

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.008

等体积空孔直眼掏槽槽腔形成过程及其分析*

柴修伟¹,李建国¹,习本军²,徐亮²,彭亚利²,王文科¹,金胜利²

(1. 武汉工程大学, 武汉 430070; 2. 湖北兴发化工集团股份有限公司, 兴山 443700)

摘要: 在巷道掘进爆破中,空孔能够引起掏槽眼周围应力集中,为槽腔的形成提供自由面。根据空孔效应理论推导出装药孔与空孔之间的距离公式,采用 LS-DYNA 有限元软件建立数值模型,分析不同直径下的直眼掏槽槽腔的形成过程及有效应力传播规律。模拟得出空孔具有应力波导向作用、产生反向拉伸应力波和应力集中现象,且随着空孔直径的增大作用效果更加明显;四空孔直眼掏槽相比于八空孔直眼掏槽爆破作用形成的裂纹扩展更加丰富,四空孔直眼掏槽空孔直径为八空孔直眼掏槽空孔直径的 1.42 倍,最大有效应力峰值增长 1.2 倍。

关键词: 巷道掘进;空孔效应;直眼掏槽;数值模拟;有效应力

中图分类号: TD236 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)04-0048-05

Formation Process and Analysis of Cavity by Burn Cut with Equal Volume Empty Hole

CHAI Xiu-wei¹, LI Jian-guo¹, XI Ben-jun², XU Liang², PENG Ya-li², WANG Wen-ke¹, JIN Sheng-li²
(1. School of Resources & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430070, China;
2. Hubei Xingfa Chemicals Group Co Ltd, Xingshan 443700, China)

Abstract: In tunneling blasting, an empty hole can cause stress concentration around the cutting holes, providing free surface for the formation of the cavity. According to the theory of empty hole effect, the formula of the distance between the charge hole and the empty hole was deduced. The numerical model was established by the finite element software LS-DYNA to analyze the formation process and effective stress propagation law of burn cut blasting cavity under different diameters. The simulation results show that the empty hole presents a guiding effect for stress wave, producing the reverse tensile stress wave and stress concentration, and the effect becomes more obvious with the increase of the empty hole diameter. Compared with the eight-hole burn cut, the four-hole burn cut exhibits more abundant crack propagation. The diameter of the four-hole burn cut blasting is 1.42 times that of the eight-hole burn cut blasting, and the maximum effective peak stress is increased by 1.2 times.

Key words: roadway tunnelling; empty hole effect; parallel hole cut blasting; numerical simulation; effective stress

在巷道掘进爆破施工中,由于矿山大型机械设

备的更新,导致掏槽方式在中小断面的巷道掘进中受到了很大限制。空孔能够引起掏槽眼周围应力集中效应,为掏槽眼提供破碎空间,进一步加强破岩效果,提高巷道掘进速度。

宗琦采用理论分析和数值模拟相结合的方法^[1],研究了深孔直眼掏槽大直径空孔的作用机理。朱必勇利用数值模拟的手段^[2],得出随着空孔

收稿日期:2020-07-25

作者简介:柴修伟(1980-),男,博士、副教授,主要从事爆破破岩理论与技术、岩土工程与安全监测技术研究,(E-mail) xwchai@wit.edu.cn。

通讯作者:习本军(1969-),男,总经理助理、技术中心主任,主要从事企业安全技术管理,(E-mail) hubeixjt@126.com。

基金项目:国家自然科学基金(51709257);武汉工程大学研究生教育创新基金项目(CX2019097)

