

DOI: 10.12382/bgxb.2025.0700



# 大口径聚能装药中孔洞缺陷对爆轰波与射流的影响规律

季悦悦, 贾鑫\*, 葛紫薇, 杨珍应, 宋子骏

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为研究大口径熔铸装药中孔洞缺陷对爆轰波与射流的影响规律,使用仿真软件对装药熔铸过程与射流成型开展分析。对大口径聚能装药熔铸过程进行模拟,发现当浇铸口未偏移时,缺陷主要集中于装药上部和锥角处:上部为大尺寸空腔缩孔与蜂窝状缩松,锥角处为小尺寸孔洞群;当浇铸口偏移时,上部缺陷位置横向偏移。基于上述研究所得缺陷位置,系统分析孔洞缺陷对爆轰波及射流性能的影响。研究结果表明:当孔洞尺寸小于反应区宽度时,爆轰波可跨越缺陷且不受显著影响;小尺寸和中等尺寸孔洞附近,爆轰波压力峰值随着孔洞尺寸的增大而升高;大尺寸孔洞则会引起爆轰波出现次峰值。进一步对存在随机孔洞缺陷的仿真进行研究,发现随着孔洞缺陷比例的增加,射流头部速度增加,尾部速度减小,断裂时间提前;装药左右两侧孔洞占比每相差 0.25%,射流偏转角度增大约 0.2°~0.5°。

**关键词:** 聚能装药; 大口径; 熔铸装药; 孔洞缺陷

**中图分类号:** TJ410.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1093(2026)04-250700-13

## Influence of Cavity Defects in Large-diameter Shaped Charges on Detonation Waves and Jets

JI Yueyue, JIA Xin\*, GE Ziwei, YANG Zhenying, SONG Zijun

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

**Abstract:** To investigate the influence of cavity defects in large-diameter casting explosive on detonation waves and jets, using simulation software to analyze the charge melt-casting process and jet formation. The casting process of a large-diameter shaped charge is simulated. It is found that, when the pouring nozzle is not offset, the defects are primarily concentrated in the upper portion of the charge and at its conical angle: large-sized shrinkage cavities and honeycomb-like shrinkage porosity in the upper portion, and clusters of small-sized cavities at the conical angle. When the pouring nozzle is offset, the defect locations in the upper portion are shifted laterally. Based on the identified defect locations from the aforementioned research, the effects of porosity defects on detonation wave and jet are systematically analyzed. The research results indicate that the detonation wave can traverse the defect without being significantly impacted when pore size is smaller than the width of reaction zone. The pressure peak of detonation wave increases with the increase in pore size near small and medium-sized cavities. The large-sized cavities

收稿日期: 2025-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(12372360)

\* 通信作者邮箱: jiaxin@mail.njust.edu.cn

induce secondary peaks in the detonation wave. Further simulation study on the randomly distributed cavities reveals that, as the void fraction increases, the jet head velocity rises while the jet tail velocity decreases, and the fracture time of the shaped charge jet advances. For every 0.25% difference in void fraction on the left and right sides of the charge, the deflection angle of jet increases by approximately 0.2° to 0.5°.

**Keywords:** shaped charge; large-diameter; casting explosive; cavity defect

## 0 引言

随着现代防御体系的发展,世界主要军事国家指挥控制中心、弹药贮藏库等设施大规模转入深层地下或自然山体中,其防御结构越来越坚固。重要军事目标的地下化与坚固化,促进了侵彻技术和钻地武器的发展,要求反深层目标毁伤元具备更强的毁伤能力。大口径聚能战斗部依靠炸药爆炸驱动金属药型罩产生比动能高、侵彻能力强的金属射流,其中大口径意味着更多的装药空间,爆炸时能产生更高的爆轰压力,驱动金属药型罩形成更长、更稳定的射流<sup>[1]</sup>,因此增加装药量和药型罩口径是提升打击效果的手段之一。对于大口径聚能装药,目前国内没有足够大的压机进行压装,因此多将炸药加热至熔融态,用分次浇铸的方式进行铸装。熔融炸药铸装后,在浇铸过程存在晶核形成与长大、热传递、相变、体积收缩等过程和变化<sup>[2]</sup>,因此大口径聚能装药内部更容易出现气泡、裂纹、缩孔等缺陷。这些缺陷不仅影响装药的力学完整性和安全性,更可能在爆轰过程中干扰爆轰波的正常传播,并导致射流不稳定、断裂或偏离轴线,最终严重影响大口径聚能装药的侵彻效能。因此,研究大口径聚能装药中孔洞缺陷的形成及其对爆轰波传播和金属射流成型的影响规律,对于提升钻地武器的可靠性、侵彻深度和打击精度具有重大意义。

