

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.006

爆轰波垂直碰撞固体介质分界面爆炸压力计算

郭子如,刘伟,刘锋,何志伟,杜宝强,吴俊浩
(安徽理工大学 化学工程学院,淮南 232001)

摘要: 有很多实际应用场合需要分析和预估炸药接触爆炸时接触面上爆炸压力,以便更加有效地理解和评估这些场合的爆炸效果,如炮孔中炸药爆轰对孔壁和孔底爆炸冲击压力、碎甲战斗部与目标接触爆炸压力、带壳战斗部炸药爆轰对壳体的作用压力等等。为了理论上确定炸药爆轰垂直碰撞固体介质分界面上爆炸压力,介绍和评述了几种计算方法,并运用这些计算方法对同一个条件的爆炸压力进行了分析、计算和比较。当爆轰波垂直作用于固体介质时,应力波理论计算值小于爆轰波冲击理论计算值,爆轰波冲击理论计算结果与文献值更为接近,炸药在固体介质分界面爆炸压力实际情况具有复杂性,因此认为炸药在固体介质分界面上爆炸压力应以爆轰冲击式计算较为合适。计算过程和方法可为有关理论和工程应用分析提供参考。

关键词: 爆炸压力;爆轰;垂直碰撞;计算方法

中图分类号: O381 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)04-0039-05

Calculation of Explosion Pressure at Interface of Solid Medium when Detonation Wave Collides Vertically

GUO Zi-ru, LIU Wei, LIU Feng, HE Zhi-wei, DU Bao-qiang, WU Jun-hao

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

Abstract: There are many practical applications where the explosive pressure on the surface of the solid target should be analyzed and estimated in order to understand and evaluate the explosion effect on these occasions more effectively. For example, the explosion pressure of explosives contacting and detonating on the target surface of high explosive squash warhead or on the wall of blasting borehole and on the inner wall of shell warhead. In order to theoretically determine the explosion pressures at the interface of solid medium when explosive detonation collides vertically, several calculation methods are introduced, reviewed and employed to analyze, calculate and compare the explosion pressure in the same scene. When the detonation wave acts vertically on the solid medium, the theoretical calculation value of stress wave is smaller than the theoretical calculation value of detonation wave. Furthermore, the calculated value of detonation wave shock theory is closer to literature data. Since the actual situation of explosive pressure at the interface of solid medium is complicated, it is considered that the detonation shock formula should be used to calculate the explosive pressure at the interface of solid medium. The calculation process and method could provide reference for related theory and engineering application analysis.

Key words: explosion pressure; detonation; vertical collision; calculation method

研究爆轰波在固体介质中形成冲击波的初始参

数也就是接触面上的参数对评定炸药爆炸对邻近介质的作用及介质中冲击波传播规律十分必要。计算爆轰波在分界面上的压力峰值大小,对钢板自由面上发生的层裂效应评估和碎甲战斗部做功能力提高及工程爆破中装药爆轰对孔壁孔底的冲击响应分析

收稿日期:2021-06-25

作者简介:郭子如(1962-),男,教授、硕士,从事爆炸材料、爆炸作用及效应以及爆炸燃烧安全方面的研究,(E-mail) 34999704@qq.com.

和爆破效果改善具有重要实际意义。

OZGUR Yilmaz 等人采用三维有限差分数值模拟研究岩体在爆破载荷作用下的行为^[1],分析中采用 Mohr-Coulomb 破坏准则、应变率对岩石材料力学性能的影响,探讨了加载速率和各向应力对爆破性能和爆破损伤区的影响;Ning JianGuo 等人提出了一种三维嵌入欧拉-拉格朗日方法模拟爆炸和冲击载荷下的三维流固耦合问题^[2],将典型爆炸和冲击问题数值结果与实验数据进行了比较,验证了方法的有效性,对进一步研究爆炸与冲击问题提供了有益的参考;Sternberg H M 采用膨特里特(TNT/PETN 50/50)与钢板倾斜接触爆炸时^[3],分界面最大压力与入射角度的关系数据表,可以根据炸药的爆轰压力来决定分界面上的最大压力;Barker L M 等人通过任意反射表面速度干涉仪可非接触连续精确测量高速运动目标的速度研究^[4];姜夕博等采用不同方法探究了冲击波在铝、钢、有机玻璃中的衰减特性^[5-10],得到固体介质中冲击波的衰减为指数型衰减;刘好全通过数值模拟方法^[11],对 B 炸药铝等系统中爆轰波斜反射进行了研究,计算结果与前人的实验观测结果吻合;刘鲁峰对冲击波倾斜入射非线性弹性介质进行了研究^[12];谢平等通过控制炸药密度和不耦合系数^[13],爆速与装药直径相关,采用理论分析和现场试验的方法,研究了炮孔壁压力与装药直径的关系;张恒根等人提出了空气不耦合装药时孔壁初始冲击波参数的计算方程组^[14],并与常用公式计算值、数值模拟结果和实验结果进行比较,得到方程组计算的孔壁压力与实验结果更吻合;林哲等人利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对爆炸应力波传播规律在炮孔水耦合装药不同耦合系数条件下模拟研究^[15],并对所得到的模拟结果数据进行拟合分析,得到在爆破水耦合装药下最佳的不耦合系数。

