

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.02.011

# 气流粉碎硅粉在硅系延期药中的应用\*

伍富全

四川省宜宾威力化工有限责任公司(四川宜宾,644600)

[摘 要] 文章对气流粉碎硅粉、球磨硅粉和高纯硅粉进行性能对比。选择气流粉碎硅粉,研究其配方、粒度、混药时间等参数对延期药性能的影响。结果表明:气流粉碎硅粉纯度较高,粒度分布最集中,延期精度最高,可以较好地满足硅系延期药的要求;不同粒度的气流粉碎硅粉可以用于不同燃速的延期药;在快燃速硅系延期药中,不加三硫化二锑能显著提高产品的延期精度。

[关键词] 气流粉碎硅粉;粒度分布;硅系延期药;延期精度

[分类号] TJ510;TD235.22+2

## 引言

硅系延期药的主要成分为硅粉、铅丹、三硫化二锑等,燃速较快,可调延期时间范围较广,延期精度高<sup>[1]</sup>,成本低,工艺性好。硅粉是硅系延期药的主要可燃剂,其纯度、粒度大小和粒度分布状态对延期时间影响显著,目前一般采用机械球磨硅粉或高纯硅粉进行生产。球磨硅粉的缺点是生产周期长,能耗大<sup>[1]</sup>,噪音大,效率低,球磨出来的硅粉纯度低<sup>[2]</sup>,粒度分布不集中。高纯硅粉纯度高,但粒度分布范围大,且价格昂贵。

气流粉碎硅粉是将干燥、净化后的压缩空气通过特殊的拉瓦尔喷管,加速成具有一定速度的气流。气流喷出后,带动物料做高速运动,使物料相互碰撞、摩擦,实现粉碎。被粉碎的物料随气流运动到分级区,在离心力作用下,达到一定细度要求的物料由收集器收集,达不到要求的再回到粉碎室继续粉碎,直至粉碎到所需的细度后被收集<sup>[3]</sup>。

气流粉碎硅粉具有纯度高、粒度细、分布窄、精度高、均匀性与分散性好等特点<sup>[4]</sup>;气流粉碎工艺,其生产能力大、自动化程度高,生产的产品价格适中。笔者考察了气流粉碎硅粉、球磨硅粉、高纯硅粉的纯度、粒度和延期精度,优选出气流粉碎硅粉进行延期药配方试验,并讨论了延期药的安定性,为气流粉碎硅粉在硅系延期药的深入研究提供参考。

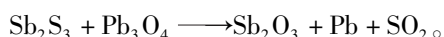
## 1 配方设计思路

硅和铅丹延期药 3 个阶段的反应为:



反应生成物有一氧化铅,在延期药的反应温度下呈气态<sup>[2]</sup>。由于气体生成物对燃烧稳定性有影响,因此,可燃剂硅粉应过量,即配方需设计为负氧平衡,以减少气态生成物。降低燃速是通过增加硅粉含量实现的,多余的硅粉起热沉作用。

如果燃速更低一些,只增加硅粉含量已不能满足持续燃烧所需的热量,需要用三硫化二锑等参与的缓燃剂来降低燃速,含有三硫化二锑的延期药还可能存在产生二氧化硫气体的反应:



生成物二氧化硫气体对燃烧稳定的影响巨大。因此,在延期药配方的设计上,一是要保证配方处于负氧平衡,减少气态产物的产生;二是低段别只用硅粉和铅丹来调节燃速,高段别加三硫化二锑等来调节燃速。

## 2 试验材料与仪器

气流粉碎硅粉:粒径 0.82、5.10、10.41  $\mu\text{m}$ ,过 200 目筛。

球磨硅粉:粒径 2.97  $\mu\text{m}$ ,过 200 目筛。

高纯硅粉:粒径 10.17  $\mu\text{m}$ ,过 200 目筛。

铅丹:粒径 1.18  $\mu\text{m}$ ,过 200 目筛。

三硫化二锑:粒径 2.70  $\mu\text{m}$ ,过 200 目筛。

仪器:winner2000 激光粒度分析仪;ZBS9601 智能爆速测量仪。

## 3 硅粉对比

### 3.1 硅粉纯度

硅的纯度越高,秒量精度越好<sup>[2]</sup>;一般采用纯

\* 收稿日期:2015-06-29

作者简介:伍富全(1978~),男,工程师,主要从事民爆器材及爆炸技术研究。E-mail:wfquan146@sohu.com

度 > 98% 的硅粉即可满足纯度要求<sup>[2]</sup>。表 1 是 3 种常用硅粉纯度的对比。不同种类的硅粉,其纯度差异较大,气流粉碎硅粉和高纯硅粉的纯度较高,球磨硅粉由于长时间球磨过程中带入杂质,硅粉纯度下降较大。

