

文章编号: 1006-9941(2013)03-0357-06

低爆速爆炸焊接乳化炸药的制备与性能

黄文尧, 张凯, 吴红波, 胡鑫, 王道阳, 申夏夏, 余燕

(安徽理工大学化学工程学院, 安徽淮南 232001)

摘要:为使乳化炸药的性能满足爆炸焊接用炸药的要求,采用乳胶基质与泡沫塑料和碳酸盐类矿物粉混合制得一种低爆速爆炸焊接乳化炸药。对该炸药的微观结构、流散性和机械感度进行了测试,研究了装药直径对炸药爆速的影响,并进行了不锈钢与钢板爆炸焊接实验。结果表明,该炸药颗粒内部含有空隙,颗粒形状极不规则,流散性好,撞击感度和摩擦感度均为0,当装填密度为 $0.81\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,炸药的猛度实测值为 9.71 mm ,当装药直径为 $16\sim 50\text{ mm}$ 时,爆速为 $1754\sim 2439\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,基本满足金属板材爆炸焊接的要求。

关键词:应用化学;低爆速乳化炸药;粒状;有机气泡载体;矿物粉;爆炸焊接

中图分类号: Tj55; O69

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.03.017

1 引言

随着现代科学技术和工业的快速发展,单一的金属或合金已很难满足其对材料综合性能的要求,采用爆炸焊接技术制成的金属复合材料在宇航、石油、化工、轻工、造船、电子、电力、冶金、机械、原子能等工业工程领域得到了广泛应用,作为爆炸焊接能源的低爆速炸药成为影响复合材料性能的重要因素^[1-2]。目前,国内外爆炸焊接用炸药主要是在膨化硝酸铵炸药、粉状改性铵油炸药、粉状乳化炸药等粉状类炸药在爆炸焊接现场掺入食盐、滑石粉、膨胀珍珠岩等稀释剂来制得低爆速爆炸焊接炸药^[3-8]。也有人将硝酸铵与燃料油和稀释剂等膨化制得性能优异的低爆速膨化铵油爆炸焊接炸药^[9]。但上述炸药生产能耗高,粉尘大,炸药在空气潮湿时易吸湿结块,在现场混拌稀释剂又增加安全隐患。虽然乳化炸药生产自动化程度高,生产环保,但乳化炸药不仅爆速高,而且外观呈胶状,粘度大,无法在爆炸复合板上快速均匀地布药。

因此,本研究选用一种泡沫塑料作为炸药的敏化剂,再辅以碳酸盐类矿物粉作为爆炸能量的稀释剂,并将其与乳胶基质混合分散,制得一种流散性好,易于均

匀布药,爆速低,能满足爆炸焊接用的低爆速爆炸焊接乳化炸药。

2 实验部分

2.1 样品制备

2.1.1 原料

硝酸铵,工业级,安徽淮南化工股份有限公司;硝酸钠,工业级,安徽华泰化工工业有限公司;2号复合蜡,南阳微晶蜡精细化工厂;T-152乳化剂,江南化工股份有限公司;泡沫塑料(敏化剂),自制;碳酸盐类矿物粉(稀释剂),自制;水为自来水。

2.1.2 仪器

搅拌机,常州国华电器有限公司;多功能混合器,霸州市双龙塑料五金厂。

2.1.3 炸药的制备

炸药的配制:准确称取硝酸铵 81 g ,硝酸钠 6 g ,加入 8 mL 水加热至 $110\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$,制得水相;准确称取2号复合蜡 3 g ,T-152乳化剂 2 g 加热至 $100\sim 105\text{ }^{\circ}\text{C}$,制得油相;在开启搅拌机条件下,将水相倒入油相中搅拌 2 min 制得乳胶基质。再准确称取泡沫塑料 3 g ,碳酸盐类矿物粉 35 g ,乳胶基质 62 g 分别倒入混药器中搅拌 1 min 后出料,冷却至 $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,即得低爆速爆炸焊接乳化炸药。