近年来,国内外学者对熔铸装药缺陷的形成与位置分布展开了系统研究。文献[3-4]使用熔铸仿真软件对熔铸装药的孔洞位置进行了模拟,模拟结果与试验结果吻合较好,表明该软件在模拟炸药熔铸过程及预测其内部缺陷方面具有可靠性和适用性。李敬明等<sup>[5]</sup>通过熔铸仿真软件分析指出熔铸装药内部缩孔、缩松主要是由于凝固过程中结晶收缩、固体收缩及气体析出形成的。刘瑞鹏等<sup>[6-7]</sup>的研究表明,缩孔和缩松分布于装药中轴线上,其中药柱上部主要缺陷为大尺寸的封闭孔洞,下部多为微尺寸的空穴疏松。Yu 等<sup>[8]</sup>通过非线性后处理算法对炸药的缺陷进行了超声成像检测。为降低缺陷率,研究者们开

发了多种工艺优化方法,杨治林等<sup>[9]</sup>使用水浴顺序凝固工艺实现了炸药自下而上凝固,朱锦书等<sup>[10]</sup>使用了梯度护理凝固方法,均有效减少了熔铸装药中缺陷的形成。

在研究缺陷对装药性能与安全性的影响方面,白志鑫等<sup>[11]</sup>阐述了孔洞塌缩、气泡绝热压缩、裂纹尖端加热等的“热点”形成机制;黄龙杰等<sup>[12]</sup>则通过分子动力学方法阐明了孔隙率、孔洞数量及分布形态对 $\beta$ -奥克托今(Cyclotetramethylene tetranitroamine, HMX)单晶动态变形、损伤及破坏过程的影响规律;胡秋实等<sup>[13]</sup>对塑料粘结炸药(Plastic Bonded Explosive, PBX)缝隙挤压加载下的破裂模式及点火响应进行了分析;成丽蓉等<sup>[14]</sup>研究了裂纹摩擦与孔洞塌缩两种点火机制,研究结果表明降低装药初始微裂纹、微孔洞等疵病,均是提高装药侵彻安全性的有效手段;文献[15-17]等则分别从温度分布、热损伤特征、应变分布和力学性能等角度研究了缺陷的表征参数及其影响规律。

为进一步研究装药缺陷对爆轰波与射流的影响,王宇等<sup>[18]</sup>在试验中证实了黑索金(Hexogen, RDX)/三硝基甲苯(Trinitrotoluene, TNT)装药中的孔洞缺陷会导致爆速下降。李砚东等<sup>[19]</sup>的研究表明,射流的速度并不是完全随着爆轰压力的增加而增加,装药中的缺陷可能在装药起爆后影响爆轰波的传递和传播,从而影响弹药的毁伤效能。Ayisit<sup>[20]</sup>的数值模拟结果揭示了孔洞缺陷会引起射流产生径向速度,导致射流偏离轴线,且偏离程度与缺陷位置和尺寸直接相关。

尽管学者们对当前关于熔铸装药存在孔洞缺陷情况的相关科学问题已开展了大量研究,但仍存在一定的局限性。现有的熔铸装药孔洞缺陷位置分布仿真模拟,多研究圆柱形规则的小尺寸药柱,而对含有药型罩的不规则大尺寸药柱缺陷位置分布的研究较为匮乏。同时,现有研究多关注于少量孤立的孔洞缺陷影响,而对在大口径熔铸聚能装药中存在多位置、多尺寸、缺陷集群等复杂孔洞缺陷现象研究较少,需要进一步的研究探索。

为了更贴近工程实际情况,本文对大口径聚能战斗部熔铸装药中难以避免的孔洞缺陷现象进行分析,通过熔铸仿真软件对大口径聚能装药孔洞缺陷的位置进行研究,为孔洞缺陷对爆轰波与射流的影响分析提供真实的缺陷位置。在此基础上使用有限元软件得出孔洞缺陷对大口径聚能装药的影响规律,以为后续研究大口径聚能装药提供关键支撑。本文思路与仿真框架如图1所示。

