疏散准备时间及出口宽度对人员疏散影响的模拟

褚冠全 孙金华* 王青松 陈思凝

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026. * 联系人, E-mail: sunjh@ustc.edu.cn)

摘要 在人员疏散计算过程中, 通常将疏散准备时间取为一定值, 而事实上它是一个服从概率分布的随机变量. 通过利用 GridFlow 疏散模型研究了疏散准备时间及出口宽度对人员疏散的影响. 在一个单空间建筑条件下, 研究了疏散准备时间服从正态分布时, 在不同人员密度条件下, 对人员疏散的影响情况. 同时, 比较了当疏散准备时间服从正态分布和取为定值两种情形时计算得到的疏散时间的差异, 阐述了当疏散准备时间取为定值时可能导致的两个主要缺陷. 基于拥塞与排队理论, 对计算结果进行了分析. 此外, 当疏散准备时间服从正态分布时, 研究了出口宽度对整个疏散时间的影响. 最后, 根据计算结果, 分析了整个疏散时间的概率分布状态. 结果表明, 当疏散准备时间平均值比较小的情况下, 人员疏散时间主要受人员密度的影响; 随着疏散准备时间平均值的增加, 人员疏散时间受人员密度变化的影响越来越小. 对于较长的疏散准备时间、较低的人员密度或较宽的出口, 当疏散准备时间服从正态分布时, 总的疏散时间也服从正态分布.

关键词 火灾 疏散准备时间 人员疏散 正态分布 出口宽度 人员密度

在进行火灾风险评估与性能化防火设计时, 首先要保证人员在危险状态来临之前逃离至安全区域. 目前, 衡量人员能否疏散至安全区域的判据是比较可用安全疏散时间(ASET) 与所需安全疏散时间(RSET) 的大小. 如果 RSET 小于 ASET, 则认为人员能够疏散至安全区域, 其关系如式(1)所示.

$$\mathrm{RSET} < \mathrm{ASET}, \tag{1}$$

式中, ASET 受多方面因素的影响, 如火灾荷载、点火源、房间内衬材料的热特性、房间高度和通风状况以及火灾产物的特性等. RSET 主要与火灾探测与报警, 及火灾时的人员行为等因素相关, 一般由四个部分组成:

$$\mathrm{RSET} = t_{\mathrm{de}} + t_{\mathrm{alarm}} + t_{\mathrm{pre}} + t_{\mathrm{move}}, \tag{2}$$

式中, t_{de} 为火灾探测时间; t_{alarm} 为火灾报警时间; t_{pre} 为疏散准备时间, 即从人员获得火灾信息到开始疏散所需的时间; t_{move} 为人员运动时间, 即从开始疏散到撤离至安全区域所需的时间.

火灾探测与报警时间主要受探测报警装置特性的影响. 疏散准备时间受建筑用途、报警设施、人员特征、建筑物特征及消防管理等诸多因素的影响. 人员运动时间主要与人员密度、人员疏散速度、建筑环境等因素相关. 对于整个人员疏散过程来讲, 在一个特定的场景下, 火灾探测与报警时间很容易确定. 为了研究方便, 这里不再考虑探测与报警时间. 那么疏散时间 t_{ev} 为疏散准备时间与运动时间之和, 即

$$t_{\mathrm{ev}} = t_{\mathrm{pre}} + t_{\mathrm{move}}. \tag{3}$$

对于RSET, 多侧重于运动时间的计算, 研究人员在疏散路线上的运动情况[1~5]. 对于疏散准备阶段, 多是根据一些火灾后的调查, 或在不同功能建筑物内开展事先未通知的疏散演习, 以获得相关数据来研究这个阶段的人员行为[6~10]. 而关于疏散准备时间对人员疏散影响的研究还较少. 在火灾风险评估与性能化防火设计时, 疏散准备时间经常被忽视或简单取为一定值. 事实上, 疏散准备时间为服从概率分布的随机变量. MacLennan等[11]认为比较适合威布尔分布, 但这并不意味着其他分布状态不能表示疏散准备时间的分布状态. Purser等[12]通过大量的实验, 认为单峰的、向一边倾斜的分布, 如对数正态分布比较合适. 同时还指出, 正态、对数正态以及威布尔分布均可以用来表示疏散准备时间[13]. 总的来讲, 对于不同人员特征和建筑类型, 当前还不能确定疏散准备时间的具体分布状态[14]. 然而, 疏散准备时间服从概率分布已勿庸置疑. 为了获得更加合理的疏散时间以进行消防设计, 很有必要研究疏散准备时间对人员疏散的影响.

