

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2017.02.012

压药压力对硅系延期药燃速影响的试验研究^{*}

朱 帅^① 刘 锋^① 张 彦^① 唐俊峰^② 王宁波^③

①安徽理工大学化学工程学院(安徽淮南,232001)

②湖南南岭衡阳民用爆破服务有限公司(湖南衡阳,421600)

③中国人民解放军77618部队(西藏拉萨,850000)

[摘 要] 通过测量不同压力压装的单芯延期体的压药密度、燃烧速度,研究了压药压力对硅系延期药燃速及其精度的影响。测试结果表明:压药压力在40~640 MPa范围内,对应压药密度为3.15~4.08 g/cm³、延期药燃速为187.74~258.26 mm/s;压药压力与平均压药密度、平均燃速均呈良好的线性关系;随着压药压力的增加,延期精度变好;640 MPa压药压力下硅系延期药燃速标准差最小,延期精度最高。

[关键词] 延期药;压药压力;压药密度;燃烧速度;延期精度

[分类号] TJ45+5

Experimental Study on Effect of Loading Pressure on the Burning Rate of Silicon Type Delay Composition

ZHU Shuai^①, LIU Feng^①, ZHANG Yan^①, TANG Junfeng^②, WANG Ningbo^③

①School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology (Anhui Huainan, 232001)

②Hu'nan Nanling Hengyang Civil Blasting Services Co., Ltd. (Hu'nan Hengyang, 421600)

③Unit 77618, Chinese People's Liberation Army (Tibet Lhasa, 850000)

[ABSTRACT] Effect of loading pressure on burning rate and delay precision of silicon type delay composition was studied by measuring the charging density and the burning rate of the single core delay elements with different loading pressure. Results show that, in the range of 40~640 MPa the charging density changes from 3.15 g/cm³ to 4.08 g/cm³, and the burning rate changes from 187.74 mm/s to 258.26 mm/s. The correlation of the loading pressure and the charging density, or the loading pressure and the burning rate, shows a good linear relationship. With the increase of loading pressure, delay precision increases. The minimum standard deviation of burning rate and the highest delay precision appear at 640 MPa.

[KEYWORDS] delay composition; loading pressure; charging density; burning rate; delay precision

引言

延时性起爆器材中用以控制由点火到爆炸的时间的药剂称为延期药。通过改变延期药的配方、粒度及药柱长度等条件,控制延期药的燃烧时间,完成延期功能。延期药的性质及工艺条件等因素,共同决定其延期精度^[1]。张建富等的研究表明,延期药可燃剂、氧化剂的粒度分布对延期精度影响较大,粒度分布的均匀性、一致性越好,越有利于提高延期药

的延期精度^[2]。曾寿礼等在硅系延期药中添加铅粉,有效地提高了硅系延期药的燃烧速度、延期时间精度和储存稳定性^[3]。张致魁改变延期药中铬酸钡的配比,得出铬酸钡含量越高,其假密度越低,药柱高度增加,延期时间越长;含量过高时延期药的燃烧时间、精度变低;硼粉含量越低,延期药燃烧时间精度越高^[4]。

以上研究人员着重研究了延期药的配比、粒度、添加剂等因素对延期精度的影响。本文中,采用不同压药压力压装单芯延期体,探究了硅系延期药压

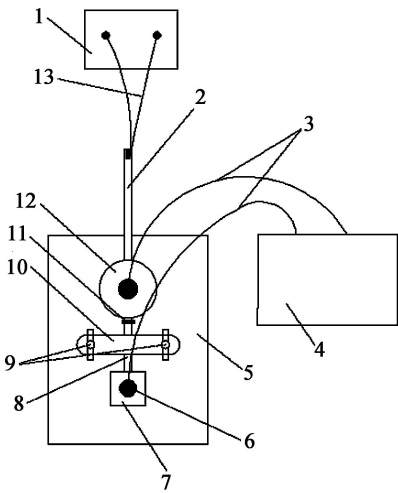
^{*} 收稿日期:2016-11-10
作者简介:朱帅(1992-),男,硕士研究生,主要从事民用爆破器材研究。E-mail:shuaizhu92@163.com
通信作者:刘锋(1976-),男,博士,副教授,主要从事工业炸药及爆炸效应方面的研究。E-mail:zsaust@sina.com

