

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.02.024

新型裂岩器材装填药剂的燃烧性能研究

马健行¹, 王彦君², 赵静², 陈华东², 徐建勇³, 黄寅生¹

(1. 南京理工大学 化学与化工学院, 南京 210094; 2. 泸州北方化学工业有限公司, 泸州 646000;

3. 上海美同安防工程科技有限公司, 上海 200090)

摘要: 利用密闭爆发器实验系统, 对一种新型裂岩器材的装填药剂燃烧性能进行了研究, 以此对后续产品中的药剂组分、比例进行指导性调控。设计了9:1~4:6不同梯度组分的混合药剂进行密闭爆发器实验, 对所有药剂的 $p-t$ 曲线及 $dp/dt-t$ 曲线分析后确定火药力实验中所用药剂配比为7:3与5.5:4.5。使用 0.12 g/cm^3 、 0.2 g/cm^3 两种装填密度对混合药剂进行火药力实验, 参照火药燃速处理方法, 假设混合药剂为单一整体, 密度为 1.5 g/cm^3 , 在此假设基础上得到药剂燃烧的 $\Gamma-\psi$ 曲线及相应的火药力、燃速系数等参数, 其中单+添(7:3)配方的火药力最高, 为 564.87 kJ/kg , 双+添(7:3)配方的火药力比之略低, 但仍高于5.5:4.5配方的火药力。通过对药剂的 $\Gamma-\psi$ 曲线分析解释了双+添(5.5:4.5)配方在实验中出现明显燃烧不完全现象的原因; 对混合药剂对应火药力、燃速系数的分析发现, 火药对整体药剂的做功能力占主导性因素, 火药占比的上升会显著提高药剂的燃烧效能, 但装填密度的改变对两种火药燃烧效果的影响却不一致。装填密度的上升会导致单基药配方燃烧效能的下降, 而双基药配方会出现燃烧效能的上升。

关键词: 非炸药爆破; 裂岩管; 密闭爆发器; 燃烧性能

中图分类号: TJ55 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2023)02-0165-07

Study on Combustion Performance of New Type Rock Splitting Equipment

MA Jian-xing¹, WANG Yan-jun², ZHAO Jing², CHENG Hua-dong², XU Jian-yong³, HUANG Yin-sheng¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology,

Nanjing 210094, China; 2. Luzhou North Chemical Industry, Luzhou 646000, China;

3. Shanghai Meitong Security Engineering Technology Company, Shanghai 200090, China)

Abstract: Using a closed explosion experimental system, the combustion performance of a new type of rock-splitting equipment's loading agent was studied, providing guidance for the drug components and proportions in subsequent products. Different gradient components with a ratio of 9:1 to 4:6 were designed to mix the loading agents for the closed explosion experimental, and the $p-t$ curve and $dp/dt-t$ curve of all agents were analyzed. The drug ratio used in the explosive strength experiment was determined to be 7:3 and 5.5:4.5. The mixed drugs were subjected to the explosive strength experiment using two types of loading densities, 0.12 g/cm^3 and 0.2 g/cm^3 . The mixed drug was assumed as a single entity with a density of 1.5 g/cm^3 , referring to the method of treating the gunpowder burning speed. On this assumption basis, the $\Gamma-\psi$ curve of the drug combustion and the corresponding parameters such as explosive strength and burning rate coefficient were obtained, among which the explosive power of the single + additive (7:3) formula was the highest, reaching 564.87 kJ/kg . The explosive power of the dual + additive (7:3) formula was slightly lower but still higher than that of the 5.5:4.5 formula. The reason for the apparent incomplete combus-

收稿日期: 2023-01-07

作者简介: 马健行(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事火工品技术研究, (E-mail) 2686837863@qq.com。

通讯作者: 黄寅生(1962-), 男, 教授、博导, 主要从事军事化学与烟火技术研究, (E-mail) huangyincheng@sina.com。

tion phenomenon observed in the experiment of the dual + additive (5.5:4.5) formula was explained by analyzing the $\Gamma-\psi$ curve of the drug. The analysis of the corresponding explosive strength and burning rate coefficient of the mixed drugs showed that the explosive force of the gunpowder on the overall drug is the dominant factor, and the increase in the ratio of the gunpowder will significantly improve the efficiency of the drug's combustion. However, the effect of the change in loading density on the burning of the two types of gunpowder is inconsistent. The increase in loading density will cause a decrease in the burning efficiency of the monobasic formula, while the dual-base formula will exhibit an increase in burning efficiency.