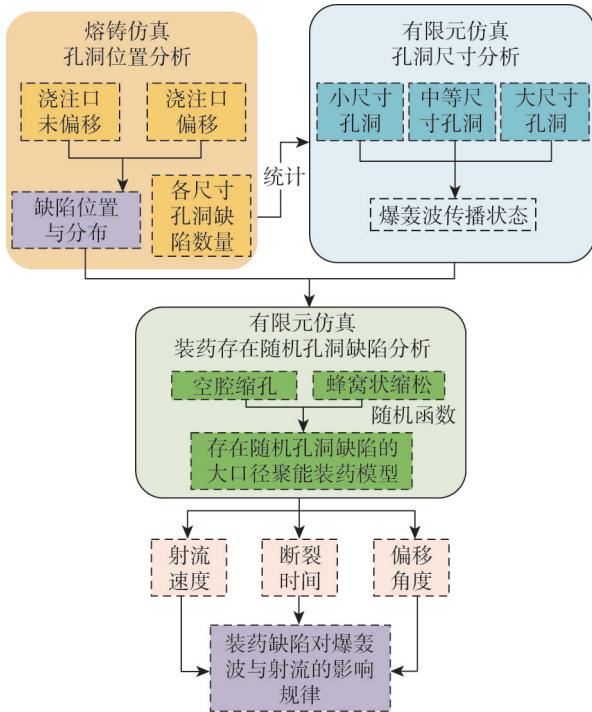


图1 本文思路与仿真框架

Fig. 1 The main ideas and simulation framework of this article

## 1 大口径聚能装药孔洞缺陷位置分析

### 1.1 熔铸仿真中大口径聚能装药有限元模型及参数设置

使用熔铸仿真软件对大口径聚能装药进行熔铸模拟,如图2所示,冒口、模具与装药均采用四面体网格进行有限元划分,网格尺寸为20 mm,整个模型体网格单元为354 140个。其中装药口径800 mm、高度1 050 mm,模具厚度为40 mm。

将药液共分3次注入模具中,第1次注入约200 kg,使药液超过药型罩顶部,后两次注入药量约为剩下装药体积的1/2,间隔时间为8 min,当药液温度降至80℃左右再进行下一次注药。RDX/TNT熔铸装药(典型配比为RDX:TNT=60%:40%,记为RDX/TNT 60/40)兼顾RDX的高爆速和TNT的铸造性能,结合成熟的熔铸工艺,成为大口径聚能装药的

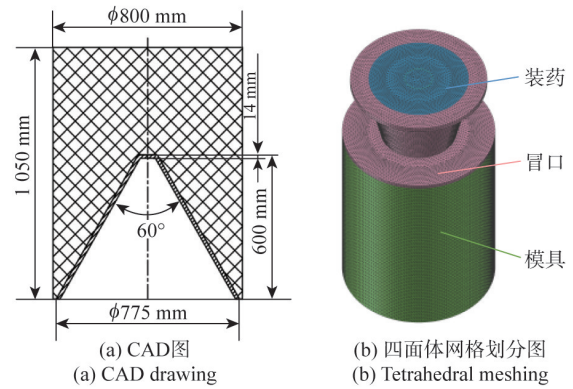


图2 CAD及四面体网格划分图

Fig. 2 CAD drawing and tetrahedral meshing

理想选择,因此设置装药材料为RDX/TNT 60/40,模具材料为钢。炸药、模具与冒口部分参数设置如表1<sup>[21]</sup>所示。

表1 装药与模具部分参数<sup>[21]</sup>

Table 1 Charge and mold part parameters<sup>[21]</sup>

部位	$\rho/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\lambda/$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	$c/$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	$Q/$ ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	$\mu/$ ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ )
装药	1 710(25℃) 1 640(90℃)	0.26	1.181	37.5	0.015
模具与冒口	7 625	25	0.73		

注: $\rho$ 为密度, $\lambda$ 为导热率, $c$ 为比热容, $Q$ 为相变潜热, $\mu$ 为黏度。

在熔铸装药生产过程中,由于装药尺寸较大,会存在模具未水平放置导致药液偏向一侧流动、浇铸口左右分布不均等的现象,使用熔铸仿真软件对浇铸口位于中心与浇铸口偏移现象进行对比分析,偏移现象中浇铸口中心向x轴方向移动30 mm。

### 1.2 熔铸仿真网格敏感性分析

为确保模拟结果的准确性并权衡计算精度与效率,在炸药浇注温度为90℃、浇注速度为20 kg/min、冒口与模具预热温度为50℃、环境温度为30℃的条件下,分别采用15 mm、20 mm两种网格尺寸对模型进行网格敏感性分析,并对比缺陷区域方位与缩孔体积等关键结果。仿真结果如图3所示。由图3可见:药柱上中部缺陷区域由缩孔与缩松组成,缩孔为缺陷中的红色部分,是凝固时体积收缩未得到充分补偿形成的孔洞,多为集中的空腔孔洞;其余部分为缩松,表现为微小、密集、弥散分布的蜂窝状孔洞群。

