

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2021.04.007

# 非储压干粉灭火装置产气药柱的性能研究\*

张兴炎 谢兴华 孙 鹏 崔 钊

安徽理工大学化学工程学院(安徽淮南,232001)

[摘 要] 基于非储压干粉灭火装置的安全、高效等特点,设计不同氧化剂配比的产气药柱的基本配方,对比不同氧差下药柱的燃速,并对残渣进行 XRD 试验分析、产气量测试比较。结果表明:氧化剂含量对燃速和产气量影响很大,设计氧差时要考虑氧化剂耗氧量;药柱燃烧后残渣过多会降低性能。为寻求稳定燃速和低残渣,应控制氧差在 -15 至 -20 之间为佳。最优基本配方(质量分数)是氧化剂 77.2%、可燃剂 11.4%、黏结剂 11.4%。氧差 -15 时,燃速达到 8.95 g/s,产气量为 0.245 L/g;较某消防药柱产气量提升 19%。

[关键词] 产气药;产气性能;氧差;燃速

[分类号] TQ569

## Research on Performance of Gas-Producing Grains in Dry Powder Fire Extinguishing Device with Non-Pressure Storage

ZHANG Xingyan, XIE Xinghua, SUN Peng, CUI Tian

School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology (Anhui Huainan, 232001)

[ABSTRACT] Based on safety and high efficiency of dry powder fire extinguishing device with non-pressure storage, basic formulas with different oxidizer ratios were designed for the gas-producing grains. Burning rate under different oxygen differences was compared, the residue was analyzed by XRD test, and the gas production was also compared. The results show that oxidant content has a great influence on burning rate and gas production, so oxygen consumption of the oxidant should be considered when oxygen difference is designed. Too much residue after combustion will reduce performances. In order to seek stable burning rate and low residue, the best oxygen difference should be controlled to be around -15 to -20. In the optimal basic formula, mass fractions of oxidizer, combustible agent, and binder are 77.2%, 11.4%, and 11.4%, respectively. When oxygen difference is -15, burning rate is 8.95 g/s, and gas production is 0.245 L/g. Compared to a fire-fighting grain, the gas production increases by 19%.

[KEYWORDS] gas-generating drug; gas production performance; oxygen difference; burning rate

## 引言

近年来,火灾事故频繁发生。为了减小危害,灭火效率需迅速提升,对便携式干粉灭火器也提出了更高的要求。干粉灭火器凭借突出的灭火效率、无有害气体、生产使用成本低、安全性能良好等优势而备受关注。缓释型灭火器是一种非储压式干粉灭火器,应用固-气转换方式,将特定配方的药块点燃后,产生的高温气体作为驱动干粉的动力,喷洒干粉到火源处,从而达到灭火的目的<sup>[1]</sup>。在灭火器结构

中,产气药柱产生的气体压力是灭火弹的动力源,燃速影响燃烧时长,产气量则影响灭火性能。

硝酸钾  $\text{KNO}_3$  的热分解速率对产气药柱的燃速有显著的影响。过渡金属或过渡金属化合物位于 d 轨道上的电子,能加快  $\text{KNO}_3$  热分解时电子的移动,使燃烧加剧。在使用非储压干粉灭火装置时,喷出的超细干粉需满足快流速和大流量的要求;因此,产气药必不可少的条件是产气量充分和燃速恰当。有鉴于此,设计了氧差(100g 的药剂中所有可燃药剂完全氧化所消耗的氧和药剂的含氧量之差<sup>[2]</sup>) 在 -40 ~ 0 之间的基础配方,进行燃速试验,分析残

\* 收稿日期:2021-03-05

第一作者:张兴炎(1995-),硕士研究生,主要研究方向:爆炸理论与应用。E-mail:zxy1915408919@163.com

通信作者:谢兴华(1963-),博士,教授,主要研究方向:爆破器材及工程应用。E-mail:xhx1963@163.com

渣,确定最佳配方。对最佳配方进行产气量测试,再同消防药柱进行对比。

## 1 产气药柱的设计

### 1.1 产气药配方

产气药作为壳体的动力源,由点火具点燃,即刻反应生成高温、高压的气体,推动超细干粉喷射出去,进行灭火。其成分包括氧化剂、可燃剂、黏结剂和性能调节剂等<sup>[3]</sup>。在燃烧过程中,氧化剂为反应供氧,可燃剂提供维持反应进行所需的热量<sup>[4]</sup>。为了使药块成型,在药剂组分中添加使药块强度增加的黏结剂和燃速调节剂。但添加剂对燃速均有正催化作用,均使产气量有所降低<sup>[5]</sup>。因此,在优化产气药组分时,需考虑以下几点:

- 1) 各成分不影响预先设计的燃烧效应;
- 2) 化学安定性好;
- 3) 可长期储存;
- 4) 所产气体无毒无害;
- 5) 原料易得,价格便宜。

灭火器按氧化剂可分为 K 型( $\text{KNO}_3$  为主)和 S 型[ $\text{Si}(\text{NO}_3)_2$  为主],K 型灭火效率要高于 S 型。所以,选择  $\text{KNO}_3$  作为产气药的氧化剂。由于酚醛树脂对弱酸、弱碱有较好的耐受性,且会被强酸、强碱腐蚀,酚醛树脂粉末不溶于水,易溶于极性溶剂,所以选取酚醛树脂作为可燃剂<sup>[6]</sup>。同时,由于酚醛树脂有高、低温耐受性强、化学安定性好等优点,试验中,也选择酚醛树脂为黏结剂。可燃剂与黏结剂相同,这也确保了产气药有较好的化学相容性。

### 1.2 基础配方负氧平衡

以产气药的配方为基础来进行负氧平衡设计。氧化剂为  $\text{KNO}_3$ ,可燃剂和黏结剂都为酚醛树脂。在计算时,烟火药中的聚合物用单体,即酚醛树脂单体  $\text{C}_{13}\text{H}_{12}\text{O}_2$ <sup>[7]</sup>。

对于三元混合物,有

$$\begin{cases} n = \frac{A}{a} - \frac{B}{b} - \frac{C}{c}; \\ A + B + C = 100。 \end{cases} \quad (1)$$

对于二元混合物,有

$$\begin{cases} n = \frac{A}{a} - \frac{B}{b}; \\ A + B = 100。 \end{cases} \quad (2)$$

式(1)、式(2)中: $n$  为氧差; $A$  为氧化剂的质量, $g$ ; $B$  为可燃物的质量, $g$ ; $C$  为黏结剂的质量, $g$ ; $a$  为释放 1  $g$  氧所需氧化剂的质量, $g$ ; $b$  为 1  $g$  氧燃烧所消耗

可燃剂的质量, $g$ ; $c$  为 1  $g$  氧燃烧所消耗黏结剂的质量, $g$ 。

各配方燃烧或分解完全反应方程,见表 1。

表 1 各成分完全反应方程式

Tab. 1 Complete reaction equation of each component

成分	方程式	质量/ $g$
硝酸钾	$2\text{KNO}_3 = \text{K}_2\text{O} + \text{N}_2 + 2.5\text{O}_2$	$a = 2.53$
酚醛树脂	$\text{C}_{13}\text{H}_{12}\text{O}_2 + 15\text{O}_2 = 13\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	$b = 0.42$
酚醛树脂	$\text{C}_{13}\text{H}_{12}\text{O}_2 + 15\text{O}_2 = 13\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	$c = 0.42$

分析以上成分,进行负氧(或零氧)平衡设计,改变药剂中硝酸钾和酚醛树脂的质量分数,计算出不同的氧差,见表 2。

表 2 不同氧差下的产气药的质量分数

Tab. 2 Proportion of gas-producing drugs under different oxygen differences

硝酸钾%	酚醛树脂%	氧差
71.36	28.64	-40
73.16	26.84	-35
74.96	25.04	-30
76.76	23.24	-25
78.56	21.44	-20
80.36	19.64	-15
82.16	17.84	-10
83.96	16.04	-5
85.76	14.24	0

### 1.3 产气药柱结构

合适的燃烧面积,是设计产气药柱的关键<sup>[6]</sup>。因此,选取恰当的装药密度,以保证药柱的机械强度以及药柱能够匀速燃烧。产气药柱结构见图 1。确定压药密度  $3.01 \text{ g/cm}^3$ ,直径 20.0 mm,高度 23.0 mm。在药柱的顶端有一直径 7.6 mm、深 6.0 mm 的圆柱孔,可增加其接触火焰的面积,易于点火。

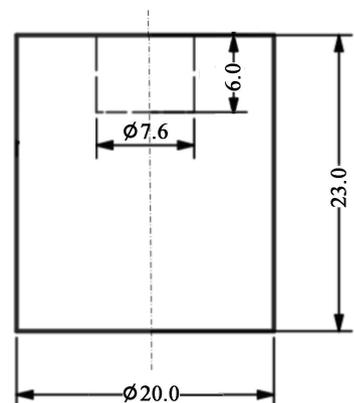


图 1 产气药柱结构(单位: mm)