药压力与压药密度、燃烧速度及延期精度之间的关系,有利于提高火工品的延期精度。

1 试验部分

试验配方为 $w(\text{Pb}_3\text{O}_4) : w(\text{Si}) : w(\text{Se}) = 6.0 : 4.0 : 0.5$; Pb_3O_4 纯度 98.0%, 粒径 $3.974 \sim 4.475 \mu\text{m}$; Si 粉纯度 99.8%, 粒径 $3.235 \sim 4.623 \mu\text{m}$; Se 粉纯度 99.5%, 粒径 $20.237 \sim 23.943 \mu\text{m}$; 设计 40、80、160、320、640 MPa 5 组压药压力, 将延期药压装在长 15.0 mm, 内径 2.0 mm、外径 5.6 mm 的铝合金管内; 每组 20 发, 共 100 发。

延期药燃烧速度测试装置如图 1 所示。



1 - 发爆器; 2 - 导爆管; 3 - 信号线; 4 - HDO4034 示波器; 5 - 固定台; 6 - 光电二极管; 7 - 固定块; 8 - 压装延期药的铝合金管; 9 - 蝶形螺母; 10 - 固定夹片; 11 - 固定夹; 12 - 固定块; 13 - 起爆线。

图 1 延期药燃烧速度测试装置
Fig. 1 Test device for burning rate of delay composition

2 结果及分析

2.1 试验结果

用图 1 装置测量铝合金管内压装延期药的燃烧时间, 结合药柱长度、压装延期药前后的质量差, 计算各组延期药平均压药密度、平均燃速、燃速极差及燃速标准差, 如表 1 所示。

压药压力与平均压药密度、平均燃速等参数的关系如图 2、图 3 所示。

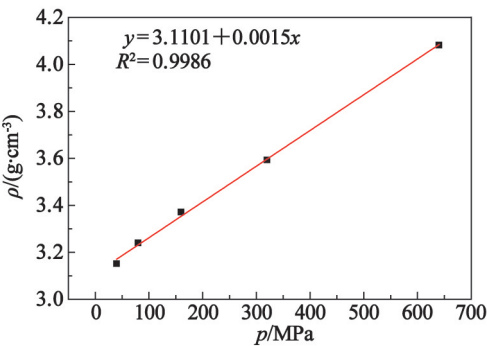


图 2 压药压力与平均压药密度的关系
Fig. 2 Relationship between loading pressure and average burning rate

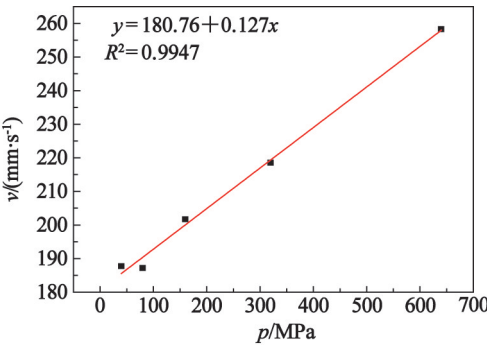


图 3 压药压力与平均燃速的关系
Fig. 3 Relationship between loading pressure and average charging density

表 1 压药压力变化对装药密度及燃速的影响

Tab. 1 Effect of loading pressure on charging density and burning rate

编号	压药压力/ MPa	平均压药密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	平均燃烧时间/ ms	平均燃速/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	燃速极差/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	燃速标准差/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)
1 [#]	40	3.15	79.90	187.74	74.55	24.96
2 [#]	80	3.24	80.13	187.19	89.40	34.91
3 [#]	160	3.37	74.38	201.68	138.27	43.35
4 [#]	320	3.59	68.64	218.53	97.42	37.96
5 [#]	640	4.08	58.08	258.26	41.64	13.27

注: 试验用铝合金管为机械加工; 模具装药和压制过程中, 药高和铝合金管长度一致, 均为 15.0 mm。

图 4 为平均压药密度与平均燃速的关系,图 5 为压药压力与燃速标准差的关系。

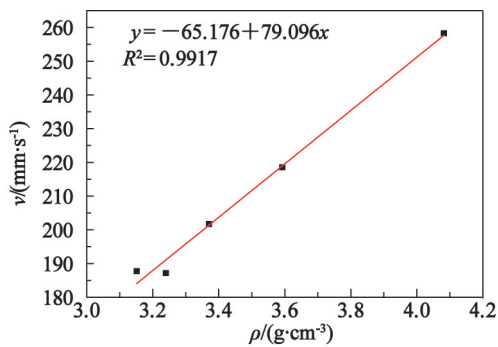


图 4 平均压药密度与平均燃速的关系
Fig.4 Relationship between average charging density and average burning rate

