

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.03.007

# 爆炸复合现场混装炸药工艺参数研究\*

孙大为 熊代余 龚兵 孙光 李国仲  
北京矿冶研究总院(北京,100160)

[摘要] 针对以成品炸药改性加工制备爆炸焊接专用炸药的复杂工艺,提出并成功开发了一种“多孔粉状铵油冷混”新工艺,仅采用多孔粒状硝酸铵、密度调节剂和柴油3个组分,在国内外首次实现了金属板材爆炸复合加工专用炸药的现场混装,结合配套新型现场混装炸药的研制,解决了粉状物料在混装车料仓中容易蓬料成拱、不易输送的工艺问题,实现了炸药配方及成套工艺技术的工业化应用。

[关键词] 爆炸复合;低爆速;现场混装炸药

[分类号] TD235.2+1

## 引言

低爆速爆炸焊接炸药是金属板材实现爆炸复合的能量加载源,除要求炸药具有较低的爆速外<sup>[1-3]</sup>,还要求具有较低的堆积密度、爆温及合适的感度,现行的成品包装炸药难以满足要求。对于低爆速爆炸焊接炸药的研究历来受到研究人员的重视,一直以来,研究工作主要集中在2#岩石炸药、粉状铵油炸药、膨化硝酸铵炸药等粉状成品炸药的改性加工上<sup>[4-7]</sup>,工艺复杂,作业安全性差,人工劳动强度大,运输、仓储时经常出现吸潮结块问题,给爆炸复合作业带来较大安全隐患与麻烦。

针对上述问题,提出将现场混装炸药技术引入爆炸复合专用炸药制备与工程应用领域,以最简化的组分,连续自动化的生产方式,现场加工制备爆炸复合专用炸药,省去传统成品炸药运输、仓储环节,实现安全高效、质优价廉爆炸复合专用炸药的现场混装。

本文主要介绍爆炸复合现场混装炸药的配方、性能和工艺技术。

## 1 爆炸复合现场混装炸药工艺和配方设计

### 1.1 设计原则

根据爆炸力学基本理论,金属板材爆炸复合实现的必要条件是: $\rho_H C_H < \rho_1 C_1 < \rho_2 C_2$  (H、1、2分别表示炸药爆轰C-J面、复板、基板)。其中, $\rho_H$ 为C-J面炸药密度(堆积密度); $\rho_1$ 和 $\rho_2$ 为金属材料的密度; $C_H$ 为爆轰波传播速度; $C_1$ 和 $C_2$ 为金属材料中的声速。同时,C-J面爆轰波阻抗与炸药爆速 $D$ 关系为:

$$\lg D \propto \lg(\rho_H C_H)$$

可见,金属板材爆炸复合炸药的关键,是控制炸药爆速 $D$ ,进而控制 $\rho_H C_H$ ,满足 $\rho_H C_H < \rho_1 C_1 < \rho_2 C_2$ 。

理论计算和实践经验表明,当板材呈平行几何结构爆炸复合时, $D = (1/2 \sim 2/3) C_x$ , $C_x$ 为两种金属中声速较小者<sup>[8]</sup>;当板材呈预制角几何结构爆炸复合时, $D = (1/2 \sim 2/3) v$ , $v$ 为基板、复板碰撞点的速度<sup>[9]</sup>。

对常用金属材料,一般 $D$ 为2 000~3 000 m/s。此外,炸药还需要具有合适的感度(单发8#工业电雷管)和堆积密度(0.5~0.6 g/cm<sup>3</sup>),保证炸药的稳定起爆和焊接能量。

### 1.2 技术方案

1)对多孔粒状硝酸铵进行粉碎,保持其多孔、微孔(纳米量级)特性和冷混吸油工艺特点制备“多孔粉状硝酸铵”,以此保障成品炸药的感度和爆轰性能。

2)充分考虑与“多孔粉状硝酸铵”的相容性,选择合适的密度调节剂,并实现螺旋输送过程的快速、均匀掺混,保证炸药的低密度。

3)以“多孔粉状硝酸铵”与密度调节剂的混合物作为车载干料,实现爆炸复合低爆速、低密度专用炸药的现场混制。

## 2 试验研究

### 2.1 多孔粉状硝酸铵粒径分布对成品炸药爆速的影响

表1为不同粉碎工艺参数条件下获得的“多孔粉状硝酸铵”细度分布及其制备炸药性能试验结

\* 收稿日期:2013-12-19

作者简介:孙大为(1982~),男,硕士,工程师,主要从事乳化炸药工艺技术的研究与开发。E-mail:sundawei@bgrimm.com

表 1 不同细度硝酸铵制备炸药性能测试

Tab. 1 Performance test of explosives containing ammonium nitrate with different particle sizes

