

文章编号: 1006-9941(2009)03-0326-04

## 金属爆炸焊接用低爆速膨化铵油炸药实验研究

王 勇, 张越举, 赵恩军, 刘 昕, 陈 磊, 阎 钧

(大连爆炸加工研究所, 辽宁 大连 116021)

**摘要:**将膨化硝酸铵与柴油按 94.5 : 5.5 质量比混制为铵油炸药, 并与混合稀释剂按不同质量比混合后, 以自然堆积状态和不同的铺设药厚, 测量混合炸药爆速和密度。结果显示, 当稀释剂含量从 20% 增加到 60% 时, 混合炸药的爆速(药厚: 30 mm)由  $3100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  降到  $2100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 炸药的密度也由  $0.615 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  增加到  $0.76 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (稀释剂含量: 20% ~ 50%); 稀释剂含量为 50% 的混合炸药, 当药厚在 25 ~ 50 mm 范围内时, 爆速保持在  $2300 \sim 2360 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之间。用含 35% 稀释剂的混合膨化铵油炸药对 SS304/16MnR 进行的爆炸焊接试验表明, 该混合炸药能够用于金属材料的爆炸焊接。

**关键词:**爆炸力学; 膨化铵油炸药; 低爆速; 混合炸药; 爆炸性能; 爆炸焊接

**中图分类号:** TJ55; TD235.21; O389

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.03.018

### 1 引 言

爆炸焊接专用炸药的研究一直以来都受到研究人员的高度重视。炸药的爆炸性能, 尤其是爆轰速度, 对爆炸焊接的工艺参数的选择有很大影响, 实践表明, 爆轰速度越高, 复合材料之间的“可焊性窗口”越窄, 尤其是复层材料厚度较大的情况更是对炸药爆速提出了高要求。我国爆炸焊接的实践中广泛采用了以硝酸铵炸药为主的工业炸药, 如 2<sup>#</sup>岩石炸药、粉状铵油炸药等。考虑到硝酸铵炸药存在易吸潮、结块等缺点, 孙业斌等<sup>[1]</sup>提出了在普通高爆速炸药 RDX、TNT 中加入稀释剂来降低炸药爆速的办法, 制成符合爆炸焊接要求的混合炸药。由于低爆速铵油炸药的爆轰感度较低, 为了确保混合炸药可靠地起爆和传爆, 余运辉<sup>[2]</sup>在铵油炸药中选用 TNT 和 RDX 作复合敏化剂, 并增加了密度调节剂, 获得了一种传爆性能可靠的低爆速爆炸焊接专用炸药。安立昌<sup>[3]</sup>以 2<sup>#</sup>抗水岩石硝酸铵炸药为主体, 进行了低爆速爆炸焊接炸药的配方设计研究, 田建胜等<sup>[4]</sup>也以 2<sup>#</sup>岩石硝酸铵炸药为主, 配制了用于铜/钢爆炸焊接的低爆速炸药。聂云端<sup>[5]</sup>以硝酸铵炸药为主体, 进行了爆炸焊接专用粉状低爆速炸药的研制, 并对影响爆轰参数的因素进行了讨论。近年来, 由南京理工大学研制的膨化硝酸铵炸药, 与粒状硝酸铵和多孔粒

状硝酸铵相比, 密度低, 爆速高, 感度、抗吸湿性和结块性能得到了很大的改善, 并通过耐冻膨化硝酸铵炸药的研究<sup>[6]</sup>, 解决了膨化硝酸铵炸药在北方寒冷的冬季使用的实际问题。膨化硝酸铵是对普通硝酸铵的升级换代, 其具有优异的特性<sup>[7]</sup>, 在不久的将来, 有望取代普通粉状、粒状和多孔状硝酸铵成为硝酸铵类炸药的主要成分。另外, 目前在爆炸焊接实践中大量使用的铵盐炸药, 由于含有 TNT, 即将被禁用。因此, 加紧研究配制膨化硝酸铵低爆速炸药, 调整其密度、爆速、感度等爆炸性能, 使其满足爆炸焊接对炸药的要求是当务之急。