Key words: non-explosive methods; rock breaking cartridge; closed explosion experimental system; combustion performance

城市居民区或其他重要设施区域附近进行爆破作业时,由工业炸药产生的爆破危害难以避免^[1-5],会对周围环境人民日常生活造成影响^[6-10],因此需要一类可以不使用炸药的破碎技术对特殊区域岩石进行破碎。非炸药破碎就是一类在避免使用炸药的同时,也能很好完成破碎岩石等破碎任务的技术^[11,12],其作用的基本机理为破碎器材在密闭环境中产生高压^[13,14],当压力大于岩石的抗拉强度时,岩石即被破坏^[15-17]。

裂岩管(Rock Breaking Cartridge)是近年来国外新兴的一种非炸药破岩产品,是将非爆轰产气药剂装入特殊结构管内,使用时装填到炮孔内并密封,经点火具点火后,非爆轰产气药剂快速燃烧产生大量气体膨胀做功,致使周围介质破裂的一种新型安全型破岩器材。目前国外该类产品主要有 NoneX、ROYEX、PYROBLAST、AUTOSTEM 几家分区域销售,其主要装填组分为氧化剂与硝化纤维素等火药^[18],依靠产品的特殊结构设计,在装填至炮孔并被密封后,点燃装填药剂,依靠药剂迅速燃烧产生的大量气体作功拉裂岩石。同时气体在拉裂岩石后压力会降低,做功能力迅速下降,从而降低了此类产品的使用危害;且药剂成分简单,运输、储存、使用的安全管控成本低,因此在国外已广泛应用于敏感环境下的拆除作业,如城改、城建以及特殊开采等。目前国内此类产品由泸州北方化学工业有限公司联合上海美同安防工程科技有限公司及南京理工大学等多家院校开发,目前已有典型产品送往国家民用爆破器材质量检验检测中心进行危险等级鉴定。

由作用机理可以看出,该种器材的破岩性能与药剂的燃烧性能有着直接联系,药剂的药量、种类、配比、装填密度均会影响药剂的燃烧性能,从而影响燃烧阶段所能产生的峰值压力及速率。由于该类裂岩管的裂岩机理是在强堵塞条件下短时燃烧产生大量气体,可看作是一种定容高压燃烧过程,因此对于药剂燃烧的理论研究可借助密闭爆发器实验进行。由此,本研究将对药剂在密闭环境下的燃烧性能进

行研究,以此对后续产品中的药剂组分、比例进行指导性调控。

1 实验部分

1.1 实验条件

测试系统为泸州北方化学工业有限公司科研所自研的密闭爆发器测试系统,密闭爆发器本体容积 50 cm³,系统采样频率选定为 200 k ~ 1 MHz,点火药为 C 级硝化棉,点火压力 9.87 MPa,使用 0.2 mm 镍铬丝点火,点火电流 3.5 A。实验所用药剂为单基粒状药、双基球扁药与钝感添加剂,装填密度根据实验需求确定。

本研究将通过火药力及燃速等燃烧性能参数对混合药剂进行燃烧性能评价,由于火药力测定实验需要在两种装填密度下分别进行实验,为减少不必要的实验,将先对混合药剂的比例进行优选,选出合适的几种混合比例后再进行火药力实验。

1.2 实验设计

首先对混合药剂比例进行筛选。单、双基药分别与添加剂混合,在装填密度 $\Delta = 0.12 \text{ g/cm}^3$ 下进行密闭爆发器实验。起始火药-添加剂质量比例设置为 90:10,之后以 10% 为阶梯逐渐降低火药所占比例,直至比例调整为 40:60,具体比例见表 1。在得到所有药剂的 $p-t$ 数据后,分析对比 $p-t$ 数据以选出符合实际需求的药剂配比。

密闭爆发器中某一时刻的压力存在关系

$$p'_{\psi} = p_{ig} + p_{\psi} \quad (1)$$

式中: p'_{ψ} 为密闭爆发器内压力; p_{ig} 为点火药燃烧压力; p_{ψ} 为火药燃烧压力,单位均为 MPa。

当压力低于 400 MPa 时,燃气余容与装填密度无关^[19]。因此,根据两种装填密度(Δ_1 和 Δ_2)及对应最大压力(p_{m1} 和 p_{m2}),即可计算出该种火药的火药力 f 和余容 α ,即

$$\alpha = \left(\frac{p_{m2}}{\Delta_2} - \frac{p_{m1}}{\Delta_1} \right) / (p_{m2} - p_{m1}) \quad (2)$$

$$f = \frac{p_{m2}}{\Delta_1} - \alpha p_{m2} \quad (3)$$

式中,最大压力 p_{m1} 和 p_{m2} 应扣除点火药点火压力 p_{ig} 。式中: α 为火药余容; f 为火药的火药力。

表1 药剂混合比例
Table 1 Mixing ratio

编号	单基药/%	双基药/%	添加剂/%
1#	90	/	10
2#	80	/	20
3#	70	/	30
4#	60	/	40
5#	50	/	50
6#	40	/	60
7#	/	90	10
8#	/	80	20
9#	/	70	30
10#	/	60	40
11#	/	50	50
12#	/	40	60