2.2 实验方法

颗粒形貌表征:用日本电子株式会社扫描电镜S-3000N观察炸药颗粒的结构特征。

收稿日期: 2013-01-05; 修回日期: 2013-02-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51074006);安徽省高等学校省级自然科学基金资助项目(KJ2013A102)

作者简介: 黄文尧(1964-),男,副教授,主要从事含能材料和爆炸加工的教学与科学研究。e-mail: wyhuang@aust.edu.cn

流散性测试:炸药的流散性测试方法通常有静止实验法、振动实验法、斜槽实验法和安息角试验法^[10], 本试验用量筒代替斜槽测试炸药的流散性, 即称取 380 g 样品倒入 500 mL 量筒中, 将量筒开口一端用透明胶带封堵后, 以一定倾角朝下固定在铁架台上, 再轻轻去掉透明胶带, 测量量筒中的样品完全流下时, 量筒的最小倾斜角度。

机械感度测试:摩擦感度采用 WM-1 型摩擦感度仪测试, 摆角 96°, 表压 4.9 MPa, 药量 25 mg, 温度 25 °C, 其他同 GJB772A-1997 方法 602.1; 撞击感度用卡斯特落锤仪测试, 锤重 10 kg, 落高 25 cm, 药量 50 mg, 温度 25 °C, 其他同 GJB772A-1997 方法 601.1。

猛度测试:由于爆炸焊接时, 炸药倒在复板上平铺一定的厚度, 炸药没有受压, 因此, 测猛度时, 炸药的密度为自然装填的密度即假密度, 其他同国标 GB12440-1990 炸药猛度试验-铅柱压缩法测试方法。

爆速测试:装药纸筒用不同直径的塑料管截成长度为 200 mm, 用报纸卷成三层的纸筒, 而炸药的密度为假密度, 其他同国标 GB/T 13228-1991 炸药爆速测试方法。

不锈钢与钢板爆炸焊接试验:将尺寸为 200 mm × 100 mm × 18 mm 的钢板作为基板, 尺寸为 210 mm × 110 mm × 2.5 mm 的不锈钢板作为复板, 用电砂轮按从粗到细把钢板和不锈钢板焊接表面打磨、抛光后用酒精进行擦洗。在爆炸碉堡内, 以砂土为基础, 按照表 1 钢与不锈钢的爆炸焊接参数, 依次按图 1 分别把基板、间隙物、复板、药框和炸药安装起来, 再把电雷管插到炸药中起爆, 即将钢板与不锈钢板焊接。用汕头市超声仪器研究所有限公司 CTS-22A 超声波探伤仪检测爆炸焊接质量。

3 实验结果与讨论

3.1 炸药颗粒的微观结构

低爆速爆炸焊接乳化炸药的 SEM 的照片如图 2 所示。从图 2 中可以看出, 炸药各组份混合均匀, 颗粒形状极不规则, 颗粒内部还含有空隙。这是由于该炸药所选用的泡沫塑料与乳化炸药常用的膨胀珍珠岩和空心玻璃微珠相比, 具有良好抗压性和分散性, 文中给出了这三种气泡载体微观结构的 SEM 照片, 如图 3 ~ 图 5 所示。泡沫塑料作为一种高分子泡沫塑料, 其组成为碳氢化合物, 颗粒内外含有大量的空隙(图 3), 且

表面“歧化”, 在高粘度乳胶基质中混合具有较好的粘弹性; 膨胀珍珠岩颗粒虽然含有空隙, 但受力极易碎裂, 不适合高粘性乳胶基质的混合分散(图 4); 空心玻璃微珠内有空隙, 但颗粒表面光滑, 粘附性差(图 5)。由此可知, 泡沫塑料是低爆速爆炸焊接炸药良好的气泡载体。