当网格从20 mm加密至15 mm时,孔洞缺陷区域方位大致不变,而缩孔体积的变化小于10%,因此认为20 mm的网格尺寸在保证计算精度的同时兼顾了计算效率,可用于后续熔铸仿真模拟。

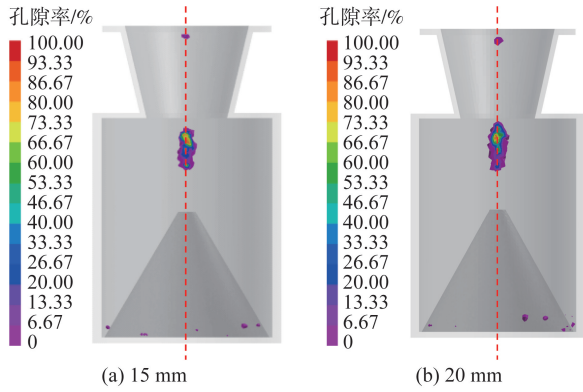


图 3 不同网格尺寸工况下的装药内部孔洞缺陷

Fig. 3 Internal cavity defects in charge under different mesh size conditions

### 1.3 大口径聚能装药中孔洞位置分析

#### 1.3.1 大口径聚能装药浇铸口未偏移分析

为得到常规工艺条件下孔洞缺陷的预测位置,设计四因素三水平进行正交分析,因素一为预热温度,取 50 ℃、70 ℃、90 ℃ 三水平;因素二为浇铸速度,取 10 kg/min、20 kg/min、30 kg/min 三水平;因素三为浇铸温度,取 90 ℃、95 ℃、100 ℃ 三水平;因素四为环境温度,取 10 ℃、20 ℃、30 ℃ 三水平。通过仿真分析所得正交分析结果如表 2 所示。表 2 中,仿真组记为  $L_1 \sim L_9$ ;  $K$  为表示某个因素在同一水平下,所有试验结果的平均值;  $R$  为极差,是每个因素下  $K$  的最大值减最小值。

表 2 正交分析表

Table 2 Orthogonal analysis table

仿真组 与极差	预热 温度/℃	浇铸速度/ (kg·min <sup>-1</sup> )	浇铸温度/ ℃	环境温度/ ℃	缩孔缺陷/ cm <sup>3</sup>
$L_1$	50	10	90	10	62.798
$L_2$	50	20	95	20	390.100
$L_3$	50	30	100	30	371.980
$L_4$	70	10	95	30	59.196
$L_5$	70	20	100	10	459.200
$L_6$	70	30	90	20	194.820
$L_7$	90	10	100	20	90.798
$L_8$	90	20	90	30	193.210
$L_9$	90	30	95	10	313.467
$K_1$	274.959	70.931	150.276	278.488	
$K_2$	237.739	347.503	254.254	225.239	
$K_3$	199.158	293.422	307.326	208.129	
$R$	75.801	276.572	157.05	70.359	

表 2 中  $R$  越大,则该因素对缺陷影响越显著。通过正交分析可知,浇铸速度对缩孔缺陷的影响最大,环境温度影响最小。因此,当预热温度为 50 ℃、浇铸速度为 20 kg/min、浇铸温度为 100 ℃、环境温度为

10 ℃ 时,产生的缩孔缺陷最大,此仿真组记为  $L_{max}$ 。

熔铸装药的凝固是由外向内的过程,外部温度较低、首先凝固,内部温度较高,从而形成了温度梯度。而缩孔是熔铸装药冷却凝固时体积收缩导致的缺陷,对产生缩孔最大的  $L_{max}$  仿真进行分析,熔铸装药于 10 000 s 和 15 000 s 时刻凝固过程的温度场云图如图 4 所示。

