

基于 CFD 分析的预作用灭火系统可用充水时间研究

智会强, 牛坤, 白殿涛, 王健强, 王海娟
(公安部天津消防研究所, 天津, 300381)

摘要: 从 CFD (计算流体动力学) 数值分析的角度, 研究了预作用自动喷水灭火系统和预作用泡沫—水喷淋系统的可用充水时间; 首先分析了国内外相关规范对预作用系统充水时间的要求, 然后针对不同顶棚高度、火源位置、火灾模式及喷头公称动作温度, 共设置了 41 个火灾场景, 采用 CFD 软件, 对闭式喷头和火灾探测系统的动作时间进行了分析, 得到了系统的可用充水时间; 分析结果表明对于 A 类火灾场所, 当火源位于喷头下方附近时, 容易出现喷头开启而管道未充满水的情况; 对于 B 类火灾的场所, 泡沫—水喷淋系统的喷头动作温度不低于 121℃, 充水时间不大于 1min 的情况下, 基本可以保证喷头开启前, 系统管道充满泡沫混合液。

关键词: 预作用系统 充水时间 数值分析

0 引言

预作用灭火系统可分为单联锁系统、双联锁系统和无联锁系统。目前, 我国应用的大部分是单联锁系统。因此, 本文主要针对单联锁预作用系统展开讨论。单联锁预作用系统将火灾自动探测报警系统和自动喷水灭火系统(或泡沫—水喷淋系统)结合在一起, 平时管道内充气, 与干式系统相同, 发生火灾时, 由火灾探测器和火灾报警控制器打开预作用阀, 在闭式喷头尚未开启时, 向系统内充水, 使系统转为湿式系统。与干式系统相比, 预作用系统在喷头动作之前管网里就充满了水, 使得喷头开启后就能喷水, 因此提高了灭火效率^[1~3]。

从预作用系统的工作原理可知, 管道充水是从火灾探测装置动作联动启动预作用阀开始的, 所以, 该系统能够及时转换为湿式系统的关键因素之一就是火灾报警系统比喷头提早多长时间启动, 只有在这段时间内完成管道充水才能保证在喷头动作时有水可喷, 本文将火灾报警系统动作至灭火喷头启动这段时间称为预作用系统的可用充水时间。

目前, 相关规范对预作用系统充水时间的规定是不同的, 为了更广泛研究规

范规定的差异性和合理性，为系统设计提供参考，本文将从数值分析的角度，采用 CFD 软件，研究不同顶棚高度、火源位置、喷头类型、火灾模式下的火灾探测报警系统动作时间和喷头动作时间，得到预作用系统的可用充水时间，并结合相关规定，对该充水时间进行分析。

1 预作用系统充水时间分析

目前，预作用灭火系统主要有自动喷水灭火系统和泡沫—水喷淋灭火系统，前者主要用于 A 类火灾场所，后者主要用于 B 类火灾场所。由于应用场所不同，相关规范对该类系统充水时间的规定有所不同^[1]。

国家标准《自动喷水灭火系统设计规范》GB50084-2001（2005 年版）第 8.0.9 条规定：预作用系统与雨淋系统的配水管道充水时间不宜大于 2min^[1]。国家标准《泡沫灭火系统设计规范》GB50151-2010 第 7.3.10 条规定：泡沫—水预作用系统与泡沫—水干式系统的管道充水时间不宜大于 1min^[2]。NFPA13《水喷淋系统安装标准》（2007 年版）规定：一个预作用阀控制的系统容积应不超过 2839L，当配水管道充水时间不超过 60 s 时，可允许其容积超过 2839L^[4]。

规定管道的充水时间，一是为了保证系统能够及时喷水灭火，二是为了限制系统不至于过大，以提高系统的可靠性。由以上规定可以看到，自动喷水预作用系统和泡沫—水预作用系统的管道充水时间是不同的，前者主要用于 A 类火灾场所，火灾发展相对较慢，所以规定可以有较长的充水时间，而后者主要用于初起火灾为 B 类火灾的场所，该类场所火灾发展迅速，要求系统能够快速喷洒泡沫灭火。从另一个角度来说，火灾发展越快，闭式喷头开放的越早，火灾探测系统动作至喷头之间的时间较短，即可用充水时间较短。

2 可用充水时间的数值分析

2.1 模拟软件

分析软件采用 FDS，该软件由美国国家标准与技术研究院（NIST）建筑火灾研究室开发，是目前应用最为广泛的火灾数值分析软件。该软件可以模拟火灾状态下喷头的启动及对火灾的抑制过程、探测系统在火灾状态下的动作过程，同时，火灾探测系统可以和喷头进行联动。该软件模拟结果的准确性已经得到了众多试验的验证^[5-6]。