编号	粉碎机频率/Hz	硝酸铵细度分布/%			平均爆速/(m·s <sup>-1</sup> )	爆速测试条件
		>20 目	20~40 目	<40 目		
1	25	55.3	30.1	14.5	2294	φ50 mmPVC
2	28	40.0	35.0	25.0	2561	φ50 mm PVC
3	30	42.0	36.0	22.0	2580	φ50 mm PVC
5	35	25.6	39.8	34.5	1841	φ32 mm 纸筒
6	40	19.6	36.4	44.0	2033	φ32 mm 纸筒
7	45	4.8	35.5	59.7	2214	φ32 mm 纸筒
8	50	2.7	31.4	65.9	2311	φ32 mm 纸筒

注:质量分数分别为:多孔粉状硝酸铵 90%、密度调节剂 4.5%、柴油 5.5%。

果。图 1 是多孔粉状硝酸铵粒径分布随粉碎机频率的变化趋势。

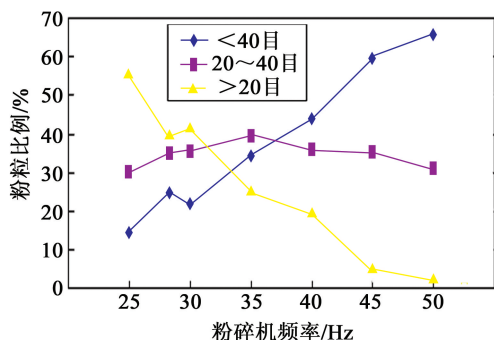


图 1 粉状硝酸铵粒径分布随粉碎机频率变化趋势

Fig. 1 Effect of crusher frequency on particle size distributions of powdery ammonium nitrate

由图 1 可看出,随着粉碎强度的增大,20~40 目的硝酸铵粉粒比例的变化幅度不大,基本在 30%~40% 之间,而小于 40 目和大于 20 目的粉粒比例则大幅变化。当粉碎机频率小于 35 Hz 时,大于 20 目的粉粒比例较高,当超过 35 Hz 时则是小于 40 目的粉粒比例显著增加。

因此,35 Hz 前后粉料制备炸药性能将有较大差异,由表 1 数据可见,35 Hz 前粉料制备炸药必须以 φ50 mmPVC 管进行强约束才能测得爆速,而 35 Hz 后粉料制备炸药则能够按标准以 φ32 mm 纸筒测得爆速,并随着小于 40 目细粉增多而爆速增大,并可控制在 1800~2500 m/s 的范围内。

分析原因是硝酸铵细粉增多,颗粒比表面积大幅增加,反应区化学反应速率增大,更有利于爆轰的传播。因此,应至少保证粉碎机工作频率 35Hz 以上,使硝酸铵粉粒足够细小,炸药具有较好的爆轰传播性。

## 2.2 粉碎机工作频率对成品炸药传爆性能的影响

由于爆炸复合的金属板材尺寸较大,对炸药的

传爆稳定性要求较高,为此,对现场混制成品炸药的传爆性能进行了试验研究。将炸药平铺在 0.5 m 宽的三合板上(药高约 3 cm),一端引爆后通过剩余板长计算传爆距离(结果向小取整)。不同的硝酸铵粉粒制备炸药的传爆性能见图 2,可见,35 Hz 前后粉料制备炸药传爆性能有显著差异,45 Hz、50 Hz 粉料制备炸药传爆性较好,可达 7 m,为保证炸药实际应用效果,最终选取了粉碎机满赫兹——50 Hz 下的多孔粉状硝酸铵进行炸药制备。

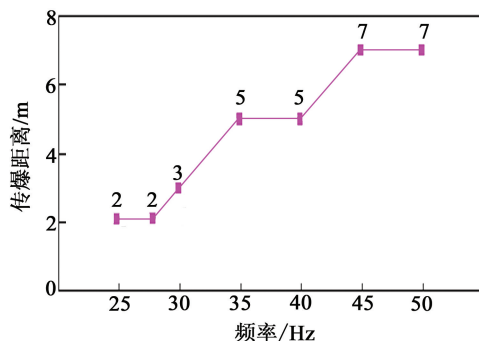


图 2 不同细度粉状硝酸铵制备炸药的传爆性能

Fig. 2 Detonation performance of explosives containing powdery ammonium nitrate with different particle sizes

## 2.3 密度调节剂添加量对成品炸药密度和爆速的影响

试验选择了一种与多孔粉状硝酸铵具有良好相容性和互混性的密度调节剂,实现了现场混装成品炸药的最终密度要求,图 3 为炸药堆积密度随密度调节剂添加量的变化情况,图 4 则是加入密度调节剂后炸药爆速的变化情况。

