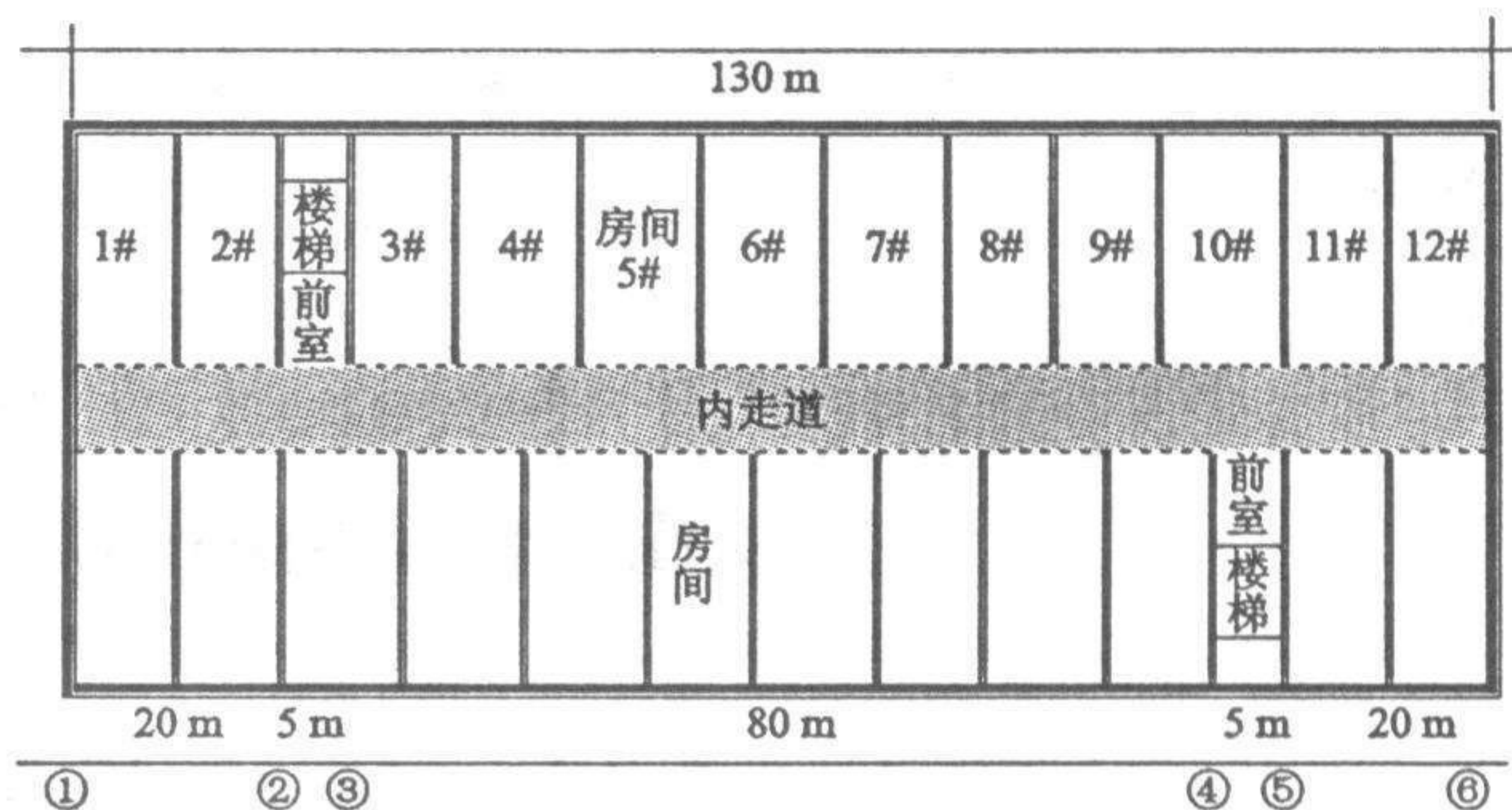


图1 某高层办公楼内走道设计

1.2 疏散距离规定脱离实际

又如某多层教学楼的设计平面图 2, 该教学楼为 2 层建筑, 每层仅 5 间教室, 室外敞开式外廊建筑, 中间有一部宽 14 m 的楼梯, 应该是能满足疏散要求^[2]。但依据《建筑设计防火规范》第 5.3.8 条规定, 袋形走道尽端的房间, 疏散距离最大不超过 27 m, 这就不符合规范要求。这显然是脱离实际。