以上研究都是采用不同方法分析、计算了冲击波在固体介质中的衰减规律,但是炸药在固体介质分界面上爆炸压力的计算未做详细的阐述,本文介绍了一些计算方法并对这些方法进行评述,并试图从理论上确定炸药在固体介质分界面上爆炸压力。本文以文献中的若干计算或实验条件为前提,对同一个场景的爆炸压力进行了分析、计算和比较,计算过程和方法可为有关理论分析和工程应用分析提供参考。

1 平面爆轰波垂直作用固体介质分界面爆炸压力计算方法

对于图 1 平面爆轰波垂直作用于固体介质的情

况,有三种分界面上爆炸压力的计算方法。一种是根据应力波理论得到的计算式(以下简称应力波计算式),该计算式是通过应力波理论(弹性范围内)得到的,并把炸药中爆轰波传播看作是应力波的传播,固体介质中冲击波也看作是应力波,这样炸药在固体分界面上作用的最大压力 P_x 为^[16]

$$P_x = \frac{2P_{CJ}(\rho C_e)}{\rho C_e + \rho_0 D} \quad (1)$$

式中: C_e 为固体介质材料中弹性纵波速度; ρ 为密实介质材料的初始密度; ρ_0 为炸药装药密度; P_{CJ} 为炸药装药爆轰 CJ 压力。式(1)中如果固体介质波阻抗 \gg 炸药装药的波阻抗,由式(1)得到 $P_x = 2P_{CJ}$ 。

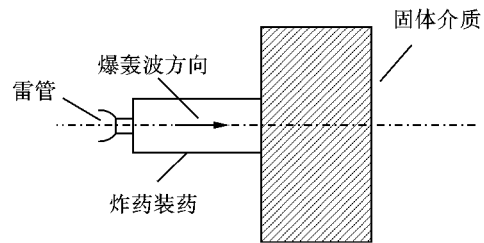


图 1 平面爆轰波垂直作用于固体介质的示意图

Fig. 1 The plane detonation wave acts to the solid medium perpendicularly

另一种是运用冲击波基本关系和材料的冲击压缩规律得到的计算方法(以下简称爆轰冲击计算式)。当爆轰产物绝热方程为 $PV^\gamma = \text{常数}$ 时,则分界面处反射冲击波与爆轰波之间有如下方程

$$\frac{V_x}{V_2} = \frac{(\gamma + 1)P_2 + (\gamma - 1)P_x}{(\gamma + 1)P_x + (\gamma - 1)P_2} = \frac{(\gamma - 1)\pi + (\gamma + 1)}{(\gamma + 1)\pi + (\gamma - 1)} \quad (2)$$

式中: $\pi = \frac{P_x}{P_2}$; V_x 为反射冲击波后爆轰产物比容; V_2 为爆轰波阵面后爆轰产物比容; γ 为多方指数; P_x 为反射冲击波阵面后的压力; P_2 为爆轰波阵面后压力。固体介质分界面上质点速度 u_x

$$u_x = \frac{D}{\gamma + 1} \left[1 - \frac{(\pi - 1)\sqrt{2\gamma}}{\sqrt{(\gamma + 1)\pi + (\gamma - 1)}} \right] \quad (3)$$

