

# 热释放速率的不确定性对可用安全疏散时间的影响

孔得朋<sup>1,2,3</sup>, 陆守香<sup>1,3</sup>, 冯磊<sup>1</sup>, 卢兆明<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027; 2. 香港城市大学建筑系, 中国香港 999077;  
3. 中国科学技术大学-香港城市大学联合高等研究中心(苏州), 江苏苏州 215000)

**摘要:** 基于室内火灾烟气层高度和温度模型, 使用拉丁超立方抽样方法研究了火灾增长系数和最大热释放速率的不确定性对可用安全疏散时间(ASET)的影响。结果表明, 对于相当于民用建筑一个防火分区的单室无排烟房间, 当最大热释放速率在 0~1 MW 时, 其不确定性对 ASET 影响较大; 当最大热释放速率为 1~4 MW 时, 火灾增长系数对 ASET 的影响大于最大热释放速率对 ASET 的影响; 当最大热释放速率在 4~8 MW 取值, 仅考虑最大热释放速率的不确定性时, ASET 为一确定值, 此时热释放速率的不确定性对 ASET 的影响仅由火灾增长系数产生。

**关键词:** 火灾增长系数; 最大热释放速率; 可用安全疏散时间; 拉丁超立方抽样

**中图分类号:** TU2; X93      **文献标识码:** A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2010.07.017

## Effects of uncertainty associated with heat release rate on available safety egress time

KONG Depeng<sup>1,2,3</sup>, LU Shouxiang<sup>1,3</sup>, FENG Lei<sup>1</sup>, LO Siuming<sup>2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230027, China;  
2. Department of Building & Construction, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China;  
3. USTC-CityU Joint Advanced Research Centre, Suzhou 215000, China)

**Abstract:** The effects due to uncertainties associated with fire growth rate and maximum heat release rate (HRR) on available safe egress time (ASET) were analyzed using the Monte Carlo simulation based on Latin hypercube sampling. The smoke layer height and temperature were employed as tenability critical criteria, and ASET was calculated by ASET-B model. The results indicate that the effect due to uncertainty associated with maximum HRR on ASET is more significant when the maximum ranges from 0MW to 1MW. For values between 1 MW and 4 MW, a greater effect from fire growth rate than maximum HRR is evident on ASET. When the uncertainty of maximum HRR ranging from 4 MW to 8 MW is considered alone, ASET is a deterministic rather than stochastic value. The uncertainty of ASET is propagated by fire growth rate.

**Key words:** fire growth rate; maximum heat release rate; available safety egress time; Latin hypercube sampling

## 0 引言

在火灾风险评估和性能化防火设计中,为保证人员安全疏散,首先需要确定火灾发生后多久会对人员安全构成威胁,即可用安全疏散时间(available safety egress time, ASET)。ASET 与火灾燃烧类型、可燃物热值、热释放速率、防灭火措施等参数密切相关<sup>[1]</sup>。受各种因素影响,这些参数具有很大的不确定性。其中,火源热释放速率对于评价火灾危险性和火灾模拟具有重要作用<sup>[1-2]</sup>,因此人们非常关注火源热释放速率的不确定性对 ASET 的影响。

有关学者对影响 ASET 的参数不确定性进行了研究。Notarianni<sup>[3]</sup>利用 Monte Carlo 技术分析了 CFAST 模型中危险参数(烟气层温度、高度、能见度等)阈值不同对 ASET 的影响。Lundin<sup>[4]</sup>将实验所测数据与同等条件下 CFAST 模型的预测结果进行对比,研究了 CFAST 模型预测烟气层温度的不确定性。Au 等<sup>[5]</sup>采用子集模拟技术研究了 CFAST 模型中包括火灾增长系数在内多个输入参数的不确定性对室内烟气最高温度的影响。Rochan 等<sup>[6]</sup>采用矩积分方法,假定火灾为稳态火,研究了热释放速率在 0~200kW 服从广义  $\beta$  分布时,单室火灾达到临界时间时烟气层高度的不确定性。汪金辉<sup>[7]</sup>采用 Monte Carlo 技术系统地研究了多个输入参数的不确定性对 ASET 的影响。

