

文章编号: 1006-9941(2011)05-0569-06

## 典型舞台焰火燃放时火焰温度分布特征

陈涛, 傅学成, 赵力增, 薛岗, 王鑫, 包志明

(公安部天津消防研究所, 天津 300381)

**摘要:** 介绍舞台焰火的定义、发展现状及其燃放时火焰和火花的辐射特征。为了获取舞台焰火燃放时火焰温度分布特征, 搭建由 59 支热电偶组成的热电偶树测试平台, 采用热电偶温度测量法与红外热像仪相结合的方式, 测试典型舞台焰火燃放时火焰的温度及分布。实验结果表明, 舞台焰火燃放时火焰温度很高, 尤其是在喷口附近的温度高达 1200 ~ 1450 °C。舞台焰火燃放时有一个狭长的高温区, 主要集中在喷射方向上到喷口一定距离内, 而横向温度下降较快。舞台焰火燃放时高温区的大小一般与其装药量多少、燃放时间长短、燃放高度大小以及覆盖半径大小正相关, 并且与其药剂组分密切相关。

**关键词:** 应用化学; 烟花; 舞台焰火; 火焰温度; 温度分布; 热电偶; 红外热像仪; 辐射特征

**中图分类号:** TJ55; TJ450.6; X932; O69

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.020

### 1 引言

舞台焰火是指燃放时仅有微量的烟, 以产生光、色等效果为主的烟花产品。舞台焰火通常为“无烟烟花”, 主要组分为硝化棉类的单基药粉、高氯酸铵、钛粉等。按照 GB10631-2004《烟花爆竹 安全与质量》的分类标准, 舞台焰火以喷花类烟花为主, 主要应用于各种舞台表演<sup>[1-2]</sup>。目前, 舞台焰火被广泛用于各种大型活动、电视节目、聚会以及节日庆典等, 用来烘托现场气氛。但是, 由于我国至今还没制定出舞台焰火产品及其燃放的具体标准, 人们对舞台焰火产品缺乏一定的了解, 尤其是对于舞台焰火燃放时的火焰和火花温度认识不够, 至今还没有关于舞台焰火燃放时火焰温度分布研究的报道<sup>[1-3]</sup>, 这导致在燃放过程中容易引发事故, 造成巨大的生命和财产损失<sup>[4-5]</sup>。2007年9月25日, 江西省抚州市“本色精英会所”迪厅酒吧燃放舞台焰火, 火星引燃屋顶的装饰棉布引发特大火灾, 导致 12 人死亡、6 人受伤, 直接财产损失 29.6 万元。2008年9月20日, 广东省深圳市龙岗区舞王俱乐部因燃放烟花, 引燃顶棚吸音海绵发生火灾, 造成 44 人死亡, 64 人受伤, 直接财产损失 27.1 万。因此, 从消防安全角

度对舞台焰火及其燃放进行研究十分必要, 明确舞台焰火燃烧时火焰温度及其分布特征, 为制定舞台焰火及其燃放相关的标准规范提供理论依据, 为消防部门制定防火预案提供技术支撑。

温度测量方法可分为两大类: 接触式测温法和非接触式测温法。在烟火药剂燃烧火焰测温领域<sup>[6-8]</sup>, 主要应用的接触式测温法为热电偶测温法, 这种方法主要测量达到热平衡状态的火焰或环境温度, 测量比较简单、可靠, 精度较高, 但不能测试瞬间燃放的舞台焰火温度, 无法捕捉到毫秒级烟火药剂燃烧温度。非接触式测温法主要为红外热成像法, 该方法测温范围广, 反应速度比较快, 不受测温上限的限制。但该方法易受测量距离、烟尘和水气等外界因素的影响, 测量误差一般较大。鉴于此, 本研究采用热电偶温度测量与红外热像法相结合的方式, 测量了燃放时间相对较长的典型舞台焰火燃放时的火焰温度及其分布。

### 2 舞台焰火燃放时火焰及火花的辐射特征

烟火药不同于普通可燃物, 其燃烧过程是一个复杂的传质、传热等物理及化学反应过程, 这个过程与烟火药的组成和燃烧条件有密切的关系。烟火药火焰的光谱性能与辐射特性有关<sup>[8-9]</sup>, 烟火药的发光有热辐射发光和化学发光, 发光的主要载体为灼热的固体或液体颗粒和气体。烟火药燃烧火焰的辐射特征如表 1。