本研究将按照配制低爆速炸药的方法, 在膨化铵油中掺入一定的密度和爆速调节剂, 使混合炸药的爆速在爆炸焊接期望的爆速范围内, 且其密度适中, 能够保证爆炸焊接中炸药驱动复板打击基板的能量和质量比的要求。

### 2 膨化铵油炸药的配制

将一定质量的膨化硝酸铵加入轮碾机中进行轮碾, 同时按照膨化硝酸铵与柴油质量比 94.5 : 5.5 加入柴油。轮碾混合 25 min 之后完成膨化铵油炸药的配制。当药厚为 30 mm 时, 纯膨化铵油炸药的爆速为  $3300 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这与一般爆炸焊接专用炸药爆速范围  $2000 \sim 3000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  存在差距。另外, 纯膨化铵油的密度为  $0.44 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 过低的炸药密度对于不锈钢/钢、镍/钢、铜/钢等常见复合材料的爆炸焊接是不利的, 一般希望炸药的密度为  $0.7 \sim 0.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ <sup>[2]</sup>。因此, 需要对膨化铵油炸药进行爆速和密度的调整。

收稿日期: 2008-12-02; 修回日期: 2009-03-12

作者简介: 王勇(1965-), 男, 高级工程师, 主要从事金属复合材料的爆炸焊接技术研究与新产品开发。

通讯联系人: 张越举, e-mail: zhangyueju2002@sina.com

### 3 混合炸药调节剂的选择

稀释剂的选择原则是能有效调节混合炸药的爆速,且在一定范围内炸药爆速对药厚不太敏感;稀释剂的加入要尽量不影响混合炸药的吸湿结块性能;另外,价格要低廉,来源广泛。目前广泛使用的工业稀释剂有珍珠岩、工业食盐、玻璃微珠等。珍珠岩和工业食盐的密度比膨化铵油的密度大,能够提高混合炸药的密度,而玻璃微珠的密度比膨化铵油的密度小,能够降低混合炸药的密度。从稀释剂对炸药的感度影响来说,珍珠岩和玻璃微珠都能一定程度上提高混合炸药的爆轰感度。从炸药混合均匀的角度考虑,由于珍珠岩的粒度比膨化铵油炸药的粒度大很多,在炸药存放、搬运和使用过程中珍珠岩颗粒容易偏聚,由此可导致炸药爆轰性能不稳定。工业食盐的粒度较细,能够很好地与膨化铵油炸药混合,在存放、搬运和使用过程中都不会发生偏聚的现象。因此,将工业食盐与玻璃微珠以不同的质量比混合为混合稀释剂,并以相同比例与膨化铵油炸药混合成为不同的混合炸药,然后对这些混合炸药进行对比试验。通过不同比例混合稀释剂的密度、对混合炸药吸湿性、抗结块性以及爆炸性能等方面的比较,确定了工业食盐与玻璃微珠的混合比例。经研究表明,我们所选择的混合稀释剂对铵油的吸湿性影响较其他盐类来说是比较小的,如30℃时纯铵油的吸湿点为59.4%,而铵油与混合稀释剂摩尔比为1:1时的吸湿点为56.0%。

### 4 稀释剂含量对膨化铵油炸药爆速的影响

将不同质量比的稀释剂混入膨化铵油炸药中,搅拌使之均匀,然后用导爆索法测量自然堆积条件下不同药厚时的爆速,结果见图1。由图1可见,混合炸药的爆速随着稀释剂含量的增加而降低,随着炸药厚度的增加而增加。比较图中两条曲线可以看出,随着稀释剂含量的增加,药厚对混合炸药爆速的影响逐渐降低。对于膨化铵油来说,本实验使用的混合稀释剂的含量在30%~40%之间时,混合炸药的爆速变化相对平缓。这一特点对实际操作中炸药混制时稀释剂比例的控制比较有利,也就是说,在这一区段,稀释剂比例的误差对混合炸药爆速的影响不大。实验中,将稀释剂的含量提高到60%,布药厚度为30mm时,混合炸药仍然能形成爆轰,且测得爆速为2100 m·s<sup>-1</sup>。这说明含有稀释剂的膨化铵油混合炸药具有较好的爆轰感度和传爆性能。