2.2 火灾场景设置

2.2.1 模拟基本参数

为使模拟结果具有普遍性，模拟区域长 40m，宽 25m，高度考虑 3m、5m、7m、9m 四种情况，喷头和探测器均按现行规范要求设置，喷头采用普通喷头，模拟区域内设有 104 只喷头，喷头间距 3m，探测器采用最常用的感烟探测器，模拟区域内设有 9 只探测器，探测器间距 10m。模拟采用非均匀网格，火源附近网格尺寸 0.05m×0.05m×0.05m，其他区域 0.1m×0.1m×0.1m。湍流模型采用大涡模拟模型，室内初始温度为 24℃，无风。

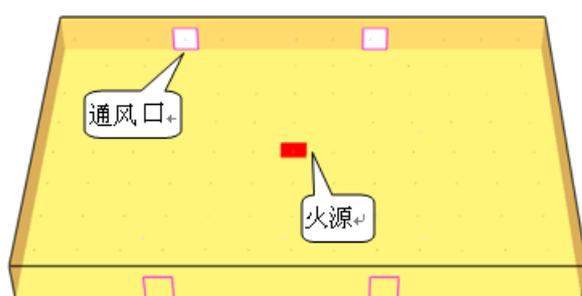


图 1 FDS 模型

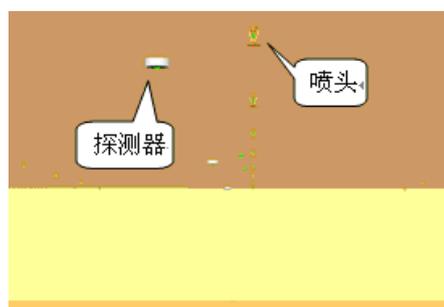


图 2 模型局部放大图

2.2.2 火灾热释放速率的确定

工程分析时，火灾发展一般考虑为 t^2 火，即火灾热释放速率与火灾发展时间一般用式 (1) 表示：

$$Q_f = \alpha t^2 \quad (1)$$

式中： Q_f —火源热释放速率，kW；

α —火灾增长速率，kW/s²；

t —火灾的燃烧时间，s；

对于 t^2 火灾的类型，国际标准 ISO/TS16733（消防安全工程第 4 部分：设定火灾场景和设定火灾的选择），按火灾的发展时间与其规模的关系划分为慢速火、中速火、快速火和超快速火，它们分别在 600s、300s、150s、75s 时刻可达到 1MW 的火灾规模，图 3 显示了它们的火灾发展曲线，表 1 列出了各火灾模式的火灾增长系数及有代表性的可燃物质。

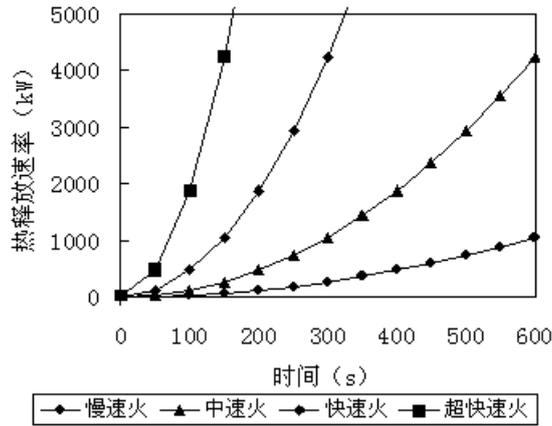


图 3 t^2 火灾发展特性曲线

表 1 t^2 火灾分类

火灾类别	典型的可燃材料	火灾增长系数(kW/s ²)	热释放速率达到 1MW 的时间(s)
慢速火	铺地材料	0.00293	600
中速火	办公设备、商店柜台	0.01172	300
快速火	被褥、沙发、展台或装有衬垫的工作台隔断	0.04689	150
超快速火	池火、非阻燃塑料泡沫、轻质窗帘	0.1875	75

本文主要对预作用自动喷水灭火系统和预作用泡沫—水喷淋系统进行研究。预作用自动喷水灭火系统主要用于扑救建筑室内的 A 类火灾，泡沫—水喷淋系统主要用于扑救 B 类火灾。参考表 1，一般建筑室内的 A 类火灾增长速率不会超过快速火，因此，将 A 类火灾设为快速火，而 B 类火灾则考虑为超快速火。