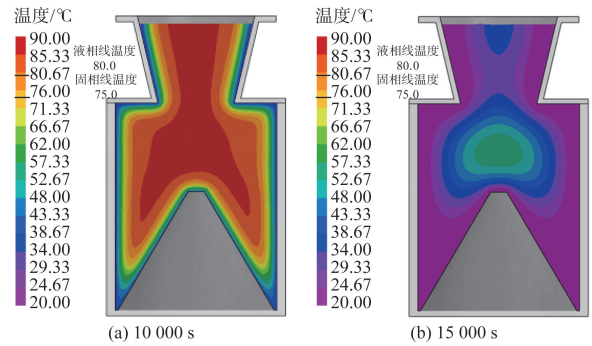


图 4 不同时刻温度场云图

Fig. 4 Temperature field contour maps at different times

通过仿真分析可知孔洞存在位置如图 5 所示。图 5 中紫色部分为缩松缩孔预测区域,其中红色部分为缩孔缺陷,其余部分为缩松可能产生的位置。当浇铸口未发生偏移时,药柱上部中心区域与药柱底部容易产生孔洞。由于熔铸装药上部中心的药浆最后凝固,冒口部分提前凝固导致药液无法在重力作用下向下补缩;药柱下部属于壁厚突变区,横截面近似为锥角,在药液充型时锥尖部位容易裹气,形成气阻影响补缩。上部缺陷为空腔缩孔与蜂窝状缩松组成的大尺寸孔洞缺陷,锥角处为小尺寸孔洞缺陷群,这一分布特征与文献[6-7]在小尺寸圆柱装药中观察到的孔洞分布特征高度一致,由此可知孔洞缺陷多出现于装药上部中心与下部的结论同样适用于大口径不规则熔铸装药。

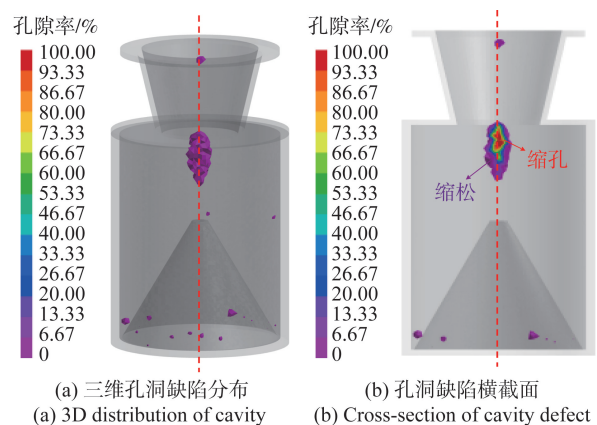


图 5 装药内部孔洞缺陷

Fig. 5 Cavity defects in the charge

### 1.3.2 大口径聚能装药浇铸口偏移分析

如图 6 所示,在浇铸口偏移时装药上部左侧药液最后凝固,与图 5 进行对比发现:浇铸口未偏移时,上

部的孔洞缺陷分布在装药中轴线上;浇铸口偏移时,药柱一侧的上部出现了较大面积的孔洞区域且偏离中轴线。因此当浇铸口偏移时,孔洞横向位置也会产生偏移。

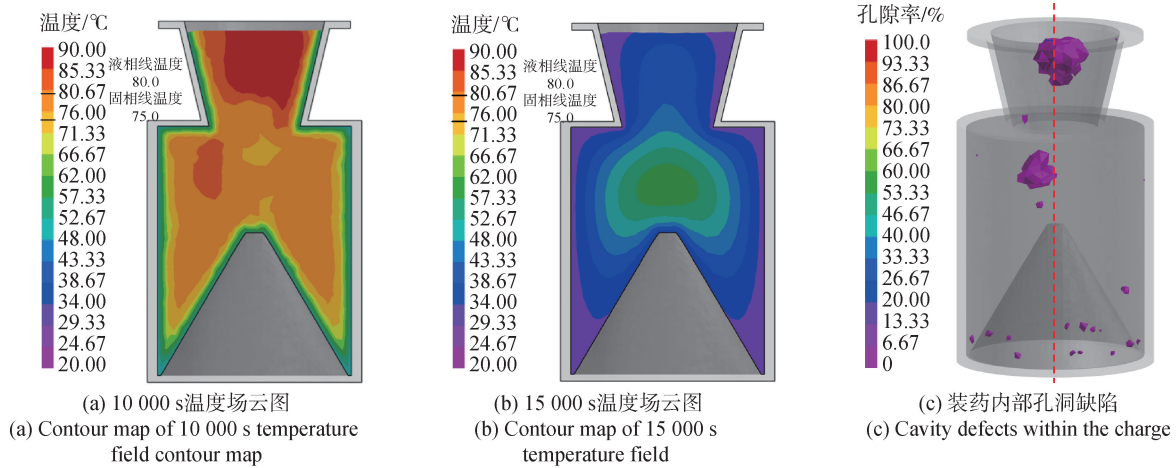


图 6 浇铸口偏移仿真

Fig. 6 Casting port offset simulation

## 2 孔洞缺陷对爆轰波与射流影响分析

### 2.1 有限元仿真中大口径聚能装药有限元仿真模型及参数设置

为研究孔洞缺陷对大口径聚能装药的影响,本文将直径 775 mm、60° 锥角的药型罩置于口径 800 mm、高度 1 050 mm 的装药结构中,具体聚能装药结构如图 7 所示。