收稿日期: 2011-02-05; 修回日期: 2011-04-20

基金项目: 公安部消防局应用创新项目(2010XFCX005)

作者简介: 陈涛(1980-), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事消防安全评估与火灾防治技术研究。e-mail: chentao@tfri.com.cn

表 1 烟火药火焰的辐射特征

Table 1 The radiation characteristics of pyrotechnics flame

radiation type	activation factor	matter state	radiating principal	radiation spectrum characteristics
thermal radiation	temperature	solid liquid	grain (macroscopic)	continuous spectrum
thermal radiation	temperature	gas	atom molecule	line spectrum band spectrum
dissociation	temperature	gas	molecule	continuous spectrum

由于烟火药剂燃烧过程中火焰不断地与周围介质进行热交换,火焰中出现不同的温度层<sup>[8-9]</sup>。与温度层相对应的为辐射层,如图 1<sup>[8]</sup>。烟火药剂燃烧火焰由内至外可分为还原层、完全燃烧层、热辐射层、氧气层和烟层等。带还原性介质的负氧平衡烟火药燃烧时,燃烧火焰内部的还原层内温度最低,此处的温度只能起到将反应物质解离为原子,但通常不能激发这些原子产生原子辐射,因而此处主要是分子辐射;贴近火焰表面附近温度较高,此处主要为原子辐射;火焰外围燃烧层、氧气层和烟层都因由空气流入氧而发生二次反应,并使部分固体或液体颗粒冷却,外围各层产生辐射的载体为未反应完全的或新生成的固体或液体颗粒,因此该层为热辐射层,遵循绝对黑体辐射定律。

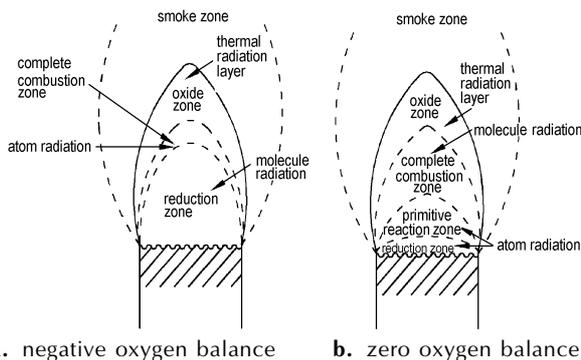


图 1 烟火药火焰模型

Fig. 1 Flame model of pyrotechnics

本研究对象主要是燃放时间在 20 s 以上的典型舞台焰火,如舞台喷泉(以下简称舞台焰火),此类产品的药剂配方一般为负氧平衡。这类舞台焰火燃放时在喷口附近很小的区域为还原层和燃烧层,存在部分分子或原子辐射。由于舞台烟火药剂配方中加入了一定的钛、锆等金属颗粒,这些金属的熔点较高,燃烧产物主要以灼热固体颗粒形式存在。当药剂燃烧时,未完全反应的金属固体颗粒或产生的新反应物被火焰气流带出,再与空气中的氧进行二次反应,从而在燃烧层、氧气层和烟层形成众多极亮的火花或火星。这些火花为灼热凝聚相颗粒,其火焰辐射以热辐射或纯温度辐射为主,可视为灰体。因此,舞台焰火燃放时以热

辐射为主,而在其喷口附近很小的区域以及火花颗粒的表面层可能会存在原子辐射或分子辐射。舞台焰火的发光主要是基于热辐射的连续光谱,并存在极少的线状光谱和带状光谱。

舞台焰火燃放时火焰的温度及分布是其燃放安全性的一个关键技术指标。本研究主要测量燃放时间在 20 s 以上的典型舞台焰火火焰温度,这类产品燃放过程中与周围介质快速进行热交换,燃放时间相对较长,适合采用热电偶测温的方法。另外,由于该类产品燃放时以热辐射为主,可视为灰体,遵循绝对黑体定律,因此可以采用红外热像法测量火焰温度及分布。