乳胶基质的油相组份为复合蜡和高分子乳化剂, 在一定温度下具有较好的粘性。当泡沫塑料和碳酸盐类矿物粉混合物中加入乳胶基质时, 在搅拌器混合分散作用下, 乳胶基质将粘附在泡沫塑料和碳酸盐类矿物粉的表面, 甚至有乳胶基质会深入到泡沫塑料的内部, 当炸药温度降至常温时, 炸药就形成不规则的颗粒。

表 1 钢与不锈钢的爆炸焊接参数

Table 1 Parameters of explosive welding of stainless steel and steel

material	stainless steel and steel
charge at unit area /g · cm ⁻²	2.26
charge mass /g	522
mass ratio	1.15
layout thickness/mm	28
gap/mm	6

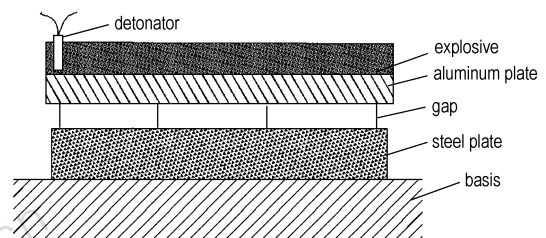


图 1 爆炸焊接装置

Fig. 1 Explosive welding device

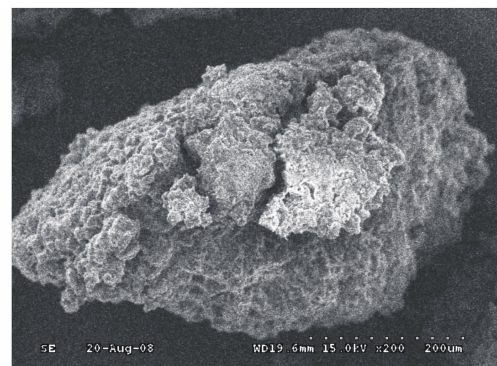


图 2 炸药样品的扫描电镜图

Fig. 2 SEM photograph of the explosive sample

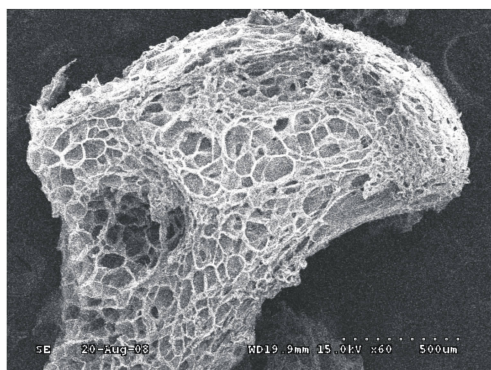


图3 气泡载体的扫描电镜图

Fig. 3 SEM photograph of bubble carriers

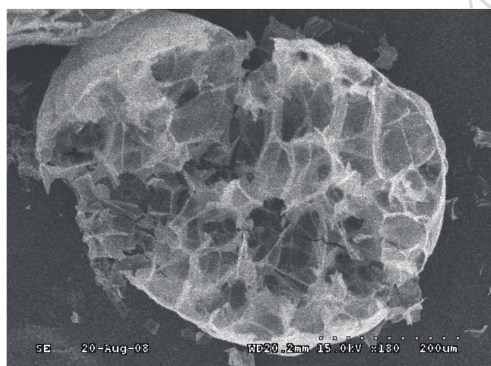


图4 膨胀珍珠岩的扫描电镜图

Fig. 4 SEM photograph of expanded perlite

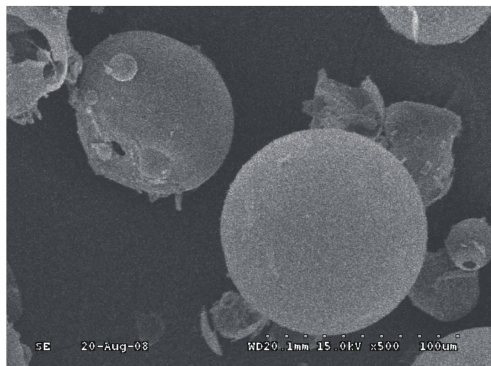


图5 空心玻璃微珠的扫描电镜图

Fig. 5 SEM photograph of hollow glass micro beads

3.2 炸药的流散性

实践表明,由于爆炸焊接通常在野外作业,且板材大而平,这就要求爆炸焊接炸药最好为粉状或粒状,以利于布药。为此,低爆速爆炸焊接乳化炸药必须具有较好的流散性,按本文流散性测试方法测得低爆速爆炸焊接乳化炸药与其他粉状炸药的量筒内炸药完全流下时的最小倾斜角度对比结果见表2。由表2可知,低爆速爆炸焊接乳化炸药的流散性与岩石粉状乳化炸药相当,但明显优于岩石膨化硝酸铵炸药。

表2 低爆速爆炸焊接乳化炸药与其他粉状炸药的最小倾斜角度