人员疏散时间不是疏散准备时间和运动时间的简单累加, 因为这两部分并不是完全相互独立的. 例如, 一个人的疏散准备时间较短, 而其距离出口较远; 另一个人的疏散准备时间较长, 但其距出口较近. 因此, 最先开始疏散的人不一定就能够最先完成整个疏散过程. 通常情况下, 如果将疏散准备时间取为

定值，认为所有人员在同一时刻开始疏散，疏散时间即在运动时间上加入一个疏散准备时间，而这是不能反应实际疏散情形的.

本文的主要目的是研究在不同人员密度和出口宽度条件下，疏散准备时间对人员疏散的影响，及当疏散准备时间服从概率分布的情况下，总的疏散时间的分布状态.

1 模拟计算结果与讨论

本文中所用的GridFlow疏散模型为英国BRE (Building Research Establishment) 开发. 该疏散模型最初用于研究人员行为与疏散方法. GridFlow运动时间的计算是基于Nelson 和 MacLennan提出的算法[15]，因此与Crisp、Exodus、Simulex等模型的算法相似. GridFlow与其他疏散计算模型最大的不同在于其考虑了疏散准备时间与运动时间的相互作用. 对于疏散准备时间，可以根据需要设定为概率分布或定值.

人员疏散是疏散准备时间与运动时间相互叠加的结果，同时还会受到人员密度与出口宽度的影响. 在实际情况下，由于起火位置与人员获得火灾信息后的行为均为随机变量，所以很难确定发生火灾时每个人的疏散准备时间及其在建筑物内的位置. 为了能够设计出一个更加接近于实际的场景，从统计的观点考虑，将整个建筑物内人员的疏散准备时间赋予一定的平均值与方差，并将人员随机地分布于建筑物内各处，这里用正态分布表示疏散准备时间，来研究其对人员疏散的影响.

1.1 疏散准备时间与人员密度对疏散的影响

由于房间为建筑物的基本组成部分，这里将一个长和宽均为 20 m，中间开口为 1 m的单空间场景作为模拟计算的场所. 人员密度从小到大依次取为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0 和 1.3 ppl/m^2 (ppl 为people的缩写). 由于地面面积为 400 m^2，那么建筑物内的人数分别为 40, 80, 200, 400 和 520 人. 人员步行速度采用正态分布表示(平均值为 1.19 m/s，标准方差为 0.3 m/s)[15]. 由于不同功能类型的建筑疏散准备时间差别较大，为了研究不同分布状态情况下，疏散准备时间对人员疏散的影响情况，平均值分别取为 30, 60, 120, 180, 240, 360和480 s. 根据式(3)，由于未考虑火灾探测与报警时间，因此疏散准备时间应接近于坐标 0 处开始. 正态随机变量在区间 $[\mu-3\sigma,\mu+3\sigma]$ 内的概率为 0.9974，几乎完全落在该区间之内. 因此方差取为平均值的 1/3，即 10, 20, 40, 60, 80, 120 和 160 s.

图 1 是在人员密度为 0.5 与 1.0 ppl/m^2 情况下，疏散准备时间服从正态分布与对数正态分布时疏散时间的比较. 由图 1 可知，两种情况下计算得到的疏散时间没有明显差别.

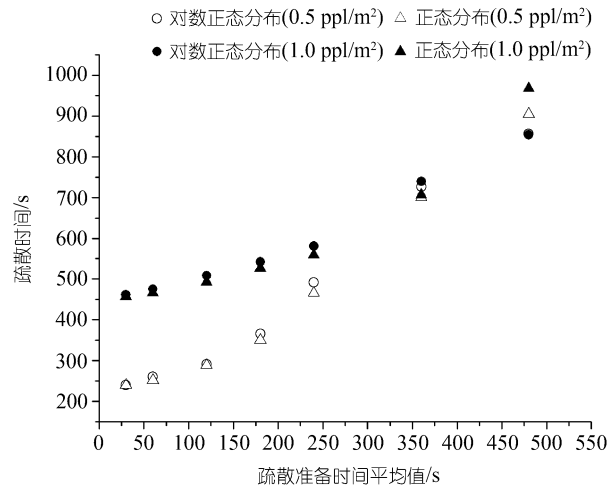


图 1 疏散准备时间服从正态分布与对数正态分布时得到的疏散时间

图 2 表示的是当疏散准备时间服从正态分布时，不同人员密度条件下疏散时间随疏散准备时间平均值的变化关系. 由图 2 可以得知，对于相同的人员密度，疏散时间随着疏散准备时间平均值的增加而增加. 对于相同的疏散准备时间平均值，人员密度越高，疏散时间越长. 这是因为对于一个固定的出口宽度，较高的人员密度将导致拥塞与排队，从而使得疏散时间延长. 当疏散准备时间平均值较短时，疏散时间受人员密度变化的影响较大. 然而随着疏散准备时间平均值的继续增加，疏散时间受人员密度影响越来越弱. 在一定的人员密度条件下，随着疏散准备时间平均值的增加，人们将会在不同的时间开始疏散，这从某种程度上会缓解拥塞与排队的状况，因此疏散时间受人员密度影响程度降低.