定义 ψ 为火药已燃百分比,有公式建立起 ψ 与时间 t 的关系

$$\psi = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\rho_p}}{\frac{f}{p'_\psi - p_{ig}} + \alpha - \frac{1}{\rho_p}} \quad (4)$$

式中: Δ 为装填密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; ρ_p 为火药密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。根据实测的 $p-t$ 数据与式(4)将其转化为 $\psi-t$ 数据。

设火药的长度为 $2c$ 、宽度为 $2b$ 、厚度为 $2e_1$, e 为某瞬间已燃去厚度, mm ; 起始燃烧面积为 S_1 , 某瞬间对应燃烧表面积为 S , 此时相对燃烧表面积 σ 为

$$\sigma = \frac{S_1}{S} = 1 - \frac{2(e_1 + b + c)e}{ce_1 + cb + be_1} + \frac{3e^2}{ce_1 + cb + be_1} \quad (5)$$

令

$$\alpha = \frac{e_1}{b}, \beta = \frac{e_1}{c}; \chi = 1 + \alpha + \beta, \gamma = -\frac{\alpha + \beta + a\beta}{1 + \alpha + \beta}$$

将上述代入式(5)并求积分,获得形状函数式(6)

$$\psi = \int_0^z \sigma dZ = \chi Z(1 + \lambda Z) \quad (6)$$

将 $\psi-t$ 数据转化为 $Z-t$ 数据。根据相对燃烧厚度定义式(7)及燃速定义式(8),将(7)式代入(8)式可获得燃速 u 与压力 p 的函数关系(9)。

$$Z = \frac{e}{e_1} \quad (7)$$

$$u = \frac{de}{dt} \quad (8)$$

$$u = u_1 p^n \quad (9)$$

式中: Z 为相对燃烧层厚度; u 为燃烧速度, $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$; u_1 为燃速系数, $\text{mm}/(\text{s} \cdot \text{MPa}^n)$; n 为燃速压力指数。

对(9)式左右取对数,得到 $\ln u \sim \ln p$ 关系,关系式斜率即为燃速压力指数 n ,燃速系数 u_1 也可求出。

根据上述原理及公式,在选取出合适的混合配比后,以 $\Delta_1 = 0.12 \text{ g}/\text{cm}^3$ 、 $\Delta_2 = 0.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ 两种装填密度进行密闭爆发器实验,从而计算出相应配比的火药力与燃速参数。

2 实验结果与分析

2.1 优选实验结果与分析

以点火药压力 9.87 MPa 为起始点,各比例药剂 $p-t$ 曲线如图1所示。由图1可以看出,添加剂占比较小时,药剂燃烧的峰值压力及升压曲线较为接近纯火药燃烧的状态,随着添加剂的加入,不仅峰值压力下降,曲线斜率也随之下落。可以观察到的是,单、双基药两种下降的趋势存在一定差异:单基药混药的 $p-t$ 曲线随着添加剂占比的上升下降较为平滑,呈现明显的平滑阶梯趋势,而双基药混药的下降的规律性未如单基药混药一般呈现平滑阶梯趋势。

分析认为:①出现峰值压力与曲线斜率下降的状况,一方面是由于添加剂占比的上升减少了火药的用量,对产气量与产气速率均造成影响,另一方面由于添加剂较难出现燃烧反应,因此添加剂在燃烧过程中会不断吸收点火药及火药燃烧产生的热量,火药燃烧反应速率随之降低;②单基药曲线随药剂配比变化过渡较为平滑,双基药曲线变化波动较大的原因可能是,单基药的比热为 $1.21 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,热导率 $0.80 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K})$,双基药的比热为 $1.50 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,热导率 $0.75 \text{ kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot \text{K})$ ^[20],因此在药剂燃烧传热中,单基药相较于双基药更容易升温、传热,从而更易被点火药点燃,当点火药燃烧能量更多的被添加剂吸收时,单基药相对更容易进行燃烧,从而表现出单基药 $p-t$ 曲线随药剂配比变化过渡较为平滑的现象。