直径增大,反射应力波和聚集爆破能量的作用更加显著。柴修伟运用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 的 FSI 建模方法分析了空孔直眼掏槽中空孔自由面效应对深孔掏槽的影响^[3]。罗学冬基于炸药爆破产生的应力传播机理^[4],模拟得出在有空孔存在时应力波优先向自由面和相邻炮孔连线处传播。郑祥滨等借助 ANSYS /LS-DYNA 软件研究单螺旋空孔直眼掏槽成腔过程,研究发现掏槽槽腔的成型效果随着装药孔与空孔的间距增大而变差^[5]。胡刚依据直眼掏槽方式槽腔形成力学理论,通过 LS-DYNA 建立数值模型仿真研究分析了大空孔下复式筒形直眼掏槽槽腔有效应力的传播规律^[6]。柯波利用 LS-DYNA 三维非线性动力有限元软件建立渐进式大直径空孔螺旋掏槽爆破模型,以中心孔的纵切面分析了爆破成腔过程^[7]。陈秋宇在空孔效应的力学模型基础上,通过改变空孔与装药孔的间距试验得到空孔位于裂隙圈时具有定向作用,且有利于提高爆炸能量的利用率^[8]。文椿从不同孔间距系数、空孔直径、炸药种类三个方面展开模拟研究,结果表明空孔对爆破后岩石裂纹的扩展有导向作用^[9]。上述研究可见诸多学者对空孔直眼掏槽做了大量的研究,但大多数都忽略等空孔体积等槽腔等炸药条件下,不同空孔直径的直眼掏槽对爆破效果的影响。

通过空孔效应理论,计算装药孔与空孔之间的间距,借助 LS-DYNA 软件模拟等槽腔等空孔体积等炸药三种状态下的两个数值模型,对比分析不同空孔直径下掏槽腔体的形成过程和有效应力传播规律,揭示等空孔体积等槽腔等炸药下槽腔形成机理,以期指导工程实践。

1 空孔效应

在空孔直眼掏槽爆破中,炸药孔起爆以后,装药孔与空孔之间的岩石首先被破碎,并向空孔方向移动。在整个槽腔形成的过程中,空孔的存在能够为装药孔提供新的自由面。

依据炸药爆炸后产生的应力波在空孔孔壁形成的反射拉应力必须大于岩石的动态抗拉强度,确定出空孔与装药孔之间的距离。掏槽孔起爆后,在空孔附近产生的拉应力最大值,即岩石满足拉裂破坏条件可表示为^[10]

$$\sigma_{\theta \max} = (1 + 3\lambda) p \left(\frac{R_h}{L - R} \right)^\alpha \geq [\sigma_\theta] \quad (1)$$

式中: $\sigma_{\theta \max}$ 为炸药爆炸后应力波在孔壁处反射成拉应力的最大值,MPa; $[\sigma_\theta]$ 为岩石的抗拉强度,MPa; L 为装药孔中心至空孔中心的距离; R_h 、 R 分别

为装药孔半径和空孔半径,mm; α 为应力波衰减系数, λ 为侧应力系数,均与岩石的泊松比 μ 有关,其中可以表示为 $\alpha = 2 - \mu / (1 - \mu)$; $\lambda = \mu / (1 - \mu)$ 。

根据文献[11]可得知在其公式(1)孔壁处投射压力 P 的计算方法,其公式为

$$P = \frac{1}{8} \rho_e D^2 \left(\frac{r_e}{r_h} \right)^{2n} \quad (2)$$

式中: P 为孔壁处投射压力,MPa; D 为炸药爆轰速度,m/s; ρ_e 为装药密度, kg/m^3 ; r_e 为药卷直径; r_h 为炮孔直径; n 为多方指数,一般情况下 $n = 3$ 。

由式(1)和式(2)可知,当 $\sigma_{\theta \max} \geq [\sigma_\theta]$ 时,满足在爆破应力波反射拉伸作用下,空孔孔壁周围岩石才足以被拉裂破坏,由此公式整合可以得到式(3)。

$$L \leq R_h \left[\frac{(1 + 3\lambda) P}{[\sigma_\theta]} \right]^{\frac{1}{\alpha}} + R \quad (3)$$

2 等空孔体积等槽腔直眼掏槽分析

2.1 不同直径空孔的布孔方式

某磷矿矿层为层状和块状,一般致密坚硬、强度高,节理裂隙基本闭合,稳定性较好。其巷道掘进采用钻爆法,矿山现用的掏槽方式为八空孔直眼掏槽,每循环进尺为3 m。掏槽孔和空孔均为45 mm孔径,炸药采用2#岩石乳化炸药,其规格为 $\phi 32 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ (300 g),采用不耦合装药爆破。

