

火灾中闭式喷头响应特性研究

张村峰, 霍然, 李元洲

(中国科技大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

[摘要] 探讨了火灾时闭式喷头的响应时间和启动闭式喷头的临界火源功率, 通过分析计算, 给出了喷头启动时间与各种影响因素的拟合公式。结果表明: 响应时间与安装高度、环境温度呈近似线性关系; 火灾增长方式对响应时间的增长快慢产生影响; 喷头的响应时间常数与响应时间则成指数关系。随着高度增加, 喷头启动的临界火源功率不断增大, 当喷头安装高度较高时, 为早期有效的控制火灾, 必须采用快速响应喷头。

[关键词] 喷头; 临界热释放速率; 响应时间

[中图分类号] TU998.13 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)11-0055-05

1 引言

自动喷水灭火系统作为一种有效的火灾控制方式, 在许多公共建筑如宾馆、超市、机场候机厅等地方得到广泛的应用。在火灾发生时, 这些建筑内的自动喷水灭火系统起到了探测火灾和控制火灾的重要作用。

安装在管路上的闭式喷头是自动喷水灭火系统的主要部件。火灾中喷头的响应特性决定了自动喷水灭火系统的性能。A. K. Gupta, W. K. Chow 和 Kevin B. McGrattan 等人曾对火灾中喷头的响应特性进行了研究, 并建立了喷头响应方程^[1-3]。

火灾时闭式喷头的响应时间和启动闭式喷头的临界火源功率是影响喷头响应特性的 2 个重要方面。研究表明, 喷头响应时间的长短, 不仅与发生火灾时的热释放速率有关, 还受到喷头安装高度和喷头的响应时间常数等其它因素的影响。而启动闭式喷头的临界火源功率则确定了火灾中喷头启动的可能性, 它是由喷头的安装高度确定的。研究启动闭式喷头的临界火源功率对喷头选择、确定喷头的合理安装高度有重要的意义。

作者利用 DETACT-T2 进行数值计算, 探讨

了喷头响应时间与安装高度、喷头响应时间常数、火灾增长方式、环境温度等的关系, 并分析了启动闭式喷头的临界火源功率随喷头安装高度变化的关系, 从而对喷头的合理安装给出建议。

2 喷头响应方程

火灾发生时, 火源上方的热烟气在浮力驱动下形成上升的热烟气羽流。羽流到达建筑顶部后, 受到建筑顶棚的限制, 烟气在顶棚下聚集, 将喷头淹没。喷头与其周围的热烟气之间通过对流换热, 促使其内的敏感元件温度上升。当敏感元件温度等于闭式喷头的公称动作温度时, 敏感元件熔化, 喷头开始喷水。因此, 喷头可以看作是一个温度探测器, 其敏感元件和周围热烟气的传热过程可由式(1)描述^[1,2]:

$$\frac{d(\Delta\theta_L)}{dt} = \tau^{-1}(\Delta\theta_s - \Delta\theta_L) \quad (1)$$

式中, $\Delta\theta_L$ 与 $\Delta\theta_s$ 分别是喷头敏感元件温度和喷头附近热烟气温度与环境温度之差; 时间常数 $\tau = R_c/U_s^{1/2}$, 反应了敏感元件吸收的热量与通过对流传递给敏感元件的热量的相对大小; R_c 是喷头的响应时间常数, 其大小由喷头的材料决定; U_s 是

[收稿日期] 2004-09-13; **修回日期** 2004-11-19

[基金项目] 国家重点基础研究发展规划专项经费资助项目(2001CB409604)。

[作者简介] 张村峰(1978-), 男, 福建龙岩人, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室博士研究生

喷头附近热烟气的流动速度。

通过求解式(1),可以得到喷头温度随时间的变化规律。由于当敏感元件温度等于公称动作温度时敏感元件将熔化,喷头敏感元件的温度到达喷头的公称动作温度的时间即是喷头的响应时间。

3 喷头响应时间

喷头响应时间是使用自动喷水灭火系统必须考虑的一个重要问题。喷头响应时间的长短,直接影响火灾扑救的难度,喷头响应时间越长,喷头启动时火灾的热释放速率越大,火灾扑救难度越大。

3.1 稳定火源时喷头响应时间

对于稳定火源,对式(1)积分,可得到稳定火源时喷头的响应时间 $t_a^{[4]}$:

$$t_a = \frac{R_c}{\sqrt{U_s}} \ln \left(\frac{\theta_s - \theta_\infty}{\theta_s - \theta_a} \right) \quad (2)$$