表 1 硅粉纯度对比

Tab. 1 Comparison of silicon powder purity

硅粉种类	气流粉碎硅粉	球磨硅粉	高纯硅粉
硅粉纯度/%	99.5	89.6	99.9

3.2 硅粉粒度

将过 200 目筛的气流粉碎硅粉、球磨硅粉、高纯硅粉用激光粒度分析仪进行粒度对比。图 1 为气流粉碎硅粉粒度分布曲线,其粒度分布集中,两端的粒度分布具有较好的对称性,过筛时筛上无颗粒物;图 2 中,球磨硅粉粒度分布范围较大,且有两个粒度分布较集中的点,对称性较差,过筛有少量颗粒物;图 3 中,高纯硅粉粒度分布范围大,粒度由小到大呈递增分布,无对称性,过筛后粒度呈断崖式分布,筛上有较多颗粒物。

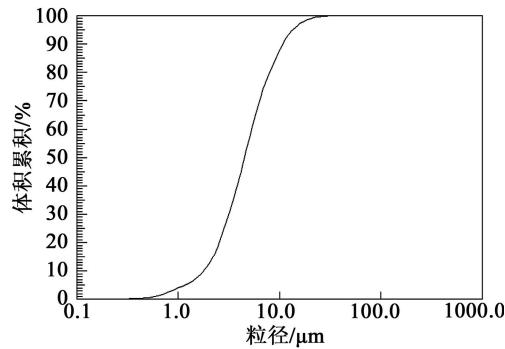


图 1  $D_{50} = 5.10\text{ }\mu\text{m}$  气流粉碎硅粉粒径-体积累积曲线  
Fig. 1 Size-volume accumulation curve of air milling silicon powder of  $D_{50} = 5.10\text{ }\mu\text{m}$

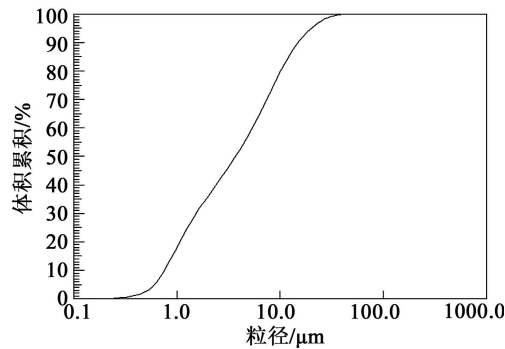


图 2  $D_{50} = 2.97\text{ }\mu\text{m}$  球磨硅粉粒径-体积累积曲线  
Fig. 2 Size-volume accumulation curve of ball milling silicon powder of  $D_{50} = 2.97\text{ }\mu\text{m}$

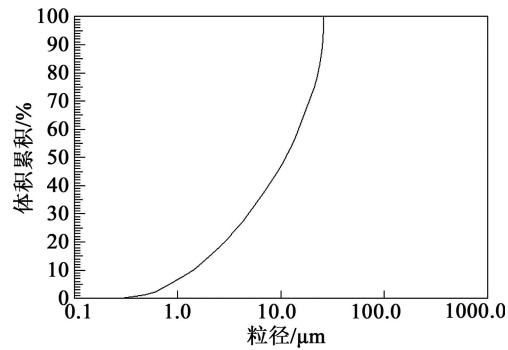


图 3  $D_{50} = 10.17\text{ }\mu\text{m}$  高纯硅粉粒径-体积累积曲线  
Fig. 3 Size-volume accumulation curve of high purity silica fume of  $D_{50} = 10.17\text{ }\mu\text{m}$

4 试验方案及结果

4.1 硅粉种类对延期精度的影响

为了对比 3 种硅粉对延期时间及精度的影响,使用 3 种硅粉按相同条件混制延期药。气流粉碎硅粉粒径为  $5.10\text{ }\mu\text{m}$ ,球磨硅粉粒径为  $2.97\text{ }\mu\text{m}$ ,高纯硅粉粒径为  $10.17\text{ }\mu\text{m}$ 。由表 2 可以看出,气流粉碎硅粉由于纯度高,粒度分布集中,延期精度最好;球磨硅粉延期精度也可满足要求;高纯硅粉虽然纯度很高,但由于粒径大,粒度分布不集中,导致延期精度较差。

表 2 硅粉种类对延期精度的影响

Tab. 2 Effect of different kinds of silicon powder on accuracy of delay time

硅粉种类	平均秒量 $t$ /ms	极差 $R$ /ms	标准偏差 $S$
气流粉碎硅粉	24.4	2.5	0.7
球磨硅粉	25.1	3.7	1.2
高纯硅粉	33.5	8.9	2.6