通过文献分析可知,有较多学者关注输入参数不确定性对 ASET 的影响。由于热释放速率受多个因素影响,其分布形式不确定,而前人研究中仅假设热释放速率服从某一种分布。对于火灾增长规律,前人研究中多假设火灾为稳态火。基于以上问题,本文采用拉丁超立方抽样方法,假定火灾为  $t^2$  火,研究面积为一个防火分区的单室无排烟建筑内,最大热释放速率分别服从均匀分布、正态分布和对数正态分布,火灾增长系数服从对数正态分布时对 ASET 的影响。

## 1 ASET 分析方法

### 1.1 ASET 的计算模型

ASET 可由下式确定<sup>[8]</sup>:

$$ASET = \min(t_1, t_2, t_3, t_4, t_5) \quad (1)$$

式中,  $t_1/s$  为人员不能承受辐射热情况的来临时间;  $t_2/s$  为人员不能承受的烟气层温度来临时间;  $t_3/s$  为烟气中有害气体浓度达到威胁人员安全的来临时

间;  $t_4/s$  为环境能见度影响到人步行速度的来临时间;  $t_5/s$  为其他因素导致的危险状况来临时间。

对于单室高大空间的建筑,在火灾过程中往往会形成明显的烟气分层现象,如图 1 所示。这种情况下,计算 ASET 可以以烟气层下降到 2.1 m 或达到 180 °C 为判据,使用双区域模型 ASET-B 进行计算<sup>[9]</sup>:

$$\frac{dZ}{dt} = \begin{cases} -C_1 \dot{Q} - C_2 \dot{Q}^{1/3} Z^{5/3}, & Z_f < Z < H \\ -C_1 \dot{Q}, & 0 < Z < Z_f \\ 0, & Z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{dT_u}{dt} = \begin{cases} \frac{T_u [C_1 \dot{Q} - (T_u/T_a - 1) C_2 \dot{Q}^{1/3} Z^{5/3}]}{H - Z}, & Z_f < Z \leq H \\ \frac{T_u C_1 \dot{Q}}{H - Z}, & 0 \leq Z \leq Z_f \end{cases} \quad (3)$$

其中,

$$C_1 = \frac{(1 - L_c)}{C_p T_a \rho_a A}, \quad C_2 = \frac{0.21}{A} \left( \frac{\chi_c g}{C_p T_a \rho_a} \right)^{1/3} \quad (4)$$

式中,  $Z/m$  和  $T_u/^\circ\text{C}$  为待求量,分别为烟气层高度和温度;  $H/m$  和  $A/m^2$  分别为房间高度和面积;  $T_a/^\circ\text{C}$  为环境温度;  $C_p/(kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$  和  $\rho_a/(kg \cdot m^{-3})$  分别为空气比定压热容和空气密度;  $g/(m \cdot s^{-2})$  为重力加速度;  $L_c$  和  $\chi_c$  分别为总热损失系数和对流热占总释放热的比率;  $\dot{Q}/kW$  为热释放速率;  $Z_f/m$  为火焰高度。

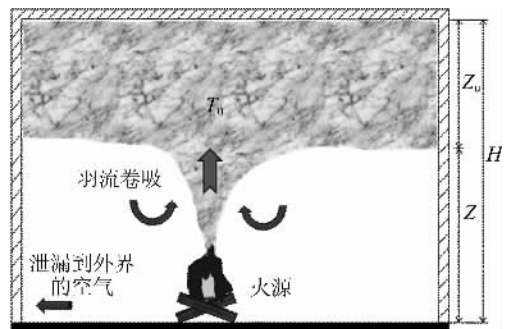


图 1 单一空间建筑火灾示意图

Fig. 1 Schematic of fire in a single compartment

对于该模型的准确性,文献<sup>[10]</sup>将大空间内烟气高度的实验数据与 ASET 模型计算的结果进行了对比,二者符合较好。本文仅考虑热释放速率的不确定性对 ASET 的影响,因此其他参数均为确定值。

对于热释放速率  $\dot{Q}$ , 假设其遵循  $t^2$  规律, 即

$$\dot{Q}(t) = \begin{cases} at^2, & 0 < t < t_g \\ Q_{\max}, & t_g < t < t_f \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $a$  为火灾增长系数;  $Q_{\max}/\text{kW}$  为最大热释放速率;  $t_g/\text{s} = \sqrt{\frac{Q_{\max}}{\alpha}}$  为达到最大热释放速率的时间;  $t_f/\text{s}$  为火源自动熄灭时间。

## 1.2 热释放速率的不确定性

Holborn 等<sup>[11]</sup> 基于大量的统计数据, 认为火灾增长系数  $\alpha$  服从对数正态分布, 即  $\alpha \sim \text{lognormal}(-5.4, 1.9^2)$ , 范围为 0.011 7~0.187 6。