前面的分析结果表明，对于一个固定的出口宽度，当疏散准备时间平均值比较小时，疏散时间为疏散准备时间与人员密度的函数. 随着疏散准备时间平均值的增加，疏散时间主要受疏散准备时间的影响.

1.2 出口处拥塞与排队分析

前面的计算结果表明，当疏散准备时间平均值

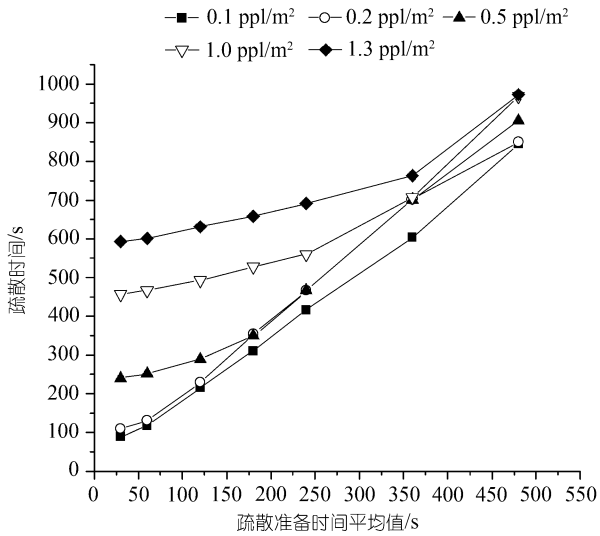


图 2 不同人员密度下疏散准备时间服从正态分布时得到的疏散时间

比较小时，疏散时间是疏散准备时间与人员密度的函数；当疏散准备时间平均值比较大时，疏散时间受人员密度的影响越来越小．出现这种情况的主要原因在于拥塞与排队的形成．尤其当人员密度较大时，拥塞与排队经常会出现在出口附近．拥塞与排队能减缓人员运动速度，延长疏散时间．为了分析疏散准备时间、人员密度与出口宽度的相互关系，这里引入一个微分方程

$$\mathrm{d}N = N_{\mathrm{all}} f(t)\mathrm{d}t - n_{\mathrm{out}}\mathrm{d}t, \tag{4}$$

其中，N_{all} 为建筑物内的总人数；$f(t)$为疏散准备时间的概率密度函数；n_{out} 为单位时间已疏散的人数(ppl/s).

将人员密度引入到式(4)并对其进行积分，在 t 时刻处于拥塞与排队状态的人数可由下式得到:

$$N_{\mathrm{cq}} = D_0 A F(t) - N_{\mathrm{out}}, \tag{5}$$

式中，N_{cq} 为处于拥塞与排队状态的人数；D_0 为人员密度(ppl/m^2)；A 为地板面积(m^2)；$F(t)$为 t 时刻疏散准备时间的累积概率；N_{out} 为已疏散的人数．一般情况下，N_{out} 为一变量，受出口特征的制约．

如果概率密度函数 $f_1(t)$的平均值大于 $f_2(t)$的平均值，对于任意的 t_0，有 $F_1(t_0) < F_2(t_0)$，即疏散准备时间平均值越小，相同时刻下人员疏散准备时间的累积概率值越大．根据式(5)，对于固定的人员密度，人员疏散准备时间平均值的增加能减少拥塞与排队的人数．对于疏散准备时间与人员密度对疏散时间的相互作用，可以通过两种极端情况进行分析．当疏散准备时间平均值趋于 0 时，即人们得到火灾报警后同时开始疏散，$F(t)$的值趋于 1．拥塞与排队程度主要受人员密度的影响，因此整个疏散时间受人员密度与运动时间决定．当疏散准备时间平均值趋于无穷大时，$F(t)$的值趋于 0，即在出口处没有拥塞与排队现象，整个疏散时间主要受疏散准备时间的影响而与人员密度无关．当疏散准备时间处于这两种极端情况之间时，疏散时间受到疏散准备时间与人员密度的共同影响．因此，疏散时间是疏散准备时间与人员密度的函数．