若固体介质为绝对刚体,则 $u_x = 0$,由式(3)得到

$$\pi = \frac{5\gamma + 1 + \sqrt{17\gamma^2 + 2\gamma + 1}}{4\gamma} \quad (4)$$

取 $\gamma = 3$,此时计算得到 $\pi = 2.39$,即 $P_x = 2.39P_2$ 。

第三种方法假定:爆轰波如图 1 所示由左向右碰撞目标,若药柱长度不是很大时,爆轰产物无侧向飞散,目标或介质为绝对刚体,可以得到分界面上爆

炸压力计算式^[17]

$$P_x = \frac{64}{27} P_2 \left(\frac{h}{D\tau} \right)^3 \quad (5)$$

式中: h 为炸药长度; P_2 为爆轰波阵面后压力; D 炸药爆速; τ 为炸药爆炸压力对目标的作用时间。在爆轰结束瞬间,即 $\tau = h/D$ 时刻,作用在目标上的压力值为 $P_x = \frac{64}{27} P_2$,即产物作用在目标上的压力为爆轰压力的2.37倍。

凝聚介质中冲击波速度 D 与其波后质点速度 u 之间,在相当宽的速度范围(或压力范围1.7~200 GPa)内存在着线性经验关系^[6]

$$D = a + bu_x \quad (6)$$

式中: D 为冲击波速度; a 和 b 为常数; u_x 为波后质点速度。上式本质上也是固体介质的冲击压缩规律。将式(6)代入冲击波的动量守恒方程,可得波后质点中压力方程

$$P_x = \rho_{0m} D u_x = \rho_{0m} (a + bu_x) u_x \quad (7)$$

式中: P_x 为波后压力; ρ_{0m} 为介质初始密度。式(7)与式(3)联立,可求出炸药在固体介质接触面处爆炸压力和介质中初始冲击波波后质点速度。

2 若干条件下的计算

为了便于与文献中结果进行对比,本文采用了以下文献的计算条件。

条件一:文献[18]选用密度为 1.777 g/cm^3 , $\phi 100 \times 50 \text{ mm}$ 的钝化RDX炸药药柱,爆速为 8.668 km/s ,爆压为 34.178 GPa ,绝热指数为 2.9806 。利用冲击突跃条件式与冲击波在低碳钢中冲击响应结合,计算得到炸药在低碳钢分界面冲击波压力为 51.38 GPa 。

条件二:文献[8]选用密度为 1.57 g/cm^3 ,长为 $L=50 \text{ mm}$ 的TNT药柱,绝热指数为 2.44 ,该TNT药柱爆速为 6.7 km/s ,爆轰压力为 17.62 GPa 。文献从介质温升效应出发,提出一个近似模型,计算得到炸药在介质铝分界面爆炸压力约为 21 GPa 。

条件三:文献[6]选用密度为 1.57 g/cm^3 ,长度为 50 mm ,直径为 45 mm 的PETN/TNT(质量比50:50)药柱,爆速为 7.351 km/s ,爆压为 22.24 GPa ,绝热指数为 2.81 。文献将有机玻璃冲击波速度与质点速度关系式带入冲击波动量守恒方程,再与冲击波后压力方程联立,利用作图法求出PETN/TNT在PMMA分界面处爆炸压力为 17.1 GPa ,波后质点速度为 2.41 km/s 。

条件四:文献[19]选用炸药密度为 1 g/cm^3 ,爆

轰压力为 3.24 GPa ,爆速为 3.6 km/s 的2号铵梯炸药,绝热指数为 3 。在耦合柱装药炮孔中,考虑了炸药和岩体性质对岩体中爆轰应力波的作用,利用数值计算得到灰岩和辉绿岩孔壁膨胀速度最大值 v_0 ,将最大速度带入孔壁应力方程 $\sigma = C_0 \cdot v_0 \cdot \rho_0$ (其中 C_0, ρ_0 分别为岩石内声速和密度),且孔壁应力方程等价于孔壁岩石状态方程(即默纳汉状态方程),得到灰岩、辉绿岩孔壁爆炸压力为 4.31 GPa 、 5.93 GPa 。本文计算中用到的一些固体介质相关参数见表1。

表1 一些固体介质相关参数^[20]