2.2.3 火源位置及顶棚高度的确定

为模拟火灾发生在不同位置时的系统可用充水时间，考虑两个火源位置，其中火源位置 A 位于喷头正下方，此时，喷头启动最快，火源位置 B 位于两个喷头对角线中间，此时，火源距喷头最远，启动最慢。顶棚高度考虑 3m、5m、7m、9m 四种情况，因为相关规范规定闭式系统一般用于净空高度低于 9m 的场所，因此，最大顶棚高度考虑为 9m。

2.2.4 喷头动作温度的确定

对于自动喷水灭火系统来说，喷头动作温度一般选择 68℃，因此，对于该系统的分析，选用 68℃的喷头。对于泡沫—水喷淋系统，国家标准《泡沫灭火系统设计规范》GB50151 第 7.3.7 条规定：当喷头设置在顶棚时，其公称动作温度应为 121℃~149℃。该要求参考了 NFPA16《泡沫-水喷雾与泡沫-水喷淋系统安装标准》^[7]。泡沫-水喷淋系统喷头选择动作温度较高，主要是考虑到该系统

主要保护 B 类火灾场所，B 类火灾发展快、热值高，若喷头动作温度过低，容易导致喷头开放数目过多，喷洒面积可能会超过系统的作用面积。分析泡沫—水喷淋系统时，喷头公称动作温度根据国家标准 GB5135.1《自动喷水灭火系统 第 1 部分：洒水喷头》，选用 68℃、79℃、93℃、107℃、121℃、141℃进行分析^[8]，以从数值分析的角度研究规范对喷头温标规定的合理性及预作用系统管道充水时间的合理性。

2.2.5 火灾场景汇总

综上，考虑不同火源位置、顶棚高度、火灾类型及喷头动作温度的情况下，共设置了 10 组共 41 个火灾场景，具体见表 2。

表 2 火灾场景汇总表

序号	火源位置	火灾增长类型	顶棚高度 (m)	喷头动作温度 (°C)	备注
1	A	快速火	3/5/7/9	68	不同顶棚高度
2	B	快速火	3/5/7/9	68	不同顶棚高度
3	A	超快速火	3/5/7/9	68	不同顶棚高度
4	A	超快速火	3/5/7/9	79	不同顶棚高度
5	A	超快速火	3/5/7/9	93	不同顶棚高度
6	A	超快速火	3/5/7/9	107	不同顶棚高度
7	A	超快速火	3/5/7/9	121	不同顶棚高度
8	A	超快速火	3/5/7/9	141	不同顶棚高度
9	B	超快速火	3/5/7/9	121	不同顶棚高度
10	B	超快速火	3	68/79/93/107/121/141	不同动作温度

2.3 模拟结果分析

各火灾场景的探测器动作时间、喷头动作时间和可用充水时间的具体模拟值见表 2，相应的模拟曲线见图 4~图 8，从曲线可以看到，系统的可用充水时间和顶棚高度及喷头动作温度呈近似线性关系，随着顶棚高度和喷头动作温度的增加，可用充水时间相应增长。

对于 A 类火灾，选择 68℃喷头情况下，可用充水时间随建筑顶棚高度的变化见图 4，可以看到，对于火源位置 A，可用充水时间最低为 61.4s，最高位 104.9s，均低于 2min，对于火源位置 B 可用充水时间最低为 128.6s，大于 2min，因此，对于预作用自动喷水灭火系统，当火源位于喷头正下方附近时，喷头开启时，管道内可能还没有充满水，容易出现喷头开启而无水可喷的情况。

对于 B 类火灾, 不同公称动作温度和不同顶棚高度下的系统可用充水时间变化曲线见图 5~图 8。对于火源位置 A, 68℃的喷头在各个顶棚高度下, 可用充水时间均小于 1min, 79℃的喷头在顶棚高度低于 9m 时, 可用充水时间均小于 1min, 93℃的喷头在顶棚高度低于 7m 时, 可用充水时间均小于 1min, 对于 121℃和 141℃的喷头, 顶棚高度为 3m 时, 可用充水时间分别为 52.5s 和 56.4s, 距 60s 相差时间很短, 可以认为能满足要求, 对于其他顶棚高度, 可用充水时间均大于 1min, 但小于 2min (见图 5~图 6)。对于火源位置 B, 选用 121℃的喷头时, 对于不同的顶棚高度, 可用充水时间均大于 1min (见图 7), 对于顶棚高度为 3m 时, 对于不同公称动作温度的喷头, 可用充水时间均大于 1min, 但小于 2min (见图 8)。从模拟结果来看, 预作用泡沫-水喷淋系统的可用充水时间远低于预作用水喷淋系统。因此, 对于泡沫—水喷淋系统, 宜选择公称动作温度较高的喷头, 且系统的充水时间应较短, 从模拟结果来看, 当喷头公称动作温度不低于 121℃时, 基本可保证可用充水时间大于 1min。

