

文章编号: 1006-7051(2021)03-0083-06

双层爆炸复合中覆板最小可焊厚度的分析

张仲一¹, 郭子如¹, 周佐玉², 王自军³, 方中华², 魏善太³, 何志伟¹, 刘伟¹

(1. 安徽理工大学化学工程学院, 安徽 淮南 232001; 2. 湖北金兰特种金属材料有限公司, 湖北 赤壁 437300; 3. 安徽江南化工股份有限公司, 合肥 230022)

摘要: 为了研究双层爆炸焊接中覆板的最小可焊厚度, 分析了爆炸焊接对于炸药布药量的要求, 提出了一种利用爆炸焊接的碰撞速度下限与覆板的一维平板运动公式计算爆炸焊接中覆板最小可焊厚度的方法, 并采用爆炸焊接中常用的3种炸药, 分别对不锈钢-钢、铝-钢、钛-钢、铜-钢的爆炸焊接最小可焊厚度进行计算, 计算得出4种覆板的最小可焊厚度分别在1.5、2.5、2.0、1.5 mm左右。同时指出在进行小厚度覆板的爆炸焊接时, 由于密度更低的炸药爆轰压力也更低, 可以更好地适用于小厚度覆板的爆炸焊接。

关键词: 爆炸焊接; 覆板; 最小可焊厚度; 低密度炸药

中图分类号: TG456.6; TD235 **文献标志码:** A **doi:** 10.19931/j. EB. 20200090

Analysis of minimum weldable thickness of flyer plate in bimetal explosive welding

ZHANG Zhong-yi¹, GUO Zi-ru¹, ZHOU Zuo-yu², WANG Zi-jun³, FANG Zhong-hua², WEI Shan-tai³, HE Zhi-wei¹, LIU Wei¹

(1. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, China; 2. Hubei Jinlan Special Metal Material Co., Ltd., Chibi 437300, Hubei, China; 3. Anhui Jiangnan Chemical Industry Co., Ltd., Hefei 230022, China)

Abstract: In order to indicate the minimum weldable thickness of the flyer plate in explosive welding, the charging weight of explosives required by welding is analyzed. At the same time, a method is proposed to calculate the minimum weldable thickness of the flyer plate in explosive welding by using the lower limit of collision velocity of explosive welding and the one-dimensional plate motion formula of the flyer plate. Three explosives commonly used in explosive welding are replaced in stainless steel-steel, aluminum-steel, titanium-steel, and copper-steel explosion weldings, and the calculated minimum weldable thickness of the flyer plate are about 1.5, 2.5, 2.0, 1.5 mm. This paper also gives a result that the lower density explosive is more suitable for the welding of thin flyer plates because the detonation pressure is also lower.

Key words: explosive welding; flyer plate; minimum weldable thickness; low-density explosive

爆炸焊接亦称爆炸复合, 是一种利用炸药爆炸产生的能量, 使同种或者异种材料发生高速斜碰撞, 形成金属间冶金结合的高能加工技术, 由爆炸焊接法制备的金属复合材料由于其具备独特的

功能性以及可加工性, 已得到广泛地应用^[1-2]。在爆炸焊接使用炸药方面, 吴卫明等^[3]对爆炸焊接所使用炸药的性能进行了探讨, 结合“爆炸焊接窗口”以及工程实例对用于爆炸焊接的炸药爆速、密

收稿日期: 2020-07-06

作者简介: 张仲一(1994—), 男, 在读博士, 从事炸药爆炸理论及爆炸焊接方面的研究。E-mail: 2505886613@qq.com

通信作者: 郭子如(1962—), 男, 硕士, 教授, 从事爆炸理论及应用、爆炸材料、燃烧爆炸安全方面的研究。E-mail: 34999704@qq.com

度、爆轰状态等参数进行计算,得到了爆炸焊接中炸药爆速的上、下限,密度的取值范围以及提高炸药能量利用率的途径。侯国亭等^[4]研究了爆炸焊接机理,提出了“脉冲熔池压力焊”界面成波的观点,认为爆炸焊接结合界面波是由射流冲刷的脉冲熔池和爆轰荷载共同作用的结果。闫建文等^[5]应用 AUTODYN 非线性显式动力学分析软件,模拟了基、覆板爆炸焊接复合过程,得到了不同炸药量下爆炸焊接过程中的压力时程,结合理论公式,分析炸药量、爆轰荷载、碰撞速度和界面波之间的关系,及炸药量对爆炸焊接界面波的影响。

