

粉状乳化炸药在铝-钢及钛-钢爆炸焊接中的可行性分析

蒋晓博, 李 军, 韩 刚, 刘金涛

(中国船舶集团有限公司第七二五研究所, 河南 洛阳 471023)

摘 要:采用粉状乳化炸药进行铝-钢、钛-钢爆炸焊接试验,通过力学性能(常温剪切、高温剪切、常温黏结、高温黏结、侧弯等)及界面形貌(波高、波长、界面未包裹化合物尺寸等)金相分析,确定粉状乳化炸药在铝-钢、钛-钢爆炸焊接中的应用可行性。

关键词:粉状乳化炸药;铝-钢;钛-钢;力学性能;界面形貌

中图分类号: TG456.6

文献标识码: A

Feasibility Analysis on Powdery Emulsion Explosive in Explosive Welding of Aluminum-Steel and Titanium-Steel

JANG Xiaobo, LI Jun, HAN Gang, LIU Jintao

(Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471023, China)

Abstract: The explosive welding of aluminum steel and titanium steel is carried out by using powdery emulsion explosive. The normal and high temperature shearing, normal and high temperature bonding, and lateral bending of the aluminum-steel and titanium-steel are investigated, and the interface morphologies including wave height, wavelength, and size of unwrapped compound at interface are analyzed. The application feasibility of powdery emulsion explosive in the explosive welding of aluminum-steel and titanium-steel is verified.

Keywords: powdery emulsion explosive; aluminum-steel; titanium-steel; mechanical properties; interface morphology

在爆炸焊接技术研究中,焊接参数的选取是非常重要的基础问题,已有大部分理论结果都是关于单一金属材料的,也有一些双金属的推广结果,但都存在着不同程度的问题^[1]。由于材料种类千差万别,不同材料理化性能相差悬殊。在面对众多不同性能组合及厚度组合材料的爆炸焊接时,首先需要依据材料熔点、密度、强度、硬度、热导率、比热、声速、雷诺数及冲击波系数等,选择爆轰性能匹配的炸药。

目前铝-钢、钛-钢爆炸焊接主炸药为膨化硝

铵炸药,存在吸湿性大、易结块、易压缩(布药厚度敏感)等缺点,导致装药量不均匀,影响爆炸复合质量(尤其在温湿度较大环境,炸药结块后,其撞击感度及爆轰感度较低,可能产生不完全爆轰或由爆轰转变成爆燃,导致爆炸焊接失败)。而粉状乳化炸药,具有较好的抗水性、几乎不吸湿、不易结块、不易压缩等特点,能够有效解决膨化硝铵炸药使用过程中存在的问题。由于其优越的爆轰性能,特别是其在低爆速情况下的稳定爆轰性能,粉状乳化炸药在爆炸焊接市场中占到越

收稿日期:2022-12-26

作者简介:蒋晓博,男,1985年生,工程师,主要从事金属材料复合技术研究。E-mail:jiangxiaobo725@163.com

引用格式:蒋晓博,李军,韩刚,等. 粉状乳化炸药在铝-钢及钛-钢爆炸焊接中的可行性分析[J]. 材料开发与应用, 2024, 39(2): 75-80.

JIANG X B, LI J, HAN G, et al. Feasibility analysis on powdery emulsion explosive in explosive welding of aluminum-steel and titanium-steel[J]. Development and Application of Materials, 2024, 39(2): 75-80

来越大的比重^[2]。通过研究建立粉状乳化混合炸药性能数据库,便于不同材料组合爆炸焊接工艺设计过程中系列爆速、猛度、质复比炸药的选择与优化。

本研究以过渡接头中铝-钢、钛-钢为样本进行粉状乳化混合炸药爆炸焊接试验,通过性能评价,以确定粉状乳化混合炸药在铝-钢、钛-钢爆炸焊接中的应用可靠性。

1 试验材料

铝-钢、钛-钢用原材料 1060(厚 4 mm)、TA1(厚 2 mm)、B 级钢(厚 16 mm)的性能数据见表 1~表 3。

表 1 1060 性能

Table 1 Mechanical property of 1060

项目	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A_{50}/\%$
GB/T 3880—2012	60~100	≥ 15	≥ 25.0
试验值	93/95	36/39	38.5/40.0