根据式(5)，对于给定的人员密度与疏散准备时间，随着出口宽度的增加，N_{out}也将增加．因此拥塞与排队程度有所减轻，从而使得疏散时间变短．对于给定的人员密度，当疏散准备时间平均值趋于 0 时，$F(t)$的值趋于 1，拥塞与排队主要受出口宽度的影响．当疏散准备时间平均值趋于无穷大时，$F(t)$的值趋于 0，出口宽度的变化对拥塞与排队几乎没有任何影响．

1.3 疏散准备时间服从正态分布与取为定值时得到的疏散时间比较

疏散准备时间是疏散时间的重要组成部分．实际工程中为了简化计算，通常将疏散准备时间取为一定值，而这可能会导致两个缺陷．

一是使得人员疏散时间的计算结果不准确．当疏散准备时间取为定值时，建筑物内所有人均在同一时刻开始疏散．这势必造成在门、走廊等处的严重拥塞与排队，从而影响整个疏散过程．然而实际情况下人员疏散准备时间服从概率分布,人们会在不同的时刻开始疏散，拥塞与排队现象与疏散准备时间取为定值时差别较大．因此将疏散准备时间简单取为定值，会使得疏散时间的计算结果不准确．

二是不能反映真实的疏散过程．在不同功能的建筑内人员疏散准备时间有较大的差异．例如，在宾馆、公寓等多室建筑中，人员广泛分布于建筑物内的各处，疏散准备时间差异较大．在礼堂、影剧院等单空间建筑中，疏散准备时间差别则比较小[16]．因此简单地将疏散准备时间取为定值，不能反映不同建筑类型下的实际疏散过程．

疏散准备时间服从正态分布与取为定值(最大疏散准备时间)时分别计算得到的疏散时间如图 3 所示．由图 3 可知，当人员密度较低(0.1 和 0.2 ppl/m^2)时，两种情况下得到的疏散时间差别不是十分明显．然而，当人员密度较高(0.5，1.0 和 1.3 ppl/m^2)时，两种情况

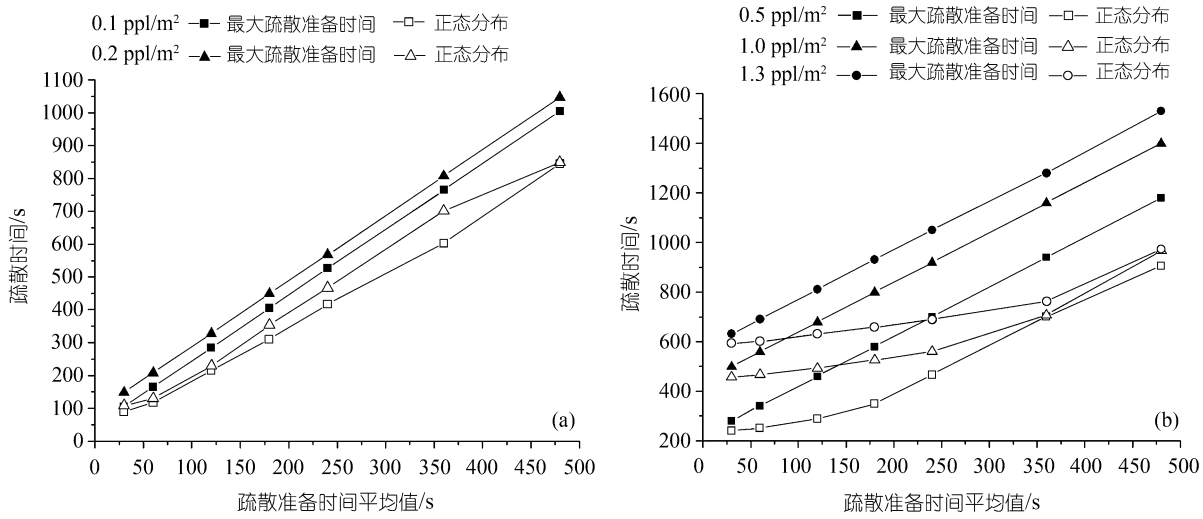


图 3　疏散准备时间服从正态分布与取为最大疏散准备时间时得到的疏散时间

下得到的疏散时间差别较大，而且随着疏散准备时间平均值的增加，差别更加明显.