目前,薄或脆性复合材料的应用越来越多,特别是一些特殊的装置或者精密的设备,如何便捷而又有效地实现这类复合材料的爆炸焊接亦是目前需要考虑的问题。因此,在实际的爆炸焊接过程中,覆板的最小可焊厚度也是爆炸焊接实践中需要考虑的一个问题,笔者针对这一问题予以了分析。

1 爆炸焊接用炸药

1) 爆炸焊接对其所用炸药的爆炸性能有着特殊要求,由于需要在复板上布置炸药,所以要求爆炸焊接用炸药具有易于摊铺、布药的特点,根据“爆炸焊接窗口”理论,所用炸药应为低爆速炸药,炸药的爆速一般在 2 000 m/s 左右^[6]。

2) 炸药布药量是爆炸焊接的一个非常重要的初始参数,在其他条件都确定的情况下,由于布药量的大小决定着布药厚度,所以它在某种程度上也影响着炸药的爆速 v_d ,与此同时,随着布药量的增大,爆炸载荷以及基覆板的碰撞速度 v_p 当然也会随之增大。

3) 爆炸焊接基覆板的结合界面一般分为 3 种:即大波状结合界面、小波状结合界面以及微波状结合界面。大波状结合界面波高 100~150 μm ,波长一般在 300 μm 左右,结合界面有比较宽的过渡区域(约 30 μm 左右)并有缝隙存在;小波状结合界面类似于大波状结合界面,波高约为 50 μm ,波

长约 100~150 μm ,缝隙稍小;微波状结合界面几乎看不到分界面,可以认为这类结合界面为完全焊合。大波状结合界面并不是最佳的结合界面,小波状结合和微波状结合界面才是高质量的结合界面^[7]。

爆炸焊接结合界面到底是属于哪一种波型是根据波长 λ 来划分的,通常对于波长 λ 的计算可采用如下的公式^[8]:

$$\lambda = \frac{\pi v_p d}{2c} \cdot \left(\frac{c}{v_c} - 1 \right)^2 \quad (1)$$

式中: v_p 为基覆板的碰撞速度; d 为覆板厚度; c 为覆板金属的体积声速; v_c 为碰撞点移动速度,在平行法爆炸焊接系统中也即炸药的爆速 v_d 。

由式(1)可知,对于确定的爆炸焊接系统,炸药爆速及板材种类及厚度是确定的,基覆板碰撞速度 v_p 能很大程度上影响波长 λ ,在爆炸焊接可焊窗口之内,碰撞速度越小,则结合界面的波长越小越趋近于微波状结合界面,结合质量也就越高。

传统的“爆炸焊接窗口”理论是目前爆炸焊接中用来确定动态参数的基本方法,不过“爆炸焊接窗口”只说明了在什么情况下“可焊”,而没有考虑到如何达到最佳的焊接效果。由式(1)可知,想要让爆炸焊接结合界面是以微波状结合,则需要减小碰撞速度 v_p 。所以当取可焊性窗口下限来确定炸药布药量时,有利于获得高质量的微波状结合界面^[9]。

4) 柱状炸药爆轰存在直径效应,最小可爆轰直径就是临界直径,类似地,对于平板装药存在着临界厚度^[10]。对于普通雷管敏感的工业炸药而言,其临界厚度一般为 20 mm^[11]。爆炸焊接所用的是低爆速炸药,爆炸焊接炸药的种类一般是铵油炸药、粉状乳化炸药以及加入膨松性、多孔状物质为密度调节添加剂的低爆速乳化炸药。