喷头附近热烟气层温度 θ_s 由式(3)表示^[1,4]:

$$\theta_s - \theta_\infty = 16.9 \frac{\dot{Q}^{2/3}}{H^{5/3}}, \quad r/H \leq 0.18 \quad (3a)$$

$$\theta_s - \theta_\infty = \frac{5.38}{H} (\dot{Q}/r)^{2/3}, \quad r/H > 0.18 \quad (3b)$$

而 U_s 则由式(4)表示^[1,4]:

$$U_s = 0.095 2 (\dot{Q}/H)^{1/3}, \quad r/H \leq 0.15 \quad (4a)$$

$$U_s = 0.196 \frac{\dot{Q}^{1/3} H^{1/2}}{r^{5/6}}, \quad r/H > 0.15 \quad (4b)$$

其中 H 为喷头安装高度(m); r 是喷头与火源中心的水平距离; \dot{Q} 是火源的热释放速率(kW); θ_s 是顶棚下方热烟气温度; θ_∞ 是环境温度。

3.2 t^2 火源时喷头响应时间

式(2)给出了启动喷头所需的最短时间。但在实际的火灾中,初期的热释放速率并不稳定,而是按指数规律增长,喷头启动时间将要比稳定火源时长。因此,喷头响应时间不仅与喷头安装高度、喷头响应时间常数、喷头与火源位置的水平距离、环境温度等因素有关,还受到火灾增长方式的影响。

一般而言,火灾初期的热释放速率可用下式表示^[5,6]:

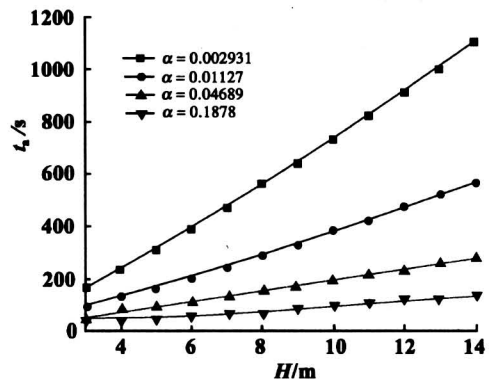
$$\dot{Q} = \alpha t^2 \quad (5)$$

根据 α 值的不同,火灾被分为慢速、中速、快速和超快速4种类型。它们分别对应的 α 值为0.002 931,0.011 27,0.046 89和0.187 8。DETECT -

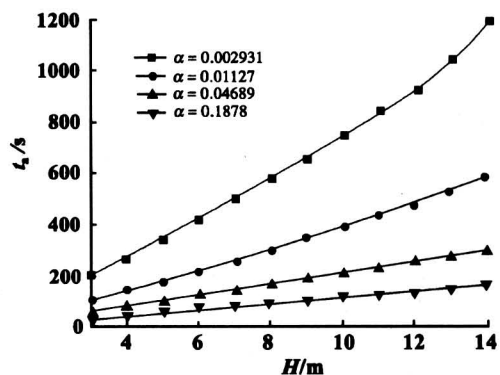
T2采用区域模拟方法,对 t^2 火源条件下热烟气的流动状况进行分析,并通过式(1)计算热烟气与喷头的换热过程,对火灾时喷头的动作特性给出了较好的估计。

作者采用DETECT-T2计算了 t^2 火源条件下对于 $\theta_a = 68^\circ\text{C}$ 喷头,当布置在火源正上方时,其响应时间随顶棚高度的变化。计算时喷头的 R_c 从25变化到100,环境温度从 0°C 变化到 40°C 。

3.2.1 安装高度、火灾增长系数与喷头的响应时间
喷头安装时顶棚的高度是影响喷头响应时间的主要参数。图1是 R_c 为25和75时喷头响应时间随高度变化曲线。计算时环境温度为 20°C 。从图中可看出,响应时间与安装高度接近线性关系,安装高度越高,响应时间越长。



(a) $R_c = 25$



(b) $R_c = 75$

图1 不同火灾增长系数时喷头的响应时间曲线

Fig.1 Sprinkler response time vs. installing height under different fire growth rate

从图1还可看出,火灾增长系数越大,响应时间越短。将图1中的每条曲线采用最小二乘法进行线性拟合,将得到的曲线斜率 k 与火灾增长系数 α ,一并列在表1中。从表1可看出,火灾增长系数 α 与