根据相关材料参数,依据空孔效应理论推导的式(3),代入各参数计算得到 $L_1 \leq 242.9 \text{ mm}$,即装药孔与空孔最大间距为242.9 mm。在原有掏槽方式的基础上进行改进,最终确定掏槽眼的布孔方式为八空孔直眼掏槽,其炮孔布置为5个 $\phi 45 \text{ mm}$ 装药孔,8个 $\phi 45 \text{ mm}$ 空孔,具体布孔方式详见图1所示。

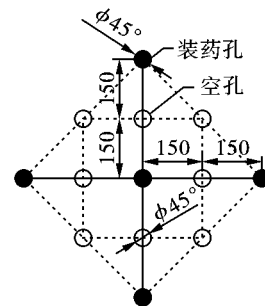


图1 八空孔直眼掏槽布孔方式(单位:mm)

Fig. 1 Method of arranging holes for eight-hole parallel hole cut blasting(unit:mm)

为了构建与八空孔直眼掏槽模型等槽腔等空孔体积等炸药数值模型,经过计算确定另一个数值模型布孔方式为四空孔直眼掏槽,其中5个 $\phi 45 \text{ mm}$ 装药孔,4个 $\phi 64 \text{ mm}$ 空孔,再依据空孔效应理论推

导的式(3),代入各参数计算得到 $L_1 \leq 261.9 \text{ mm}$,即装药孔与空孔最大间距为 261.9 mm ,具体布孔方式详见图2所示。

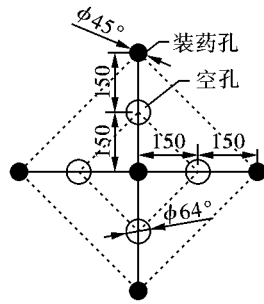


图2 四空孔直眼掏槽布孔方式(单位:mm)

Fig. 2 Method of arranging holes for four-hole parallel hole cut blasting (unit:mm)

2.2 数值模型

采用 LS-DYNA 分别建立八空孔直眼掏槽数值模型和四空孔直眼掏槽数值模型,数值模型单位制为 $\text{g}\cdot\text{mm}\cdot\mu\text{s}$,模型尺寸均为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 。由于模型的炮孔大小和相对位置在纵向上不随模型的尺寸而变

化,将模型简化为二维的平面应变模型,以3D单层网格划分模型,即在模型厚度的方向上施加位移约束,同时,两模型上边界和右边界施加无反射边界条件,下边界和左边界两个对称面施加对称约束。根据对称性简化模型,建立1/4模型。在模型划分网格时采用 SOLID164 单元,岩石选用 Lagrange 网格,空气和炸药材料选用 Euler 网格,通过关键字 * CON-STRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 来定义岩体物质、炮泥与炸药等流体物质之间的流固耦合作用^[12]。

2.3 材料参数

数值模型主要包括岩石、空气、炸药三种材料,岩石材料采用塑形随动模型,岩石的物理力学参数见表1;炸药材料采用 JWL 状态方程描述,参数见表2;空气材料采用 NULL 模型,空气密度为 1.29 kg/m^3 。

表1 岩石材料参数

Table 1 Rock material parameters

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	抗拉强度/ MPa	抗压强度/ MPa
2.88	55.00	0.22	9.53	124.00

表2 炸药与 JWL 状态方程参数

Table 2 The parameter of explosive and JWL

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	爆速 D / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	CJ 压力/ GPa	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	E_0 /GPa
1.25	4600.00	9.70	374.00	7.33	4.15	0.95	7.00

3 数值分析

3.1 槽腔形成过程对比分析

选取不同时刻点分析不同时刻有效应力云图。八空孔直眼掏槽不同时刻有效应力云图见图3。从图3(a)中可以看出,在 $t = 9.97 \mu\text{s}$ 时,炸药起爆后爆轰波冲击炮孔壁后形成强应力波以圆形波面向四周传播,可以看到装药孔周围岩石开始破碎,这是由于炸药产生的爆轰波压力大于岩石的极限抗压强度。应力波继续向外传播至空孔时,即在 $t = 24.934 \mu\text{s}$ 时,爆炸应力波首次相遇叠加形成一个类似四边形的应力集中区域,在 $t = 49.95 \mu\text{s}$ 时,爆炸应力波充满整个槽腔,所有空孔产生反向拉应力。产生的反向拉应力大于岩石的极限抗拉强度,如图3(b)所示,在 $t = 69.887 \mu\text{s}$ 时所有空孔周围岩石开始发生拉伸破坏。岩石在动载荷作用下的应力分布受空孔的影响,导致在装药孔与空孔的连线上发生较多裂纹扩展,证明了空孔具有一定的导向作用。在 $t = 2079.9 \mu\text{s}$ 时,如图3(c)所示,在应力波和反向拉应力的共同作用下,装药孔与空孔之间的岩