表 2 TA1 性能

Table 2 Mechanical property of TA1

项目	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$
GB/T 3621—2007	≥ 240	140~310	≥ 30.0
试验值	363/354	272/269	55.5/47.3

表 3 B 级钢性能

Table 3 Mechanical property of grade B steel

项目	R_m/MPa	R_{eH}/MPa	$A/\%$	$KV_2(0\text{ }^\circ\text{C})/\text{J}$
GB 712—2011	400~520	≥ 235	≥ 22	27
试验值	443	305	33	145/155/170

2 试验方案

炸药作为焊接能量源,其性能优劣直接影响爆炸焊接质量,在爆炸焊接工艺设计中,主要关注混合炸药的爆速和密度两项指标,对比参考炸药猛度。

前期铝-钢、钛-钢爆炸焊接用膨化硝铵混合 PH 炸药性能数据见表 4。

表 4 膨化硝铵混合 PH 炸药性能数据

Table 4 Performance data of PH and expanded ammonium

nitrate mixed explosive

项目	炸药爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	猛度/ mm
添加剂(矿粉)	—	1.330	—
膨化硝铵炸药	3 176	0.485	12.75
PH 炸药	2 100	0.860	8.45

根据系列粉状乳化混合炸药性能数据库分析,与 PH 炸药性能接近的炸药为 FR 炸药,性能数据见表 5。

表 5 粉状乳化混合 FR 炸药性能数据

Table 5 Performance test data of FR powder

emulsion mixed explosive

项目	炸药爆速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	猛度/ mm
添加剂(矿粉)	—	1.330	—
粉状乳化炸药	3 659	0.750	15.00
FR 炸药	1 903~1 988	1.180	8.80

爆炸焊接前,对 B 级钢板复合面先用砂轮打磨,再用页轮抛光处理,对 1060、TA1 复合面用页轮抛光处理,然后用粗糙度仪测量 B 级钢和 1060、TA1 表面粗糙度,满足 $Ra \leq 3.2\text{ }\mu\text{m}$ 。采用上述粉状乳化混合 FR 炸药,进行铝-钢、钛-钢爆炸焊接。

爆炸焊接后,依据 GB 20091—2012《铝合金-铝-钢(不锈钢)复合过渡接头规范》附录 A:铝合金-铝-钢(不锈钢)复合过渡接头结合率的超声波检验方法,对铝-钢试板进行 100%超声波探伤,测出结合率为 100%;依据 GB/T 8547—2019《钛-钢复合板》附录 A:钛-钢复合板的超声波探伤方法,对钛-钢试板进行 100%超声波探伤,测出结合率为 100%;后续进行性能评价。

3 试验结果与分析

3.1 力学性能

依据 GB/T 6396—2008 标准,对试板进行力学性能评价,包括常温剪切、高温剪切、常温黏

结、高温黏结、侧弯性能。由于铝-铝-钢复合过渡接头的焊接允许温度不高于 300 ℃,铝-钛-钢复合过渡接头的焊接允许温度不高于 350 ℃^[3],结合复合材料试样规格及导热性能,模拟焊接性能检测(高温剪切、高温黏结),铝-钢、钛-钢分别加热到 315 ℃及 350 ℃,保温 15 min 后进行。

剪切性能直接考察两种金属的界面结合强度,是反映爆炸焊接工艺是否合适的判据。依据 GB/T 6396—2008 标准,对试板各取 4 个室温剪切试样和 4 个高温剪切试样,测试其剪切强度,试验结果见表 6、表 7。铝-钢界面剪切强度平均值在 57~71 MPa 之间,较原材料 1060 屈服强度(36~39 MPa)有所增强,考虑铝-铝-钢过渡接头铝合金复层二次爆炸强化,且爆炸后不经过热处理过程,以最低 50%屈服强度增长率预估铝-钢界面平均剪切强度将达到 86~107 MPa,满足标准要求;钛-钢界面剪切强度平均值在 203~222 MPa 之间,较原材料 TA1 屈服强度(269~272 MPa)有所降低,分析爆炸强化强度经消应力热处理抵消、弱化,但考虑铝-钛-钢过渡接头铝合金二次爆炸强化,且爆炸后不经过热处理过程,以最低 50%屈服强度增长率预估钛-钢界面平均剪切强度将达到 305~333 MPa,远超标准要求。