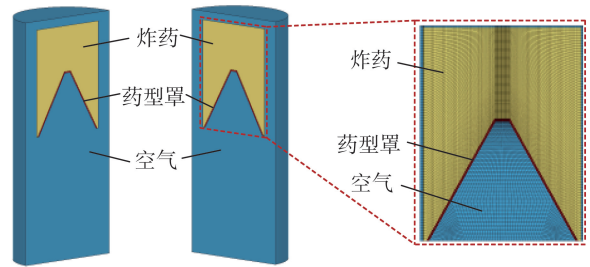


图 8 有限元模型

Fig. 8 Finite element model

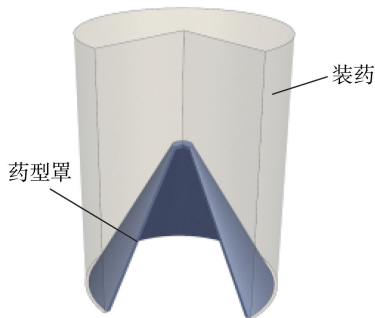


图 7 大口径聚能装药结构

Fig. 7 Structural diagram of large-caliber shaped charge

使用有限元软件对大口径聚能装药射流的形成过程进行数值模拟计算。有限元模型如图 8 所示,其中装药、药型罩、空气均采用 Euler 网格,在空气域的外表面施加边界无反射约束,使爆轰波可以透射出去,起爆方式为中心点起爆,单位为  $\text{cm-g-}\mu\text{s}$ 。

装药使用 RDX/TNT 60/40 炸药,采用 High-Explosive-Burn 材料模型和 JWL 状态方程描述。药型罩材料选用紫铜,使用 Johnson-Cook (J-C) 模型和 Gruneisen 状态方程描述。空气则采用 Null 材料模型和 Linear-Polynomial 状态方程共同描述,空气密度为  $1.28 \text{ kg/m}^3$ 。炸药、药型罩和空气的材料模型以及状态方程的主要参数分别如表 3<sup>[22]</sup>、表 4<sup>[23]</sup> 和表 5<sup>[23]</sup> 所示。

表 3 炸药材料模型及其状态方程参数<sup>[22]</sup>

Table 3 Explosive material model and its equation of state parameters<sup>[22]</sup>

$\rho/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$p_{c,j}/$ GPa	$D/$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$
1 713	28.6	7 980	534.8	7.678	4.2	1.1

注: $p_{c,j}$  为爆轰波压力, $D$  为爆速, $A, B, R_1, R_2$  为材料常数。

表 4 药型罩材料模型及其状态方程参数<sup>[23]</sup>

Table 4 Material model of the drug mask and its equation of state parameters<sup>[23]</sup>

$\rho/$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$G/\text{GPa}$	$C/$ ( $\text{km}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$n$	$S_1$	$S_2$	$\gamma_0$
8 960	47.7	3.94	0.31	1.49	0	1.99

注:  $G$  为剪切模量,  $C$  为  $u_s-u_p$  曲线的截距,  $u_s-u_p$  曲线为冲击波波速-波后质点粒子速度曲线,  $n$  为参考应变率和参考温度下的硬化指数,  $S_1$ 、 $S_2$  为  $u_s-u_p$  曲线斜率的系数,  $\gamma_0$  为 Gruneisen 系数。

表 5 空气材料模型及其状态方程参数<sup>[23]</sup>

Table 5 Air material model and its equation of state parameters<sup>[23]</sup>

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
1.28	0	0	0	0	0.4	0.4	0

注:  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_5$ 、 $C_6$  为材料常数。

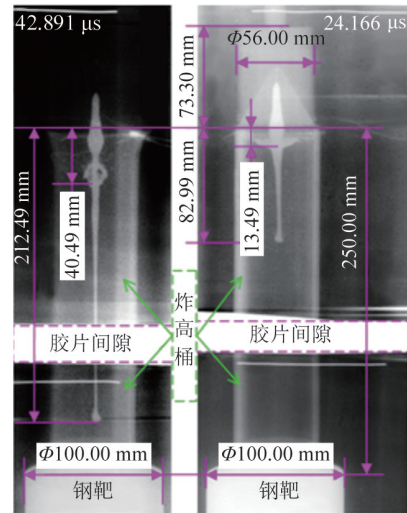
### 2.2 有限元仿真网格敏感性验证

在数值模拟之前,首先使用图 8 网格模型仿真并与文献[24]中的射流成型相关试验数据进行对比验证,如果仿真结果与试验数据吻合较好,则验证了数值模拟的准确性,也将保证后续研究结果及模拟方法的可靠性。图 8 中模型网格单元为六面体网格单元,药型罩网格单元为 27 648 个,厚度方向设置 6 层网格,装药网格单元为 378 880 个,空气网格单元为 654 848 个,射流通道部分网格加密,此模型结构由口径为 56 mm 的聚能装药等比例放大所得,与文献[24]中试验所用结构相同,本文网格模型等比例缩小后的射流形态数值模拟与试验结果如图 9 所示。