表 2 数值模拟结果汇总

序号	火源位置	顶棚高度 (m)	喷头动作温度 (°C)	探测器动作时间 (s)				喷头动作时间 (s)				可用充水时间 (s)			
				顶棚高度 (m)				顶棚高度 (m)				顶棚高度 (m)			
				3	5	7	9	3	5	7	9	3	5	7	9
1	A	3/5/7/9	68	22.6	27.6	26.8	30.7	84.0	99.0	114.6	135.6	61.4	71.4	87.8	104.9
2	B	3/5/7/9	68	26.8	26.2	28.8	30.4	155.4	162.6	176.2	187.2	128.6	136.4	147.4	156.8
3	A	3/5/7/9	68	17.7	20.5	21.6	23.7	53.4	63.3	71.1	83.1	35.7	42.8	49.5	59.4
4	A	3/5/7/9	79	17.7	19.8	21.6	23.7	57.3	68.4	79.2	91.8	39.6	48.6	57.6	68.1
5	A	3/5/7/9	93	17.7	19.8	21.6	23.7	61.2	72.0	84.9	94.8	43.5	52.2	63.3	71.1
6	A	3/5/7/9	107	17.7	19.8	21.6	23.7	65.1	76.2	90.9	100.8	47.4	56.4	69.3	77.1
7	A	3/5/7/9	121	17.7	19.8	21.6	23.7	70.2	86.4	105.6	124.3	52.5	66.6	84.0	100.5
8	A	3/5/7/9	141	17.7	19.8	21.6	23.7	74.1	89.1	118.5	134.0	56.4	71.3	91.2	110.3
9	B	3/5/7/9	121	18.9	19.8	22.5	23.7	129.6	136.5	155.4	192.0	110.7	116.7	132.9	168.3
10	B	3	68	18.9				93.9				75			
			79	18.9				101.7				82.8			
			93	18.9				112.8				93.9			
			107	18.9				122.7				103.8			
			121	18.9				129.6				110.7			
			141	18.9				138.6				119.7			

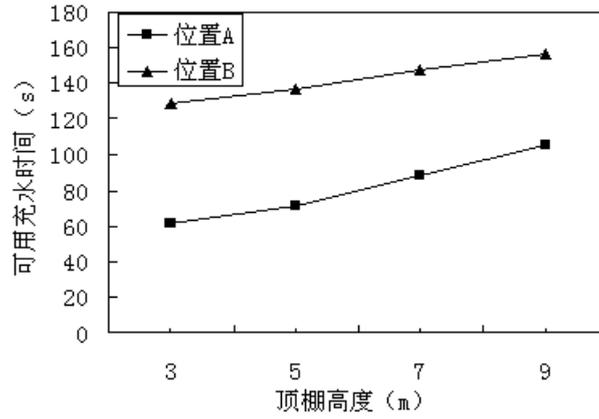


图4 A类火灾情况下可用充水时间

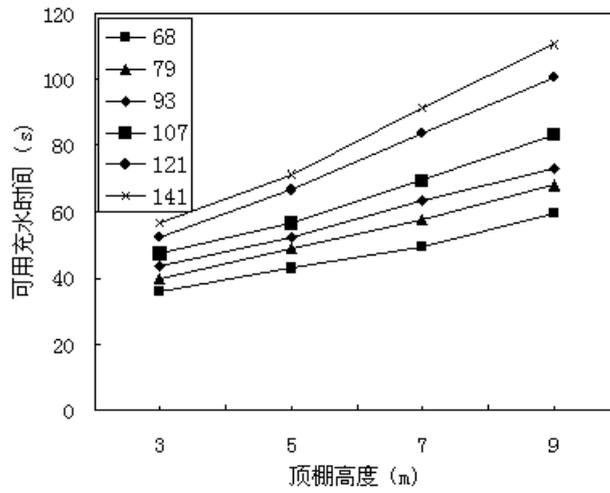


图5 B类火灾情况下可用充水时间 (位置A)