根据实验测定,某些爆炸焊接用铵油炸药、粉状乳化炸药以及加入膨松性孔状物质为敏化剂和添加剂的低爆速乳化炸药的临界厚度^[10,12-13]如表 1 所示。

表 1 几种常用爆炸焊接炸药临界厚度

Table 1 Critical thickness of several commonly used explosive welding explosives

炸药	密度/(g·cm ⁻³)	爆速/(m·s ⁻¹)	临界厚度/mm
铵油炸药	0.67	2 641	7
粉状乳化炸药	0.87	2 100	10
乳化炸药	0.56	2 596	9

2 覆板最小可焊厚度

2.1 理论分析

根据 Aziz 一维平板爆轰驱动的运动公式^[14]

$$v_p = v_d \frac{(1 + 32R/27)^{\frac{1}{2}} - 1}{(1 + 32R/27)^{\frac{1}{2}} + 1} \quad (2)$$

式中: v_d 为炸药爆速; R 为单位面积炸药与覆板的质量比。根据式(2)可以看出影响碰撞速度的主要因素就是质量比 R , 对于 Aziz 公式建立数学模型并对 R 进行求导得

$$v'_p = v_d \frac{\frac{32}{27} \cdot (1 + \frac{32R}{27})^{-\frac{1}{2}}}{(\sqrt{1 + 32R/27} + 1)^2} \quad (3)$$

可以发现 v_p 的导函数(对 R 求导)是恒大于零的, 所以碰撞速度 v_p 是关于质量比的单调增函数, 即 R 减小, v_p 减小, 反之 R 增大, v_p 增大。

对于可焊性窗口下限也即碰撞速度下限, 采用下述公式计算。单金属或 2 种相似金属爆炸焊接产生射流的最小碰撞速度为^[15]

$$v_{p \min} = \left(\frac{\sigma_b}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中: σ_b 为金属材料的极限抗拉强度, Pa; ρ 为金属材料的密度, kg/m³。

由于维氏硬度 H_v 与材料的极限抗拉强度成线性关系, 所以式(4)可以变换为

$$v_{p \min} = K_c \sqrt{\frac{H_v}{\rho}} \quad (5)$$

式中: H_v 为维氏硬度; ρ 为金属材料的密度; K_c 为系数, 一般取 0.6~1.2。

根据上述分析, 为了得到高质量的微波状界面, 令

$$v_d \frac{(1 + 32R/27)^{\frac{1}{2}} - 1}{(1 + 32R/27)^{\frac{1}{2}} + 1} = \left(\frac{\sigma_b}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

由此得到的质量比 $R_{\min}$ 即为最佳的装药质量比, 也是最小装药质量比。根据 $R_{\min}$ 分析覆板的最小可焊厚度, 由于 $R_{\min}$ 是单位面积上的最佳布药量与覆板质量的比值, 覆板厚度理论上可以无限减小, 为了保持比值不变, 覆板上布药厚度也要不断减小或者炸药密度需要降低。对于一定品种的炸药, 药厚的最小值即为该种炸药能够发生稳定爆轰的临界厚度, 若药厚小于临界厚度则炸药不能正常起爆, 以此来确定理论上的覆板最小可焊厚度。

2.2 应用计算及分析

以不锈钢—钢的爆炸焊接为例, 采用表 1 的炸药, 根据式(6)来计算理论上的覆板最小可焊厚度, 相关金属板材的材料特性参数如表 2 所示。

表 2 不锈钢-钢的材料特性参数

Table 2 Stainless steel-steel material characteristics parameters

材料	密度/(kg·m ⁻³)	抗拉强度/MPa
钢	7 850	405
304 不锈钢	7 930	560

根据式(4)计算得到不锈钢—钢的碰撞速度下限为 266 m/s, 根据不锈钢—钢的碰撞速度下限的值和式(6)计算得到表 1 的 3 种炸药的质量比 R 分别为 0.41、0.57、0.42, 根据质量比 R 和炸药的临界厚度可以得到覆板的理论最小可焊厚度(见表 3)。

表 3 不锈钢-钢覆板最小可焊理论厚度

Table 3 Minimum thickness of flyer plate in stainless steel-steel explosive welding