1.3 疏散距离计算缺乏科学性

《建筑设计防火规范》和《高层民用建筑设计防火规范》为规格式规范,其规定的疏散距离为“处方式”,

* 收稿日期:2004-10-20

作者简介:王凌东(1972-),男,四川大竹人,重庆大学工程硕士,武警消防工程师(技术10级),主要从事火灾技术鉴定方向研究。

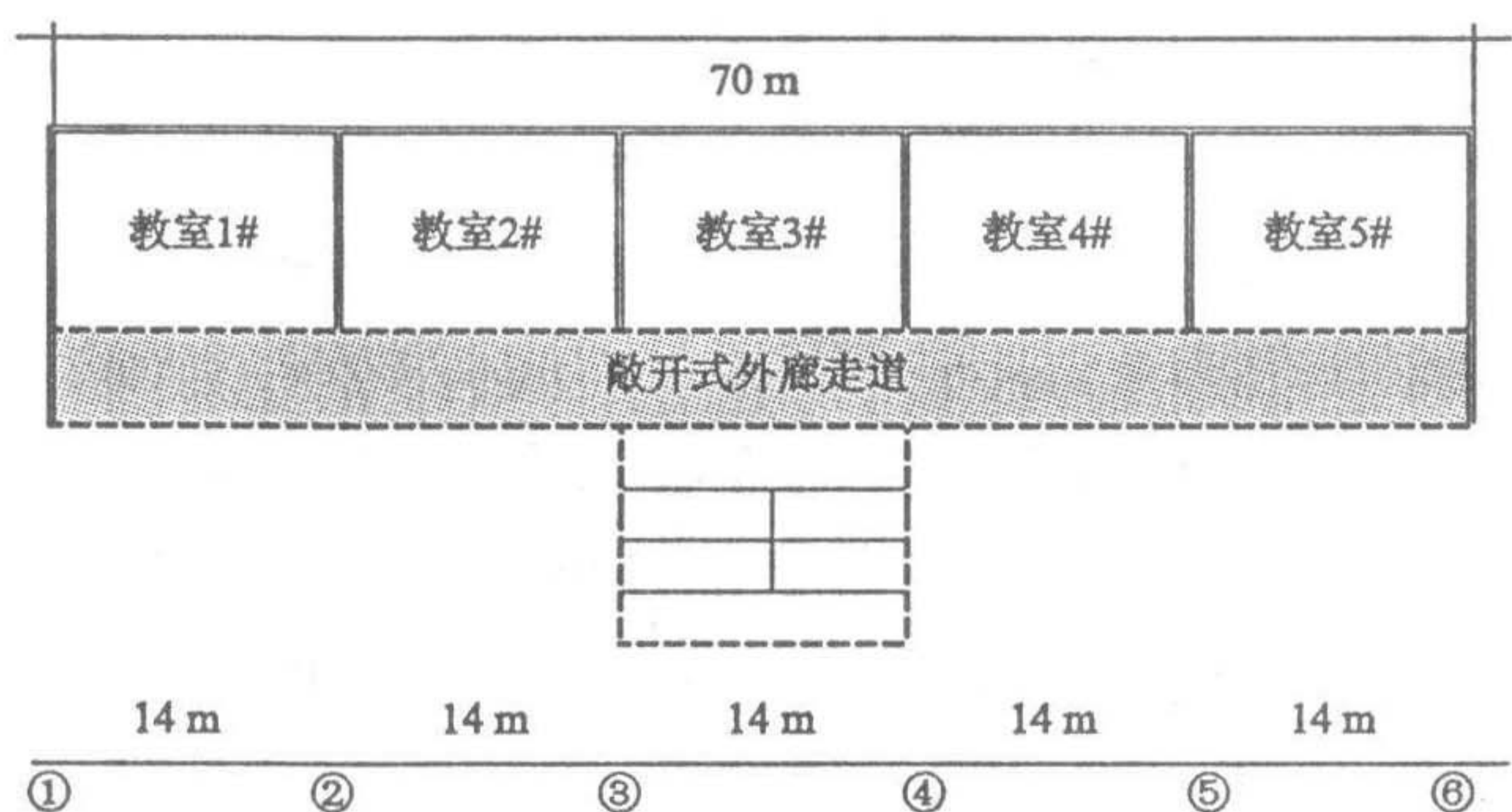


图 2 某多层教学楼的设计平面

大都借鉴国外一些经验数值,缺乏性能化设计。不能够很好地针对建筑物特点、人员因素、火灾条件、消防设施因素进行建筑防火性能化设计,而确定安全疏散距离^[3]。

2 基于火灾安全理论下的安全疏散模型

2.1 火灾安全理论

2.1.1 火源设计

根据火灾场景而设定火灾释放热率,对火灾可燃物的认识而设定参数值,此参数设定是决定火灾危害的主要参数,在火灾模型中释热率值作为模型计算的基本数据输入,并以此来决定火灾中烟气温度、烟气层高度和烟气层辐射的多少。

稳态火源:其释热率保持某一常数。实际中多取平均值,如办公室:290 kW/m²,商场:500 kW/m²,宾馆:249 kW/m²。

非稳态火源:其火灾释热率是时间的函数^[4]。可用公式:

$$Q = \alpha(t - t_0)^2$$

式中: α ——火灾增长系统(kW/s²);

t ——点火后的时间(s);

t_0 ——为开始有效燃烧所需要的时间(s)

火灾增长系数可分为慢速(0.002 931)、中速(0.011 270)、快速(0.046 890)、超快速(0.187 800)。

2.1.2 烟气流动模拟

房间质量平衡式:

$$V_i \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \sum_j (m_{ij} - m_{ji}) = M_i$$

式中: V_i —— i 室的体积(m³);

ρ_i —— i 室的烟气密度(kg/m³);

m_{ij} ——通过开口从 i 室向 j 室的烟气流量(kg/s);

m_{ji} ——通过开口从 j 室向 i 室的烟气流量(kg/s);