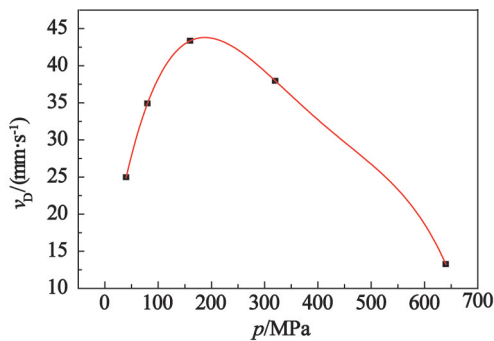


图 5 压药压力与燃速标准差的关系
Fig.5 Relationship between loading pressure and standard deviation of burning rate

2.2 结果分析

由图 2 可知,压药压力在 40 ~ 640 MPa 范围内变化,对应的平均压药密度为 3.15 ~ 4.08 g/cm³,平均压药密度随压药压力的增大而增大,二者呈良好的线性关系。40 ~ 640 MPa 范围内,压药压力增大,延期药剂颗粒之间孔隙率减小,延期药剂颗粒之间接触更加紧密,压药密度随之增大。

图 3 中,平均燃速与压药压力呈线性增加的关系。分析原因,可燃剂 Se、Si 的硬度较小,随着压力的增大,可燃剂颗粒被压碎,破裂为更小的颗粒,将导致:

- 1)装药密度随压力的增大而增大,药柱结构更为致密;
- 2)可燃剂颗粒破裂,增大了颗粒的比表面积,氧化剂与可燃剂接触更充分;
- 3)Se、Si 与氧化剂接触,界面处发生扩散作用,自然氧化,表面生成阻碍传热的氧化膜。颗粒破碎,其内部未氧化的部分直接接触 Pb₃O₄,加剧燃烧过程的传热;

4)铝合金导热系数高达 121 ~ 151 W/(m · K),高于铁、铅等金属,装药密度随压力的增加而增大,同等体积燃烧放热量增多,管壳传递的热量也增多,加剧了未燃延期药的预热。

以上 4 点原因导致延期药燃烧过程传热加剧。硅系延期药以非均相的固-固、固-液反应为主^[5-6]:

1)Se、Si 表面生成氧化膜,表面活性降低。氧化膜把 Si、Se 和 Pb₃O₄ 隔开,Pb₃O₄ 分解出的氧需通过氧化膜扩散到 Si、Se 表面,燃烧才能进行下去。压药压力增大,可燃剂颗粒破裂,内部未氧化部分直接接触 Pb₃O₄,使原子的扩散运输容易进行;

2)传热增加,加剧了 Si、Se 和 Pb₃O₄ 晶体缺陷程度,缺陷在晶体结构中热振动加剧,并快速移动,促进传质和氧化还原反应的发生^[7]。

以上 2 点原因加剧延期药燃烧过程中的传质。根据 Mclain^[8] 提出的药层再点火燃烧模型和 Rose^[9] 的研究结果:

$$P_1 = \Delta H \cdot \rho \cdot \frac{v}{T_{ig}}$$
 (1)

式中:P₁ 是传播指数;ΔH 为反应热;T_{ig} 为点火温度。

P₁ 是延期药在外界刺激点燃后,产生持续燃烧可能性的度量,与延期药的密度 ρ 和燃烧速度 v 密切相关。压药密度随压力的增加而增大,传热和传质相互促进,共同作用,使延期药传播燃烧的能力增大,平均燃速随之变快。

图 3 中,40 MPa 压药压力下燃速为 187.74 mm/s,略高于 80 MPa 下的 187.19 mm/s,其原因可能是:

- 1)40 MPa 压药压力较小,颗粒之间孔隙较大,药柱整体结构松散。燃烧产物压力达到药柱强度极限,使药柱破裂,增大燃烧延期药与未引燃延期药的距离,阻碍了传热;
 - 2)燃烧火焰及产物温度很高,部分通过松散药柱的孔隙喷射至未燃烧延期药表面,直接加热未燃烧延期药;
 - 3)延期药为微负氧平衡,低压装药时颗粒之间孔隙掺杂的空气参与反应,使药剂间的氧化还原反应受到一定的影响,从而影响延期药的燃速。
- 上述 3 种情况相互作用、相互制约,造成延期药燃烧不稳定、燃速较高、燃烧时间飘移。