炸药	覆板最小可焊厚度/mm
铵油炸药	1.46
粉状乳化炸药	1.94
乳化炸药	1.53

由理论计算结果可知: 一般不锈钢-钢爆炸焊接的覆板理论最小可焊厚度是很小的, 约在 1.5 mm 左右。

式(3)是同种金属或者相似金属的下限计算公式, 而不同种金属(双金属)的爆炸焊接下限计算不同于单金属或 2 种相似金属的计算。在双金属爆炸焊接中, 只有 2 种金属同时产生射流才可能发生焊接, 因此碰撞压力必须达到 2 种金属中较高

的可焊碰撞压力。因此要根据式(7)、式(8)先计算出单金属产生射流的最小碰撞速度,然后计算出单金属的最小可焊压力,取两者间较大者作为双金属焊接的最小可焊压力。

$$D_1 = C_0 + \frac{\lambda v_{p \min}}{2} \quad (7)$$

$$p = \frac{\rho D_1 v_{p \min}}{2} \quad (8)$$

式中: C_0 为材料声速; ρ 为材料密度; λ 为线性系数,铝取 1.34,钢取 0.454,铜取 1.51,钛取 1.146^[16],处理后得出双金属的碰撞速度下限为^[15]

$$v_{p \min} = \frac{\sqrt{1 + 4\lambda_1 p_{\min}/(\rho_1 C_{01}^2)} - 1}{2\lambda_1} \cdot C_{01} + \frac{\sqrt{1 + 4\lambda_2 p_{\min}/(\rho_2 C_{02}^2)} - 1}{2\lambda_2} \cdot C_{02} \quad (9)$$

对铝-钢、钛-钢、铜-钢的碰撞速度下限进行计算,几种金属的材料特性参数如表 4 所示。

表 4 金属板材的材料特性参数

Table 4 Material characteristic parameters of sheet metal

材料	密度/(kg·m ⁻³)	抗拉强度/MPa	λ	声速/(m·s ⁻¹)
钢	7 850	405	0.454	6 000
铝	2 720	100	1.340	6 300
铜	8 930	209	1.510	4 640
钛	4 510	450	1.146	5 990

由表 4 的参数及式(4)、式(7)、式(8)、式(9)可以计算出铝-钢、钛-钢、铜-钢的碰撞速度下限,之后按照与不锈钢-钢复合板同样的计算方法先计算出最小质量比 R ,之后得出覆板的理论最小可焊厚度,计算得到铝-钢、钛-钢、铜-钢复合板的碰撞速度下限分别为 453、356、274 m/s,对于表 1 的 3 种炸药,计算得出的质量比 R 和覆板最小厚度如表 5 所示。

表 5 3 种复合板的覆板理论最小可焊厚度

Table 5 Minimum thickness of flyer plate of three kinds of coosite board

炸药	质量比			覆板最小可焊厚度/mm		
	铝-钢	钛-钢	铜-钢	铝-钢	钛-钢	铜-钢
铵油炸药	0.8	0.6	0.4	2.16	1.79	1.28
粉状乳化炸药	1.2	0.8	0.6	2.67	2.41	1.71
乳化炸药	0.8	0.6	0.4	2.31	1.92	1.38

由表 5 可以看出铝-钢、钛-钢、铜-钢爆炸焊接

覆板的最小可焊厚度分别在 2.5、2.0、1.5 mm 上下,整体上的差异并不大。

为了能够焊接很薄的覆板,在爆炸焊接实践中,采用在覆板上方放置水袋、水箱等方法来实现薄板爆炸焊接^[17]。但是若采用更低密度的炸药,则可以不采用这种麻烦的焊接工艺。吴卫明等^[18-19]研究设计了一种低密度的柔性平板状炸药,利用多孔性物质和乳化液进行物理混合,所得炸药密度可以低至 0.2 g/cm³,临界厚度为 20 mm,此时爆速为 2 079 m/s,满足爆炸焊接的要求。根据以上的分析和方法可以计算出上述几种常见金属的爆炸焊接覆板最小厚度约在 1 mm。因此,这种低密度炸药可以实现更小厚度的薄板焊接。