石完全破碎贯通。贯通之后,岩石的破碎情况基本不变,但随着时间的推移,槽腔内部的裂纹继续扩展,在 $t = 3340 \mu\text{s}$ 时,如图3(d)所示,此时槽腔内部应力均匀分布,槽腔基本形成。

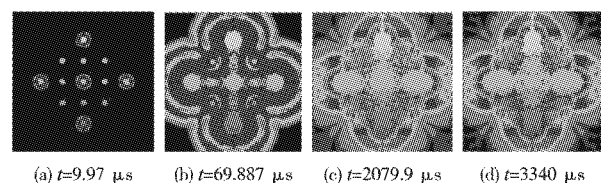


图3 八空孔直眼掏槽不同时刻有效应力云图

Fig. 3 Effective stress cloud diagram of eight-hole parallel hole cut blasting at different moments

四空孔直眼掏槽不同时刻有效应力云图见图4,从图4(a)中可以看出,在 $t = 29.986 \mu\text{s}$ 时,爆炸应力波在空孔处首次相遇同时在空孔处产生反向拉应力。在 $t = 49.943 \mu\text{s}$ 时,如图4(b)所示,所有空孔周围岩石开始发生拉伸破坏。在 $t = 1320 \mu\text{s}$ 时,如图4(c)所示,装药孔与空孔之间的岩石完全破碎贯通。在 $t = 3024.9 \mu\text{s}$ 时,如图4(d)所示,原外围

4 个装药孔所围成的槽腔所残留的岩石也已经脱落,并且可以清晰地看出槽腔外周围的岩石裂纹,此时槽腔基本形成。

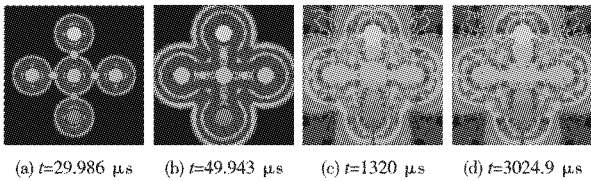


图 4 四空孔直眼掏槽不同时刻有效应力云图
Fig. 4 Effective stress cloud diagram of four-hole parallel hole cut blasting at different moments

比较两种直眼掏槽的有效应力云图,可以发现两种掏槽所形成的槽腔面积基本一致。八空孔直眼掏槽槽腔内部岩石相比于四空孔直眼掏槽更破碎,但可以看出四空孔直眼掏槽槽腔内部未破碎的岩石也已经脱落,并且槽腔外的岩石已有明显的裂纹扩展,形成了更大的爆破自由面,有利于整个断面岩石的破碎。

3.2 有效应力时间曲线图结果对比分析

为了进一步分析两种直眼掏槽不同位置下应力波在岩体中的传播规律,分别选取两模型上 4 个典型位置上的单元作为测点进行数据化分析。八空孔直眼掏槽模型取点位置如图 5 所示,四空孔直眼掏槽模型取点位置如图 6 所示,其中,测点 A 位于装药孔与空孔中间位置,测点 B 位于空孔周围,测点 C 位于八空孔直眼掏槽模型空孔与四空孔直眼掏槽模型无空孔的等同位置,测点 D 位于距离装药孔较远位置。



图 5 八空孔直眼掏槽测点选取布置图
Fig. 5 Layout of measuring point selection for eight-hole parallel hole cut blasting

由图 7 八空孔直眼掏槽测点有效应力时间曲线图可知,测点 C 的有效应力峰值最大,高达 152 MPa,测点 B 的有效应力峰值 94.3 MPa 也明显高于 D 测点,这是由于测点 B、测点 C 位于空孔周围,空孔具有应力集中作用。对比测点 A 和测点 D 可以发现,位于装药孔附近的测点 A 有效应力峰值 112 MPa 大于位于装药孔远距离的测点 D 有效应力峰值 66.9 MPa,解释了应力波在岩体中传播时急剧衰减的现象。