对图1的 $p-t$ 曲线进行求导,获得 $dp/dt-t$ 曲线,如下图2所示。从图2可以看出,药剂的燃烧变化趋势与由图1观察得出的结论是一致的,即单基

药曲线随药剂配比变化过渡较为平滑,双基药曲线

变化波动较大。

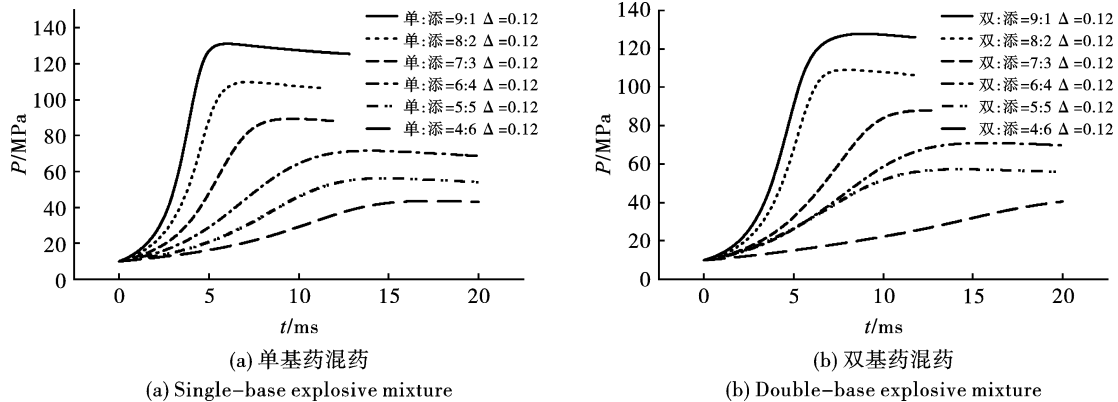


图1 药剂 $p-t$ 曲线

Fig. 1 The curves of $p-t$

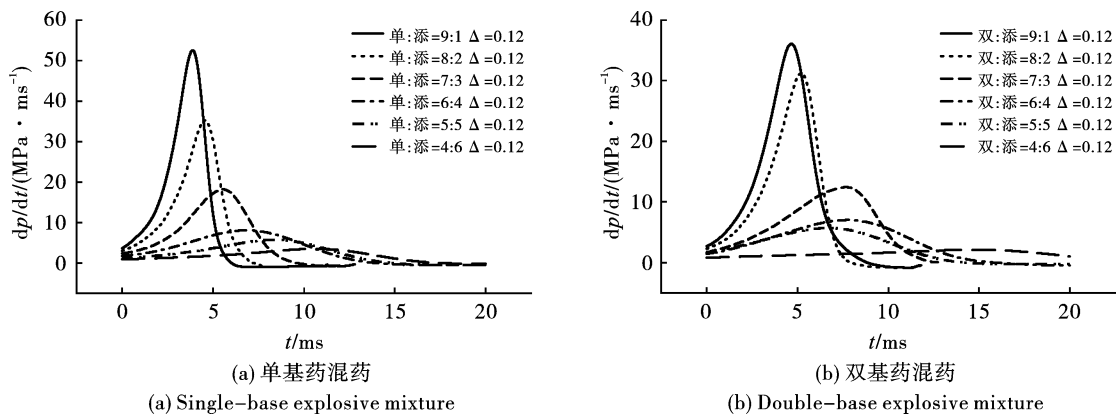


图2 药剂 $dp/dt-t$ 曲线

Fig. 2 The curves of $dp/dt-t$

研究图2可以发现,单基药混药的最大升压速率即 $(dp/dt)_{\max}$ 出现的位置是随着添加剂的加入而推后的,且最大升压速率值也随之减小,而双基药混药的 $(dp/dt)_{\max}$ 并未随着添加剂的加入而依次推后(如10#与11#曲线的对比),呈现出燃烧的不规律性。同样可以看出,加入同样比例添加剂的6#与12#配方,6#的 $dp/dt-t$ 曲线仍可以观察到一定的起伏程度,而12#配方已近乎为一条直线,可以认为添加剂的加入对于双基药燃烧的影响比单基药的影响更大。

对于药剂的优选需要考虑两方面问题:①药剂感度不能高。国外同类产品均归属于联合国危险货物分类中的1.4S类危险品(GB 6944—2012 同样有此分类),此类危险品的意外起爆危害范围仅在包件范围内,在包件被火烧损的情况下所有的爆炸和喷射效应也有限^[21]。在此种安全要求下需要装填药剂有较低感度以满足1.4S分类标准的危险等级鉴定。②药剂产气速率及产气量不能过低。由前

文所述,此类非炸药裂岩器材均依靠在密闭环境中产生大于岩石抗拉强度的压力从而破坏岩石,完成工程任务,因此药剂需要产生一定量的气体满足任务所需压力。产气速率不能过低是因为,如不能在短小时内产生大量气体,随着岩石内外微裂缝的增多,可能会出现难以维持密闭环境导致泄压,但岩石未被破碎成功的现象。

综上所述,在后续实验中首先排除火药占比较高的1#、2#、7#及8#配方,因为观察这四种配方的燃烧曲线可以发现, $dp/dt-t$ 曲线存在明显尖峰且燃烧速度较快,认为该四种配方的燃烧状态更接近纯火药,添加剂所能起到的钝感作用较为有限,感度相对应的会较高,不符合安全性需求;同样需要排除6#与12#配方,因为这两种配方不仅最大压力较小,且升压速率低,不符合需求②。结合实际样品的先期实验,最终确定的后续实验火药-添加剂比例为:70:30、55:45。