3 结论

1)利用爆炸焊接碰撞速度下限确定布药量有利于得到高质量的微波状焊接结合界面。

2)利用爆炸焊接碰撞速度下限和覆板的一维平板运动公式可以估算覆板的理论最小可焊厚度。计算得出在不锈钢-钢爆炸焊接中这一值为 1.5 mm 左右,铝-钢、钛-钢、铜-钢爆炸焊接覆板的最小可焊厚度分别在 2.5、2.0、1.5 mm 左右。

3)焊接更薄的覆板,可采用更低密度的炸药来实现。

参考文献(References):

- [1] 张成俊. 爆炸复合法制取金属复合板的现状探讨[J]. 煤矿爆破, 2019, 37(5): 30-34.
ZHANG C J. Discussed on the present situation of making metal composite plate by explosion compounding method[J]. Coal Mine Blasting, 2019, 37(5): 30-34.
- [2] 韩小敏, 王少刚, 黄燕. 金属爆炸焊的研究现状及发展趋势[J]. 电焊机, 2016, 46(4): 112-117.
HAN X M, WANG S G, HUANG Y. Research progress and development trend of metal explosive welding[J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(4): 112-117.
- [3] 吴卫明, 张伟, 郭子如, 等. 爆炸焊接对炸药性能要求

- 的探讨[J]. 工程爆破, 2019, 25(1): 68-73.
- WU W M, ZHANG W, GUO Z R, et al. Discussion on the requirement of explosive performance for explosive welding[J]. Engineering Blasting, 2019, 25(1): 68-73.
- [4] 侯国亭, 冯健, 袁安富, 等. 爆炸焊接界面成波机理[J]. 爆破, 2013, 30(4): 120-124.
- HOU G T, FENG J, YUAN A F, et al. Analysis of forming mechanism of interface wave in explosive welding processing [J]. Blasting, 2013, 30(4): 120-124.
- [5] 闫建文, 雷方超, 俞祺洋, 等. 炸药量对爆炸焊接界面波影响的数值模拟[J]. 工程爆破, 2018, 24(6): 10-17.
- YAN J W, LEI F C, YU Q Y, et al. Research of explosive charge impact on explosive welding interface wave[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(6): 10-17.
- [6] 郑远谋. 爆炸焊接和爆炸复合材料的原理及应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007: 15-40.
- ZHENG Y M. The principle and application of explosive welding and metallic composite [M]. Changsha: Central South University Press, 2007: 15-40.
- [7] 王耀华, 洪津, 史长根. SA266-304 爆炸复合板的三种结合界面[J]. 材料科学与工艺, 1998(4): 35-38, 42.
- WANG Y H, HONG J, SHI C G. Three bond interfaces of explosive welding of steel SA266/304 [J]. Materials Science and Technology, 1998(4): 35-38, 42.
- [8] 孙锦山, 朱建士. 理论爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995: 356-418.
- SUN J S, ZHU J S. Theoretical detonation physics [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995: 356-418.
- [9] 王耀华, 尤峻, 陆明. 爆炸焊接合理装药量试验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2004(3): 46-48.
- WANG Y H, YOU J, LU M. Reasonable dynamite amount experiment of explosive welding[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural science edition), 2004(3): 46-48.
- [10] 李科斌, 李晓杰, 闫鸿浩, 等. 一种测量工业炸药临界直径和临界厚度的连续电阻丝探针法[J]. 含能材料, 2018, 26(7): 620-625.
- LI K B, LI X J, YAN H H, et al. A continuous resistance wire probe method for determining the critical diameter and thickness of commercial explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(7): 620-625.
- [11] 黄寅生. 炸药理论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016: 144-151.
- HUANG Y S. Explosive theory [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016: 144-151.
- [12] 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 Y D. Development of cool explosive specially used in welding[J]. Blasting, 2005, 22(2): 106-108.
- [13] 李雪交, 汪泉, 黄文尧, 等. 玻璃微球含量对乳化炸药爆速的影响及蜂窝炸药研究[J]. 爆破, 2018, 35(3): 120-124, 178.
- LI X J, WANG Q, HUANG W Y, et al. Percentage of glass microsphere on emulsion explosive property and honeycomb explosive[J]. Blasting, 2018, 35(3): 120-124, 178.
- [14] 邵丙璜, 张凯. 爆炸焊接原理及其工程应用[M]. 大连: 大连工学院出版社, 1987: 7-50.
- SHAO B H, ZHANG K. The principle of explosive welding and its engineering application [M]. Dalian: Dalian Institute of Technology Press, 1987: 7-50.
- [15] 赵铮, 王金相, 杭逸夫, 等. 双金属复合板爆炸焊接窗口研究[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(5): 1 126-1 129.
- ZHAO Z, WANG J X, HANG Y F, et al. Research on explosive welding window of bimetal composite plate [J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(5): 1 126-1 129.
- [16] 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.
- LI X J, YANG W B, XI J Y, et al. The lower limit of explosive welding parameter window for bimetal [J]. Explosive Materials, 1999, 28(3): 22-26.
- [17] MANIKANDAN P, LEE J O, MIZUMACHI K, et al. Underwater explosive welding of thin tungsten foils and copper[J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 418(1/3): 281-285.
- [18] 吴卫明. 一种柔性平板状炸药的研究[D]. 淮南: 安徽