M_i —— i 室的质量发生速度,一般地

$$M_i = M_{\text{comb},i} + M_{\text{supply},i}$$

一般地: $m_{ij} = f(P_{ij}, T_i, T_j, \mu)$

$$m_{ji} = f(P_{ij}, T_i, T_j, \mu)$$

建筑烟气质量流动解析:

$$m_{\lambda} = m_{\lambda}^+ - m_{\lambda}^- = f(P, \rho, \mu)$$

将质量平衡式按各室展开,可改写:[I]·[m] = [M]

2.2 安全疏散模型的建立

以图 1 为例。某高层建筑办公楼标准层火灾平面图 3,假设起火点位于图中红色点房间(A4#房)。

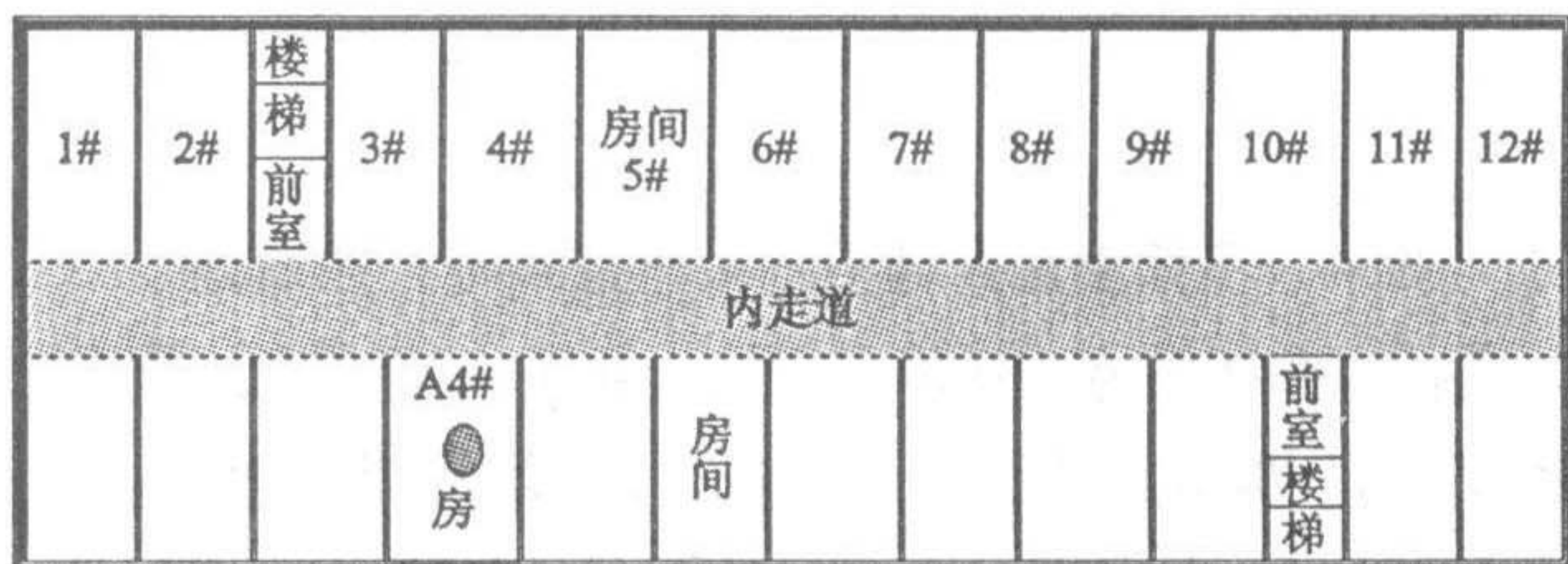


图 3 某高层建筑办公楼标准层火灾平面

2.2.1 设定条件

火源设计:起火点房间(A4#房)为一般通常办公室,建筑面积 50 m²,开窗面积 6 m²,窗开口高 2 m,门 0.8 m²,门高 1.9 m,室内容纳 4 人办公,有 4 张办公桌、4 个书柜、1 套沙发、1 个茶几、4 台电脑、窗帘、纸张、个人常用品(如衣物 8 件)。按公式: $q_i = \sum G_i H_i / A_i$ (MJ/m²)可计算出火灾荷载密度。按公式: $R = 5.5 A_{w0} \times \sqrt{H}$ (kg/min)可计算出燃烧速度^[5]。

计算参数取值:起火点房间(A4#房)发生火灾,且火灾经过初期阶段,刚进入火灾发展期。利用此时的参数值进行计算,更有利于人员疏散。这是因为火灾初期阶段有利于疏散,但火灾所产生的烟、热又以火灾全面发展阶段为临界状态,其值是火灾中产生最大有害烟雾和毒气,也是通过理论计算的最科学阶段。

疏散条件:以 4#房间按 4 人进行人员安全疏散,4 人均均为正常普通人员,出门在不分辨方向的情况下疏散。暂不考虑疏散指示标志和应急照明作用。以白天自然采光在烟雾中的能见度为依据。

走道条件:走道为内走道,长 130 m,高 2.5 m,宽 1.4 m,设有机械排烟系统。

外设条件:不考虑风向,设定门、窗均开启,室内燃烧充分。

2.2.2 理论计算

1) 人员安全疏散时间 t (s)