由于受室内可燃物的燃烧性能、位置、通风因素、消防设施及建筑结构等因素影响, 最大热释放速率  $Q_{\max}$  的分布形式尚不明确。假设其分别服从均匀分布  $U(a, b)$ 、正态分布  $N(\mu, \sigma^2)$ 、对数正态分布  $\text{log} N(\mu, \sigma^2)$ , 考查不同分布形式下的  $Q_{\max}$  对 ASET 的影响。对于相同分布下不同统计参数的影响不作考虑;  $a, b$  分别为  $Q_{\max}$  的最大值和最小值;  $\mu, \sigma$  可根据“ $3\sigma$ ”原则, 使得  $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$  能够涵盖  $Q_{\max}$  的取值范围。不同场所有无喷淋情况下  $Q_{\max}$  的参考值, 见表 1<sup>[12]</sup>。

表 1 各类场所火灾最大热释放速率<sup>[12]</sup>

Tab. 1 Values of maximum heat release rate in various types of buildings<sup>[12]</sup>

场所类型	最大热释放速率 $Q_{\max}/\text{MW}$	
	有喷淋	无喷淋
商场	3	—
办公室、客房	1.5	6
公共场所	2.5	8
汽车库	1.5	3
超市、仓库	4	20
中庭	1	4

## 1.3 不确定性分析方法

输入参数不确定性对输出结果的影响, 分析基本程序如图 2 所示, 主要包括以下步骤:

(I) 选取不确定参数。为简化计算, 一般只考虑对输出结果影响较大且不能给出精确数值的参数作为不确定性参数。本文主要考虑火灾增长系数和最大热释放速率。

(II) 确定参数分布形式。文中不确定参数的分布形式已在 1.2 中给出。

(III) 对不确定参数进行抽样。Monte Carlo 模拟是目前应用较为广泛的不确定性分析方法, 但是

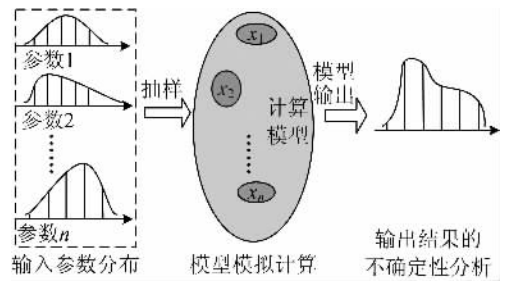


图 2 不确定性分析基本流程图

Fig. 2 Schematic of uncertainty analysis

传统的 Monte Carlo 模拟方法基于简单随机抽样 (simple random sampling, SRS), 一般抽样量较大, 抽样效率较低。本文采用基于拉丁超立方抽样方法 (Latin hypercube sampling, LHS) 的 Monte Carlo 模拟。LHS 是一种分层 Monte Carlo 抽样方法, 与 SRS 相比抽样效率更高, 可以明显减少计算量<sup>[13]</sup>。具体抽样方法见文献<sup>[14]</sup>。

(IV) 抽样结果的计算。将抽样样本代入 ASET-B 模型中计算 ASET。

(V) 模型输出的不确定性分析。对输出结果进行统计分析, 给出输出结果的统计特征, 如概率密度函数 (PDF)、累积概率函数 (CDF) 等。

## 2 算例与分析

为说明上述方法, 对一公共场所单室无排烟建筑进行分析。为使计算具有代表性, 基于《建筑设计防火规范》中对于防火分区最大允许建筑面积的有关规定, 单室面积设定为 2 500  $\text{m}^2$ , 顶棚高度为 3.6 m。环境温度为 20  $^{\circ}\text{C}$ ,  $L_c$  和  $\chi_c$  取值均为 0.7, 可燃物高度为 0 m。在本算例中, 我们仅考虑最危险的场景, 即整个防火分区内防火分隔失效时, 热释放速率对 ASET 的影响。

### 2.1 最大热释放速率对 ASET 的影响

由表 1 可知, 对于公共场所, 无喷淋作用下的  $Q_{\max}$  为 8 MW。为分析不同范围内  $Q_{\max}$  不同分布对 ASET 的影响, 将  $Q_{\max}$  分为以下区间: 0~1 MW, 1~4 MW, 4~8 MW, 考查每个区间内  $Q_{\max}$  不同分布形式对 ASET 的影响。为简化分析, 此处不考虑  $\alpha$  的不确定性对 ASET 的影响, 取其基准值 0.047。