4.2 气流粉碎硅粉配方对延期精度的影响

硅系延期药中一般用三硫化二锑等缓燃剂来调节燃速,三硫化二锑含量越高,燃速越慢,延期精度越差,甚至会造成瞎火<sup>[2]</sup>。所以在燃速较快的延期药中不加三硫化二锑,通过硅粉和铅丹的比例来调节燃速,一般配成负氧平衡。燃速较慢的延期药需要加入适量的三硫化二锑和硒粉来提高延期药的可靠性和延期精度。由表 3 和表 4 可以看出,对于燃速较快的延期药,不加三硫化二锑时延期精度更高;对于燃速较慢的延期药,加入适量的三硫化二锑和硒粉后可靠性更高。

4.3 气流粉碎硅粉的粒径对延期精度的影响

硅粉粒度对燃速和延期精度影响较大,为了得

表 3 三硫化二锑对延期精度的影响

Tab.3 Effect of antimony trisulfide on the delay precision

$w(\text{硅}):w(\text{铅丹}):w(\text{三硫化二锑})$	平均秒量 $t/\text{ms}$	极差 $R/\text{ms}$	标准偏差 $S$
40:60:0	78.6	8.0	2.1
18:64:18	77.2	12.5	3.1
50:50:0	110.3	10.3	2.7
17:67:16	107.5	13.8	3.6

表 4 气流粉碎硅粉在慢燃速延期药中的配方试验

Tab.4 Test of air milling silicon powder in delay composition with slow burning rate

$w(\text{硅}):w(\text{铅丹}):w(\text{三硫化二锑}):w(\text{硒})$	平均秒量 $t/\text{ms}$	极差 $R/\text{ms}$	标准偏差 $S$	备注
55:45:0:0	142.2	13.6	3.5	无瞎火
60:40:0:0	290.0	25.7	5.4	瞎火率 2%
16:65:15:4	238.9	24.5	5.7	无瞎火
15:62:19:4	636.5	49.2	11.4	无瞎火

到更快的燃速和更高的延期精度,一般用较细的硅粉来实现,但对于燃速较慢的硅系药,过细的硅粉不但燃速难以调节,配方偏离合理区间太远还易造成延期精度差,甚至瞎火。

表 5 为不同粒径的硅粉通过调整配方到相同燃速后的延期时间对比,燃速快的硅系药用粒度细的硅粉,燃速慢的硅系药用粒度较粗的硅粉能得到更好的延期精度和更高的可靠性。

表 5 气流粉碎硅粉的粒径对延期精度的影响

Tab.5 Effect of particle size of air milling silicon powder on the delay precision

硅粉平均粒径/ $\mu\text{m}$	平均秒量 $t/\text{ms}$	极差 $R/\text{ms}$	标准偏差 $S$	备注
0.82	31.7	2.7	0.8	无瞎火
10.41	32.5	4.1	1.7	无瞎火
0.82	425.8	36.2	9.6	瞎火率 4%
10.41	430.2	34.5	7.3	无瞎火

4.4 混药时间对延期精度的影响

采用滚筒球磨机,球料质量比 2:1,球的直径有 15、20、25 mm 3 种,混药介质为工业酒精,转速 60 r/min。由表 6 可以看出,混药时间加长,平均燃速增大,延期精度提高,达到一定的混药时间之后,延期精度变化缓慢,混药时间在 12 h 以上,性能趋于稳定。

4.5 延期药的安定性

硅系延期药具有自发氧化还原反应扩散模型,铅丹与硅粉的氧化还原反应在硅粉表面形成的二氧化硅膜,在达到稳定厚度后反应停止,应把刚生产出

表 6 混药时间对延期精度的影响

Tab.6 Effect of mixing time of air milling silicon powder on the delay precision

混药时间/h	平均秒量 $t/\text{ms}$	极差 $R/\text{ms}$	标准偏差 $S$
4	87.6	19.4	4.5
8	79.5	14.2	3.1
12	76.6	10.1	2.3
16	72.1	9.6	2.1
20	66.7	9.8	2.2

来的延期药储存一定时间后再使用<sup>[5]</sup>。而提高硅系延期药的储存稳定性,关键是要解决硅系延期药的吸湿问题<sup>[6]</sup>。

- 提高延期药的安定性一般采用以下 3 种措施:
- 1)用化学或物理的方法使可燃剂粒子表面包覆一层惰性保护层;
  - 2)除去药剂中的水分,即尽量干燥;
  - 3)隔绝药剂和空气,使产品密封良好。

为了提高延期药的安定性,一般同时采用这 3 种方法<sup>[7]</sup>。另外,根据延期药燃速随时间的变化特点,延长储存时间,在药剂储存相对稳定后再使用。具体做法为:

- 1)适当提高黏合剂含量,隔绝空气的同时提高延期药流散性,从而提高装药均匀性。
- 2)降低延期药水分含量,水分控制在 0.05% (质量分数)以内,甚至更低。
- 3)保温、长时间储存是为了进一步降低水分含量,使硅粉表面的反应基本停止。在一定温度条件下,延期药储存时间不低于 180 d;铅延期索储存期不低于 60 d;对于延期管,由于段别已固定,必须在

3 d 内完成装配,减少药剂吸潮。

表 7 为经过安定性处理的延期药装配成导爆管雷管模拟储存试验的结果。模拟储存时间越长,雷管的秒量越高,延期精度略有下降,但仍符合标准要求,没有出现瞎火失效现象。

表 7 雷管模拟储存试验

Tab. 7 Simulation storage test of detonator			
模拟储存时间/a	平均秒量 t/ms	极差 R/ms	标准偏差 S
0	242.2	31.2	6.5
1	258.6	26.4	5.8
2	265.5	34.4	7.1

5 结论

- 1)气流粉碎的硅粉纯度高,粒度选择范围大,粒度分布集中,是硅系延期药较理想的可燃剂。
- 2)使用气流粉碎硅粉的硅系延期药在燃速低时宜用硅和铅丹来调节燃速,在燃速高时可加适量的三硫化二锑等缓燃剂。
- 3)宜选用不同粒度的气流粉碎硅粉来混制不同燃速的硅系延期药,粒度细的硅粉混制燃速快的延期药,粒度较粗的硅粉混制燃速慢的延期药。
- 4)硅系延期药水分含量控制在 0.05% (质量分数) 内,保温、长时间储存延期药和延期索后,其秒量稳定性仍然较好。

参 考 文 献

[1] 吴幼成,宋敬埔. 延期药技术综述[J]. 爆破器材, 2000,29(2):23-27,39.  
WU Y C, SONG J P. Review on the technology of delay composition[J]. Explosive Materials, 2000, 29 ( 2 ) : 23-

27,39.  
[2] 刘自钊,蒋荣光. 工业火工品[M]. 北京:兵器工业出版社,2003: 216-252.  
LIU Z T, JIANG R G. Industrial pyrotechnics[M]. Bei-jing:Chinese Weapon Industry Press, 2003: 216-252.  
[3] 王战宏,王莉. 气流粉碎技术及应用[C]//第八届全国颗粒制备与处理学术和应用研讨会论文集. 银川, 2007:189-191.  
[4] 蔡艳华,马冬梅,彭汝芳,等. 超音速气流粉碎技术应用研究新进展[J]. 化工进展,2008,27(5):671-674,714.  
CAI Y H, MA D M, PENG R F, et al. New research progress of supersonic speed airflow grinding technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2008, 27(5):671-674,714.  
[5] 颜声龙,张涵,何杰,等. 铅丹-硅系延期药贮存中的化学反应机理[J]. 火炸药学报,2014,37(2):86-90.  
YAN S L, ZHANG H, HE J, et al. Chemical reaction mechanism of the stored silicon type delay composition [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2014,37(2):86-90.  
[6] 郑思友,翟廷海,夏斌,等. 硅系延期药贮存稳定性的热动力学研究[J]. 煤矿爆破,2010(3):14-17.  
ZHENG S Y, ZHAI T H, XIA B, et al. Research on ther-mokinetics of the storage stability of silicon type delay composition[J]. Coal Mine Blasting,2010(3):14-17.  
[7] 陈文基,陈姗姗,周桂松,等. Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 对硅系延期药稳定性的影响[J]. 爆破器材,2014,43(6):39-42.  
CHEN W J, CHEN S S, ZHOU G S, et al. Effect of Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> on the stability of silicon-based delay composition[J]. Ex-plosive Materials,2014,43(6):39-42.

Application of Air Milling Silicon Powder in the Manufacture of Si-series Delay Composition

WU Fuquan

Sichuan Yibin Weili Chemical Co.,Ltd. (Sichuan Yibin,644600)

[ABSTRACT] Performances of air milling silicon powder, ball milling silicon powder and high purity silica fume were analyzed. Air milling silicon powder was selected to examine the effect of its formulation, particle size and mixing time on the performances of delay composition. Experiment results indicate that, for air milling silicon powder, the purity is moderate, the size distribution is the most concentrated and the delay accuracy is the highest, which are better meet requirements of the manufacture of Si-series delay composition. Air milling silicon powder with different particle size can be used for Si-series delay composition of different burning rate. In the absence of antimony trisulfide the delay accuracy of the high-latency Si-series delay composition can be remarkably improved.  
[KEY WORDS] air milling silicon powder; size distribution;Si-series delay composition; delay accuracy