### 3 实验

#### 3.1 试验平台和测试装置

本研究搭建了以 59 根热电偶为核心的热电偶树测试平台,如图 2,其中包括 57 支 K 型热电偶(1 mm)和 2 支 S 型热电偶(1 mm)。热电偶布置在由 176 个 65 mm × 65 mm 的网格组成的支架上面,详细布置如图 3,各热电偶到样品喷口距离可以参照图中标尺。基于热电偶树测试平台,分别采用摄像机、标尺、时间测量装置、热电偶温度采集系统(NI)和红外热像仪(德国科研型)等测试装置或测试仪器,测试舞台焰火的燃放高度、覆盖半径、燃放时间、火焰温度及分布等燃放特性。放置样品时,保持样品的喷口中心正对热电偶树中第 1 列(L1)的热电偶测试端部,确保样品燃放时第 1 列的热电偶测试端部都在其火焰中心线上,并保持样品喷口到第一行(R1)的距离 65 mm,样品详细布置如图 3。为确保网格支架不影响样品燃放时的温度及燃放效果,保持热电偶测试端的端部距离网格支架 15 cm 以上。

#### 3.2 舞台焰火样品

选择了三种不同装药量的“喷泉”样品开展试验研究,测试了样品的燃放高度、覆盖半径、燃放时间以及药量等性能,详见表 2。根据药量及燃放效果的测试结果,参照 GB10631 - 2004《烟花爆竹安全与质量》的分类方法,这三种样品均属于 C 级喷花类烟花。

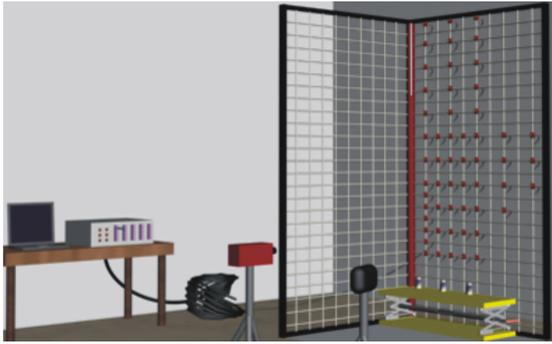


图2 舞台焰火燃放性能测试平台示意图

Fig.2 Schematic diagram of the experimental apparatus

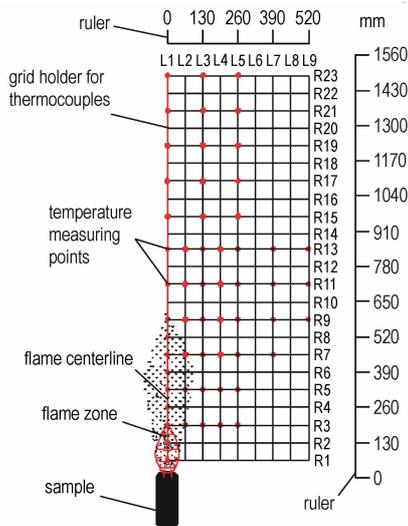


图3 热电偶平面布置示意图

Fig.3 Schematic diagram of the experimental apparatus

### 3.3 温度测试及数据处理

基于热电偶测试平台,采用热电偶温度采集系统分别测试了单支试样燃放时的温度,每种样品重复测试10次,选取各测试点温度较高的试样进行数据处理分析。首先,对于每种样品的单个试样,分别作样品火焰中心线(L1)上各温度采集点的温度-时间曲线( $T-t$ 曲线)。然后,取各温度采集点的最高温度,以样品喷口处为原点,在样品喷射方向上,作(最高)温度-

距离曲线( $T-S$ 曲线)。同理,分别作试样喷射方向其它各列的(最高)温度-距离曲线( $T-S$ 曲线),其中,第2列距火焰中心线65 mm,第3列距火焰中心线130 mm,第4列距火焰中心线195 mm,第5列距火焰中心线260 mm。最后,采用德国科研型红外热像仪测试了单支样品燃放时的温度场分布,与热电偶测试结果进行对比。

## 4 结果与讨论

### 4.1 舞台焰火燃放时不同位置的温度变化曲线

由图4、图5和图6可知,三种样品各个测试位置的温度随时间变化趋势基本一致。从样品被点燃开始,在数秒内各个测试点的温度迅速升高,之后在样品燃放过程中,火焰温度略有波动,但波动较小(基本维持水平),样品燃放结束后,温度迅速下降。