喷头响应时间曲线斜率成负相关, α 越小, 斜率 k 越大。另外, 从表中还可看出, 尽管 R_c 不同, 在同样的火灾增长速率时, 响应时间曲线的斜率是接近的。

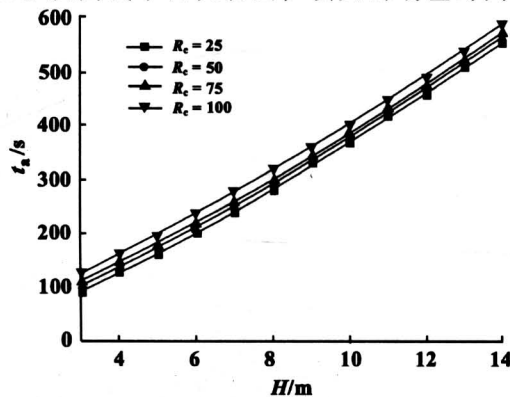
表 1 不同高度喷头的响应时间曲线斜率 k 与火灾增长系数 α 的关系

Table 1 Relationship between sprinkler response time curve slop and fire growth rate

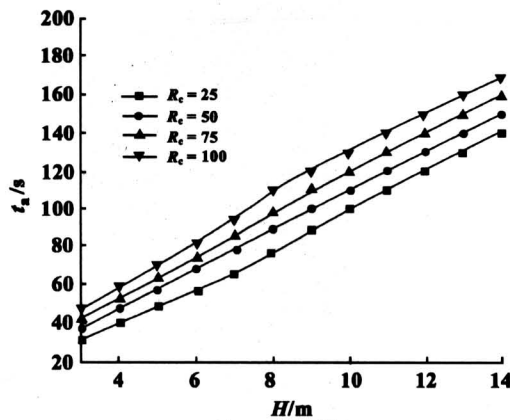
α	0.002 931	0.011 27	0.046 89	0.187 8
k_{25}^*	84.895	43.469	21.126	10.017
k_{75}^*	82.273	42.762	21.084	11.073

* k_{25} 为 $R_c=25$ 时的 k , k_{75} 为 $R_c=75$ 时的 k

3.2.2 R_c 安装高度与喷头响应时间 R_c 反应了喷头内敏感元件的热敏感性能。 R_c 越小, 喷头的热敏感能力越强, 喷头升温越快。图 2 给出了 α 为 0.011 27 和 0.187 8 时, 喷头响应时间随安装高度变化曲线。与前面相同, 计算时, 环境温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 。从曲线中再次看出, 喷头的响应时间与安



(a) $\alpha = 0.01127$



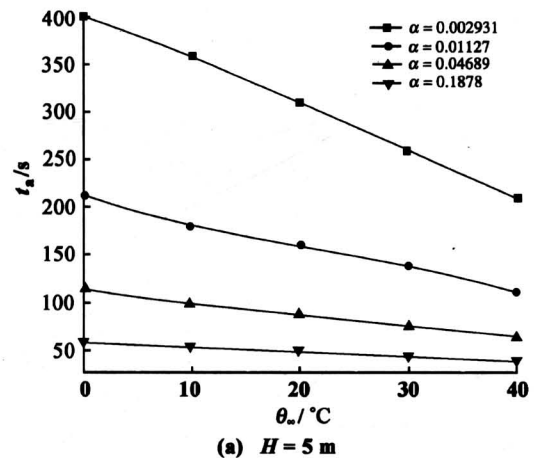
(b) $\alpha = 0.1878$

图 2 不同 RTI 时喷头的响应时间曲线

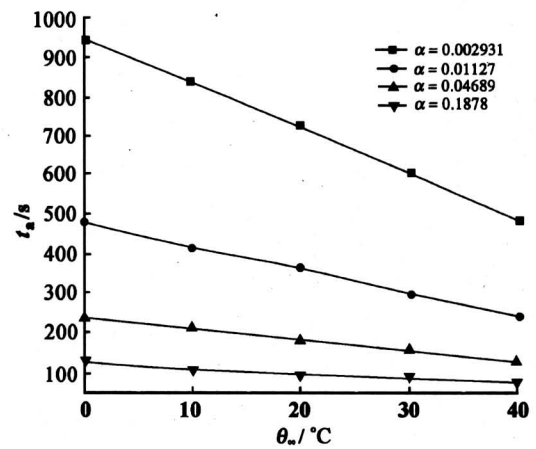
Fig.2 Sprinkler response time vs. installing height under different R_c