材料	$\rho_0 / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$a / (\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	b
低碳钢	7.90	3.57	1.92
铝	2.79	5.48	1.30
有机玻璃	1.19	2.87	1.88
灰岩	2.42	3.50	1.43
辉绿岩	2.87	3.50	1.32

炸药在低碳钢分界面上,根据应力波计算式,式(1) $P_x = 44.13 \text{ GPa}$ 。根据爆轰冲击计算式,式(6)得到

$$D = 3.57 + 1.92u_x \quad (8)$$

将式(8)代入到式(7)得到

$$P_x = 7.9(3.57 + 1.92u_x)u_x \quad (9)$$

式(3)得到

$$u_x = 2.178 - \frac{0.155P_x - 5.316}{\sqrt{0.116P_x + 1.9086}} \quad (10)$$

将式(10)与式(9)联立,利用作图法可以得到炸药在低碳钢分界面处爆炸压力和爆轰波后质点速度(见图2): $P_x = 52.98 \text{ GPa}$, $u_x = 1.16 \text{ km/s}$ 。同理可以得到炸药在铝、有机玻璃、灰岩和辉绿岩分界面上的爆炸压力,计算结果见表2。

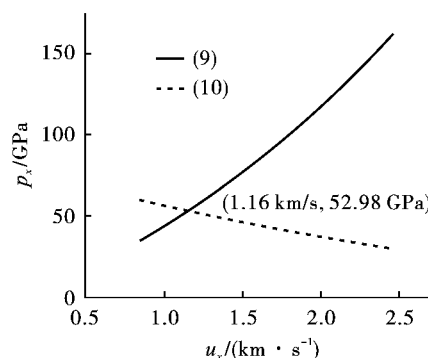


图2 低碳钢界面处冲击波初始参数
Fig. 2 Initial parameters of shock wave at the low carbon steel interface

3 计算结果分析与比较

上述三种计算方法得到的分界面上爆炸压力值

列于表2中,三种方法得到的爆炸压力值分别记为 P_s 、 P_d 、 P_n 。

表2 爆轰波在固体介质分界面上压力 P_x (单位:GPa)

Table 2 Detonation wave pressure on the interface of solid medium P_x (unit: GPa)

条件	炸药爆轰压力 P_2	文献压力 P_x	P_s	P_s/P_2	P_d	P_d/P_2	P_n	P_n/P_2
条件一	34.178	51.38	44.13	1.29	52.98	1.55	-	-
条件二	17.62	21.00	20.64	1.17	24.79	1.41	-	-
条件三	22.24	17.10	9.34	0.42	18.84	0.85	-	-
条件四	灰岩 辉绿岩	4.31	4.52	1.40	4.98	1.54	-	-
		5.93	5.41	1.67	5.21	1.61	-	-
绝对刚体	P_2	-	$2P_2$	2.00	$2.39P_2$	2.39	$2.37P_2$	2.37

通过分析可以看出:

(1) 钢的密度大于爆轰波阵面上产物密度,在爆轰产物作用下,分界面沿冲击波前进方向运动速度极低,爆轰产物在分界面上越来越密集,当爆轰波达到分界面之后,立即向爆轰产物中反射一个反向压缩波,分界面上波形发生叠加,爆轰产物作用于分界面上的最大压力大于爆轰波阵面上的压力,所以炸药在钢板分界面上爆炸压力满足不等式关系: $P_2 < P_s < P_d < 2P_2 < 2.37P_2 < 2.39P_2$,炸药在铝和灰岩分界面上爆炸压力关系与炸药在钢板分界面情况类似,而炸药在辉绿岩分界面上爆炸压力关系: $P_2 < P_d < P_s < 2P_2 < 2.37P_2 < 2.39P_2$,应力波理论计算得到的压力值大于爆轰波理论计算得到压力值;对有机玻璃而言,其密度要小于钢、铝,爆轰波到达有机玻璃分界面上,向爆轰产物中传递一个反射膨胀波,波形叠加后,爆轰产物作用于分界面上的最大压力小于爆轰波阵面上的压力,所以炸药在有机玻璃分界面上压力关系: $P_s < P_d < P_2 < 2P_2 < 2.37P_2 < 2.39P_2$ 。本文采用的第二种计算方法即爆轰冲击计算式本质上与文献中采用的方法原理是相同的,只是计算时采用的冲击压缩关系式不同,但计算结果与文献值一致。