Table 2 The minimum inclined angle of emulsion explosive with low detonation velocity and other powdery explosives

explosive	minimum inclined angle / (°)
emulsion explosive with low detonation velocity	28
rock powdery emulsion explosive	27
rock expanded ammonium nitrate explosive	34

我国粉状乳化炸药的乳胶基质组份中选用的T-152乳化剂为高分子乳化剂,化学名称为聚异丁烯二酰亚胺,外观为棕红色粘稠油状体,与SP-80乳化剂相比,具有分子量且具有框架结构,能形成立体阻碍膜,这种结构特点决定了乳化时需要较高的剪切力或较长的乳化时间方可形成稳定的乳化液,粉状乳化炸药就是利用这一特点,将含水量仅为4%左右的乳胶基质在高温下喷雾干燥脱水的同时,又经冷风造形,制得性能优异的粉状炸药^[11-12]。即使低爆速爆炸焊接炸药所用乳胶基质含水量为8%,比岩石粉状乳化炸药的乳胶基质含水量多4%,但是,当温度降至50℃以下时本身也呈固态,在搅拌器分散作用下,乳胶基质在高温下粘结碳酸盐类矿物粉的同时,又粘附在泡沫塑料表面,扩大了乳胶基质的分散面积,当温度降至常温时,炸药呈颗粒状,且颗粒之间不粘结,因此,即使含水量大于粉状乳化炸药,仍具有较好的流散性。而岩石膨化硝酸铵炸药组份中含有少量柴油,是导致炸药流散性差的主要原因。

3.3 炸药的机械感度

在低爆速爆炸焊接乳化炸药中加入碳酸盐类矿物粉作为爆炸能量的稀释剂,由于碳酸盐类矿物粉是一种固体物质,研究炸药在机械作用下的安全性是该炸药生产安全的前提和保证。为此,按GJB772A-1997测了低爆速爆炸焊接乳化炸药的撞击感度和摩擦感度,结果均为0,说明该炸药在生产和使用过程比较安全可靠。一方面,乳胶基质内相中含有8%左右的水份,当撞击或摩擦作用于炸药时,必然产生一定的热量使硝酸铵与水发生溶解,而硝酸铵本身溶于水又将吸收一定的热量;另一方面,可能是乳胶基质本身仍为W/O型乳化结构,其外相中的复合蜡具有良好的润滑性,与泡沫塑料混合时,又封闭着许多微小气泡,但泡沫塑料为高分子材料,具有较好的塑性和韧性,虽然碳酸盐类矿物粉有一定的硬度,但该矿物粉的主要成份为碳酸盐,质地松软,且本身被乳胶基质所包覆,因此,当撞击或摩擦作用时,炸药颗粒所赋予的吸热性、