#### 2.1.1 $Q_{\max}$ 为 0~1 MW 时其不确定性对 ASET 的影响

根据上述方法分析  $Q_{\max}$  在 0~1 MW 内服从不同分布形式时对 ASET 的影响, 抽样次数为

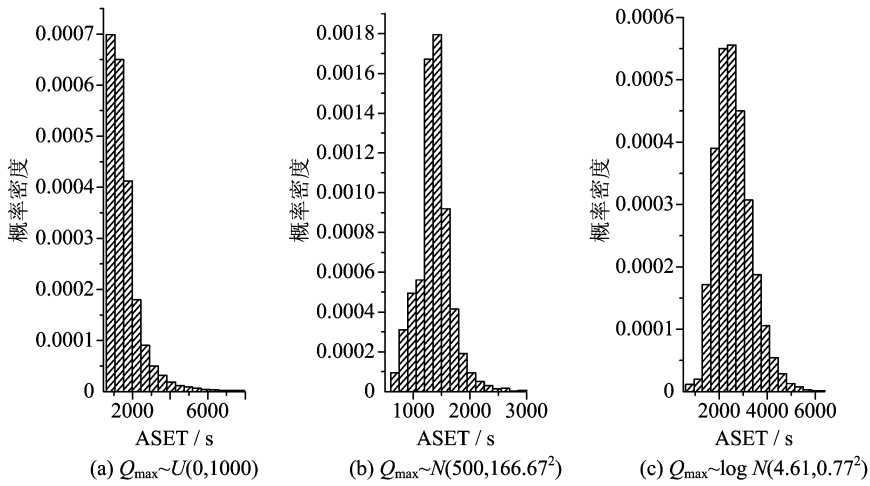


图 3  $Q_{\max}$  服从不同分布时 ASET 的概率密度直方图

Fig. 3 Probability density histogram of ASET considering different distributions of  $Q_{\max}$

2 000 次。

图 3 给出了 ASET 的概率密度直方图。由图 3 可知,  $Q_{\max}$  服从均匀分布时, ASET 的概率密度直方图与服从其他两种分布时有所不同。  $Q_{\max}$  服从正态分布时, ASET 的范围大致在 800~3 000 s 内, 比其他两种分布形式下 ASET 范围小得多。  $Q_{\max}$  服从对数正态分布时, ASET 的最大概率值集中在 3 000 s 附近, 而其他两种分布下 ASET 的最大概率值则集中在 1 500 s 附近。这些特征说明, 当  $Q_{\max}$  在 0~1 MW 取值时, 其分布形式对 ASET 的分布形式影响较大。

在火灾风险分析中, 往往通过比较可用安全疏散时间 ASET 与必需安全疏散时间 RSET 来确定人员安全疏散水平<sup>[1]</sup>; 如果 RSET 小于 ASET, 认为火灾不会造成人员伤亡; 如果 RSET 大于 ASET, 则认为在火灾对人员造成威胁前仍有人员未成功疏散, 这时就有可能发生人员伤亡。考虑到二者的不确定性, ASET 与 RSET 的概率密度分布在其尾部存在干涉, 如图 4 所示。干涉面积的大小即决定了人员伤亡的概率。因此, 对于 ASET 而言, 更需要关注小概率(通常取为 0.05 或 0.1)时的值。图 5 为 ASET 的累积概率密度曲线, 并给出了三种分布下累积概率置信度为 0.05 时的 ASET 值( $Q_{\max}$  服从均匀分布时, 给出其 ASET 最小值所对应的累积概率)。从图 5 可知, 此时 ASET 值有以下关系:  $ASET_{\log \text{ normal}} > ASET_{\text{normal}}$ 。这说明假定  $Q_{\max}$  服从正态分布时得到的 ASET 值要偏保守。此外, 正态分布下累积概率置信度取 0.05 时的 ASET 值与均匀分布下 ASET 的最

小值基本相同, 但此时均匀分布下 ASET 的累积概率置信度为 0.32。这说明与正态分布相比, 假定  $Q_{\max}$  服从均匀分布时得到的 ASET 值要更为保守。