装高度成线性关系。从图中还可看出, 喷头响应时间随 R_c 增大而增大, 而对不同的 R_c , 曲线几乎是平行的。

3.2.3 环境温度与喷头响应时间 环境温度对喷头的响应时间也有一定的影响。环境温度越高, 从热烟气中传递到环境中的热量越少, 喷头与热烟气之间的传热越快。图 3 给出了 H 为 5 m 和 10 m 时, 对 R_c 为 25 的喷头, 其喷头响应时间随环境温度的变化曲线。从曲线中可看出, 喷头的响应时间与环境温度接近线性关系。



(a) $H = 5 \text{ m}$



(b) $H = 10 \text{ m}$

图 3 不同环境温度时喷头的响应时间曲线

Fig.3 Sprinkler response time under different ambient temperature

将上述分析中的数据采用最小二乘法进行拟合, 可得到喷头在火源正上方时, 其响应时间 t_a 与火灾增长系数 α 、喷头安装高度 H 、环境温度 T_{∞} 以及喷头响应时间常数 R_c 的关系式:

$$t_a = 4.6\alpha^{-0.498}H + 1.7R_c^{0.72}$$

$$- 0.1675\alpha^{-0.511}\theta_{\infty}^{1.1} - 25 \quad (5)$$

式 (5) 给出了在 t^2 火源时计算响应时间的一种简易方法, 计算结果用 s 为单位。从式 (5) 可看出, 响应时间与 H 和 θ_{∞} 呈近似线性关系。 H 越大, 响应时间越长; 环境温度 θ_{∞} 越高, 响应时间越短。而火灾增长方式则对响应时间的增长快慢产生影响。喷头的响应时间常数与响应时间则成指数关系, 由于指数项前的系数较大, 响应时间常数的影响也是不可忽略的。

3.3 喷头离火源中心的水平距离 r 对喷头响应时间的影响

喷头响应时间还受到喷头在顶棚的布置方式影响。喷头布置间距越大, 火灾时喷头离火源中心的距离可能越大。而随着离火源中心水平距离 r 的加大, 喷头周围热烟气的温度和速度将逐渐变小, 从而使喷头的响应时间变长。从式 (3), 式 (4) 知道, 喷头周围热烟气的温度和速度不仅仅是 r 的函数, 还与 H 有关。图 4 给出了 r 为 3 m, 6 m 时的喷头响应时间与喷头在火源正上方时的喷头响应时间之差 $\Delta t_{r,0}$ 随高度变化情况。从图中可看出, r 越大, 喷头响应时间越长, 当 r 为 6 m 时, 最大时间差可达到 550 s。

4 启动喷头的临界火源功率

闭式喷头是通过与其周围的热烟气进行对流换热而升温的。热烟气的温度由火灾的火源功率决定, 只有当火灾发展到一定的火源功率, 当热烟气的温度达到并超过喷头的公称动作温度时, 喷头才有可能启动。

4.1 稳定火源时启动喷头的临界火源功率

在式 (3a), 用喷头启动温度 θ_a 取代 θ_s 可估算出稳定火源时启动火源正上方的水喷淋喷头的临界火源功率 \dot{Q}_c [4]:

$$\dot{Q}_c = 0.0144(\theta_a - \theta_{\infty})^{3/2} \times H^{5/2} \quad (6)$$

式 (6) 给出了启动喷头的最小火源功率。对于可燃物较少的建筑, 火灾时的火源功率小于 \dot{Q}_c , 喷头将无法启动。

图 5 给出了对于 $\theta_a = 68 \text{ }^\circ\text{C}$ 的标准喷头, 根据式 (6) 计算得到的不同环境温度时启动喷头的临界火源功率随高度的变化曲线。从图中可看出, 随着高度的增加, \dot{Q}_c 不断增大。当高度超过 10 m 时, \dot{Q}_c 超过了 1 MW。环境温度对 \dot{Q}_c 也有很大影响, 环境温度越低, \dot{Q}_c 越大。 $\theta_{\infty} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的约