表 6 铝-钢剪切试验结果

Table 6 Results of aluminum-steel shear test				
编号	检测值 1/ MPa	检测值 2/ MPa	平均值/ MPa	备注
LF-1-1	70	68	69	室温
LF-2-1	62	64	63	室温
LF-1-2	56	57	57	315 ℃, 15 min
LF-2-2	79	62	71	315 ℃, 15 min
标准值	≥60	≥60	≥60	—

注:LF-X-Y,LF 为铝-钢、粉乳炸药首字母缩写;编号 X 代表取样位置,1 为起爆远端,2 为起爆近端;编号 Y 代表试验类别,1 为室温剪切,2 为高温剪切。

表 7 钛-钢剪切试验结果

Table 7 Results of titanium-steel shear test				
编号	检测值 1/ MPa	检测值 2/ MPa	平均值/ MPa	备注
TF-1-1	241	202	222	室温
TF-2-1	205	207	206	室温

续表

编号	检测值 1/ MPa	检测值 2/ MPa	平均值/ MPa	备注
TF-1-2	233	199	216	350 ℃, 15 min
TF-2-2	205	200	203	350 ℃, 15 min
标准值	≥140	≥140	≥140	—

注:TF-X-Y,TF 为钛-钢、粉乳炸药首字母缩写;编号 X 代表取样位置,1 为起爆远端,2 为起爆近端;编号 Y 代表试验类别,1 为室温剪切,2 为高温剪切。

黏结性能直接考察两种金属的 Z 向结合强度,是反映爆炸焊接工艺是否合适的重要判据。依据 GB/T 6396—2008 标准,对试板各取 4 个室温黏结试样和 4 个高温黏结试样,测试其黏结强度,试验结果见表 8、表 9。

表 8 铝-钢黏结试验结果

Table 8 Results of aluminum-steel bonding test				
编号	检测值 1/ MPa	检测值 2/ MPa	平均值/ MPa	备注
TF-1-3	99	115	107	室温
TF-2-3	110	100	105	室温
TF-1-4	104	107	106	315 ℃, 15 min
TF-2-4	104	97	101	315 ℃, 15 min
标准值	≥80	≥80	≥80	—

注:LF-X-Y,LF 为铝-钢、粉乳炸药首字母缩写;编号 X 代表取样位置,1 为起爆远端,2 为起爆近端;编号 Y 代表试验类别,3 为室温黏结,4 为高温黏结。

表 9 钛-钢黏结试验结果

Table 9 Results of titanium-steel bonding test				
编号	检测值 1/ MPa	检测值 2/ MPa	平均值/ MPa	备注
TF-1-3	89	132	111	室温
TF-2-3	106	169	138	室温
TF-1-4	92	114	103	350 ℃, 15 min
TF-2-4	120	222	171	350 ℃, 15 min
标准值	无要求	无要求	无要求	无要求

注:TF-X-Y,TF 为钛-钢、粉乳炸药首字母缩写;编号 X 代表取样位置,1 为起爆远端,2 为起爆近端;编号 Y 代表试验类别,3 为室温黏结,4 为高温黏结。

由表 8、表 9 可知,铝-钢黏结强度平均值在

101~107 MPa 之间,大于标准值 80 MPa,考虑铝-铝-钢过渡接头铝合金复层二次爆炸强化,且爆炸后不经过热处理过程,铝-钢黏结值裕量较大;钛-钢黏结强度平均值在 103~171 MPa 之间,观察试样复层凸出变形,测试值不代表界面部分结合强度。受力分析发现,复层凸台内部环形部分为应力集中突出部位,根据 Von Mises 屈服准则,外部施加应力达到一定值时,此处最先发生塑性变形,主应力、材料屈服点、剪切屈服强度关系如式(1)。

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 = 6K^2 \quad (1)$$

式中, σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为主应力, σ_s 为材料的屈服点, K 为材料的剪切屈服强度。