(2) 爆轰波垂直作用于绝对刚体时,分界面上爆炸压力计算结果满足: $P_s < P_d$,即应力波理论计算值 < 爆轰波冲击理论计算值。

(3) 炸药在固体介质爆炸压力理论计算结果基本满足关系: $P_s < P_d$,即通过应力波理论计算得到炸药在固体介质分界面爆炸压力值小于爆轰波冲击理论计算得到的压力值,然而炸药在辉绿岩分界面上,通过应力波理论计算得到的爆炸压力值略大于爆轰冲击理论计算得到的压力值。

(4) 通过上述分析可以看出,炸药爆轰压力越大,固体介质分界面上的爆炸压力越大,而增加炸药的爆轰速度和密度将使得爆轰压力提高。文献

[21,22]中研制出了一种高威力三级煤矿许用水胶炸药,其爆轰压力高于普通的三级煤矿许用水胶炸药,因此其作用于炮孔壁的压力更高,因此对于硬岩巷道掘进爆破,该炸药获得了更大的掘进进尺。

4 结论

(1) 爆轰波垂直作用于固体介质时,应力波理论计算值 < 爆轰波冲击理论计算值,爆轰波冲击理论计算结果与文献值更为接近。

(2) 应力波理论计算式的条件较为特殊,很多实际状况在物理上是很难理解的,如把爆轰波看成是弹性应力波,因此我们认为炸药在固体介质分界面上爆炸压力应以爆轰冲击式计算较为合适。

(3) 结合本文提出的分界面爆炸压力的理论计算方法和具体计算过程,若给出岩石和炸药的相关参数,对有效预估岩石爆破中,炸药对岩石的爆破破碎能力,有一定的理论指导意义。

参考文献 (References)

- [1] OZGUR Yilmaz, TUGRUL Unlu. Three dimensional numerical rock damage analysis under blasting load [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38:266-278.
- [2] NING Jian-guo, MENG Fan-lin, MA Tian-bao, et al. A special numerical method for fluid-structure interaction problems subjected to explosion and impact loading [J]. Science China Technological Sciences, 2020, 7: 1280-1292.
- [3] STERNBERG H M. Interaction of oblique detonation waves with iron [J]. Physics Fluids, 1966, 9:1307-1315.
- [4] BARKER L M, HOLLENBACH R E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surfaces [J]. Appl Phys, 1972, 43(11): 4669-4675.
- [5] 姜夕博, 饶国宁, 徐森, 等. 冲击波在有机玻璃中衰减特性的数值模拟与实验研究 [J]. 南京理工大学学