对比图 3、图 4 可知,压药压力和平均压药密度对平均燃速的影响规律一致。原因是:压药压力对延期药平均燃速影响的本质是压药压力的变化导致

压药密度的变化。

燃速标准差反应各组延期药的延期精度,其值越小延期精度越好。由图 5 可知,试验范围内延期精度从 40 MPa 开始下降,160 MPa 左右延期精度最低,之后又逐渐升高,在 640 MPa 压药压力下延期精度最高。40 ~ 160 MPa 压力范围内,装药密度较小,孔隙率大,燃烧气体易渗透到孔隙中形成对流燃烧、振动燃烧等非平行层、非稳态燃烧^[10],秒量漂移严重,精度不高。160 ~ 640 MPa,孔隙率减小,传热、传质加剧,以平行层燃烧方式稳定传播;延期精度随压力的增大而增大。

3 结 论

1) 硅系延期药压药压力在 40 ~ 640 MPa 范围内变化,对应的平均压药密度变化为 3.15 ~ 4.08 g/cm³,平均压药密度随压药压力的增大而增大,二者呈良好的线性关系。

2) 试验压力范围内,硅系延期药压药压力与平均燃速呈线性关系。80 ~ 640 MPa 压药压力增大,传热、传质加剧,燃烧反应加剧,平均燃速随之增大;40 MPa 压药压力下燃速为 187.74 mm/s,略高于 80 MPa 下的 187.19 mm/s。

3) 40 ~ 640 MPa 压力范围内,硅系延期药压药压力对延期药平均燃速影响的本质是压药压力的变化导致压药密度的变化,压药密度导致燃速的变化,压药压力和压药密度对燃速的影响规律一致。

4) 试验压力范围内,硅系延期药的延期精度从 40 MPa 开始降低,160 MPa 左右延期精度最差,之后又逐渐升高,640 MPa 压药压力下延期精度最高。

参 考 文 献

- [1] 谢兴华. 起爆器材[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2009:171-183.
- [2] 张建富,胡延臣. 延期药粒度级配对延期精度的影响[J]. 含能材料,2014,22(4):84-88.
- [3] 曾寿礼,郑思友. 锆粉对硅系延期药燃速的影响[J]. 煤矿爆破,2015(3):23-25.
- [4] 张致魁. 硼系延期药燃烧时间与配比的关系探讨[J]. 火工品,2004(4):38-41.
- [5] 孙玉玲. 延期药燃烧特性的表征方法的研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2007.
- [6] 宋薇娜. 热电偶法测量硅系延期药燃烧温度的研究[J]. 爆破器材,2013,42(2):41-43.
- [7] 劳允亮,盛涤伦. 火工药剂学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2011:260-284.
- [8] 麦克莱恩 J. H. 烟火学[M]. 张丙辰,等,译. 北京:国防工业出版社,1986.
- [9] ROSE J E. Flame propagation parameters of pyrotechnic delay and ignition compositions[R]//Report IHMR 71-168, Naval ordnance station, Indian Maryland, 1971.
- [10] 韩体飞,钟帅,张涵,等. 微气体延期药柱燃烧传播与装药密度的关系[J]. 煤炭技术,2014,33(11):282-284.
- [11] ZHANG J F, HU Y C. Effect of particle gradation of delay composition on delay precision[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2014, 22(4):84-88.
- [12] ZENG S L, ZHENG S Y. Relationship between zirconium powder and deflagration velocity of silicon delay composition[J]. Coal Mine Blasting, 2015(3):23-25.
- [13] ZHANG Z K. Discuss on the relation between the burning time and the formulation of boron type delay composition[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2004(4):38-41.
- [14] SUN Y L. Study of combustion characteristics method of the delay composition[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2007.
- [15] SONG W N. Measuring the burning temperature of silicon delay composition with thermocouple[J]. Explosive Materials, 2013, 42(2):41-43.
- [16] LAO Y L, SHENG D L. The science of initiating explosives and relative composition[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011:260-284.
- [17] HAN T F, ZHONG S, ZHANG H, et al. Relationship between combustion propagation and charging density of columnar gasless delay composition[J]. Coal Technology, 2014, 33(11):282-284.