粉状铵油+膨化珍珠岩混合炸药的爆速对药厚比较敏感,由实践经验可知,正常情况下药厚每增加5mm,其爆速就增加约100 m·s<sup>-1</sup>。为了掌握膨化铵油+稀释剂混合炸药的爆速与药厚的关系,在变药厚的条件下对稀释剂含量为50%的混合炸药进行了爆速测量,结果如图2所示。

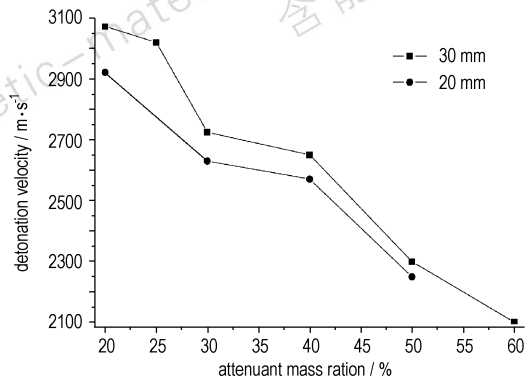


图1 混合炸药爆速随稀释剂含量变化曲线

Fig. 1 Curves of detonation velocity of compound explosive vs mass ratio of attenuant

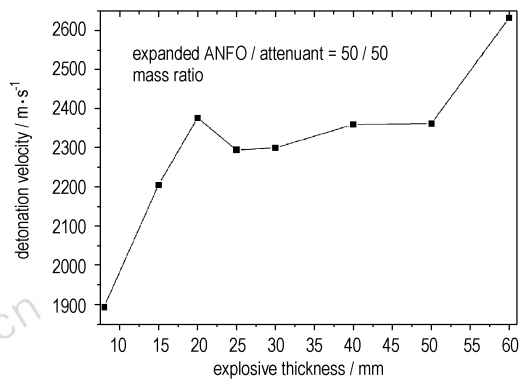


图2 含50%稀释剂混合炸药的爆速随装药厚度的变化曲线

Fig. 2 Curve of detonation velocity of compound explosive with 50% attenuant content vs loading thickness

图2显示,当药厚在25~50mm之间时,稀释剂含量为50%的膨化铵油混合炸药(简称50/50炸药)的爆速变化不大,处于2300~2360 m·s<sup>-1</sup>范围内。这表明,在这段药厚变化范围内,50/50炸药的爆速受药厚的影响很小。这与粉状铵油掺珍珠岩混合炸药爆速对药厚敏感的特点形成了鲜明对比。但值得注意的是,药厚为20mm时,50/50炸药的爆速出现了与其它数据显示的趋势不一致的特点(见图2)。为了检验图中药厚20mm处数据的可靠性,又进行了两次重复试验。试验结果为2361 m·s<sup>-1</sup>和2365 m·s<sup>-1</sup>。这说明,图中的数据2377 m·s<sup>-1</sup>是可靠的。目前我们还无法对此进行解释。药厚为8mm时的爆速是

1893 m · s<sup>-1</sup> (见图 2), 说明 50% 稀释剂含量的膨化铵油炸药仍然具有相当高的感度, 其爆轰的临界药厚小于 8 mm。

炸药的密度是爆炸焊接的重要参数之一。为了掌握混合炸药的密度, 对各种不同稀释剂含量的炸药, 在一定体积的容器中, 以自然堆积状态测量密度, 结果如图 3 所示。可以看出, 随着稀释剂含量的增加, 炸药的密度逐渐增大。当稀释剂含量在 20% ~ 50% 间变化时, 炸药密度在 0.615 ~ 0.76 g · cm<sup>-3</sup> 之间变化。当稀释剂含量超过 35% 时, 混合炸药的密度超过了 0.7 g · cm<sup>-3</sup>。