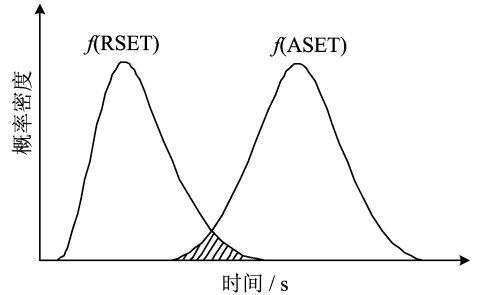
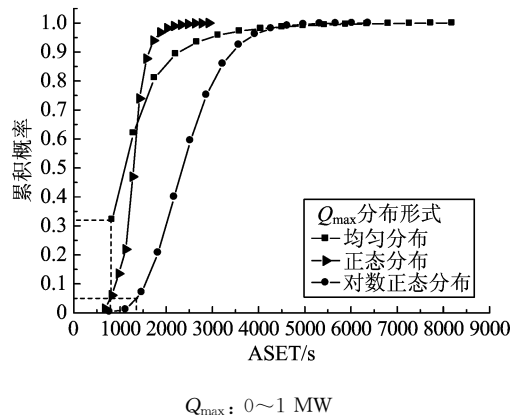


图 4 ASET 与 RSET 的概率密度分布示意图

Fig. 4 Schematic of probability density distribution for ASET and RSET



$Q_{\max}$ : 0~1 MW

图 5  $Q_{\max}$  服从不同分布时 ASET 的累积概率曲线  
Fig. 5 CDF curve of ASET considering different distributions of  $Q_{\max}$

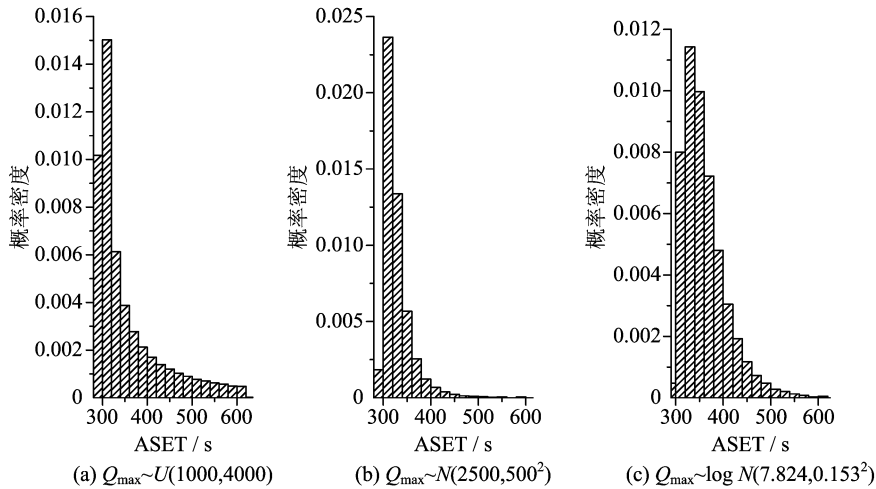


图 6  $Q_{\max}$  服从不同分布时 ASET 的概率密度直方图

Fig. 6 Probability density histogram of ASET considering different distributions of  $Q_{\max}$

### 2.1.2 $Q_{\max}$ 为 1~4 MW 时其不确定性对 ASET 的影响

图 6、图 7 分别为  $Q_{\max}$  在 1~4 MW 取值时, 不同分布形式下 ASET 的概率密度直方图和累积概率曲线. 由图 6 可知, 在以上三种分布中 ASET 的最小值均大于 280 s, 且 ASET 分布较为集中, 大部分位于 [280, 400] s 内. 此外, 三种分布下 ASET 的概率直方图形状基本相同. 这说明  $Q_{\max}$  在 1~4 MW 内, 其分布形式对 ASET 的分布形式影响不大.

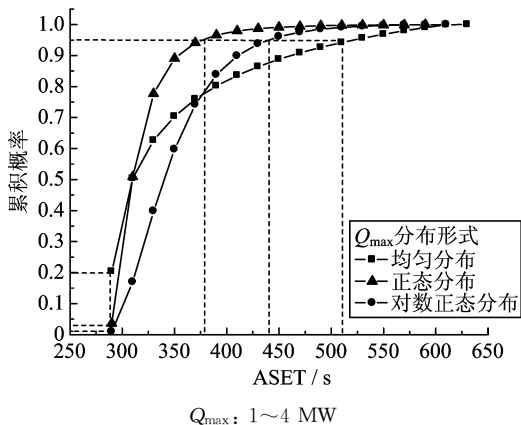


图 7  $Q_{\max}$  服从不同分布时 ASET 的累积概率曲线

Fig. 7 CDF curve of ASET considering different distributions of  $Q_{\max}$

从图 7 可知, 三种分布下 ASET 均在 900 s 内. 由于火灾发生后 600~900 s 对于人员能否逃离至安全区域具有决定作用<sup>[15]</sup>, 故有必要对最可能发生事件和后果最严重事件进行分析. 图 7 给出了累积概率置信度为 95% 时三种分布所对应的 ASET 以及不同分布下 ASET 最小值所对应的累积概率置