是 $\theta_{\infty} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的 2 倍。

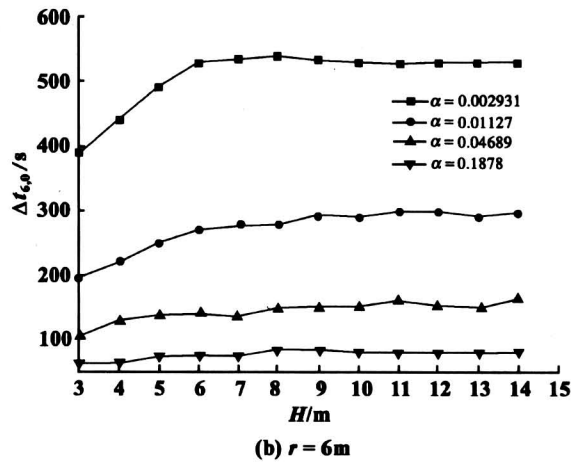
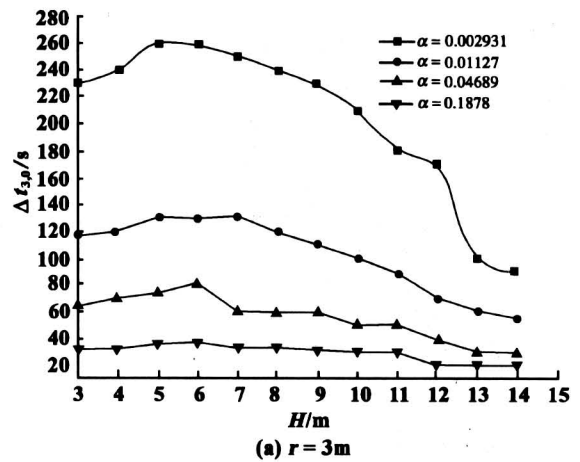


图 4 喷头离火源中心的距离 r 对喷头的响应时间曲线的影响

Fig.4 Effect of distance r on response time

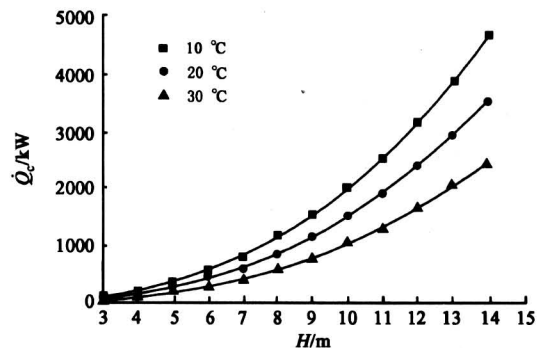


图 5 喷头启动的临界热释放速率

Fig.5 Critical HRR to active a sprinkler

4.2 t^2 火源时启动喷头的火源功率

图 6 给出了 t^2 火源时, 对于 $\theta_a = 68 \text{ }^\circ\text{C}$ 的喷头, 在环境温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 采用 DETACT-T2

计算得到的火源正上方位置喷头动作时的火源功率。从图中可看出，由于喷头本身的具有热惯性，对于安装在相同高度的喷头，喷头启动时的火源功率比临界火源功率要大一些。而随着 R_c 增大，喷头被加热的的时间越长，喷头响应时火源功率越大。

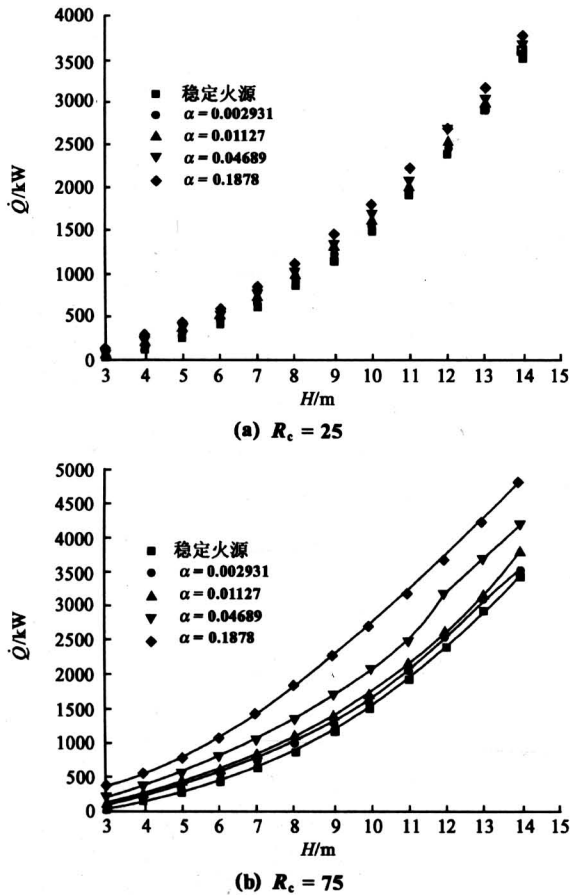


图 6 不同火源条件下喷头启动的热释放速率
Fig.6 HRR to active a sprinkler under different growth rate