当试验装置施加作用力 F 在复层凸台内部环形部分,达到复层屈服点时, σ_s 、 K 计算公式分别见式(2)、式(3)。

$$\sigma_s = \frac{4F}{\pi(d_2^2 - d_1^2)} \quad (2)$$

$$K = \frac{F}{\pi d_1 t_f} \quad (3)$$

式中, F 为试样作用力, d_1 、 d_2 为试样复层内直径、外直径, t_f 为复层厚度。

综合上述公式,可得 t_f 为 3.897 mm,即按 GB/T 6396—2008 黏结试样试验,复层厚度为 3.897 mm 时材料屈服点与材料的剪切屈服强度相等,处于塑性变形临界点。为保证界面屈服变形前复层不发生剪切屈服,需满足复层屈服强度 $\sigma_f > \sigma_s$,即 $t_f > 3.897$ mm,否则标准黏结试验时将会出现复层剪切变形或破坏,不能获得界面的绝对结合强度。考虑铝-钛-钢过渡接头复层铝合金二次爆炸强化,且爆炸后不经过热处理过程,按照 50%增长率预估钛-钢界面平均黏结强度将达到 155~257 MPa,超过铝-钛-钢拉脱强度要求。

侧弯性能直接考察两种金属的界面结合情

况及基复层弯曲后表面质量。依据 GB/T 6396—2008,铝-钢侧弯试验要求表面无裂纹,界面可有少量针孔、皱纹或 3 mm 以下连续开口缺陷;钛-钢侧弯试验要求表面无裂纹,界面无分层。对铝-钢和钛-钢试板各取 2 个室温侧弯试样,观测其界面基复层表面质量,试验结果见表 10、表 11。受弯基层和界面完好,无裂纹缺陷,说明铝-钢、钛-钢爆炸焊接结合良好,无连续、贯穿性缺陷。

表 10 铝-钢侧弯试验结果

Table 10 Results of aluminum-steel side bending test

编号	试验条件	试验结果	备注
LF-1-5	$d=12t$; $\alpha=90^\circ$	合格	室温
LF-2-5	$d=12t$; $\alpha=90^\circ$	合格	室温

注:LF-X-Y,LF 为铝-钢、粉乳炸药首字母缩写;编号 X 代表取样位置,1 为起爆远端,2 为起爆近端;编号 Y 代表试验类别,5 为侧弯; d 为弯曲直径; t 为试样厚度; α 为弯曲半径。

表 11 钛-钢侧弯试验结果

Table 11 Results of titanium-steel side bending test

编号	试验条件	试验结果	备注
TF-1-5	$d=12t$; $\alpha=90^\circ$	合格	室温
TF-2-5	$d=12t$; $\alpha=90^\circ$	合格	室温

注:TF-X-Y,TF 为钛-钢、粉乳炸药首字母缩写;编号 X 代表取样位置,1 为起爆远端,2 为起爆近端;编号 Y 代表试验类别,5 为侧弯; d 为弯曲直径; t 为试样厚度; α 为弯曲半径。

3.2 金相试验

对铝-钢和钛-钢试板近端(LF-2,TF-2)、远端(LF-1,TF-1)分别各取 2 个金相试样 LF-1-6 和 LF-2-6、TF-1-6 和 TF-2-6,用 4%硝酸酒精腐蚀试样,观察沿传爆方向的结合界面形态、波长、波高、化合物形貌及尺寸,从而分析爆炸工艺对其组织形貌的影响。