### 4.2 舞台焰火燃放时的温度分布

由图7可知,三种样品燃放时,在喷射方向火焰中心线上火焰温度分布基本一致,距样品喷口越近的位置温度越高,随着到喷口距离的增加火焰温度呈指数快速衰减。从图7中可知,距离焰火喷口较远位置处的温度仍然很高,如1号样品在距喷口1.5 m处的温度仍然在100 °C以上,其它两种样品在距喷口约1 m处的温度约为100 °C。由图8、图9和图10可知,三种样品燃放时在横向方向温度梯度较大,如距火焰中心线水平距离65 mm的列(第2列)上各点最高温度为分别为128 °C、74 °C和105 °C,而相距130 mm及以上时温度均低于60 °C。

由此可知,舞台焰火样品燃放时的高温区主要集中在喷射方向上一个狭长的区域,而横向温度衰减较快。以1号样品为例,其500 °C以上温度区为:样品喷口至其喷口正上方455 mm以内,宽度小于130 mm(火焰中心线两侧各65 mm)。表3为三种舞台焰火样品70 °C以上、300 °C以上和500 °C以上的温度分布区域。

表2 典型舞台焰火样品基本性能

Table 2 The basic characteristics of typical stage fireworks

sample number	samples	jetting height/m	coverage radius/mm	display time/s	dosage/g	type
1	fountain	3	325	21	41.6	C
2	fountain	3	260	33	14.1	fountains
3	fountain	2	195	23	25	