图 3 得到的结果同样可以根据拥塞与排队过程进行解释. 图 3(a)中，对于较低的人员密度，在出口处不足以形成拥塞与排队，因此，疏散准备时间服从正态分布与取为定值时分别计算得到的疏散时间的差别不是十分明显. 图 3(b)中，对于较高的人员密度，当疏散准备时间平均值较小时，由于不能避免出口处拥塞与排队的形成，所以两种情况下的疏散时间差别不大. 随着疏散准备时间的增加，当疏散准备时间服从正态分布时，人员之间的开始疏散时间差别较大，由式(5)可知，拥塞与排队的严重程度会有所减弱；而当疏散准备时间取为定值时，人员同时开始疏散，这势必造成严重的拥塞与排队，导致疏散时间变长. 从而使得两种情况下计算得到的疏散时间差别变得更加明显.

1.4　出口宽度对疏散的影响

前面关于疏散准备时间及人员密度对疏散时间影响的分析均是在开口宽度为 1 m 的条件下得到的. 由式(5)可知，出口宽度的变化同样能影响人员疏散时间的大小. 当疏散准备时间服从正态分布且平均值分别为 60 和 180 s 时，疏散时间随开口宽度的变化情况如图 4 所示.

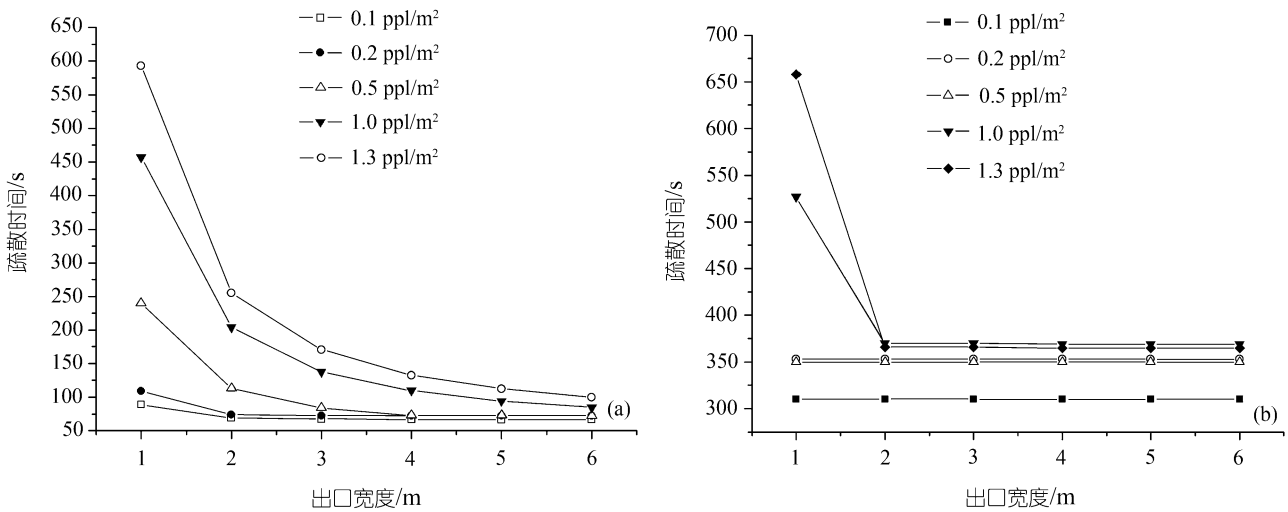


图 4　疏散准备时间平均值为 60 s (a)和 180 s (b)时，疏散时间随出口宽度的变化情况

由图 4(a)可知，随着出口宽度的增加，疏散时间变短，这主要是由于拥塞与排队程度的减弱造成的. 当出口宽度从 1 m 增加为 2 m 时，疏散时间有比较明显地减少；当出口宽度从 2 m 增加至 6 m 时，疏散时间几乎没任何变化，这在图 4(b)中尤其明显. 在人员密度较低的情况下，出口宽度的增加几乎对疏散时间没任何影响. 在人员密度较高的情况下，仅仅当开口宽度从 1 m 增加为 2 m 时，疏散时间才有明显的减少. 此外，随着疏散准备时间平均值的增加，疏散时间受出口宽度增加的影响越来越小.

图 4 显示的结果可以通过拥塞与排队的形成过程来解释. 对于较低的人员密度，在出口附近几乎没有拥塞与排队的形成，因此出口宽度的增加对疏散时间影响不大. 对于较高的人员密度，在出口附近会出现比较严重的拥塞与排队现象. 根据式(5)，随着出口宽度的增加，N_{cq} 变小，使得疏散时间有明显的减少趋势. 然而随着出口宽度的持续增加，N_{cq} 趋于 0 甚至为负值，即没有拥塞与排队现象，因此疏散时间不再受出口宽度变化的影响. 同时，随着疏散准备时间平均值的增加，对任意时刻 t，$F(t)$变小. N_{cq} 趋于 0 甚至为负值，所以出口宽度的增加对疏散时间几乎没有影响.