- 报,2012,36(6):1059-1064.
- [5] JIANG Xi-bo, RAO Guo-ning, XU Sen, et al. Numerical simulation and experimental research on shock wave attenuation properties in PMMA[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2012, 36(6):1059-1064. (in Chinese)
- [6] 徐森,刘大斌,彭金华,等.药柱冲击波在有机玻璃中的衰减特性研究[J].高压物理学报,2010,24(6):431-437.
- [6] XU Sen, LIU Da-bin, PENG Jin-hua, et al. Study on the shock wave attenuation of the booster charge in the PMMA gap[J]. Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(6):431-437. (in Chinese)
- [7] 张世文,龙建华,贾宏志,等.平面冲击波在有机玻璃中的衰减测试及数值模拟[J].兵工学报,2016,37(7):1214-1219.
- [7] ZHANG Shi-wen, LONG Jian-jun, JIA Hong-zhi, et al. Measuring and numerical simulation of attenuation of planar shock wave in PMMA[J]. Acta Armamentarius, 2016, 37(7):1214-1219. (in Chinese)
- [8] 王海福,冯顺山.密实介质中冲击波衰减特性的近似计算[J].兵工学报,1996(1):79-81.
- [8] WANG Hai-fu, FENG Shun-shan. An approximate theoretical model for the attenuation of shock pressure in solid materials[J]. Acta Armamentarius, 1996(1):79-81. (in Chinese)
- [9] 韩秀凤,蔡瑞娇,严楠.雷管输出冲击波在有机玻璃中传播衰减的实验研究[J].含能材料,2004(6):329-332,3.
- [9] HAN Xiu-feng, CAI Rui-jiao, YAN Nan. Study on attenuation of detonator shock wave in PMMA[J]. Energetic Materials, 2004(6):329-332,3. (in Chinese)
- [10] STANISLAW Andrzej, WALDEMAR Andrzej. Measurement of shock wave velocity in plexiglass for detection of energy release in aluminized nonideal explosives[J]. Energetic Materials, 1999, 7(1):34-37.
- [11] 刘好全,何洋洋,张洋溢.爆轰波斜入射金属材料的模拟计算[J].爆破器材,2009,38(6):1-4,8.
- [11] LIU Hao-guan, HE Yang-yang, ZHANG Yang-yi. Simulation on the oblique reflection of detonation waves at the explosive-metal interface[J]. Explosive Materials, 2009, 38(6):1-4,8. (in Chinese)
- [12] 刘鲁峰,李永池,唐之景.非线性弹性介质中冲击波斜反射的研究(II)[J].爆炸与冲击,1989(3):206-211.
- [12] LIU Lu-feng, LI Yong-chi, TANG Zhi-jing. Study on oblique reflection of shock wave in nonlinear elastic media(II)[J]. Explosion and Shock, 1989(3):206-211. (in Chinese)
- [13] 谢平,王梦想,武建,等.装药直径对煤矿岩巷掘进爆破效果的影响[J].煤矿爆破,2020,38(5):9-12,34.
- [13] XIE Ping, WANG Meng-xiang, WU Jian, et al. Influence of charge diameter on blasting effect in coalmine rock roadway excavation[J]. Coal Mine Blasting, 2020, 38(5):9-12,34. (in Chinese)
- [14] 张恒根,王卫华,王永强.空气不耦合装药孔壁初始冲击压力的计算[J].工程爆破,2020,26(3):8-15,22.
- [14] ZHANG Heng-gen, WANG Wei-hua, WANG Yong-qiang. Calculation of initial shock pressure on hole wall of air-decoupling charge[J]. Engineering Blasting, 2020, 26(3):8-15,22. (in Chinese)
- [15] 林哲,张世平.水耦合装药下爆炸应力波传播规律的数值模拟[J].煤炭技术,2017,36(8):88-90.
- [15] LIN Zhe, ZHANG Shi-ping. Numerical simulation of explosive stress wave propagation under water coupling charge[J]. Coal Technology, 2017, 36(8):88-90. (in Chinese)
- [16] 宗琦.爆炸冲击波的动态破岩特性研究[J].爆炸与冲击,1997(4):82-87.
- [16] ZONG Qi. Investigation on dynamic characteristics of rock fragmentation by shock wave[J]. Explosion and Shock Waves, 1997(4):82-87. (in Chinese)
- [17] 炸药理论编写组.炸药理论[M].北京:国防工业出版社,1982.
- [18] 王远飞.接触爆炸作用金属材料中冲击波的衰减[D].南京:南京理工大学,2007.
- [18] WANG Yuan-fei. Attenuation of shock waves in metallic materials exposed to explosion[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [19] 张奇.柱状装药岩石爆炸应力衰减问题的研究[J].长沙矿山研究院季刊,1990(3):63-68.
- [19] ZHANG Qi. Study on problem of attenuation of explosion stress in rocks by column charges[J]. Quarterly Journal of Changsha Mine Research Institute, 1990(3):63-68. (in Chinese)
- [20] 陈宝心,杨勤荣.爆破动力学基础[M].武汉:湖北科学技术出版社,2005.
- [21] 汪海波,郭子如,宗琦.高威力三级煤矿许用水胶炸药的试验研究[J].含能材料,2014,22(6):857-861.
- [21] WANG Hai-bo, GUO Zi-ru, ZONG Qi. Experimental study on high power class 3 permissible water gel explosive[J]. Energetic Materials, 2014, 22(6):857-861. (in Chinese)
- [22] 王修辉,郭子如,朱福元,等.高威力三级煤矿许用水胶炸药巷道掘进爆破[J].工程爆破,2017,23(4):78-81.
- [22] WANG Xiu-hui, GUO Zi-ru, ZHU Fu-yuan, et al. High-power class 3 coal mine permissible water gel explosive used in tunnel excavation blasting[J]. Engineering Blasting, 2017, 23(4):78-81. (in Chinese)