数值模拟与试验结果对比表明,射流形态基本一致,通过两时刻射流长度计算得到射流头部平均速度 6 916 m/s,数值模拟头部速度与试验结果相差 12%,低于要求标准 20%,证实了数值模拟的正确性,因此该模型网格可用于后续所有有限元仿真模拟。

### 2.3 浇铸口未偏移时大口径装药孔洞缺陷影响分析

基于图 5 对大口径装药中各个孔洞缺陷进行测量,通过统计得到各尺寸孔洞缺陷数量如表 6 所示,装药上部中心的最大缺陷区域表现为补缩不良而形成的蜂窝状孔洞集群,为了方便统计将其空腔缩孔位置提取出来,其为一个最大尺寸的、近似椭圆体的整体孔洞,长轴长度为 110 mm、短轴长度为 47 mm,而图 5 中最小的孔洞直径为 0.3 mm。



(a) 脉冲X光试验照片<sup>[24]</sup>  
(a) Pulse X-ray test photograph<sup>[24]</sup>

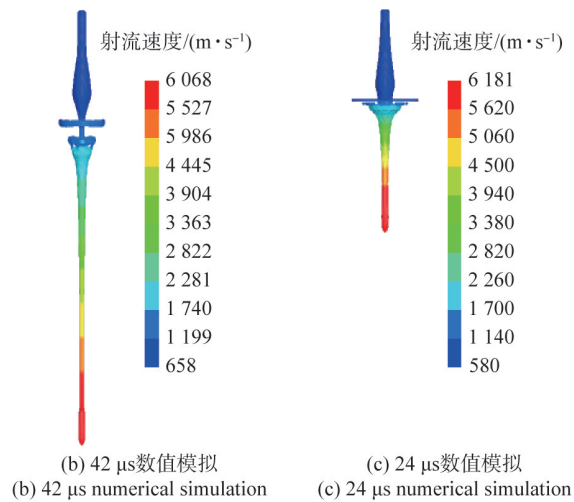


图 9 φ56 mm 聚能射流成型形态试验结果与数值模拟结果对比

Fig. 9 Comparison of experimental and simulated results of the formation of a φ56 mm shaped charge jet

表 6 孔洞缺陷尺寸及数量

Table 6 Size and quantity of hole defects

孔洞缺陷尺寸/mm	≤3	3~20	>20
数量	6	8	5

#### 2.3.1 孔洞缺陷尺寸分析

根据表 6 将孔洞缺陷按尺寸分为 3 类:

- 1) 小尺寸孔洞: 直径 ≤ 3 mm;
- 2) 中等尺寸孔洞: 3 mm < 直径 < 20 mm;
- 3) 大尺寸孔洞: 20 mm ≤ 直径。

由于孔洞缺陷较为分散,对装药中存在单个孔洞的情况进行仿真,仿真模型如图 10 所示,其中点  $E$  为孔洞缺陷附近处爆轰波观测点,点  $F$  为距离孔

洞缺陷较远处爆轰波观测点。通过熔铸仿真分析可知,孔洞缺陷多出现于上部中心,因此以装药最大孔洞中心位置为圆心,对不同尺寸的孔洞缺陷进行仿真分析,观察其爆轰波状态。

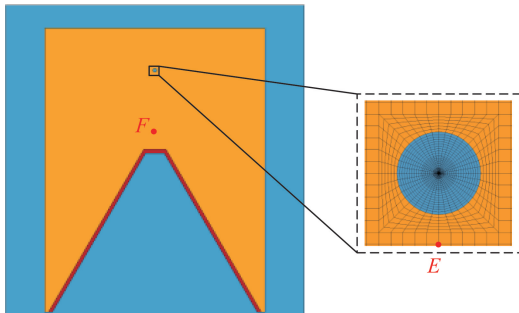


图 10 小、中尺寸孔洞缺陷仿真模型示意图

Fig. 10 Schematic diagram of small and medium-sized hole defect simulation models

通过 Zeldovich-von Neumann-Doering (ZND) 模型理论可推导出 RDX/TNT 60/40 反应区宽度,即

$$a = (D - u) \cdot \tau \quad (1)$$

式中: $\tau$  为爆轰反应时间; $u$  为在反应区持续时间  $\gamma$  内炸药反应产物的粒子速度平均值。

通过式 (1) 计算可得 RDX/TNT 60/40 反应区宽度约为 0.32 mm。根据反应区厚度与孔洞尺寸分类对孔洞尺寸进行选取,孔洞尺寸分别取小尺寸孔洞(直径为 0.32 mm、2 mm)、中等尺寸孔洞(直径为 6 mm、14 mm)4 种情况。通过仿真所得孔洞直径为 14 mm 于 20  $\mu$ s、21  $\mu$ s 和 30  $\mu$ s 时刻的爆轰波爆轰作用过程如图 11 所示。