2.2 火药力及燃速实验结果与分析

如 1.2 节中所述,火药的火药力与余容可直接根据密闭爆发器实验所得 $p-t$ 曲线计算得出,而将 $p-t$ 曲线转化为 $u-p$ 曲线,获得燃速压力指数 n 与燃速系数 u_1 则需要确定火药的药型参数,以此确定 Z 的函数。由于本实验所用药剂为混合药剂,火药与添加剂间的药型、密度并不一致,且本实验的目的在于研究不同配比、不同装填密度下药剂的燃烧效果,以此探讨添加剂对燃烧效果影响的大小,与研究纯火药燃烧过程有所区分,在此借鉴火药燃烧的燃速处理方法并进行一定的假设,具体过程如下。

将装填在密闭爆发器中的全部药剂视为一个整体药剂,药剂密度假定为 1.5 g/cm^3 ,药型假设为方片状,则 $1 > \alpha = \beta$ 。已知密闭爆发器容积为 50 cm^3 ,

则装填密度 $\Delta = 0.12$ 时, $\alpha = \beta = 0.5$; $\Delta = 0.2$ 时, $\alpha = \beta = 5/6$ 。在此假设基础之上对实验所得 $p-t$ 曲线进行处理。

首先观察装填密度对 $dp/dt-t$ 曲线的影响,见图 3。从图中可以看出,装填密度的上升对药剂燃烧效果有着较为明显的影响,低火药配比的药剂提高装填密度后 $dp/dt-t$ 曲线可与高火药配比的药剂曲线相近。在同等药剂配比下,随着装填密度的上升, $(dp/dt)_{\max}$ 值有较大幅度的上升并且出现的位置发生前移,原因在于装填密度的上升使火药总量增加,虽然添加剂的吸热对火药的燃烧起一定阻碍作用,但整体仍以促进火药的燃烧产气反应为主导,因此装填密度上升带来 $(dp/dt)_{\max}$ 值的上升以及出现位置的前移。

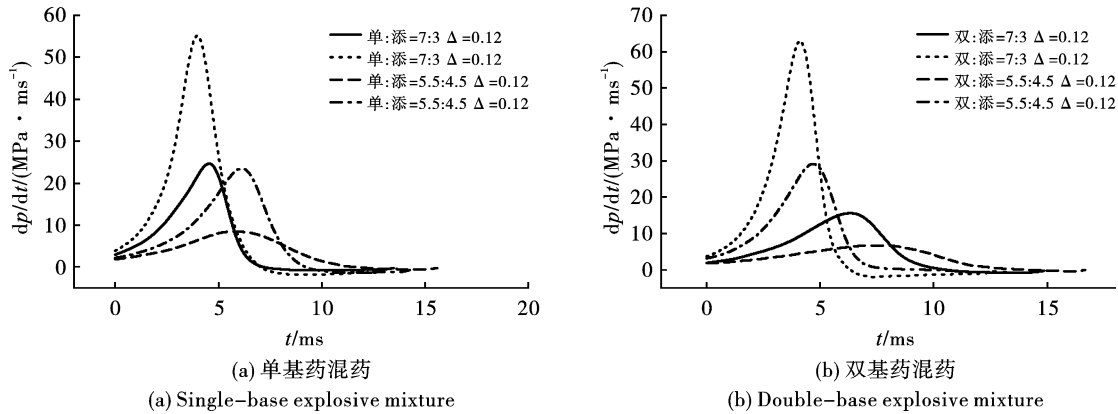


图 3 不同装填密度及配比药剂的 $dp/dt-t$ 曲线

Fig. 3 The $dp/dt-t$ curves of different filling density and proportion of chemicals

火药的燃烧情况同样可以用火药燃气生成猛度 Γ 与已燃质量百分数 ψ 的曲线来描述, Γ 表示单位压力下的气体生成速率,上述药剂的 $\Gamma-\psi$ 曲线见图 4。由图 4 曲线可以看出单基药混药与双基药混药的燃烧情况有所不同,对于单基混药,装填密度的上升会导致燃气生成猛度最大值 Γ_{\max} 的下降,且会使

Γ_{\max} 所在的 ψ 值变大,即推迟了药剂所能起到最大效能的燃烧程度。对于双基混药,装填密度的上升不仅会带来 Γ_{\max} 的上升,也对药剂的燃烧起到了一定的稳定作用。5.5:4.5 比例的双基混药在低装填密度下,燃烧的初始阶段 ($\psi < 0.2$) $\Gamma-\psi$ 曲线出现了一定的波动,而在高装填密度下并未出现此种现象。