润滑性、塑性和韧性,无法使炸药在极短的时间内形成“热点”,因而炸药生产和使用安全。

3.4 炸药的猛度

炸药的猛度是指炸药爆炸时粉碎与其接触的介质的能力。作为爆炸焊接用炸药,炸药的猛度适中,这是由金属爆炸焊接的基本原理所决定的^[1]。

为了真实反映炸药用于爆炸焊接时的猛度,消除外在因素,使用铅柱压缩法时,炸药的装药密度为假密度。按此方法,分别测试低爆速爆炸焊接乳化炸药与某金属复合材料公司于爆炸焊接现场在岩石膨化硝酸铵炸药中掺入2%的膨胀珍珠岩和10%的滑石粉混合制得的低爆速膨化硝酸铵炸药的猛度,结果见表3。从表3中可知,低爆速爆炸焊接乳化炸药的猛度略高于低爆速膨化硝酸铵炸药。究其原因可能是因为乳化炸药水相中的硝酸铵和硝酸钠与油相中的碳氢化合物成分分子状态混合,爆炸反应完全,此外,炸药中泡沫塑料不仅起敏化作用,本身又是一种碳氢化合物,与氧化剂硝酸铵和硝酸钠发生化学反应提供能量;低爆速膨化硝酸铵炸药中加入的膨胀珍珠岩在混药和使用过程中部分出现破裂而失去敏化作用,而滑石粉是含水的镁硅酸盐矿物,其分子为 $3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$,比热率大,虽然加入量少,相对炸药中的硝酸铵和燃料油的有效成份多,这种物质在炸药爆轰反应时起着钝感作用,因此,低爆速膨化硝酸铵炸药的猛度比低爆速爆炸焊接乳化炸药低。从综合成本考虑,低爆速爆炸焊接乳化炸药中含有35%的碳酸盐类矿物粉,其成本比低爆速膨化硝酸铵炸药的成本低。

3.5 炸药的爆速

根据工业炸药爆轰理论,炸药在同样的约束条件下,存在临界直径和极限直径,达到极限直径,炸药爆速就稳定了,小于临界直径,炸药就无法形成稳定爆轰,介于临界直径和极限直径之间,炸药爆速与装药直径间成函数关系^[11]。按照本文爆速测试方法,测得低爆速爆炸焊接乳化炸药爆速随装药直径变化如图6所示。由图6可知,装药的临界直径约为16 mm,极限直径约为50 mm,在此直径范围内,爆速为 $1754 \sim 2439 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,其中,AB段炸药的爆速(D)与装药直径(d)满足下列函数关系式: $D = 1200 + 40d - 0.3d^2$,BC段炸药的爆速基本不变。

炸药颗粒的微观结构表明,炸药颗粒内部含有微气泡,炸药颗粒形状又不规则,颗粒之间存在空隙,为炸药的可靠起爆和传爆提供“热点”,因而该炸药在装药直径为16 mm时,仍能可靠起爆和传爆。随着装药

直径增大,单位化学反应区内所放出的能量增加,侧向飞散的能量减小,支持前沿冲击波的能量增多,CJ面的压力增大,炸药的爆速随着装药直径的增大而增加。当装药直径增大到50 mm时,爆炸产生的侧向飞散对支持前沿冲击波CJ面的压力几乎没有影响。此外,由于炸药的装药密度低,且炸药中含有35%的碳酸盐类矿物粉作为爆炸能量的稀释剂,在爆炸反应时稀释了爆轰反应区的能量,因而炸药在此装药条件下,达到了极限直径,且极限爆速低。

表3 低爆速爆炸焊接乳化炸药与低爆速膨化硝酸铵炸药的猛度
Table 3 Brisances of emulsion explosive with low detonation velocity and the expanded ammonium nitrate explosive with low detonation velocity

explosive	emulsion explosive with low detonation velocity	expanded ammonium nitrate explosive with low detonation velocity
apparent density / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	0.81	0.78
charge mass /g	50	50
charge diameter /mm	40	40
charge height /mm	49.1	51.0
lead column compression value/mm	9.71	9.49