1.5 总的疏散时间及其概率分布

图 5 是在不同人员密度条件下，出口宽度为 1 和 2 m 时，累积疏散人数随时间的变化情况. 由图 5 可知，当各曲线相互平行时，表明出口处出现了排队现象. 这时出口处的人员疏散为连续的. 在人员密度较低、出口宽度较大或者人员疏散准备时间的平均值较大时，出口处的人员疏散并不连续.

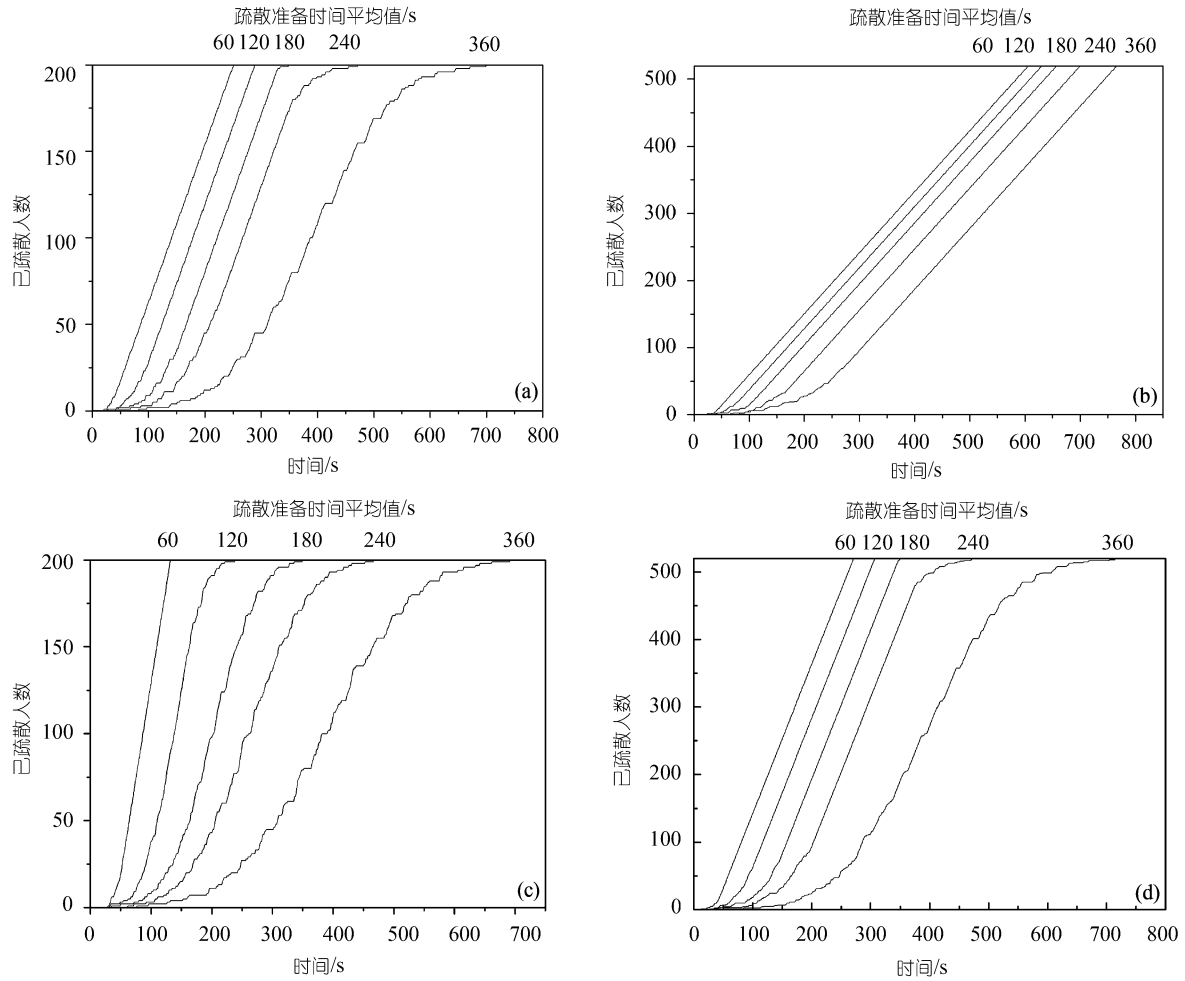


图 5 不同疏散准备时间情况下，出口宽度为 1 m，人员密度为 0.5 ppl/m^2 (a)和 1.3 ppl/m^2 (b)，及出口宽度为 2 m，人员密度为 0.5 ppl/m^2 (c)和 1.3 ppl/m^2 (d)时，已疏散人数随时间的变化情况