信度. 从图中可知, 三种分布下 ASET 的最小值十分接近, 均在 280 s 左右. 但  $Q_{\max}$  为均匀分布时 ASET 最小值所对应的置信度为 20% 左右, 而其他两种分布下的置信度则在 5% 以下. 这说明如果关注 ASET 最小值的发生概率, 则假定  $Q_{\max}$  服从均匀分布得到的结果要偏于保守. 这与  $Q_{\max}$  在 0~1 MW 内的结论一致. 同理, 对于累积概率置信度 95% 时三种分布所对应的 ASET 存在以下关系:  $ASET_{\log normal} > ASET_{uniform} > ASET_{normal}$ . 这说明如果关注 ASET 最可能发生的值, 假定  $Q_{\max}$  服从正态分布得到的结果要偏保守.

### 2.1.3 $Q_{\max}$ 为 4~8 MW 时其不确定性对 ASET 的影响

当  $Q_{\max}$  为 4~8 MW 时, 上述三种分布下得到的 ASET 基本不变, 为 297 s. 这说明  $Q_{\max}$  在 4~8 MW 内, 对于本算例, ASET 不再受  $Q_{\max}$  不确定性的影响, 表现为确定值. 这主要是由于当  $Q_{\max}$  较大时, 在达到  $Q_{\max}$  前  $t^2$  火可能已经达到了 ASET 的临界判据, 这使得 ASET 不再受  $Q_{\max}$  的影响. 另外一个原因可能是, 当  $Q_{\max}$  为 4~8 MW 时, 对于无排烟的场景, 火灾可能产生轰燃或因缺少空气而熄灭, 使得 ASET 不再受  $Q_{\max}$  的影响.

## 2.2 火灾增长系数对 ASET 的影响

在分析  $\alpha$  的不确定性对 ASET 的影响时,  $Q_{\max}$  在其每个范围内取定值. 即 0~1 MW: 0.5 MW, 0.75 MW, 1 MW; 1~4 MW: 1.5 MW, 2 MW, 2.5 MW, 3.5 MW; 4~8 MW: 4.5 MW, 6 MW. ASET 的累积概率曲线如图 8 所示.

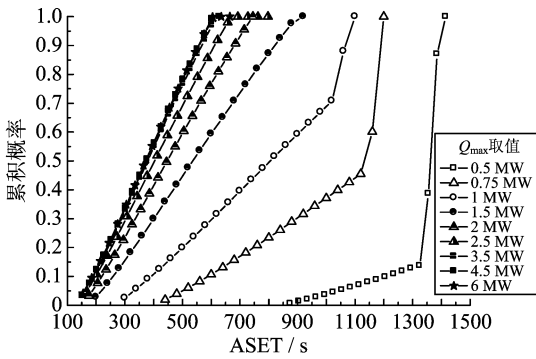


图 8 仅考虑火灾增长系数不确定性时 ASET 的累积概率图

Fig. 8 CDF curve of ASET only considering the uncertainty of fire growth rate

由图 8 可知,当  $Q_{max}$  在 0~1 MW 取不同值时, ASET 累积概率曲线的范围变化较大. 随着  $Q_{max}$  增大, ASET 累积概率曲线左移. 这说明尽管只考虑  $\alpha$  不确定性对 ASET 的影响,但此时  $Q_{max}$  对 ASET 仍具有很大影响. 当  $Q_{max}$  在 1~4 MW 取不同值时, ASET 累积概率曲线在范围和趋势上变化都不明显,可以认为  $Q_{max}$  对 ASET 的影响不明显. 当  $Q_{max}$  在 4~8 MW 取不同值时, ASET 累积概率曲线重合,这时  $Q_{max}$  对 ASET 的影响可以忽略. 此外,当  $Q_{max}$  在 0~1 MW 内取不同值时, ASET 累积概率曲线形状与  $Q_{max}$  在 1~4 MW 和 4~8 MW 内取值时有较大不同,这也说明  $Q_{max}$  在 0~1 MW 内对 ASET 影响较大.