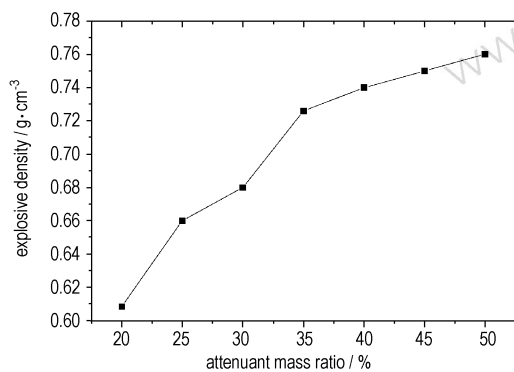


图 3 混合炸药密度随稀释剂含量变化曲线

Fig. 3 Curve of compound explosive density vs mass ratio of attenuant

## 5 爆炸焊接试验

本单位大量实验结果表明, 当炸药爆速在 2000 ~ 2800 m · s<sup>-1</sup> 时, 不锈钢 1Cr18Ni9Ti 与 Q253 钢之间的焊接界面呈现类似正弦波形态, 而这种形态结合的复合材料界面力学性能最好。对照炸药爆速和炸药密度, 选择稀释剂含量为 35% 的膨化铵油混合炸药, 设置药厚 30 mm, 对 SS304 不锈钢与 16MnR 进行爆炸复合。复合板尺寸为: (3 + 12) mm × 300 mm × 6800 mm。爆炸后对复合板超声波探伤表明, 贴合率达到 100% 复合。对复合板进行 920 °C 正火处理, 并在距离起爆点 100, 2000, 4000, 6000, 6700 mm 等不同部位进行取样检测力学性能, 结果见表 1。

压力容器用爆炸不锈钢复合板标准 JB4733 - 1996 中 B1 的要求如下:

$$\tau_b \geq 210 \text{ MPa}; \sigma_s \geq \frac{\sigma_{s1} T_1 + \sigma_{s2} T_2}{T_1 + T_2};$$

$$\sigma_b \geq \frac{\sigma_{b1} T_1 + \sigma_{b2} T_2}{T_1 + T_2}, \sigma_b \leq \sigma_{b2 \max} + 35; \delta_5 \geq \delta_{b2}。$$

式中,  $\sigma_{s1}$  和  $\sigma_{s2}$  分别为复材和基材屈服点 (或屈服强度) 标准值, MPa;  $\sigma_{b1}$  和  $\sigma_{b2}$  分别为复材和基材抗拉强

度标准下限值, MPa;  $\sigma_{b2 \max}$  为基材抗拉强度标准上限值, MPa;  $\delta_{b2}$  为基材标准值;  $\delta_5$  是标距为 5 倍直径时的伸长率;  $T_1$  和  $T_2$  分别为复层和基层厚度, mm。

对于基材 16MnR 来说,  $\sigma_{s2} = 345 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_{b2} = 510 \text{ MPa}$ , 上限为 640 MPa。对于 SS304 来说,  $\sigma_{s1} = 205 \text{ MPa}$ ;  $\sigma_{b1} = 515 \text{ MPa}$ 。

因此, 对于厚度为 (3 + 12) mm 的 SS304/16MnR 复合材料来说, JB4733 - 1996 中屈服和抗拉强度要求为:

$$\sigma_s \geq 317 \text{ MPa} \quad \sigma_b \geq 511 \text{ MPa}$$

对照表 1 可知, 爆炸复合板各项性能指标基本符合 JB4733 - 1996 标准要求 (No. 5  $\sigma_s$  为 315 MPa,  $\sigma_b$  为 511 MPa 不满足要求)。这说明, 本项工作所配制的低爆速混合炸药可以应用到普通不锈钢/钢爆炸复合上。另外, 我们已成功地将这种炸药应用在了铝/钢爆炸焊接上<sup>[8]</sup>。

表 1 SS304/16MnR 爆炸复合板力学性能

Table 1 The mechanical properties of SS304/16MnR explosive welding plate

sample No.	base plate of cladding plate			cladding plate			
	yield strength $\sigma_s$ / MPa	tensile strength $\sigma_b$ / MPa	elongation $\delta_5$ %	0 °C impact energy $A_{KV}$ / J	shear strength $\tau_b$ / MPa	bend testinturn	
						inturn $d = 3a$	excurvation $d = 4a$
1	320	525	31	120	270	180° good	180° good
2	325	520	32.5	134	250	180° good	180° good
3	320	510	33	152	305	180° good	180° good
4	325	510	33.5	130	295	180° good	180° good
5	315	515	33	132	305	180° good	180° good
6	360	545	35	160	276	180° good	180° good
7	325	515	33	110	310	180° good	180° good
8	335	515	34	112	285	180° good	180° good