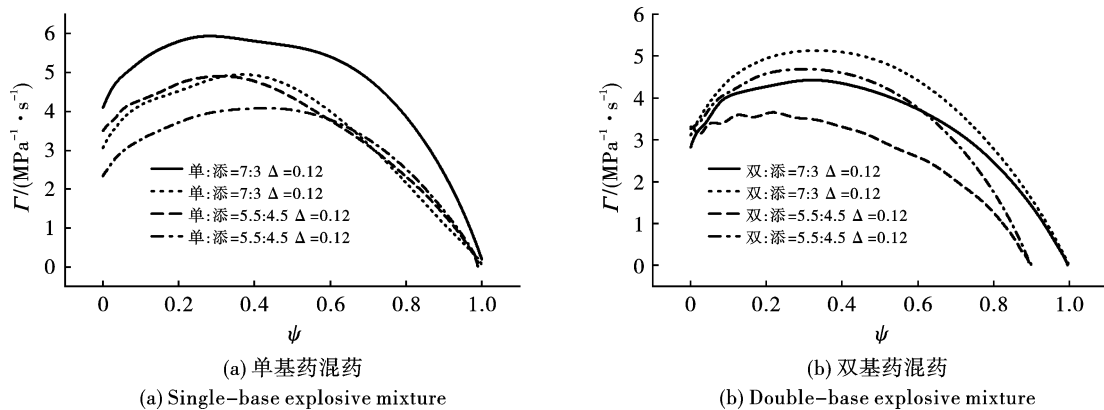


图 4 药剂 $\Gamma-\psi$ 曲线

Fig. 4 The curves of $\Gamma-\psi$

可以观察到,除双基药 55% 比例两种装填密度的药剂,其余配比药剂的曲线均在 $\psi = 1$ 处结束燃烧。根据 ψ 的定义可知 $\psi = 1$ 为火药完全燃烧点,图 4(b) 中 55% 双基药的两种药剂在 $\psi = 0.9$ 左右结束燃烧,说明药剂存在明显的不完全燃烧现象,清理密闭爆发器时也发现上述两发实验中实际存在明显的药剂残留现象,如图 5 所示,理论与实际相印证,证明本节中对药剂的假设存在一定的可信度。推测未完全燃烧的原因在于,添加剂虽较难参与燃烧反应,但密闭爆发器内温度足够的情况下可发生热分解反应,当火药燃烧不够剧烈时,密闭爆发器内的温度难以使全部的钝感添加剂发生热分解反应,因此 55% 双基药的两种药剂在实验后会残留有部分药剂在密闭爆发器内。

已知线性燃速 $u = u_1 p^n$, 对该式取对数,进行直线拟合,即可获得燃速系数 u_1 与压力指数 n 。处理

结果汇总在表 2。对数据进行直线拟合过程中发现各配比药剂的 $\ln u \sim \ln p$ 曲线斜率近似,因此在拟合过程中直线斜率均定义为 1.5, 即 $n = 1.5$, 拟合相关度 R^2 均在 0.99 以上,可认为拟合结果可信。



图 5 存在残留药剂

Fig. 5 The Residual agent

表 2 火药力及燃速处理结果

Table 2 The results of impetus and combustion velocity

	$f / (\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\alpha / (\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$u_1 / (\text{mm} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1})$	n	R^2
单:添 = 7:3 $\Delta = 0.12$	564.870	1.108	0.3381	1.5	0.998516
单:添 = 7:3 $\Delta = 0.2$			0.2892		0.998261
单:添 = 5.5:4.5 $\Delta = 0.12$	411.706	0.590	0.2953		0.998550
单:添 = 5.5:4.5 $\Delta = 0.2$			0.2552		0.994011
双:添 = 7:3 $\Delta = 0.12$	519.760	1.471	0.2514		0.997797
双:添 = 7:3 $\Delta = 0.2$			0.3091		0.999417
双:添 = 5.5:4.5 $\Delta = 0.12$	426.610	0.990	0.2197		0.984152
双:添 = 5.5:4.5 $\Delta = 0.2$			0.3080		0.998918

火药力 f 是用来衡量火药做功能力的特征值,本研究所用药剂虽不是纯火药,但在同一假设体系下可利用该特征值进行比较性评价。从表中可以看出单 + 添(7:3)配方的火药力最高,为 564.87 kJ/kg,则该配方为四种配方中做功能力最好的配方;双 + 添(7:3)配方的火药力较低一些,但仍比火药占比 55% 的两种配方火药力更高,做功能力强,证明在此类配方中,火药对整体药剂的做功能力占主导性因素,且单基药在占比较高时做功能力较双基药配方更优。