2.3 两者均为不确定参数时对 ASET 的影响

本节中将同时考虑  $Q_{max}$  和  $\alpha$  的不确定性对 ASET 的影响. 与 2.1 类似,分别考虑  $Q_{max}$  在 0~1 MW, 1~4 MW 和 4~8 MW 三个范围内两参数不确定性对 ASET 的影响.

2.3.1  $Q_{max}$  为 0~1 MW 时,热释放速率不确定性对 ASET 的影响

图 9 为  $Q_{max}$  在 0~1 MW 内取值,考虑两参数不确定性时 ASET 的累积概率曲线. 对比图 9 与图 5 可知,当  $Q_{max}$  取值为 0~1 MW,考虑两参数不确定性时 ASET 的累积概率曲线与仅考虑  $Q_{max}$  不确定性时 ASET 的累积概率曲线基本相同. 这说明此时  $\alpha$  对 ASET 的影响被  $Q_{max}$  对 ASET 的影响所掩盖. 因此可以认为  $Q_{max}$  在 0~1 MW 时,其对 ASET 的影响大于  $\alpha$  对 ASET 的影响.

2.3.2  $Q_{max}$  为 1~4 MW 时两参数不确定性对 ASET 的影响

图 10 为  $Q_{max}$  在 1~4 MW 内取值时考虑两参

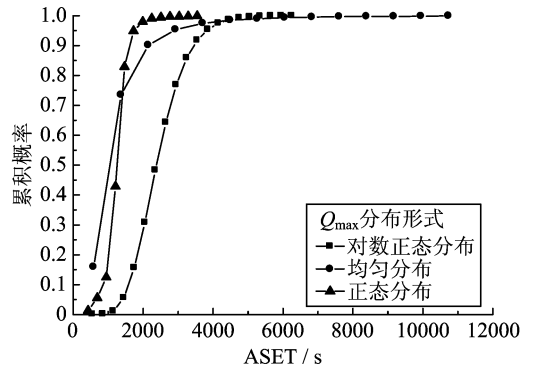


图 9 同时考虑两参数不确定性时 ASET 的累积概率图  
Fig. 9 CDF curve of ASET considering two uncertain variables of heat release rate

数不确定性时 ASET 的累积概率曲线. 由图 10 可知,考虑两参数不确定性时,三种分布形式下 ASET 的累积概率曲线基本一致. 这说明  $Q_{max}$  在 1~4 MW 时,其分布形式对 ASET 的影响不明显,热释放速率不确定性对 ASET 的影响主要体现在  $\alpha$  上.

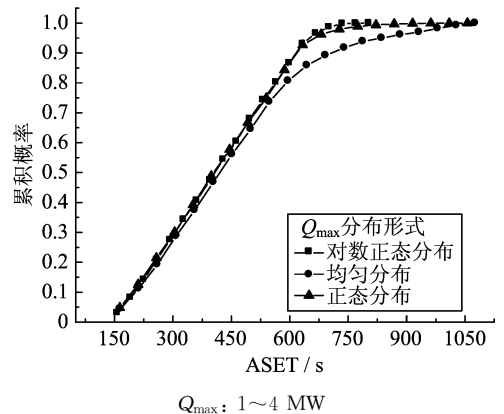


图 10 同时考虑两参数不确定性时 ASET 的累积概率图  
Fig. 10 CDF curve of ASET considering two uncertain variables of heat release rate

2.3.3  $Q_{max}$  为 4~8 MW 时两参数不确定性对 ASET 的影响

由 2.1 知,仅考虑  $Q_{max}$  不确定性,其在 4~8 MW 取值时,  $Q_{max}$  的分布形式对 ASET 无影响,此时 ASET 为一确定值. 因此,在此处仅选择  $Q_{max}$  服从正态分布、 $\alpha$  服从对数正态分布时对 ASET 的影响进行分析. 结果如图 11 所示.

图 11 中 ASET 的累积概率曲线与图 8 中  $Q_{max}$  在 4~8 MW 取值时的 ASET 累积概率曲线在范围和趋势上基本相同. 这说明在  $Q_{max}$  取 4~8 MW 时,  $Q_{max}$  对 ASET 基本无影响,这时热释放速率不确定