结果表明,铝-钢界面呈较完整的正弦波结合,波峰旋涡存在孔洞、裂纹、破碎金属颗粒及金属化合物等,见图 1、图 2。

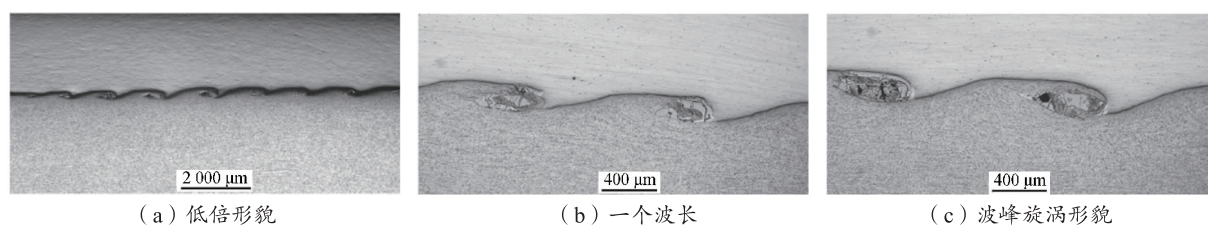


图 1 LF-1-6 界面形貌

Fig. 1 Interface morphology of LF-1-6

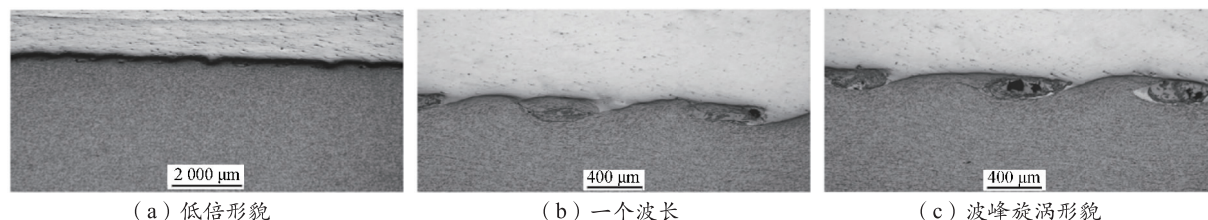


图 2 LF-2-6 界面形貌

Fig. 2 Interface morphology of LF-2-6

表 12 为铝-钢波形的波高、波长测量数据,以及波高与波长的比值。随着爆炸冲击能量的增加,基复层塑性变形能力增强,结合界面波长由 0.99~1.33 mm 增加到 1.37 mm,波高由 0.13~0.19 mm 增加到 0.24 mm。

表 12 铝-钢波形测量结果

Table 12 Results of aluminum-steel waveform measurement

编号	波高/mm	波长/mm	波高/波长
LF-1-6	0.24	1.37	0.175
LF-2-6	0.13~0.19	0.99~1.33	0.098~0.192