Fig. 1 Structure of gas-producing grain(unit: mm)

## 2 试验部分

### 2.1 产气药柱的制备

利用球磨机对  $\text{KNO}_3$  原料进行研磨,过 100 目筛;将其放置于  $50\text{ }^\circ\text{C}$  的烘箱中,干燥 24 h 后取出备用。然后,制备酚醛树脂溶液,选用极性溶剂乙酸丁酯与酚醛树脂以 1 : 10 的体积比搅拌至完全溶解。其次,按 9 种不同氧差(见表 2),分别称取  $\text{KNO}_3$ ,加入酚醛树脂溶液里,共计 9 种配比,20 min 搅拌一次。将湿混好的药剂过 30 目的造粒筛,把造粒好的药剂放入烘箱烘干。最后,利用油压机将药剂放入模具,在 40 MPa 压力下压制成型,每种配比制备 2 发,所有药柱质量都控制在 21 g 左右。见图 2。



图 2 成型药柱

Fig. 2 Shaped grain

### 2.2 试验方法

使用起爆器点燃点火药头,从而点燃药柱,再用高速摄影仪拍摄药柱的整个燃烧状态。用秒表记录每组药柱燃烧的时间,计算出药柱质量与燃烧时间的比例,分析产气药柱在不同氧差时的燃速,找出最佳的氧差配比。其次,用 X 射线衍射仪分析燃烧后的残渣成分。最终,通过 GJB770B—2005《火药试验方法》<sup>[8]</sup>测试药剂燃烧生成的气体量。

## 3 结果与分析

### 3.1 氧差对燃速的影响

各配方在氧差 -40 到 0 之间的燃速测试结果如图 3 所示。

根据图 3 测试结果可明显地看出,氧差在 -40 到 0 之间,产气药柱的燃速呈先上升、再平稳波动、最后迅速下降的走势。氧差在 -30 到 -10 之间,产气药的燃速在一个平稳阶段,燃速稳定。其中,在氧差为 -15 时燃速最快,达到  $8.95\text{ g/s}$ 。燃烧过程中,若氧化剂含量过高,导致可燃剂含量相对低,发生剧烈燃烧时无法给予足够的热量,造成燃速变慢或者

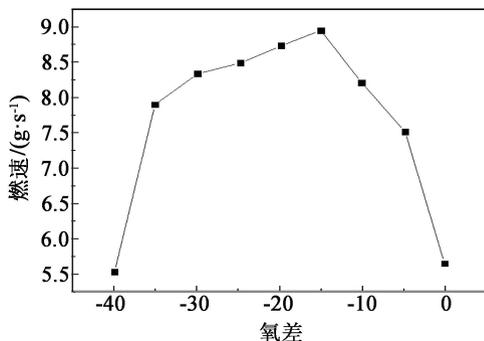


图 3 氧差与产气药燃速的关系

Fig. 3 Relationship between oxygen difference and burning rate of gas-generating agent

中止;若氧化剂不足,由于产气药的自供氧特性,燃烧几乎不利用空气中的氧气,并且药剂由性质活泼的成分组成;当氧化剂供氧过低,为了持续燃烧,需要和空气中的氧气反应,因此反应速率下降,燃速降低。

此外,氧差大,会导致  $\text{KNO}_3$  剩余,燃烧后留下大量残渣;氧差小,则会使酚醛树脂燃烧不充分。考虑到消防安全性和效率性,选用高燃速和少量残渣的产气药最为合适,即  $m(\text{KNO}_3) : m(\text{酚醛树脂}) = 80.4 : 19.6$ ,氧差为 -15。此时,药剂的配方(质量分数)为氧化剂 77.2%,可燃剂 11.4%,黏结剂为 11.4%。

### 3.2 残渣对燃速的影响

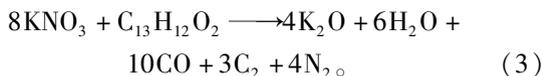
图 4 为氧差为 0 时的残渣。剧烈的燃烧反应生成高温气体,伴随少量的颗粒。这些颗粒一部分是燃烧时由高温气体喷射而出,另一部分是燃烧结束后冷却成渣。



图 4 氧差为 0 时的残渣

Fig. 4 Residue when oxygen difference is 0

通过 B-W 法( $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}-\text{CO}_2$ ),计算氧差 -15 时的状况。化学反应方程式如下:



式(3)显示,反应后的固体产物只有  $\text{K}_2\text{O}$ 。但现实

中燃烧反应极为复杂。使用 X 射线衍射仪分析,得出残渣的衍射图谱,如图 5 所示。

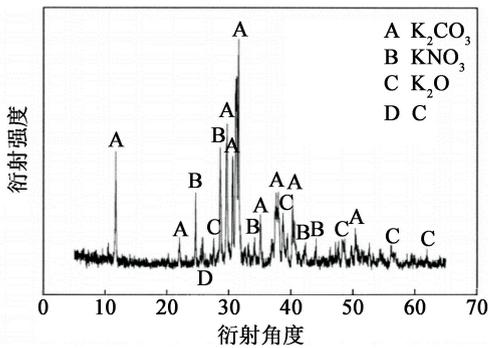


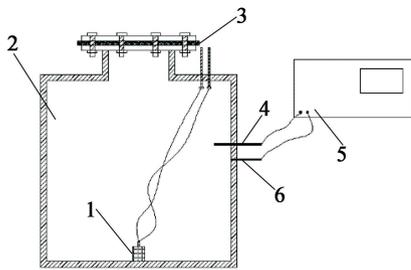
图 5 X 射线衍射图谱

Fig. 5 X-ray diffraction pattern

将 X 射线衍射图谱同标准图谱分析比较可知,燃烧残渣主要有  $K_2CO_3$ 、 $KNO_3$ 、 $K_2O$ 、C, 钾盐占比大;因为  $KNO_3$  在药柱中充当氧化剂且比重很大。过多的残渣会使喷口堵塞,影响灭火装置喷射干粉,进而降低灭火效率。因此,综合考虑燃速高和残渣低两个因素, $KNO_3$ -酚醛树脂产气药柱的氧差控制在 -20 到 -10 较合适,其中,氧差 -15 为最佳。

### 3.3 产气量测试

图 6 为产气量测试装置示意图。



1 - 产气药; 2 - 反应室; 3 - 点火极;

4 - 温度传感器; 5 - 记录仪; 6 - 压力传感器。

图 6 产气量测试装置示意图

Fig. 6 Schematic diagram of gas production test device

通过计算,假设气体在理想状态下,即

$$pV = nRT. \quad (4)$$

装置内空气物质的量

$$n(\text{空气}) = \frac{p_0 V}{RT}. \quad (5)$$

药柱完全燃烧后气体物质的量

$$n(\text{总}) = \frac{p_2 V}{RT}. \quad (6)$$

因此,产气药柱生成物的物质的量

$$n(\text{生}) = n(\text{总}) - n(\text{空气}). \quad (7)$$

转换为标准状态下气体的体积为

$$V = 22.4 \times n(\text{生}). \quad (8)$$

最终计算,每克产气药柱生成的气体体积为

$$V_m = \frac{V}{m}. \quad (9)$$

式中: $p$  是压强,Pa; $V$  为容器体积,L; $n$  是物质的量,mol; $R$  是气体普适常数; $T$  为热力学温度,K; $V_m$  单位质量产气量,L/g。

实验测试结果和消防上使用的产气药柱的产气性能做对比,见表 3 所示。

表 3 产气性能对比

Tab. 3 Comparison of gas production performance

参数	消防药柱	自制药柱
环境温度/K	289.15	289.15
大气压强/Pa	101 325	101 325
装置内温度/K	307.12	307.24
产气药柱质量/g	14.55	13.88
产气量/(L·g <sup>-1</sup> )	0.206	0.245

通过表 3 可知,自制的氧差为 -15 的  $KNO_3$ -酚醛树脂产气药柱的产气量明显比市场上使用的消防药柱更多。该药柱单位质量的产气量高于消防药柱 19%,证明该产气药柱驱动力充足。

## 4 结论

1) 通过实验和分析可知,氧差从 -40 到 0,产气药柱燃速先增大、到平稳、再降低。氧差在 -15 时,燃速最高,8.95 g/s。由 X 射线衍射分析可知,产气药柱燃烧后残渣物主要是  $K_2CO_3$ 、 $KNO_3$ 、 $K_2O$  和 C。为了稳定燃速和降低残渣,应将氧差控制在 -15 左右为佳。

2) 不同氧化剂含量对燃速影响较大。最佳配方(以质量分数计)是氧化剂 77.2%,可燃剂 11.4%,黏结剂 11.4%。

3) 该配方燃速高,产气量充足,产气量为 0.245 L/g。相较于正在使用的消防药柱,产气量提高了 19%。

## 参 考 文 献

- [1] 邵子豪. 一种干粉灭火器驱动药块的研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2017.  
SHAO Z H. Study on a drug block for driving dry powder fire extinguisher [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2017.
- [2] 朴哲镐,徐少明. 烟火剂型底部排气药柱特性研究