综合上述分析可看到，高度越高，启动喷头的火源功率越大。为了有效的控制火灾，当喷头安装高度较高时，必须采用快速响应喷头，从而缩短响应时间，降低喷头启动时的火源功率；同时，由于此时热烟气的浮力大，为了增加液滴的穿透力，使更多的水滴能有效达到地面，必须增大喷头的工作压力。

5 结论

分析了火灾时闭式喷头的响应时间和启动闭式喷头的临界火源功率，并给出了喷头响应时间的拟合公式。从分析中可看出：

- 1) 响应时间与安装高度、环境温度呈近似线性关系；火灾增长方式则对响应时间的增长速率产生影响，火灾增长系数越大，响应时间越短短；喷头的响应时间常数与响应时间则成指数关系。
- 2) 启动喷头的临界火源功率受到安装高度和环境温度的影响。当喷头安装较高时，喷头响应时间长，喷头启动所需的火源功率较大，为了在早期有效的控制火灾，应尽可能地采用快速响应喷头，以缩短响应时间；同时，应尽可能地增大喷头的流量，以控制火灾的增长。
- 3) 随着喷头与火源中心距离的加大，喷头响应时间变长。因此，如何选择合理的喷头安装间距是一个值得探讨的问题。

参考文献

[1] Gupta A K. Modeling the response of sprinklers in compartment fires [J]. Fire and Materials, 2001, 25: 117~121

[2] Bukowshi R W. Fire Hazard Analysis [A]. In: Fire Protection Handbook [M]. 19th ed. Quincy, MA: National Protection Association, 2003. Section 3 Chapter 7

[3] Budnick E K, Evans D D, Nelson H E. Simplified Fire Growth Calculations [A]. In: Fire Protection Handbook [M]. 19th ed. Quincy, MA: National Protection Association, 2003. Section 3 Chapter 9

[4] Chow W K. Performance of sprinkler in atrium [J]. Journal of Fire Science, 1996, 14: 467~488

[5] McGrattan K B, Hamins A, Stroup D. Sprinkler, Smoke & Heat Vent, Draft Curtain Interaction—Large Scale Experiments and Model Development [R], NISTIR 6196-1

[6] NFPA92B. Guide for Smoke Management Systems in Malls, Atria, and Large Areas [M]. Quincy, MA: National Fire Protection Association, 2000

[7] GB50084-2001 自动喷水灭火系统设计规范[S]. 2001

(下转第 65 页)

The Characteristic of Spectrum and Self-correlation of Some Boolean Functions Linearly Equivalent to Specific Cryptographic Functions

Yang Rui, Zeng Bensheng, Li Shiqu

(*Department of Information Research, PLA Information Engineering College, Zhengzhou 450002, China*)

[**Abstract**] The paper made an analysis of the similarities and differences about the cryptographic properties of two Boolean functions in the sense of linearly equivalence, and obtained a sufficient and necessary condition about a Boolean function linearly equivalent to some m order correlation-immune Boolean function. It also obtained a sufficient and necessary condition about a Boolean function linearly equivalent to some Boolean function satisfying the k order propagation criterion. Moreover, it showed an example, in which a given Boolean function, that is not correlation-immuned and does not satisfy the propagation criterion can be constructed into a correlation-immuned Boolean function that can satisfy the propagation criterion and is linearly equivalent to the former one.

[**Key words**] linear equivalence; Walsh cycle spectrum; self-correlation function; correlation-immunity; propagation criterion; SAC

(cont. from p. 59)

The Study of Sprinkler Performance in Fire

Zhang Cunfeng, Huo Ran, Li Yuanzhou

(*The state key laboratory of fire science, USTC, Hefei 230027, China*)

[**Abstract**] This paper studied on the activation time of sprinkler and the critical heat release rate to activate the sprinkler when a fire happened. By calculation, this paper gave the curve on the activation time and the factors which would impact the activation time. The following conclusions were done: the activation time was almost linear with the installation height and the environment temperature; the fire development mode would affect the increasing rate of the activation time; the exponential relationship was found between the activation time and the response time index (RTI). As the height increased, the critical heat release rate would increase. In order to control fire effectively, the fast response sprinkler must be used when the sprinkler was installed in a high building ceiling.

[**Key words**] sprinkler head; critical heat release rate; response time