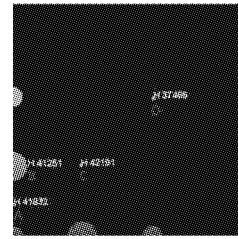


图 6 四空孔直眼掏槽测点选取布置图
Fig. 6 Layout of measuring point selection for four-hole parallel hole cut blasting

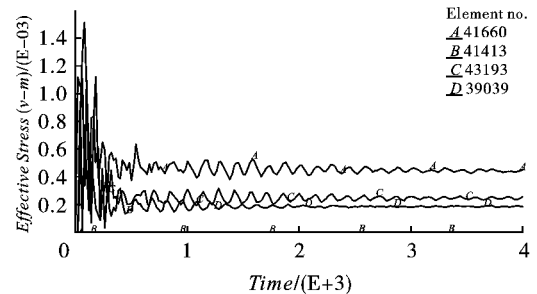


图 7 八空孔直眼掏槽测点有效应力时间曲线图
Fig. 7 Curve of effective stress time at the measuring point of the eight-hole parallel hole cut blasting

由图 8 四空孔直眼掏槽测点有效应力曲线图可知,位于空孔周围测点 B 的有效应力峰值最大,高达 183 MPa。对比测点 A、C、D 有效应力峰值大小, $A_{max} > C_{max} > D_{max}$,也证明了距离装药孔越远,应力波的叠加作用越微弱。

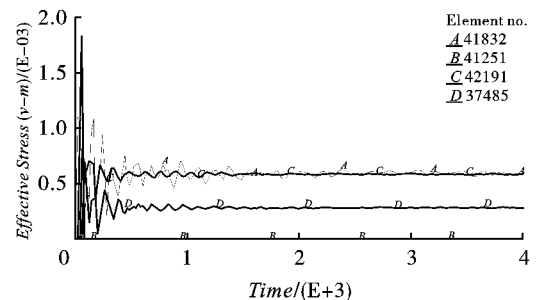


图 8 四空孔直眼掏槽测点有效应力时间曲线图
Fig. 8 Curve of effective stress time at the measuring point of the four-hole parallel hole cut blasting

比较八空孔直眼掏槽和四空孔直眼掏槽的有效应力曲线图,两模型的所有测点都表现出有效应力随着时间由上向下呈现下降趋势,但是数值上有一定的差距。八空孔直眼掏槽空孔周围测点 B 最大的有效应力峰值为 94.3 MPa,四空孔直眼掏槽空孔周围测点 B 最大的有效应力峰值为 183 MPa,可以看出随着空孔直径的增大,空孔周围产生的最大拉应力值越大。四空孔直眼掏槽空孔直径为八空孔直眼掏槽空孔直径的 1.42 倍,最大有效应力峰值增长了 1.2 倍。同样,两模型测点 C 的有效应力峰值差

异,又一次证明了空孔具有应力集中作用及空孔作为自由面产生拉应力。因此空孔的存在和空孔直径的增大,更易于形成爆破槽腔,为后续装药孔的爆破提供更大自由面,能够取得良好的爆破效果。

4 结 论

(1) 根据空孔孔壁周围岩石在爆破应力波反射拉伸作用下发生拉裂破坏的条件,推导出空孔与装药孔之间距离的计算公式。当装药孔直径为 45 mm,空孔直径为 45 mm 时,装药孔与空孔最大间距为 242.9 mm;当装药孔直径为 45 mm,空孔直径为 64 mm 时,装药孔与空孔最大间距为 261.9 mm。随着空孔直径的增大,装药孔与空孔之间的距离也随之增加。

(2) 爆炸应力波首次相遇在槽腔内部形成一个类似四边形的应力集中区域。空孔对应力波的传播具有导向作用,装药孔与空孔的连线区域上发生较多的裂纹扩展。随之空孔直径的增大,裂纹扩展越明显范围更大。

(3) 对比八空孔直眼掏槽和四空孔直眼掏槽槽腔的形成过程,二者槽腔面积基本一致,但四空孔直眼掏槽槽腔外的岩石存在更多的裂纹扩展,有利于后续爆破形成更大的自由面,提高岩石的破碎效果。