燃烧过程可分为发生燃烧和持续燃烧 2 个阶段。按波茨尔特(Berthelot)理论,如图 4,单位时间内的产热量 q_1 与单位时间内散热量 q_2 之差必等于单位时间内可燃物体系温度升高所需的热量^[6]。即

$$q_1 - q_2 = V \rho C_v \times dT/d\tau$$

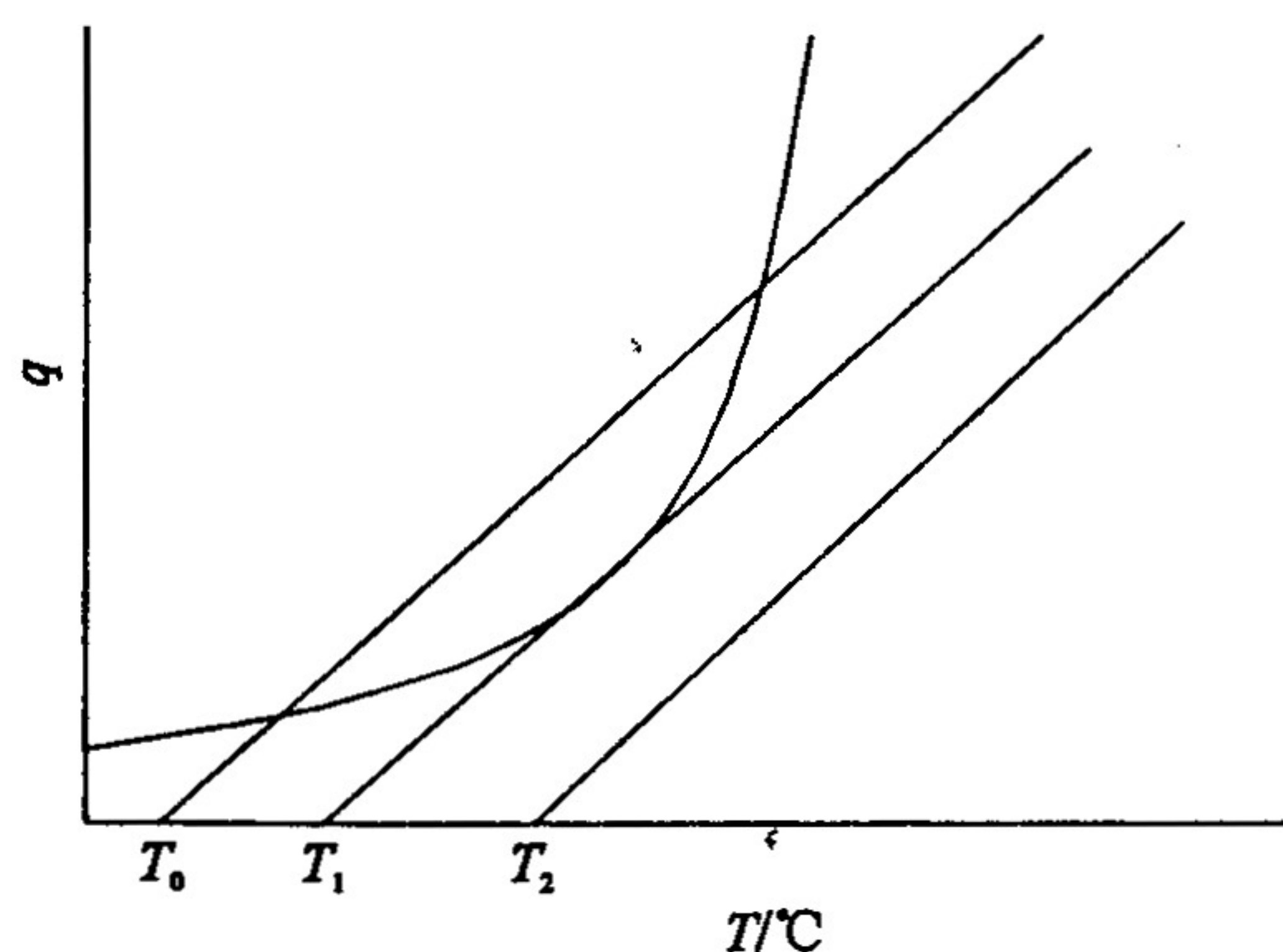


图4 不同温度条件下的散热直线与产热曲线

T_0 为室内常温,取值 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,当遇火源之后,温度上升到 T_1 时,即起火燃烧, T_1 通过计算求得。当温度上升到 T_2 时,即火灾进入全面发展阶段,燃烧猛烈, T_2 也可通过计算求得。

人员安全疏散时间,就是着火室内温度从 T_1 上升至 T_2 的时间,即

$$t = \tau_2 - \tau_1$$

2) 人员疏散最快速度 $v(\text{m/s})$

人员安全疏散的速度是以一个正常中年男人在无烟、无毒、常温下,一手抚嘴、鼻,弯腰前进的通常速度为基准,分别考虑人员素质、烟雾毒气、火场温度、消防设施情况、通道弯直等因素影响,可用公式表示,即

$$v = v_0 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5$$

式中: v_0 ——一般人通常基本速度(m/s);

K_1 ——人员素质因素系数;

K_2 ——烟雾毒气因素系数;

K_3 ——温度系数;

K_4 ——消防设施系数;

K_5 ——直、弯道系数

上述公式中各系数的取值非常数,是一个可变数。根据国外一些实验数据,系数变化为可总体用 K 表示,此公式暂不讨论消防设施对疏散的影响,按直道考虑时 K_5 取值为 1,如图 5 所示:

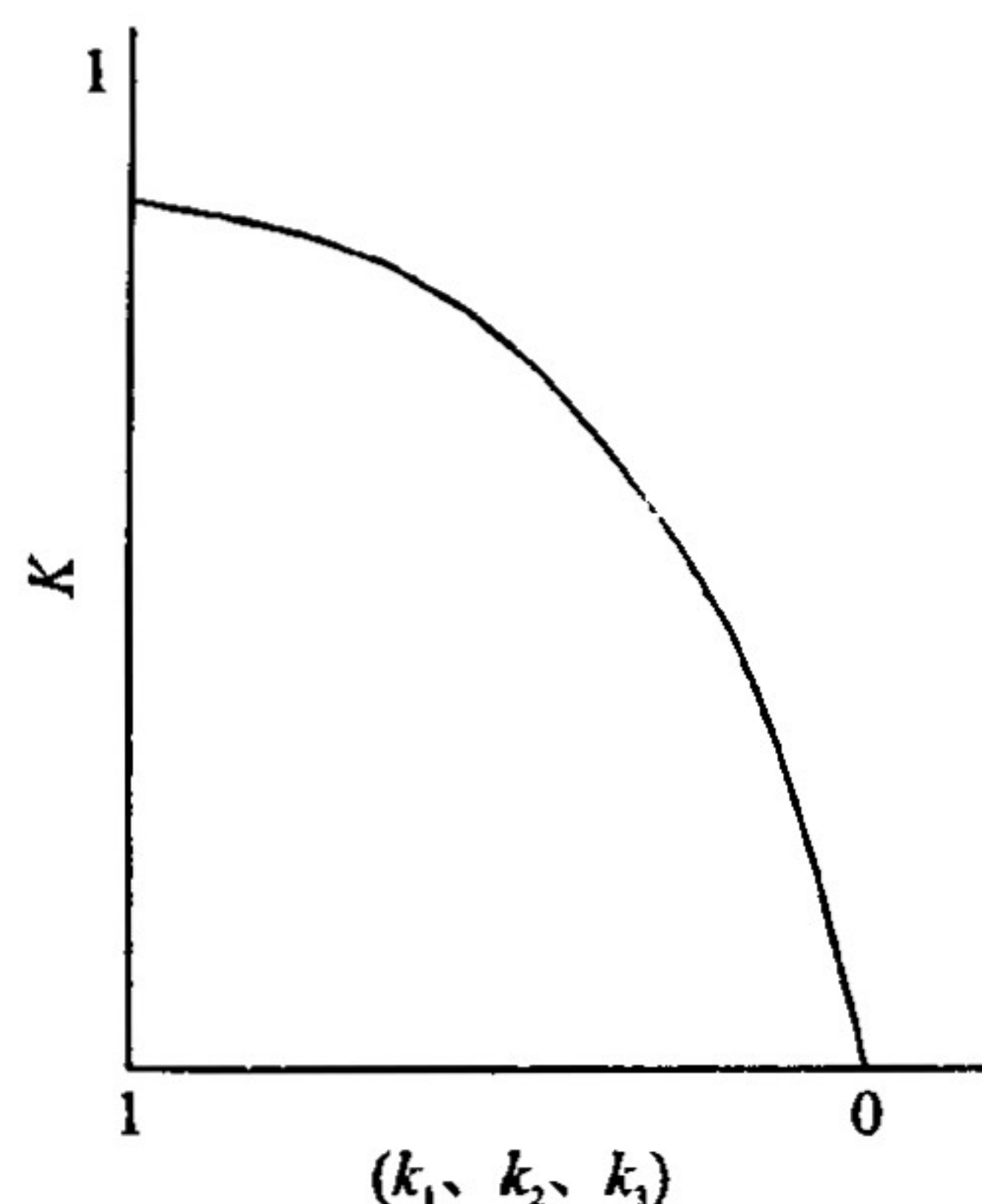


图5 速度系数与人员素质、烟雾毒气、温度关系

故,该人员疏散速度公式可改写为:

$$v = v_0 \times f(k)$$

$f(k)$ 为一函数, $f(k) = f(k_1, k_2, k_3)$,其曲线类似抛物线。

2.2.3 理论计算与实际结合要注意的几个方面

1) 实际火灾中,人员开始疏散时间 τ_1 并不是温度上升到 T_1 时的着火时间,而是烟雾、温度足以发生报警时的时间,这往往会延后的。

2) 普通正常中年男人在无烟、无毒、常温下,一手抚嘴、鼻,弯腰前进的通常基准速度 v_0 ,为实验求得平均值。

3) 人员素质因素系数 K_1 ,分别按:小孩、少年、中年、中老年、老年对应心理素质好坏、身体素质好坏、对环境是否熟悉、性别、有无火灾常识、是否受过训取值。设定中年人心理素质好、身体素质好、对环境熟悉、男性、具有火灾常识、受过训的取值为 1,其余情况均小于 1。