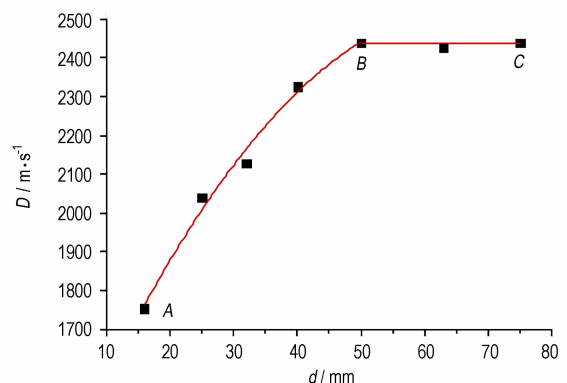


图6 炸药爆速与装药直径的关系

Fig. 6 Relationship between charge diameter of explosive and detonation velocity

3.6 不锈钢与钢板爆炸焊接超声波探伤分析

超声波探伤是检测爆炸焊接结合率的常规手段。其基本原理是利用超声波能透入金属材料的深处,并由一截面进入到另一截面时,在两界面之间发生反射的特点来检查复板与基板之间是否有缺陷的一种方

法,当超声波束自复板表面由探头通至金属内部,遇到缺陷与复板底面时就分别发生反射,反射回来的超声波被探头接收,通过仪器内部的电路处理,在仪器的荧光屏上显示出一定高度和间距的波形。探伤人员则根据波形的变化特征,判断基板与复板之间是否有缺陷,如果波形高低分布不整齐,间距不一致,则爆炸焊接有缺陷,反之则爆炸复合板的结合率较好。实验测得任一点的不锈钢与钢板复合板的超声波探测波形见图7,从图7可看出,超声波探测出的波形从高到低分布,且间距一致,具有一定规律,说明不锈钢与钢板复合板的结合率达100%。

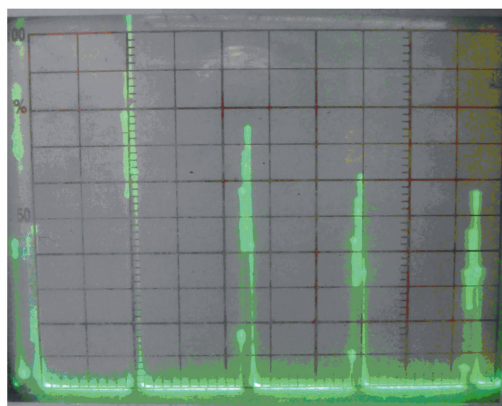


图7 不锈钢与钢复合板超声波探测波形

Fig.7 Oscillogram of ultrasonic detection to composite plate of stainless steel-steel

4 结 论

(1) 在泡沫塑料和碳酸盐类矿物粉混合物中掺入乳胶基质搅拌分散制得的低爆速爆炸焊接乳化炸药,与粉状类硝酸炸药在爆炸焊接现场掺入膨胀珍珠岩粉、滑石粉等工艺相比,生产无粉尘,安全环保,成本低,流散性好,为我国今后研究爆炸焊接用低爆速炸药提供了一种切实可行的方法。