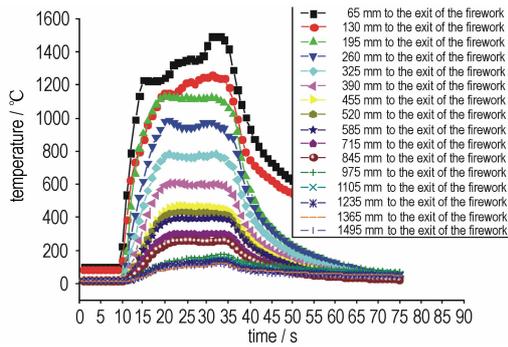


图 4 1 号样品喷射方向不同位置处的温度-时间曲线

Fig. 4 Flame temperature curves in different positions of sample 1

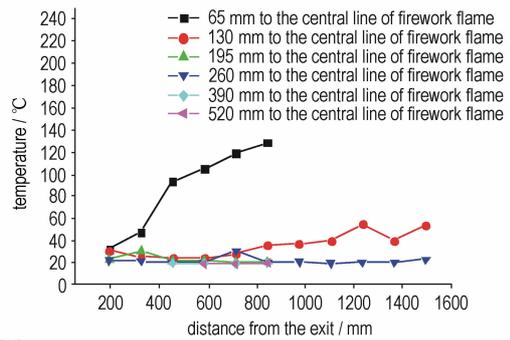


图 8 1 号样品喷射方向其它各列温度分布

Fig. 8 Temperature distribution in other positions of sample 1

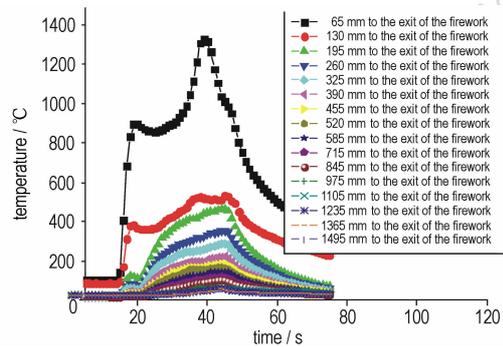


图 5 2 号样品喷射方向不同位置处的温度-时间曲线

Fig. 5 Flame temperature curves in different positions of sample 2

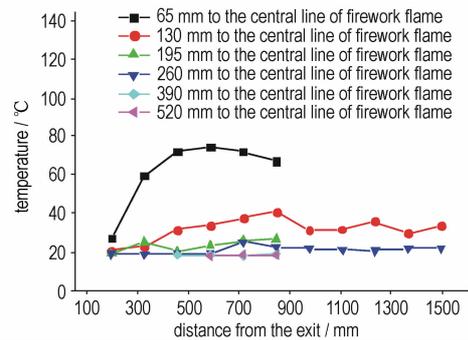


图 9 2 号样品喷射方向其它各列温度分布

Fig. 9 Temperature distribution in other positions of sample 2

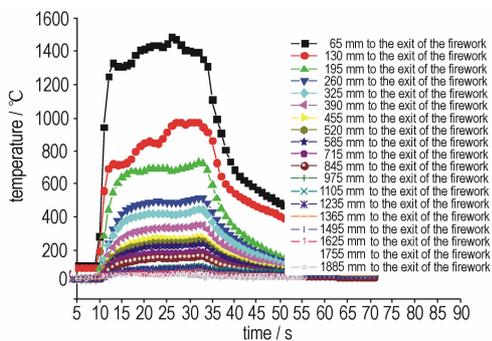


图 6 3 号样品喷射方向不同位置处的温度-时间曲线

Fig. 6 Flame temperature curves in different positions of sample 3

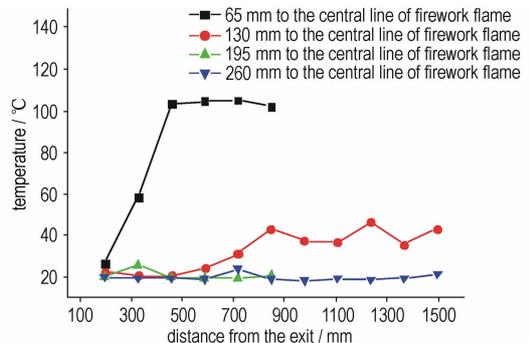


图 10 3 号样品喷射方向其它各列温度分布

Fig. 10 Temperature distribution in other positions of sample 3

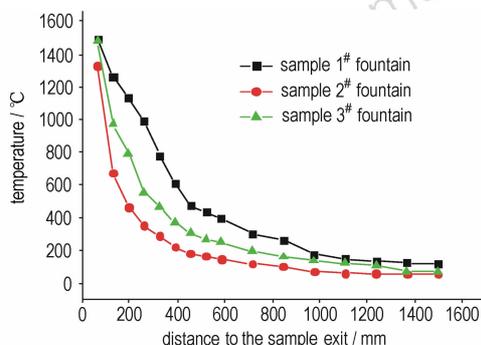


图 7 样品喷射方向火焰中心线上的温度分布

Fig. 7 Temperature distribution in the centerline of fireworks

试验采用德国科研型红外热像仪,并采用火焰滤片测试了 1 号样品的火焰区,如图 11。测试结果表明,1 号舞台焰火产品燃放时在喷射方向存在不同的温度分布区,其中高温区主要集中在喷射方向上的一个狭长区域。这与热电偶树高速温度采集系统的试验结果基本一致,并且红外热像仪测试得到的温度分布图更为直观,温度数据相对更全面。

通过对三种不同装药量舞台焰火的燃放高度、覆盖半径、燃放时间、装药量以及火焰分布特征的研究发现,舞台焰火燃放时高温区的大小一般与其装药量多

少、燃放时间长短、燃放高度大小以及覆盖半径大小正相关,并且与其药剂组分密切相关。舞台焰火燃放时

喷射方向非常危险,容易引发周围易燃物或可燃物,应做好消防安全防范措施。

表 3 三种舞台焰火样品的各种高温分布区

Table 3 The high temperature distribution regions of the typical stage fireworks

No.	above 70 °C	above 300 °C	above 500 °C
1	length: above 1495 width: about 260 mm	length: about 845 mm width: about 130 mm	length: about 455 mm width: about 130 mm
2	length: about 1105 mm width: about 260 mm	length: about 325 mm width: about 130 mm	length: about 195 mm width: about 130 mm
3	length: above 1495 width: about 260 mm	length: about 520 mm width: about 130 mm	length: about 325 mm width: about 130 mm

Note: The least space between thermocouples is 65 mm, so the real width may be smaller than 260 mm (double 130 mm).