- [J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(2):126-129.
- PIAO Z G, XU S M. Characteristic researching for pyrotechnic composition BB pellet[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(2):126-129.
- [3] 钱小华. 热气溶胶灭火剂配方的优化实验[J]. 火工品, 2017(6):49-53.
- QIAN X H. Optimization experiment of the formulation of aerosol fire extinguishing agent [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2017(6):49-53.
- [4] 江泉南. S型热气溶胶灭火剂出口温度抑制的研究[D]. 南京:南京理工大学, 2014.
- JIANG X N. Study on the outlet temperature control of S-type condensed aerosol extinguishing agent[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014.
- [5] 贾雷, 于瑶, 潘靖, 等. 基于非贮压干粉灭火装置产气剂的性能研究[J]. 火工品, 2019(3):55-57.
- JIA L, YU Y, PAN J, et al. Study on performance of gas generating agent based on non pressure-accumulated powder fire equipments [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2019(3):55-57.
- [6] 胡春红. 酚醛树脂的复合改性研究进展[J]. 化工管理, 2016(32):63.
- [7] 庄维伟, 牛鹏宇, 庄弘炜, 等. 手持式灭火弹产气剂装药设计与试验研究[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(11):1499-1502.
- ZHUANG W W, NIU P Y, ZHUANG H W, et al. Charging design and experimental research on gas generant of an handheld fire extinguishing bomb[J]. Fire Science and Technology, 2015, 34(11):1499-1502.
- [8] 譙娟, 温晓燕, 贾林, 等. 火药试验方法的发展现状和扩充建议[J]. 中国标准化, 2018(增刊1):233-236.
- QIAO J, WEN X Y, JIA L, et al. Development status and suggestings for expansion of test method of propellant [J]. China Standardization, 2018(suppl. 1):233-236.

(上接第34页)

3) 模拟结果与实验结果基本吻合, 可为圆台形FAE装置的优化设计提供参考依据。

### 参 考 文 献

- [1] 薛社生, 刘家骢, 秦承森, 等. 燃料爆炸抛撒成雾的实验与数值研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(4):272-276.
- XUE S S, LIU J C, QIN C S, et al. Experimental and numerical investigation on explosive dispersal and cloud forming[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(4):272-276.
- [2] 王德润, 沈兆武, 周听清, 等. 液态燃料爆炸抛撒及云雾形成的实验研究[J]. 流体力学实验与测量, 2004, 18(4):15-19.
- WANG D R, SHEN Z W, ZHOU T Q, et al. Experimental study on explosive dispersion and cloud formation of liquid fuel[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2004, 18(4):15-19.
- [3] SINGH S K, SINGH V P. Extended near-field modeling and droplet size distribution for fuel-air explosive warhead [J]. Defense Science Journal, 2002, 51(3):303-314.
- [4] SALLAM K, DAI Z, FAETH G M. Liquid breakup at the surface of turbulent round liquid jets in still gases[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2002, 28(3):427-449.
- [5] 惠君明. FAE燃料抛撒与云雾状态的控制[J]. 火炸药学报, 1999, 22(1):10-13.
- HUI J M. FAE fuel throw and control of cloud state[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 1999, 22(1):10-13.
- [6] 李建平, 白春华, 郭昭平. 云爆装置初始作用过程数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(5):123-125, 132.
- LI J P, BAI C H, GUO Z P. Numerical simulation of the initial interaction process of FAE device[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(5):123-125, 132.
- [7] 郭俊, 余文力, 王少龙, 等. 端盖对FAE燃料抛撒影响的数值模拟[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(6):65-67.
- GUO J, YU W L, WANG S L, et al. Numerical simulation on influence of cover to spill of liquid fuel of FAE [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013, 34(6):65-67.
- [8] 王晔, 白春华, 李建平. 弹壳体结构对燃料装药抛撒速率影响的数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(1):43-49.
- WANG Y, BAI C H, LI J P. Influence of shell structure on dispersing velocity of fuel-air mixture[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(1):43-49.
- [9] 王永旭, 解立峰, 贾晓亮, 等. 300 kg装药FAE燃料爆炸抛撒成雾的实验研究[J]. 爆破器材, 2020, 49(2):23-28.
- WANG Y X, XIE L F, JIA X L, et al. Experimental study on 300 kg charge of FAE clouds by explosion dispersal[J]. Explosive Materials, 2020, 49(2):23-28.