(2) 显微结构观察表明:制得的低爆速爆炸焊接乳化炸药颗粒形状不规则,内部含有空隙,炸药各组份混合均匀性好。

(3) 猛度和爆速测试结果表明:该炸药的猛度适中,极限爆速仅为 $2439 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右。经实验室不锈钢板与钢板爆炸焊接初步试验结果表明,结合率达100%,由于实验条件的限制,该炸药在金属爆炸焊接大板中的应用还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 郑远谋. 爆炸焊接和金属复合材料的原理及应用[M]. 长沙:中南大学出版社, 2007.
ZHENG Yuan-mou. The principle and application of explosive welding and metal composite material[M]. Changsha: Central South University Press, 2007.
- [2] 刘楚乔. 爆炸复合质量的影响因素及参数优化分析[D]. 武汉:武汉理工大学, 2003.
LIU Chu-qiao. Influence factors and optimization analysis of explosive composite quality [D]. Wuhan: Wuhan university of technology, 2003.
- [3] 王勇, 张越举, 赵恩军, 等. 金属爆炸复合用低爆速膨化铵油炸药实验研究[J]. 含能材料, 2009, 17(3): 326-327.
WANG Yong, ZHANG Yue-ju, ZHAO En-jun, et. al. Experimental study on low detonation velocity expanding ANFO explosive used in metal explosive welding [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(3): 326-327.
- [4] 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): 73-76.
YUE Zong-hong, LI Ya, HAN Gang. Research on special explosives for explosive welding and its application [J]. *Engineering Blasting*, 2011, 17(2): 73-76.
- [5] 岳宗洪, 辛宝, 邓光平. 一种贵金属复合材料爆炸焊接专用炸药及其制造方法: 中国专利: CN101412650B [P], 2012.
YUE Zong-hong, XIN Bao, DENG Guang-ping. An explosive welding specialized explosive used by noble metal composite material and its manufacturing method: China CN101412650B [P], 2012.
- [6] 安立昌. 低爆速爆炸复合炸药的配方设计[J]. 火炸药学报, 2003, 26(3): 68-69.
AN Li-chang. A new type of low detonation velocity explosives for explosive welding [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2003, 26(3): 68-69.
- [7] 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.
- [8] 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 the powdery explosive on low detonation velocity used specially in welding [J]. *Blasting*, 2005, 22(2): 106-108.
- [9] 黄文尧, 余燕, 张凯, 等. 低爆速膨化铵油炸药爆炸焊接炸药的实验研究[J]. 含能材料, 2012, 20(6): 784-788.
HUANG Wen-yao, YU Yan, ZHANG Kai, et. al. Experimental study on explosive of low detonation velocity used in explosive welding [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(6): 784-788.
- [10] 周新利. 判断膨化硝酸炸药的流散性的实验方法[J]. 周口师范学院学报, 2005, 22(5): 76-78.
ZHOU Xin-li. Experimental methods for the estimation of the fluidity of the rock expanded ammonium nitrate explosive [J]. *Journal of Zhoukou Normal University*, 2005, 22(5): 76-78.
- [11] 吕春绪. 工业炸药理论[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.
Lü Chun-xu. Industrial explosives theory[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2003.
- [12] 汪旭光. 乳化炸药(第2版)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008.
WANG Xu-guang. Emulsion explosives (Second edition) [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2008.

Preparation and Performance of Low Detonation Velocity Emulsion Explosives Used in Explosive Welding

HUANG Wen-yao, ZHANG Kai, WU Hong-bo, HU Xin, WANG Dao-yang, SHEN Xia-xia, YU Yan

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

Abstract: In order to make the properties of emulsion explosive satisfy the requirements of explosive welding, emulsion matrix, foam and carbonate mineral powder were mixed to prepare a kind of emulsion explosive with low detonation velocity. The micro-structure, fluxion property and mechanical sensitivity were tested, the effect of charge diameter on detonation velocity was studied, and the explosive welding test on stainless steel-steel plate was tested. Results show that the internal of explosive have interspaces, shapes of particle are irregular, and have a good fluxion property, and the sensitivities of impact and friction are both zero. When the loading density of explosive is $0.81 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, the actual measured brisance is 9.71 mm, and when the charge diameter is 16 – 50 mm, the detonation velocity is $1754 - 2439 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The explosive can satisfy the requirements of explosive welding of metal plate.

Key words: applied chemistry; emulsion explosives with low detonation velocity; granular; organic bubble carriers; mineral powder; explosive welding

CLC number: TJ55; O69

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.03.017

* 读者·作者·编者 *

更 正

本刊 2012 年第 6 期 812 页图 1 中的 C(1) 应为 N(11), C(2) 应为 N(21); 相应地, 文中的 C(1) 和 C(2) 分别改为 N(11) 和 N(21); 813 页左栏第 6 行的 C(3)—C(12)—C(18) 应为 N(3)—C(17)—N(4)。特此更正。

《含能材料》编辑部