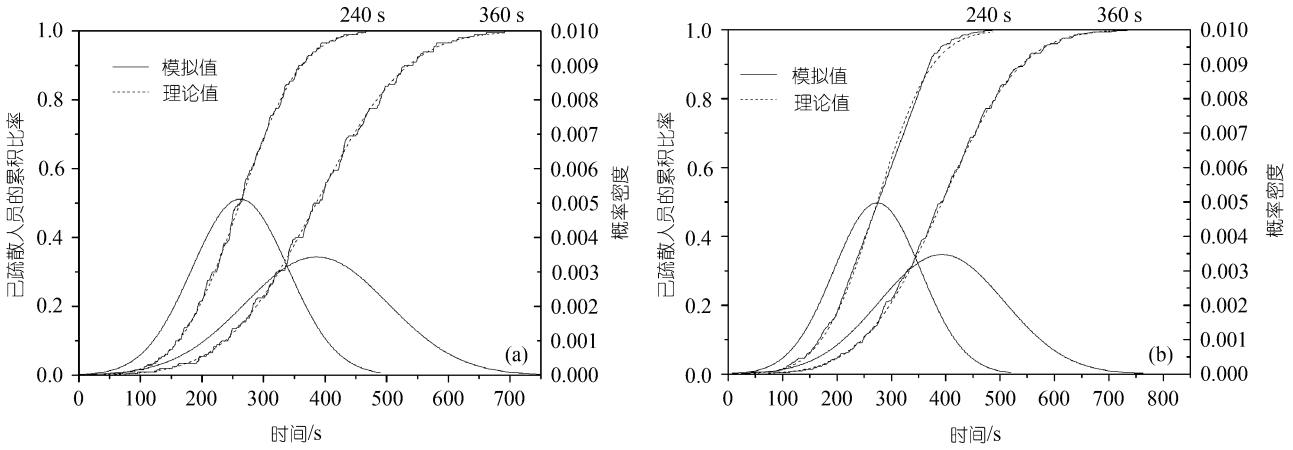


图 6 当出口宽度为 2 m，人员密度为 0.5 ppl/m^2 (a)和 1.3 ppl/m^2 (b)时，已疏散人员的累积比率及总的疏散时间的概率密度分布

根据图 5(c)和图 5(d)中的数据，当疏散准备时间平均值分别为 240 与 360 s 时，总的疏散时间的概率密度函数和累积概率分布如图 6 所示.

由图 6(a)可知，正态分布的理论值与模拟得到的结果拟合较好. 当疏散准备时间平均值为240 s时，总的疏散时间的平均值为 262 s，标准差为 78 s. 当疏散准备时间平均值为 360 s 时，总的疏散时间的平均值为 386 s，标准差为 117 s. 与图 6(a)相似，图 6(b)中正态分布的理论值与模拟得到的结果拟合也较好.当疏散准备时间平均值为 240 s 时，总的疏散时间的平均值为 274 s，标准差为 80 s. 当疏散准备时间平均值为 360 s 时，总的疏散时间的平均值为 393s ，标准差为 115 s. 结果表明，当疏散准备时间服从正态分布时，若在出口处没有严重的拥塞和排队，总的疏散时间也服从正态分布且向右平移一个值.

对于图 5(d)，当疏散准备时间平均值较小时(60 与 120 s)，很容易在出口处造成拥塞，从而导致总的疏散时间不服从正态分布. 当疏散准备时间平均值较大时(240 与 360 s)，即使有拥塞与排队现象的形成，由于整个疏散准备时间较长，拥塞与排队只是暂时现象，对疏散时间的影响不大，所以总的疏散时间仍服从正态分布.

2 结论

利用 GridFlow 疏散模型研究了疏散准备时间与开口宽度对人员疏散的影响，根据计算结果与讨论分析得出如下结论:

(1) 人员疏散时间是疏散准备时间与人员密度的函数. 当疏散准备时间平均值较小时，人员密度对疏散时间的影响较大；当疏散准备时间平均值较大时，疏散时间受人员密度的影响较小. 在礼堂、影剧院等单空间场所，人们的疏散准备时间的差异较小，因此在对这些类型建筑进行火灾风险评估和性能化设计时，需要准确地估计人员密度的大小.