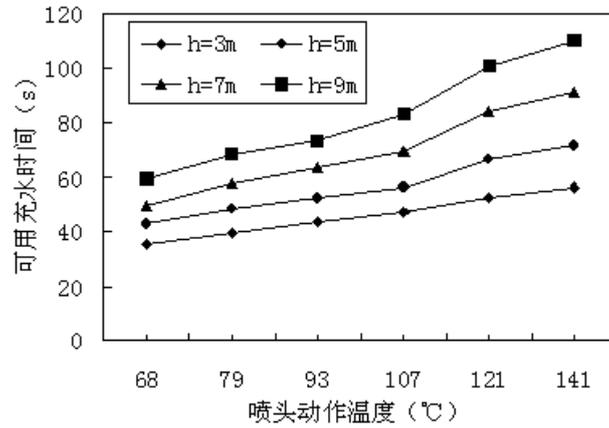


图6 B类火灾情况下可用充水时间 (位置A)

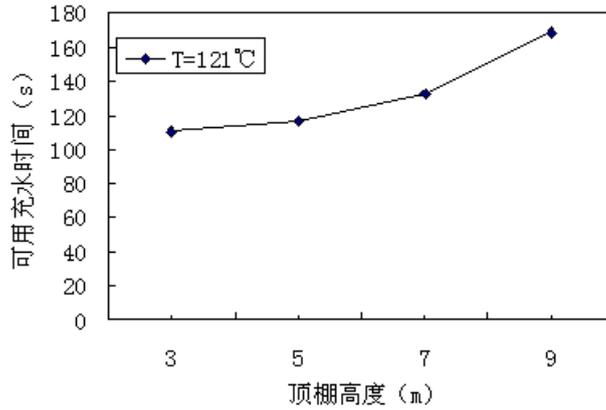


图 7 B 类火灾情况下可用充水时间（火源位置 B）

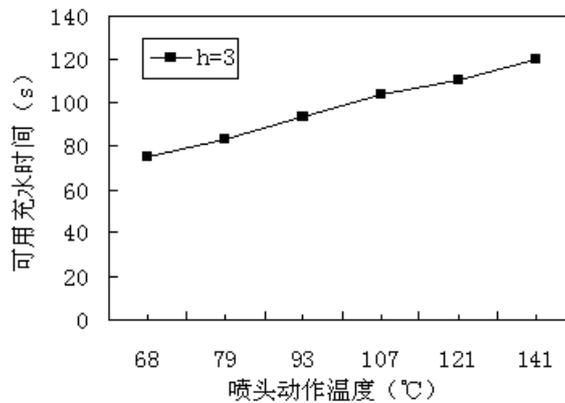


图 8 B 类火灾情况下可用充水时间（火源位置 B）

3 结论

1) 系统可用充水时间和顶棚高度及喷头公称动作温度呈近似线性变化关系，随着顶棚高度和喷头动作温度的增加，可用充水时间相应增长。

2) 对于 A 类火灾场所，当火灾位于喷头正下方附近时，系统的可用充水时间将小于 2min，此时，容易出现闭式喷头开启而管道未充满水的情况。因此，对于预作用自动喷水灭火系统设计，建议根据具体情况，适当缩短管道的充水时间。

3) 对于 B 类火灾的场所，泡沫—水喷淋系统的喷头公称动作温度不低于 121℃，充水时间不大于 1min 的情况下，基本可以保证闭式喷头开启前，系统转化为湿式系统。

参考文献

- 1 中国人名共和国公安部. GB 50086—2001 自动喷水灭火系统设计规范（2005年版）.北京：

- 中国计划出版社，2005
- 2 中国人名共和国公安部. GB 50151—2010 泡沫灭火系统设计规范. 北京：中国计划出版社，2010
 - 3 张立成,王宝令,张晓明等.预作用自动喷水灭火系统的设计.沈阳建筑工程学院学报, 2003,19（4），323~325
 - 4 NPFA.NFPA13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems,2007 edition
 - 5 Randall McDermott, Kevin McGrattan, Simo Hostikka. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 2: Verification. 2009
 - 6 Randall McDermott, Kevin McGrattan, Simo Hostikka. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 3: validation.2009.
 - 7 NPFA.NFPA16 Standard for the Installation of Foam-Water Sprinkler and Foam-Water Spray Systems 2012 edition
 - 8 中国人名共和国公安部. GB5135.1-2003《自动喷水灭火系统 第1 部分：洒水喷头》.北京：中国标准出版社，2003.

——本文发表于2013年第3期《给水排水》