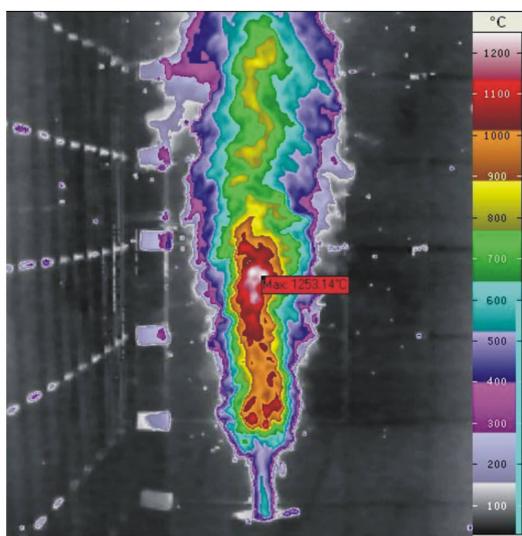


图 11 1号样品的红外热像图

Fig. 11 Thermo image of sample 1

## 5 结论与建议

(1) 舞台焰火燃放时火焰温度很高,尤其是在喷射口附近的温度更高,多数样品达 1200~1450 °C 以上。

(2) 三种典型舞台焰火样品在喷射方向上均有一个狭长的高温区,主要集中在喷射方向上一定距离内,而横向方向温度下降较快,一般在距样品火焰中心线 195 mm 以外的位置温度为常温。

(3) 舞台焰火燃放时高温区的大小一般与其装药量多少、燃放时间长短、燃放高度大小以及覆盖半径大小正相关,并且与其药剂组分密切相关。

(4) 根据舞台焰火火焰的辐射机制并结合实验研究结果可知,舞台焰火燃放时以热辐射为主,而在其喷

口附近很小的区域以及火花颗粒的表面层会存在原子辐射或分子辐射。舞台焰火的发光主要是基于热辐射的连续光谱,并存在极少的线状光谱和带状光谱。

### 参考文献:

- [1] 刘玉海,潘仁明. 无烟烟花药剂使用安全性能分析[J]. 火炸药学报,2002(3): 73-78.  
LIU Yu-hai, PAN Ren-ming. Analysis of the safety property of smokeless firework powders[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002(3): 73-78.
- [2] 潘功配. 中国烟火技术的创新与发展[J]. 含能材料,2010,18(4): 443-446.  
PAN Gong-pei. Development and innovation of pyrotechnics in China[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(4): 443-446.
- [3] 刘玉海,刘士林. 无烟烟花药剂产气速率影响因素的研究[J]. 火工品,2002(3): 51-53.  
LIU Yu-hai, LIU Shi-lin. A study on the factors affecting the gas-producing rate of smokeless firework powders[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2002(3): 51-53.
- [4] 公安部消防局. 中国消防年鉴[M]. 北京: 中国人事出版社, 2008.
- [5] 公安部消防局. 中国消防年鉴[M]. 北京: 中国人事出版社, 2009.
- [6] 李占英,席兰霞,刘举鹏,等. 多光谱辐射测温法应用于测定火工烟火药剂燃烧温度[J]. 含能材料,2010,18(4): 405-408.  
LI Zhan-ying, XI Lan-xia, LIU Ju-peng, et al. Flame temperature measurement of pyrotechnic composition using multi-spectral thermometry[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(4): 405-408.
- [7] 戴景民. 辐射测温的发展现状与展望[J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(3): 1-7.  
DAI Jing-min. Survey of radiation thermometry[J]. *Techniques of Automation & Applications*, 2004, 23(3): 1-7.
- [8] 潘功配. 高等烟火学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2005.
- [9] 焦清介,霸书红. 烟火辐射学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.

## Flame Temperature Distribution Characteristics of Typical Stage Fireworks

CHEN Tao, FU Xue-cheng, ZHAO Li-zeng, XUE Gang, WANG Xin, BAO Zhi-ming

(Tianjin Fire Research Institute of MPS, Tianjin 300381, China)

**Abstract:** The definition and development of stage fireworks were introduced. The radiation characteristics of flame temperature and sparks temperature of stage fireworks during being displayed were discussed. The thermocouple tree testing apparatus consisting of 59 thermocouples was established to measure the flame temperatures of stage fireworks. The flame temperature distribution of typical stage fireworks was investigated by temperature measure system with thermocouple and infrared thermograph. The results show that the flame temperature of typical stage fireworks is extremely high, and the temperature nearby the exits of the fireworks during being displayed are up to 1200 – 1450 °C. There is a long and narrow high temperature region along the emitting direction of the stage fireworks. The size of high temperature region of stage fireworks is positively relative to its basic display performances, such as emitting heights, emitting velocity, radiuses and durations. However, the size of high temperature region of stage fireworks is essentially depend on the compositions, dosage and combustion condition.

**Key words:** applied chemistry; firework; stage firework; flame temperature; temperature distribution; thermocouple; infrared thermograph; radiation characteristic

**CLC number:** TJ55; TJ450.6; X932; O69

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.05.020