(4) 比较两模型有效应力曲线图,两模型的所有测点都表现出有效应力随着时间由上向下呈现下降趋势,但是数值上有一定的差距。随着空孔直径的增大,空孔周围产生的最大拉应力值越大。四空孔直眼掏槽空孔直径为八空孔直眼掏槽空孔直径的 1.42 倍,最大有效应力峰值增长了 1.2 倍。

参考文献 (References)

- [1] 宗 琦,邵连军. 立井深孔直眼掏槽大直径中心空孔作用分析和参数计算[J]. 爆破,2015,32(1):11-15.
- [1] ZONG Qi,SHAO Lian-jun. Large diameter empty hole effect analysis and parameters calculation of parallel cut in rock shaft[J]. Blasting,2015,32(1):11-15. (in Chinese)
- [2] 朱必勇,贺 严,焦文宇,等. 直孔掏槽爆破中空孔效应的数值模拟研究[J]. 矿业研究与开发,2020,40(2):58-61.
- [2] ZHU Bi-yong, HE Yan, JIAO Wen-yu, et al. Numerical simulation research on empty hole effect in parallel cut blasting[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(2):58-61. (in Chinese)
- [3] CHAI Xiu-wei, SHI Sha-sha, YAN Yao-feng, et al. Key blasting parameters for deep-hole excavation in an underground tunnel of phosphorite mine [OL]. Advances in Civil Engineering,2019-12-5, <https://doi.org/10.1155/2019/4924382>.
- [4] 罗学东,朱小红,周传波,等. 坚硬岩石条件下九孔掏槽方式的数值模拟研究[J]. 爆破,2005(3):17-20,25.
- [4] LUO Xue-dong, ZHU Xiao-hong, ZHOU Chuan-bo, et al. Numerical simulation on 9-holes cutting mode in hard rock mass [J]. Blasting, 2005 (3): 17-20, 25. (in Chinese)
- [5] 郑祥滨,璩世杰,范利华,等. 单螺旋空孔直眼掏槽成腔过程数值模拟研究[J]. 岩土力学,2008(9):2589-2594.
- [5] ZHENG Xiang-bin, JING Shi-jie, FAN Li-hua, et al. Numerical simulation of cavity formation process by single helix parallel hole cut blasting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008(9):2589-2594. (in Chinese)
- [6] 胡 刚,费鸿禄,国志雨. 大空孔复式筒形直眼掏槽力学机制与数值模拟分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2018,14(9):129-135.
- [6] HU Gang, FEI Hong-lu, GUO Zhi-yu. Mechanical mechanism and numerical simulation analysis of compound barrel parallel cut with big cavity [J]. China Safety Production Science and Technology, 2018, 14(9): 129-135. (in Chinese)
- [7] 柯 波,李 萍,冯超东,等. 渐进式大直径空孔螺旋掏槽成腔过程数值模拟[J]. 金属矿山,2012(7):31-34.
- [7] KE Bo, LI Ping, FENG Chao-dong, et al. Numerical simulation on cavity formation process by progressive large diameter empty hole spiral cut blasting [J]. Metal Mine, 2012(7):31-34. (in Chinese)
- [8] 陈秋宇,李海波,夏 祥,等. 爆炸荷载下空孔效应的研究与应用[J]. 煤炭学报,2016,41(11):2749-2755.
- [8] CHEN Qiu-yu, LI Hai-bo, XIA Xiang, et al. Research and application of empty hole effect under blasting loading [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2749-2755. (in Chinese)
- [9] 文 涛,谭 海. 岩石爆破中的空孔效应数值计算分析[J]. 爆破,2011,28(3):58-61.
- [9] WEN Tao, TAN Hai. The empty hole effect numerical computation analysis during rock blasting [J]. Blasting, 2011, 28(3): 58-61. (in Chinese)
- [10] 王玉杰. 爆破工程[M]. 2版. 武汉:武汉理工大学出版社,2018.
- [11] GEGLIO M. Spherical vessel subjected to explosive detonation loading [J]. International Journal of Pressure Vessel & Piping, 1997, 74(2):83-88.
- [12] 时党勇,李裕春,张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显式动力分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2005.