在压力指数 $n = 1.5$ 不变的情况下,燃烧速度 u 与燃速系数 u_1 存在正相关关系,燃速系数 u_1 越大,在相同压力下的燃烧速度越大,燃烧时间越短。从表中看出,单基药配方中燃烧速度最快,燃烧时间最短的为单 + 添(7:3) $\Delta = 0.12$ 配方,其次为双 + 添(7:3) $\Delta = 0.2$ 配方,并且对单基药配方而言装填密度的上升会导致燃速系数的下降,而对双基药配方而言会使燃速系数上升,这与前文中根据 $\Gamma - \psi$ 曲线分析得出的结论是一致的。

3 结论

(1) 由于单基药比双基药更易传热升温,因此随着添加剂的加入其对双基药燃烧效果的影响比对单基药燃烧效果的影响要大。

(2) 药剂配比的变化对燃烧性能的影响趋势是一致的。药剂装填密度的变化对单、双基药配方的影响不同;装填密度的上升会导致单基药配方燃烧效能的下降,而双基药配方会出现燃烧效能的上升。

(3) 综合以上两点结论考虑,为达到最合理的燃烧效能,后续根据所需性能针对此种配方调整装填药剂时,单基药配方应优先考虑调整单基药的质量占比,双基药配方可优先考虑调整药剂的装填密度。

(4) 为提高燃烧的稳定性,可在药剂中添加适量的氧化剂组分,以调整药剂的氧平衡值,提高药剂的燃烧完全程度。

参考文献 (References)

- [1] LAZAR K, VLADISLAV K, IVAN J, et al. Environmental and safety accidents related to blasting operation[J]. American Journal of Environmental Sciences, 2012, 8(4): 360-365.
- [2] FARADONBEH R S, ARMAGHANI D J, MONJEZI M, et al. Genetic programming and gene expression programming for flyrock assessment due to mine blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2016, 88: 254-264.
- [3] RAINA A K, MURTHY V M S R, SONI A K. Flyrock in bench blasting: a comprehensive review[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(4): 1199-1209.
- [4] 宋光明. 爆破地震效应与减震方法的探讨[J]. 世界采矿快报, 1999(1): 26-29.
- [4] SONG Guang-ming. Approach to effect blast vibration and methods to decrease vibration[J]. Mining Technology, 1999(1): 26-29. (in Chinese)
- [5] 董海佩, 程贵海, 牛虎, 等. 基于事故树分析法的控制爆破危害影响研究[J]. 爆破, 2018, 35(2): 151-154.
- [5] DONG Hai-pei, CHENG Gui-hai, NIU Hu, et al. Research on hazard of controlled blasting based on fault tree analysis[J]. Blasting, 2018, 35(2): 151-154. (in Chinese)
- [6] OLUWOYE I, DLUGOGORSKI B Z, GORE J, et al. Atmospheric emission of NO_x from mining explosives: A critical review[J]. Atmospheric Environment, 2017, 167: 81-96.
- [7] WENG Z H, MUDD G M, MARTIN T, et al. Pollutant loads from coal mining in Australia: Discerning trends from the National Pollutant Inventory (NPI)[J]. Environmental Science & Policy, 2012, 19-20: 78-89.
- [8] JAFFE D A, WIGDER N L. Ozone production from wildfires: A critical review[J]. Atmospheric Environment, 2012, 51: 1-10.
- [9] 余红兵, 尚钰姣, 赵明生, 等. 地下室爆破拆除对紧邻建筑的危害控制[J]. 爆破, 2017, 34(1): 148-151.
- [9] YU Hong-bin, SHANG Yu-jiao, ZHAO Ming-sheng, et al. Hazards control of basement explosive demolition to adjacent building[J]. Blasting, 2017, 34(1): 148-151. (in Chinese)
- [10] 陈仲超, 刘广军. 浅析城镇爆破工程危害的综合控制[J]. 工程爆破, 2006(4): 60-63.
- [10] CHEN Zhong-chao, LIU Guang-jun. Analysis on comprehensive control of damage from blasting engineering in city[J]. Engineering Blasting, 2006(4): 60-63. (in Chinese)
- [11] 谢兴华, 张小康. 非爆破破岩法研究综述[J]. 煤矿爆破, 2017(6): 19-23.
- [11] XIE Xing-hua, ZHANG Xiao-kang. Review of the study of non-explosive rock breaking[J]. Coal Mine Blasting, 2017(6): 19-23. (in Chinese)
- [12] 谢兴华, 张小康, 王林杰, 等. 一种高能燃烧破岩药柱的应用[J]. 工程爆破, 2017, 23(5): 76-80.
- [12] XIE Xing-hua, ZHANG Xiao-kang, WANG Lin-jie, et al. Application of a high-energy incendiary crushing rock charge column[J]. Engineering Blasting, 2017, 23(5): 76-80. (in Chinese)
- [13] PICKERING R, YOUNG C. Controlled foam injection: a new and innovative non-explosive rockbreaking technology[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2017, 117(3): 237-243.
- [14] 徐颖, 程玉生. 高压气体爆破破煤机理模型试验研究[J]. 煤矿爆破, 1996(3): 1-4.
- [14] XU Yin, CHENG Yu-sheng. Model test study on coal breaking mechanism of high pressure gas blasting[J]. Coal Mine Blasting, 1996(3): 1-4. (in Chinese)
- [15] SINGH S P. Non-explosive applications of the PCF concept for underground excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1998, 13(3): 305-311.
- [16] De GRAAF W W, SPITERI W. A preliminary qualitative evaluation of a hydraulic splitting cylinder for breaking rock in deep-level mining[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2018, 118(8): 891-897.