## 6 结 论

(1) 膨化铵油混合炸药的爆速随稀释剂含量的增加而递减, 随炸药厚度的增加而增加, 增加的幅度随稀释剂含量的增加而降低; 稀释剂含量在 30% ~ 40% 之间时, 爆速的变化幅度较 0 ~ 30% 和 40% ~ 60% 区间平缓。

(2) 含 50% 稀释剂的混合炸药, 厚度在 25 ~ 50 mm 之间时, 爆速对药厚的变化不敏感, 基本保持在 2300 ~ 2360 m · s<sup>-1</sup> 范围内。

(3) 混合炸药的密度随稀释剂含量的增加而增加, 当稀释剂含量超过 35% 时, 混合炸药的密度可达到爆炸焊接期望的密度 (0.7 ~ 0.8 g · cm<sup>-3</sup>) 范围内。

(4) 爆炸焊接试验证明, 本项研究所制备的混合炸药可以应用到金属复合板的爆炸焊接生产中。

## 参考文献:

- [1] 孙业斌,张守中. 爆炸焊接用炸药的研究[J]. 爆破器材,1990,59(6): 10-13.  
SUN Ye-bin,ZHANG Shou-zhong. An experimental study on the explosives used in explosive bonding[J]. *Explosive Materials*,1990,59(6): 10-13.
- [2] 余运辉. 低爆速炸药研制[J]. 材料开发与应用,1994,9(6): 20-23.  
YU Yun-hui. Research and development of low detonation velocity explosives[J]. *Development and Application of Materials*,1994,9(6): 20-23.
- [3] 安立昌. 低爆速爆炸焊接炸药的配方设计[J]. 火炸药学报,2003,26(3): 68-69.  
AN Li-chang. The prescription design of low detonation velocity explosives used in explosive welding[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*,2003,26(3): 68-69.
- [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): 59-61.  
TIAN Jian-sheng,CHEN Qing-shu. Experimental research on specialized detonator for explosive welding[J]. *Engineering Blasting*,2008,14(3): 59-61.
- [5] 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 Yun-duan. Development of powder low detonation velocity explosives used in explosive welding[J]. *Blasting*,2005,22(2): 106-108.
- [6] 周新利,胡炳成,刘祖亮,等. 耐冻膨化硝酸铵炸药的制备[J]. 含能材料,2005,13(1): 49-51.  
ZHOU Xin-li,HU Bing-cheng,LIU Zu-liang,et al. Prepared freeze resistant expanded ammonium nitrate explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*,2005,13(1): 49-51.
- [7] 吕春绪. 膨化铵油炸药[M]. 北京: 兵器工业出版社,2001.
- [8] 王勇,张越举,赵恩军,等. 一种新型低爆速炸药爆炸焊接铝/钢的性能和表面质量问题分析[C]//中国工程爆破新技术II. 北京,2008: 615-618.

## Experimental Study on Low Detonation Velocity Expanding ANFO Explosive Used in Metal Explosive Welding

WANG Yong, ZHANG Yue-ju, ZHAO En-jun, LIU Xin, CHEN Lei, YAN Jun

(Explosive Working Research Institute of Dalian, Dalian 116021, China)

**Abstract:** The expanding ANFO explosive was produced by expanding ammonium nitrate (AN) and fuel oil (FO) with mass ratio of 94.5 : 5.5. To obtain low detonation velocity expanding explosive, commercial attenuant was blended into the expanding ANFO explosive. Then, the detonation velocity and density of compound explosive was measured on the condition of nature pile-up state and different loading thickness. Results show that detonation velocity of compound explosive declines from  $3100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  to  $2100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  when mass ratio of attenuant rises from 20% to 60% ( explosive loading thickness is 30 mm ), and the density of compound explosive rises from  $0.615 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  to  $0.76 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  when mass ratio of attenuant rises from 20% to 50%. The detonation velocity of compound explosive with 50% attenuant content is  $2300 - 2360 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , when the explosive loading thickness is 25 - 50 mm. SS304 cladding to 16MnR experiment was performed by using compound explosive with 35% attenuant content, and the results show that the compound explosive can be used in metal explosive welding.

**Key words:** explosion mechanics; expanding ANFO explosive; low detonation velocity; compound explosive; explosion property; explosive welding