- 理工大学,2019;23-28.
- WU W M. Study on a kind of flexible flat explosive [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019;23-28.
- [19] 刘富国,冯健,侯国亭. 核电设备用 SA738Gr. B 复合钢板的爆炸焊接试验研究[J]. 工程爆破,2021,27(1):89-94.
- LIU F G, FENG J, HOU G T. Experimental research of explosive welding of SA738Gr. B clad metal plate for nuclear power equipment [J]. Engineering Blasting, 2021,27(1):89-94.
-
- (上接第 62 页)
- [3] 张耿城. 露天矿工程爆破技术与实践[M]. 北京:冶金工业出版社,2019.
- ZHANG G C. Engineering blasting technology and practice in open-pit mine[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2019.
- [4] 谢先启,卢文波. 精细爆破[J]. 工程爆破,2008,14(3):1-7.
- XIE X Q, LU W B. 3P (precise, punctilious and perfect) blasting [J]. Engineering Blasting, 2008, 14(3):1-7.
- [5] 曲广建,黄新法,江滨,等. 数字爆破(I)[J]. 工程爆破,2009,15(2):23-28.
- QU G J, HUANG X F, JIANG B, et al. Digital blasting (I) [J]. Engineering Blasting, 2009, 15(2): 23-28.
- [6] 费鸿禄,郭连军. 爆破施工的数字化[J]. 爆破,2015,32(3):31-39.
- FEI H L, GUO L J. Digitization of blasting construction[J]. Blasting,2015,32(3):31-39.
- [7] 陶刘群,汪旭光. 基于物联网技术的智能爆破初步研究[J]. 有色金属(矿山部分),2012,64(6):59-62.
- TAO L Q, WANG X G. Preliminary study of intelligent blasting based on the internet of things technology[J]. Nonferrous Metals(Mining section), 2012,64(6):59-62.
- [8] 丁小华. 露天矿安全高效爆破智能化动态设计系统的研究与应用[D]. 徐州:中国矿业大学,2014.
- DING X H. Research and application of intelligent and dynamic design for surface mine safety and efficient blasting [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology,2014.
- [9] 李世丰. 露天矿智能穿孔爆破体系可靠性评价研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2016.
- LI S F. Research on the reliability evaluation of the intelligent drilling blasting system in open pit mine [D]. Fuxin: Liaoning Technology University,2016.
- [10] 施富强,廖学燕,龚志刚,等. 三维数字化爆破质量评价技术[J]. 工程爆破,2016,22(5):29-31.
- SHI F Q, LIAO X Y, GONG Z G, et al. Three-dimensional digitalization technique on blasting quality evaluation[J]. Engineering Blasting, 2016, 22(5): 29-31.
- [11] 叶磊,汪泽. 互联网与爆破安全管理融合技术研究[J]. 工程爆破,2021,27(2):130-134.
- YE L, WANG Z. Research on combinatorial technique of internet and blasting safety management [J]. Engineering Blasting,2021,27(2):130-134.