- sion 971[DB]. 2013.
- [20] 王宇涛. 基于 RHT 本构的岩体爆破破碎模型研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2015.
- [20] WANG Yu-tao. Study on rock mass blasting model based on RHT constitutive model[D]. Beijing:China University of Mining and Technology (Beijing), 2015. (in Chinese)
- [21] 凌天龙,王宇涛,刘殿书,等. 修正 RHT 模型在岩体爆破响应数值模拟中的应用[J]. 煤炭学报,2018, 43(S2):434-442.
- [21] LING Tian-long, WANG Yu-tao, LIU Dian-shu, et al. Application of modified RHT model in numerical simulation of rock blasting response[J]. Journal of China Coal Society,2018, 43(S2):434-442. (in Chinese)
- [22] TAWADROUS A. Hard rocks under high strain-rate loading[D]. Canada:Queen's University,2010.
- [23] 崔浩,郭锐,顾晓辉,等. BP神经网络和圆筒能量模型标定炸药的JWL参数[J]. 火炸药学报,2021, 44(5):665-673.
- [23] CUI Hao, GUO Rui, GU Xiao-hui, et al. Research on calibration of explosive JWL parameters by BP neural network and cylinder energy model[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2021, 44(5):665-673. (in Chinese)
- [24] 张向阳,顾金才,沈俊,等. 爆炸动载条件下短密锚杆受力特点及硐室破坏特征[C]//中国土木工程学会第十五届年会暨隧道及地下工程分会第十七届年会论文集,2012:199-205.
- [24] ZHANG Xiang-yang, GU Jin-cai, SHEN Jun, et al. Stress characteristics and cavity failure characteristics of short-dense bolt under explosive dynamic load[C]//Proceedings of the 15th Annual Conference of China Civil Engineering Society and the 17th Annual Conference of Tunnel and Underground Engineering Branch, 2012: 199-205. (in Chinese)
- [25] 杨小林. 地下工程爆破[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2009.
- [25] YI Chang-ping, DANIEL Johansson, JENNY Greberg. Effects of in-situ stresses on the fracturing of rock by blasting[J]. Computers and Geotechnics, 2017, 104: 321-330.
- [27] 夏祥. 爆炸荷载作用下岩体损伤特征及安全阈值研究[D]. 武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2006.
- [27] XIA Xiang. Study on damage characteristics and safety threshold of rock mass under explosion load[D]. Wuhan: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics), 2006. (in Chinese)
- [28] 杨小林,朱思源,褚怀保,等. 基于损伤累积的大跨度隧道(硐库)爆破振动传播规律[J]. 科学技术与工程,2021, 21(10):3958-3963.
- [28] YANG Xiao-lin, ZHU Si-yuan, CHU Huai-bao, et al. Blasting vibration propagation law of long span tunnel based on damage accumulation[J]. Science technology and Engineering, 2021, 21(10):3958-3963. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

(上接第171页)

- [17] De SILVA V R S, RANJITH P G, PERERA M S A, et al. A modified, hydrophobic soundless cracking demolition agent for non-explosive demolition and fracturing applications[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 119:1-13.
- [18] GUPTA R N. Emerging explosives and initiation devices for increased safety, reliability, and performance for excavation in weak rocks, mining and close to surface structures[C]//International Conference on Recent Advances in Rock Engineering (RARE), 2016: 91, 361-369.
- [19] 余永刚,薛晓春. 发射药燃烧学[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2016.
- [19] YU Yong-gang, XUE Xiao-chun. Propellant combustion [M]. Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,2016. (in Chinese)
- [20] 蔺向阳,郑文芳. 火药学[M]. 北京:化学工业出版社,2020.
- [20] LIN Xiang-yang, ZHENG Wen-fang. Gunpowder[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2020. (in Chinese)
- [21] 中国国家标准化管理委员会,中华人民共和国质量监督检验检疫总局. GB 6944—2012 危险货物分类和品名编号[S]. 2012.
- [21] Standardization Administration of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 6944—2012 Classification and code of dangerous goods[S]. 2012. (in Chinese)

英文编辑:黄刚