注:LF-X-Y,LF 为铝-钢、粉乳炸药首字母缩写;编号 X 代表取样位置,1 为起爆远端,2 为起爆近端;编号 Y 代表试验类别,6 为界面形貌。

表 13 为铝-钢界面未包裹化合物尺寸的测量数据。沿爆轰传播方向,界面的波形参数逐渐

增大,且铝、钢导热系数、热膨胀系数等理化性能差异大,加热、冷却过程协同性差,界面化合物、破碎金属颗粒及裂纹、孔洞等缺陷相应增加。

表 13 铝-钢界面未包裹化合物尺寸

Table 13 Dimensions of unwrapped compounds at the aluminum-steel interface

编号	样品长度/ mm	化合物总长度/ mm	化合物占比/ %
LF-1-6	51.2	6.85	13.4
LF-2-6	50.7	5.30	10.5

注:LF-X-Y,LF 为铝-钢、粉乳炸药首字母缩写;编号 X 代表取样位置,1 为起爆远端,2 为起爆近端;编号 Y 代表试验类别,6 为界面形貌。

钛-钢界面呈较完整的正弦波结合,波峰旋涡存在孔洞、破碎金属颗粒及金属化合物等,见图 3、图 4。

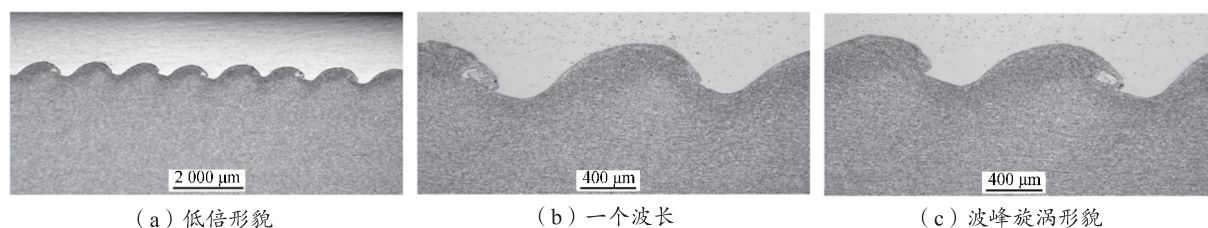


图 3 TF-1-6 界面形貌

Fig. 3 Interface morphology of TF-1-6

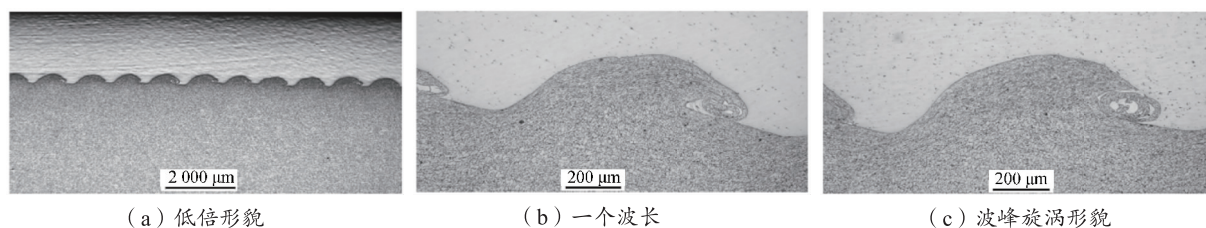


图 4 TF-2-6 界面形貌

Fig. 4 Interface morphology of TF-2-6

表 14 为钛-钢波形的波高、波长测量数据,以及波高与波长的比值。随着爆炸冲击能量的增加,结合界面波长由 1.04 mm 增加到 1.38 mm,波高由 0.26 mm 增加到 0.38 mm。

表 14 钛-钢波形测量结果

Table 14 Results of titanium-steel waveform measurement

编号	波高/mm	波长/mm	波高/波长
TF-1-6	0.38	1.38	0.275
TF-2-6	0.26	1.04	0.250

注:TF-X-Y,TF 为钛-钢、粉乳炸药首字母缩写;编号 X 代表取样位置,1 为起爆远端,2 为起爆近端;编号 Y 代表试验类别,6 为界面形貌。

表 15 为钛-钢界面未包裹化合物尺寸的测量数据。沿爆轰传播方向,界面的波形参数逐渐增大,界面化合物及缺陷相应增加,相比铝-钢界面化合物比例及裂纹缺陷显著降低。由于钛、钢导热系数、热膨胀系数等理化性能比铝、钢差异小得多,加热、冷却过程中协同性好,不易形成裂纹、孔洞等缺陷;通过 Ti-Fe、Al-Fe 二元合金相图分析,Ti 与 Fe 在较窄相对比例(33%~55%)范围内形成 Fe_2Ti 、 FeTi 化合物,而 Al 与 Fe 在较宽相对比例(25%~80%)范围内形成 Fe_3Al 、 FeAl 、 FeAl_2 、 Fe_2Al_5 、 FeAl_3 等多种化合物,即铝-钢界面更易形成较多化合物。

表 15 钛-钢界面未包裹化合物尺寸

Table 15 Dimensions of unwrapped compounds at the titanium-steel interface

编号	样品长度/mm	化合物总长度/mm	化合物占比/%
TF-1-6	51.6	0.41	0.8
TF-2-6	50.8	0.31	0.6

注:TF-X-Y,TF 为钛钢、粉乳炸药首字母缩写;编号 X 代表取样位置,1 为起爆远端,2 为起爆近端;编号 Y 代表试验类别,6 为界面形貌。

4 结论

(1)通过铝-钢、钛-钢外观和超声检测,证实粉状乳化混合炸药能够实现铝-钢、钛-钢良好复合。

(2)通过力学和界面形貌金相分析,选用粉状乳化混合 FR 炸药,铝-钢、钛-钢剪切性能、黏结性能、侧弯性能均满足标准要求,界面微观形貌钛-钢优于铝-钢的(界面未包裹化合物占比较低,力学性能较高)。

(3)通过粉状乳化混合炸药在铝-钢、钛-钢爆炸焊接中的可行性分析,表明粉状乳化混合炸药对于其工程应用是可靠的。

参考文献:

- [1] 李晓杰,杨文彬,奚进一,等. 双金属爆炸焊接下限[J]. 爆破器材, 1999, 28(3): 22-26.
- [2] 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.
- [3] 刘金涛,任江毅,蒋晓博,等. 铝-不锈钢复合过渡接头性能试验研究[J]. 材料开发与应用, 2019, 34(5): 72-76.