(2) 当疏散准备时间简单取为定值时，可能会使疏散时间计算结果不准确. 在人员密度较低时，在疏散准备时间服从正态分布与取为最大疏散准备时间两种情形下，得到的疏散时间差别不是十分明显. 在人员密度较高时，两种情形下得到的疏散时间有较大的差别，而且随着疏散准备时间平均值的增加，差别愈加明显. 因此对于多室建筑，由于人员疏散准备时间整体较长且差异较大，建议采用概率分布表示疏散准备时间.

(3) 当疏散准备时间平均值较小时，出口宽度从 1 m 增加至 2 m 时，疏散时间有明显的减少；出口宽度从 2 m 增加至 6 m 时对疏散时间的影响较小. 当疏散准备时间平均值较大时，出口宽度从 1 m 增加至 2 m 时，疏散时间同样有明显的减少. 然而，对于较低的人员密度，随着开口宽度的增加，疏散时间不再受其影响. 人员密度较高情况下，出口宽度的增加对疏散时间的影响比人员密度较低的情况下更加明显.

(4) 对于较长的疏散准备时间、较低的人员密度或较宽的出口，如果没有形成严重的拥塞与排队现象，当疏散准备时间服从正态分布时，总的疏散时间也服从正态分布并向右平移一个值.

本研究仅对疏散准备时间及出口宽度对人员疏

散的影响进行了模拟计算分析. 而人员疏散是一个及其复杂的过程, 因此尚需通过火灾后的问卷调查及事先未通知的消防演习来搜集相关数据以验证计算结果的合理性.

致谢 对提供 GridFlow 疏散模型的 David Purser 表示诚挚感谢. 本工作为国家重点基础研究发展规划(编号: 2001-CB409606)和中国科学院“百人计划”资助项目.

参 考 文 献

1 Gwynne S, Galea E R, Owen M, et al. A review of the methodologies used in evacuation modelling. Fire Mater, 1999, 23(6): 383~388[DOI]

2 Helbing D, Farkas L, Vicsek T. Simulating dynamical features of escape panic. Nature, 2000, 407(28): 487~490[DOI]

3 Fang W F, Yang L Z, Fan W C. Simulation of bi-direction pedestrian movement using a cellular automata model. Physica A, 2003, 321(3-4): 633~640[DOI]

4 Gwynne S, Galea E R, Owen M, et al. A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. Build Environ, 1999, 34(6): 741~749[DOI]

5 Tajima Y, Nagatani T. Scaling behavior of crowd flow outside a hall. Physica A, 2001, 292(1-4): 545~554[DOI]

6 Fahy R, Proulx G. Human behaviour in the world trade centre evacuation. In: Hasemi Y, ed. The 5th International Symposium on Fire Safety Science. Melbourne: International Association for Fire Safety Science, 1997. 713~724

7 Shields T J, Boyce K E. A study of evacuation from large retail stores. Fire Safety J, 2000, 35(1): 25~49[DOI]

8 Proulx G. Occupant response during a residential highrise fire. Fire Mater, 1999, 23(6): 317~323[DOI]

9 John L Bryan. Human behaviour in fire: The development and maturity of a scholarly study area. Fire Mater, 1999, 23(6): 249~253[DOI]

10 Proulx G, Fahy R. The time delay to start evacuation: Review of five case studies. In: Hasemi Y, ed. The 5th International Symposium on Fire Safety Science. Melbourne: International Association for Fire Safety Science, 1997. 783~794.

11 MacLennan H A, Regan M A, Ware R. An engineering model for the estimation of occupant pre-movement and or response times and the probability of their occurrence. Fire Mater, 1999, 23(6): 255~263[DOI]

12 Purser D A, Bensilum M. Quantification of behavior for engineering design standards and escape time calculations. Safety Sci, 2001, 38(2): 157~182[DOI]

13 Bensilum M, Purser D A. GridFlow: An object-oriented building evacuation model combining pre-movement and movement behaviours for performance-based design. In: Evans D, ed. The 7th International Symposium on Fire Safety Science. Worcester: International Association for Fire Safety Science, 2002. 941~952

14 Horasan M. Design occupant groups concept applied to fire safety engineering human behaviour studies. In: Evans D, ed. The 7th International Symposium on Fire Safety Science, Worcester: International Association for Fire Safety Science. 2002. 953~962

15 Nelson H E, MacLennan H A. The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2nd ed. MA: National Fire Protection Association, 1995. 3-286~3-295

16 British Standards Institution. Part 1: Guide to the application of fire safety engineering principles, British Standard BS DD240 fire safety engineering in buildings. London: British Standards Institution, 1997

(2005-04-28 收稿, 2005-11-07 接受)