可见,加入较少量的密度调节剂能够有效地调节炸药堆积密度,当密度调节剂质量分数为 3.0%~4.5% 时,炸药堆积密度为 0.55~0.62 g/cm<sup>3</sup>,此时炸药爆速 2200~2400 m/s,密度和爆速都处于比

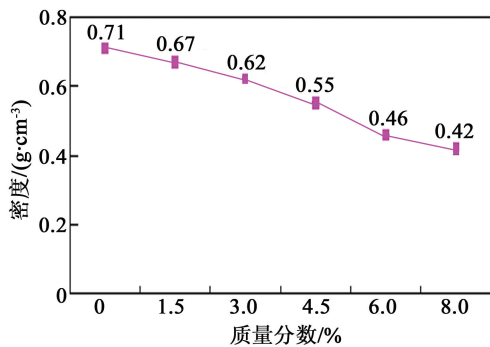


图3 密度随调节剂添加量变化曲线

Fig. 3 Curves of density changing with different quantities of regulator

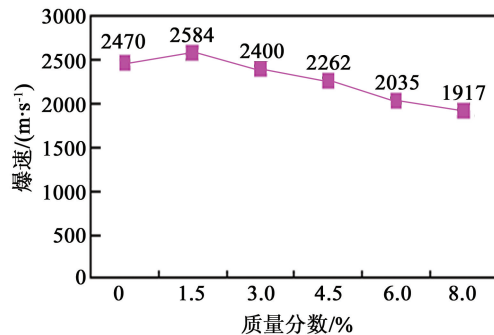


图4 爆速随调节剂添加量变化曲线

Fig. 4 Curves of detonation velocity changing with different quantities of regulator

较合适的范围内。

### 3 配套现场混装车工艺技术

多孔粉状硝酸铵与传统多孔粒状硝酸铵比较,所制备成品铵油炸药的感度、爆速、密度均匀性和传爆稳定性,能实现爆炸复合现场混装炸药的技术要求,均获得了理想效果,但其流散性却大幅下降。试验结果表明,40目筛下多孔粉状硝酸铵的静态堆积角已达到 $42^\circ$ ,吸潮后更是高达 $81^\circ$ ,采用传统多孔粒状铵油炸药现场混装车的料仓结构,多孔粉状硝酸铵在料仓中的结团、起拱情况十分严重,已不可能实现新型“多孔粉状铵油炸药”的现场混制。

对此,对配套现场混装车的料仓结构进行了创新性的工艺设计,成功研制旋转式料仓进出料系统,

摒弃传统多孔粒状铵油炸药现场混装车的固定料仓和底部螺旋出料结构,利用旋转料仓内部双螺旋叶片实现物料进料和出料。硝酸铵上料时,通过进料斗进入旋转料仓,旋转料仓通过正转将硝酸铵送至料仓底部。装药时,旋转料仓反转,将硝酸铵输送至出料仓中,通过出料仓螺旋将硝酸铵提升至混合螺旋,在混合螺旋中与柴油充分混合<sup>[10]</sup>,成功解决了硝酸铵吸潮结块带来的工艺问题。

### 4 地面站生产工艺流程

根据配方设计和试验结果,开发了如图5所示的爆炸复合现场混装炸药地面站生产工艺流程。多孔粒状硝酸铵经破碎机破碎、除尘后进入集料仓,与密度调节剂按比例进入螺旋输送机,边上输送边掺混,直接上装到混装车干料仓中,同时混装车根据生产需求量在地面站上装柴油。

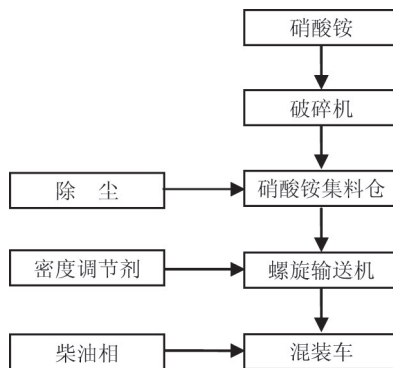


图5 地面站生产工艺流程

Fig. 5 Process in preparation station

### 5 爆炸复合现场混装炸药产品的性能

按照设计配方与生产工艺,所生产的炸药产品性能与目前常用的爆炸复合专用低爆速炸药的对比情况见表2。

结果表明,新型炸药配方设计及其配套工艺开发,研制的现场混装“多孔粉状铵油炸药”完全满足金属板材的爆炸复合技术要求,摒弃了传统爆炸复合专用成品炸药的复杂改性工艺流程,消除了成品炸药运输、贮存及爆炸加工作业环节的爆炸安全隐患,产品性能稳定可靠。