4) 烟雾毒气因素系数 K_2 ,计算在疏散时间内火灾蔓延到走道时的烟雾浓度,根据人员能见度、有毒气体对人体损害程度,确定 K_2 。

5) 温度系数 K_3 ,计算在疏散时间内火灾蔓延到走道时的温度,根据人员在该温度下的疏散能力,确定 K_3 。

3 基于安全疏散模型的安全疏散距离评估

现以某高层建筑办公楼某层(见图 3)为例,运用以上建立的火灾模型和安全疏散模型,来计算安全疏散距离,并进行安全性能的评估。

3.1 评估等级及原则

参照澳大利亚消防规范改革中心颁布的《FIRE ENGINEERING GUIDELINES》,评估等级分为 3 级,1 级为子系统评估,2 级为系统评估,3 级为建筑评估^[7]。

由于笔者仅在建立性能化设计方法下探讨安全疏散距离分析方法,因此文章重点在第 1 级分析,同时也为第 2 级、第 3 级评估打下基础。

火灾中,人员能安全地从建筑内疏散出来,必须满足以下条件:

1) 人员在得知火灾的发生后,开始疏散的时间必须在火灾全面发展期内,否则,疏散通道内将充满浓烟、高温和明火,这时是不能疏散出人员来的。

2) 安全出口保证是安全的,如防烟楼梯前室无烟火并有新鲜空气,封闭楼梯间的门能正常阻挡烟气等。

3) 疏散通道必须畅通无阻。

总之,毋庸置疑,安全疏散距离的评估方法是在上述条件下,人员能安全进行逃生。

评估中人员安全疏散的最长距离(m) = 人员疏散最快速度(m/s) $\times$ 火灾安全疏散时间(s),这里火灾安全疏散时间(s)是可用安全疏散时间(ASET)。

3.2 安全距离分析结果

1) 按公式 $q_i = \sum G_i H_i/A_i$ (MJ/m^2) 和 $Q = K \cdot A \cdot \sqrt{H} \cdot q_{co}$ 计算出起火点房间(A4#房)中(面积 50 m^2 ,4 张办公桌、4 个书柜、1 套沙发、1 个茶几、4 台电脑、窗帘、纸张、个人常用品),火灾荷载密度约 680 MJ/m^2 。室内以木材为标准,约 442.00 kg 。

2) 按公式 $R = 5.5A_{iw} \times \sqrt{H}$ (kg/min) 计算出起火点房间(A4#房)内(开窗面积 6 m^2 ,窗开口高 2 m),燃烧速度约为 46.67 kg/min 。

3) 起火点房间(A4#房,体积 150 m^3)内烟密度(kg/m^3)计算。水汽:由 442.00 kg 木材(含 $H6.4\%$,完全燃烧 70%)生成(H_2O 水蒸汽) 178.21 kg ,生成碳粒(按为完全燃烧 30% ,含 $C49.5\%$) 65.64 kg 。烟雾中主要成分是碳粒和水蒸汽,故烟密度为 1.62 kg/m^3 。(主要考虑火灾从初期阶段到全面发展阶段的临界状态,以下均同)

4) 按木材燃烧的时间 - 温度曲线,见图 6:

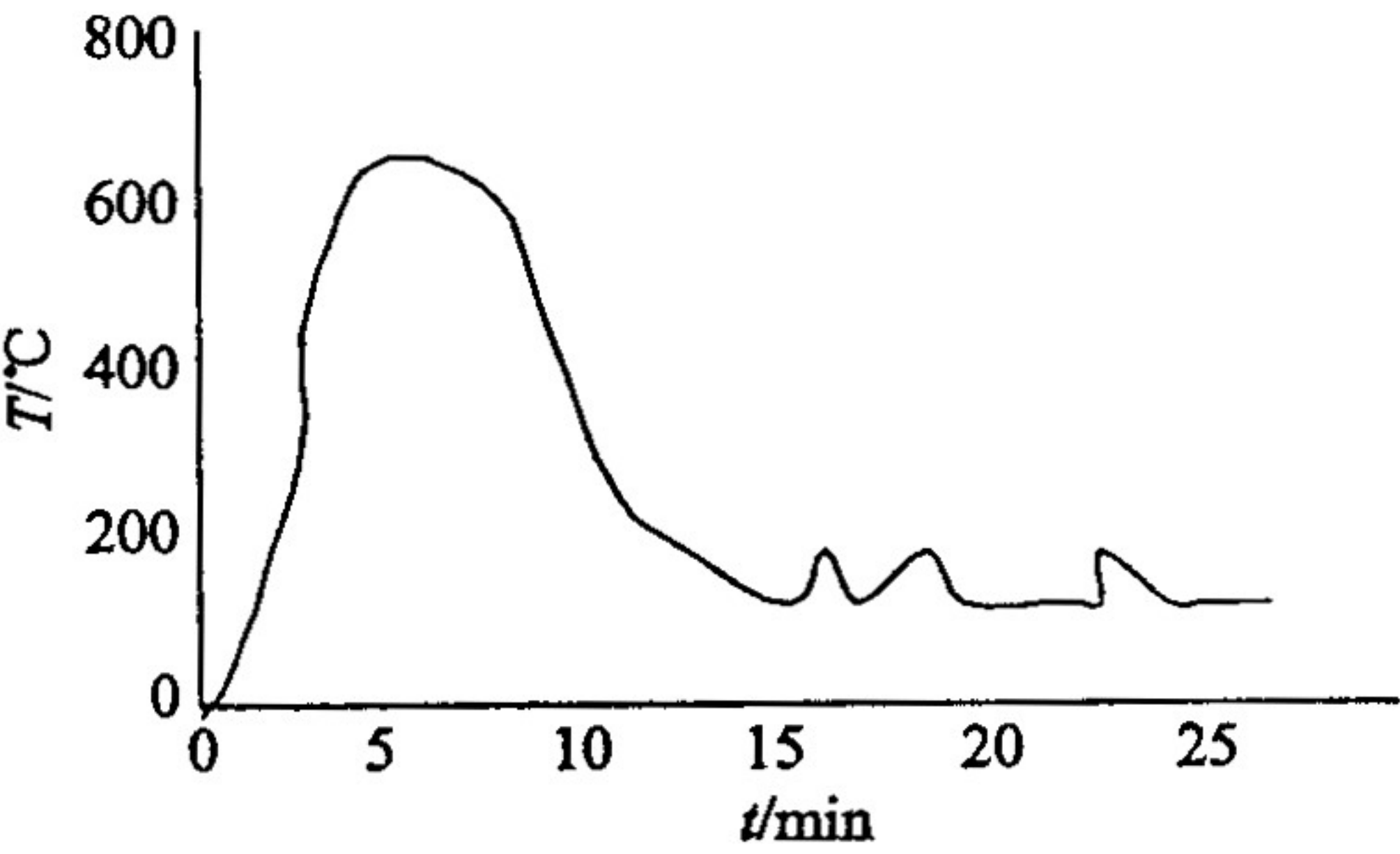


图 6 木材燃烧的时间 - 温度曲线

起火点房间(A4#房)的最高温度可达 $850\text{ }^\circ\text{C}$ [5]。

5) 按公式 $q_1 - q_2 = V\rho C_v \times dT/d\tau$,并结合火灾温度曲线,计算得出起火房间,起火物遇火源后约 4 min 开始起火燃烧,至 9 min 时,火灾发展为全面发展阶段。故人员疏散允许时间为 5 min 。

6) 根据国内外资料及实验,取 $v_0 = 80\text{ m/min}$ 。

7) 设定起火房间门、窗开启,按公式 $V_i \frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \sum_j (m_{ij} - m_{ji}) = M_i$ 可计算出流向走道的烟雾量:(按水蒸汽, $1\text{ molH}_2\text{O} = 22.4\text{ L}$,碳粒在水蒸汽中),窗户的对流形式是上半部 $1/3$ 排出烟雾。故进入走道的烟雾量: $1\,723.78\text{ m}^3$,走道体积为 455.00 m^3 ,远远小于排

进的烟量。虽走道上设有机构排烟,但走道上几乎是全充满烟雾。

8) 按公式 $E = \varepsilon C_0 (\frac{T}{100})^4$ 可计算出走道内热量,(取平均温度 $500\text{ }^\circ\text{C}$,通过门辐射)约为 $5\,386.5\text{ W}$,走道温度上升约 $3\text{ }^\circ\text{C}$ 。(环境温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$,空气密度 1.2 kg/m^3 ,比热 $1\text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$)。同时烟雾传递热量,温度上升 $28\text{ }^\circ\text{C}$,走道温度为 $56\text{ }^\circ\text{C}$ 。(这是指走道内无明火燃烧的情况)

3.3 距离安全性评估

通过上述计算可知:一个人在无火灾的情况下,通常在 5 min 时间内可行进 400 m ,但在火灾中速度减慢,环境危险大,允许时间短,疏散距离大大减短。这里针对不同时间开始疏散,进行安全性评估。

如表 1 所示,针对不同时间段内进行安全疏散距离的结果可形成如下表格:(按公式 $v = v_0 \times f(k)$ 取值 v ,抛物线定律 $v = v_0 [1 - 1/20(t - 4)^2 + 1/20(t - 4)]$)。

表 1 不同时间段内疏散距离表

发生火灾时间段/min	走道内情况	v 的取值 /m/min	理论疏散距离/m
0 ~ 4	基本无烟、热	80	400.0
4 ~ 4.5	有少许烟、热	77	346.5
4.5 ~ 5	有一定烟、热	72	288.0
5 ~ 5.5	有一定烟、热	65	227.5
5.5 ~ 6	有大量烟、热	56	168.0
6 ~ 6.5	有大量烟、热	45	112.5
6.5 ~ 7	有特大量烟、热	32	64.0
7 ~ 7.5	有特大量烟、热	17	25.5
7.5 ~ 8	浓烟、高热	0	0
8 ~ 8.5	浓烟、高热	0	0

可形成以下坐标图 7:

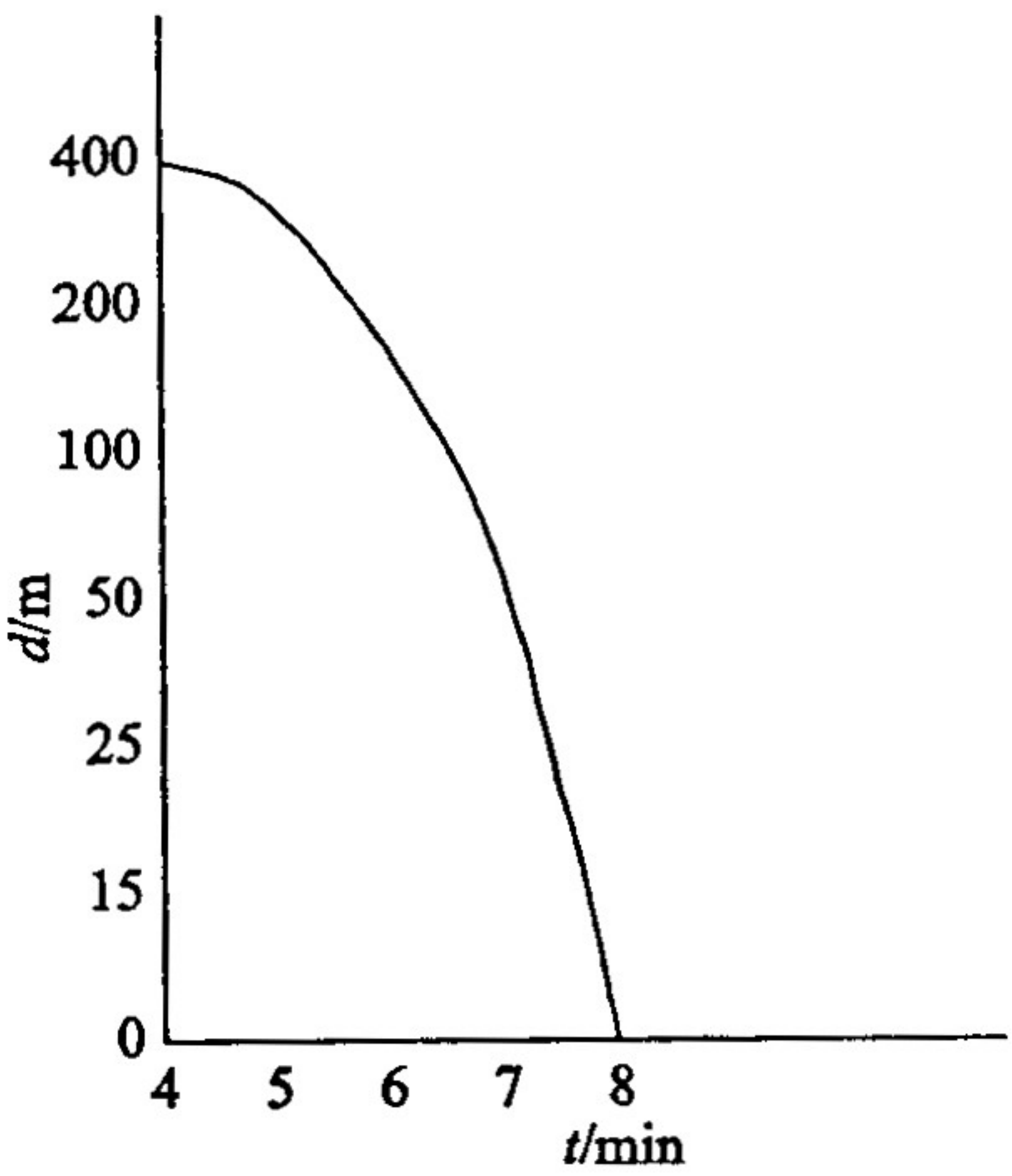


图 7 时间 - 疏散距离坐标

由图 7 可知,安全疏散距离的长短,是与火灾着火燃烧时间,疏散起始时间,火灾全面发展时间紧密相关的。发现火灾越早,人员易安全疏散。建筑内走道应在 25 m 长为适宜。

4 小 结

分析了安全疏散处方式设计的不足,探讨了安全疏散性能化设计方法,为今后的性能设计提供了参考。有关安全疏散性能设计还存在许多有待深入研究问题。安全疏散距离与疏散开始时间关系、安全疏散与建筑特点的关系等问题需要深入研究。

参考文献:

- [1] 蒋永琨. 高层民用建筑设计防火规范[M]. 北京:中国计划出版社,2001.
- [2] 张永胜. 建筑设计防火规范[M]. 北京:中国计划出版社,2001.
- [3] 李天荣. 建筑消防设备工程[M]. 重庆:重庆大学出版社,2002.
- [4] 王学谦,刘万臣. 建筑设计防火手册[M]. 中国建筑工业出版社,1998.
- [5] 姜文源. 建筑灭火手册[M]. 中国建筑工业出版社.
- [6] 刘永基. 消防燃烧原理[M]. 沈阳:辽宁人民出版社,1992.
- [7] JOHN H. KLOTE. A Method for Calculation of Elevator Evacuation Time[J]. J. of Fire Prot. Engr, 1993,5(3): 83-95.

Analysis of Safe Evacuation Based on Engineering Theory of the Safty of Fire Disaster

WANG Ling-dong

(College of Urban Construction and Environmental Engineering of Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: When the building is on fire, there is a certain requirement to evacuate people safely. In fact the requirement is normally executed by certain standard. Nowadays, both internal and external experts have proposed many ways to change current dealing models to functional standard models. But there need to be further research for functional design of distance on safe evacuation. Based on the dissection of current existed inadequacy, this thesis covers a higher standard of safe distance. That is, if the fire brokes out inside of the building, people should estimate the safe distance according to smoke and heat of the fire, the influence of the circumstances to time and speed on evacuation. The paper connects engineering theroy of safty of fire disaster and then it designs a model to evacuate people safely. The model will play a part in promoting designing a more functional antifire structure.

Key words: fire disaster; safe evacuation; model; functionization

(编辑 姚 飞)