表2 爆炸复合现场混装炸药性能对比

Tab. 2 Performance comparison of on-site mixed ANFO for explosive cladding

炸药品种	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	爆速/ (m·s <sup>-1</sup> )	猛度/ mm	殉爆距离/ cm	不锈钢板复合率 (2 m×6 m)/%
现场混装低爆速炸药	0.50~0.60	2000~2400	7~10	≥2	100
四川某厂低爆速炸药	0.58~0.62	1900~2500	9~10	≥2	100
宜宾某厂低爆速炸药	0.40~0.45	2300~2500	9~10	≥2	100

## 6 结语

爆炸复合工程应用实践已经证明,“多孔粉状铵油冷混”新工艺,是实现金属板材爆炸复合(焊接)专用炸药现场混制的有效技术方案和工艺路线。基于该新型工艺技术及其配套现场混装炸药车,已于 2010 年 10 月在四川通达化工有限公司宜宾分公司建成了国内外第一个用于金属板材爆炸复合(焊接)的专用炸药现场混装作业系统,截至 2013 年 12 月已累计生产爆炸焊接专用铵油炸药 11130 t,试验开发成功的新型现场混装“多孔粉状铵油炸药”已获中国发明专利<sup>[11]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] 王继峰,王作鹏,朱福元,等. 低爆速爆炸焊接专用炸药试验研究[J]. 煤矿爆破,2011(4):19-22.
- [2] 聂云端. 爆炸焊接专用粉状低爆速炸药的研制[J]. 爆破,2005,22(2):106-108.  
Nie Yunduan. Development of cool explosive specially used in welding[J]. Blasting,2005,22(2):106-108.
- [3] 罗英杰,孙继林,铀铀,等. 低爆速爆炸焊接炸药稀释剂优选[J]. 煤矿爆破,2011(3):19-21.
- [4] 田建胜,陈青术. 爆炸焊接专用炸药实验研究[J]. 工程爆破,2008,14(3):59-62.  
Tian Jiansheng, Chen Qingshu. Experimental research on specialized detonator for explosive welding [J]. Engineering Blasting,2008,14(3):59-62.
- [5] 王勇,张越举,赵恩军,等. 金属爆炸焊接用低爆速膨化铵油炸药实验研究[J]. 含能材料,2009,17(3):326-329.

Wang Yong, Zhang Yueju, Zhao Enjun, et al. Experimental study on low detonation velocity expanding ANFO explosive used in metal explosive welding [J]. Chinese Journal Energetic Materials,2009,17(3):326-329.

- [6] 岳宗洪,李亚,韩刚. 爆炸焊接专用炸药的研究与应用[J]. 工程爆破,2011,17(2):73-78,88.  
Yue Zonghong, Li Ya, Han Gang. Research on special explosives for explosive welding and its application [J]. Engineering Blasting,2011,17(2):73-78,88.
- [7] 王喜,王凤英,张建仁,等. 粉状乳化炸药在爆炸焊接中的应用研究[J]. 工程爆破,2012,18(1):94-96.  
Wang Xi, Wang Fengying, Zhang Jianren, et al. Study on the application of powdery emulsion explosive in explosion welding [J]. Engineering Blasting,2012,18(1):94-96.
- [8] Muoson W O. Specialty explosives development [M]. Oxford: Clarendon, 1973.
- [9] 埃兹拉. 金属爆炸加工的原理与实践[M]. 张铁生,译. 北京:国防工业出版社,1981.  
Ezra A A. Principle and practice of the metallic explosive working [M]. Zhang Tiesheng, Translation. Beijing: National Defense Industry Press,1981.
- [10] 孙光,熊代余,龚兵,等. 粉状铵油炸药现场混装车的设计与应用[J]. 爆破器材,2013,42(5):27-30.  
Sun Guang, Xiong Daiyu, Gong Bing, et al. Design and application of powdery ammonium nitrate fuel oil explosive on site mixed loading truck [J]. Explosive Materials,2013,42(5):27-30.
- [11] 熊代余,马平,龚兵,等. 铵油炸药及其制造方法:中国,2009100839307[P]. 2012-01-25.

## Study on the Technological Parameters of On-site Mixed Explosives (SME) for Explosive Cladding

SUN Dawei, XIONG Daiyu, GONG Bing, SUN Guang, LI Guozhong  
Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy (Beijing, 100160)

[ABSTRACT] For complex technology preparing for welding dedicated explosives which is modified from finished explosives, a new process of “cool mixing of porous-powdered ANFO” was proposed and developed, in which only three components including porous granular ammonium nitrate, density regulator and diesel oil were used. Mobile manufacture unit (MMU) enabling on-site mixing metal sheet dedicated explosives cladding was achieved for the first time either domestically or abroad. Combined with the new on-site mixed explosives charging truck, the problem that powdery ammonium nitrate cannot transport well in the storage bin of the blend truck was solved, and the industrialized application of explosives formula and unitized technology was realized.

[KEY WORDS] explosive cladding; low detonation velocity; on-site mixed explosives

## 声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部