通过对大口径聚能装药存在 14 mm 孔洞缺陷的爆轰过程进行分析可知:20  $\mu$ s 时,爆轰波正好经过孔洞区域,此时孔洞缺陷对爆轰波的扰动显著,破坏了爆轰波的连续传播路径,迫使爆轰波绕行,逐渐形成两个曲面波向后传播,在掠过孔洞缺陷后相遇;21  $\mu$ s 时,爆轰波阵面的高压冲击波在极短时间内压缩孔洞,使其产生局部高温高压,与主爆轰波相互作用,从而促进周围炸药引发更剧烈的化学反应;随着孔洞直径的增大,爆轰波产生畸变程度越明显。因此,孔洞缺陷会导致爆轰波局部凹陷及传播方向偏转,破坏波阵面的完整性和连续性。

将仿真中无缺陷、缺陷孔洞直径为 0.32 mm、2 mm、6 mm、14 mm 的工况分别记为  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$ 、 $Z_4$  和  $Z_5$ ,并在孔洞缺陷附近处(点 E)和距离孔洞缺陷较远处(点 F)选取爆轰波观测点,绘制观测点的爆轰压力曲线,结果如图 12 所示。

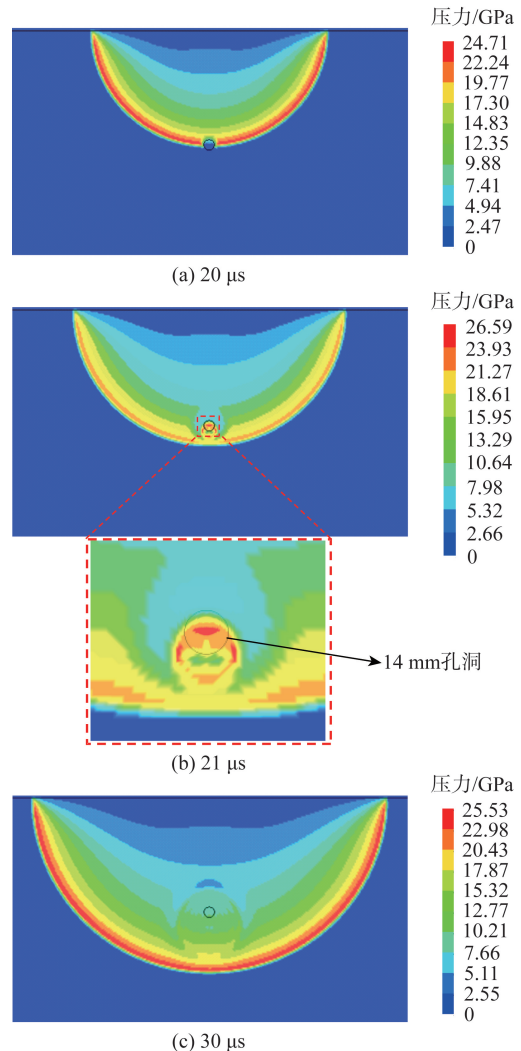


图 11 不同时刻爆轰波爆轰作用

Fig. 11 Detonation wave interaction at different times

由图 12 可知,当装药中的孔洞缺陷尺寸小于反应区宽度  $a$  时,爆轰波可跨越缺陷而不受显著影响,距离孔洞缺陷较近处的爆轰压力与无孔洞缺陷的爆轰压力几乎相同,此时能量损失可忽略,因此在研究分析中可以忽略尺寸小于反应区宽度的孔洞缺陷对装药的影响。通过对比不同位置的爆轰压力场分布特征可以看出,当爆轰波传播至孔洞缺陷区域时,孔洞在强冲击压缩下发生绝热升温,导致缺陷周边形成瞬态高压区。该区域爆轰压力峰值随着孔洞直径的增大而增大,14 mm 的孔洞缺陷压力峰值提高约 17%。当测量点与缺陷孔洞距离较远时,爆轰压力峰值随着缺陷占比的增加而降低,此结论与文献[18]中的试验结果相吻合,但是由于孔洞缺陷尺寸相对于大口径装药较小,较远区域的爆轰波传播特性仍受主反应区主导,对其稳定性的影响较为有限,14 mm 的孔洞缺陷压力峰值仅降低约 0.66%。

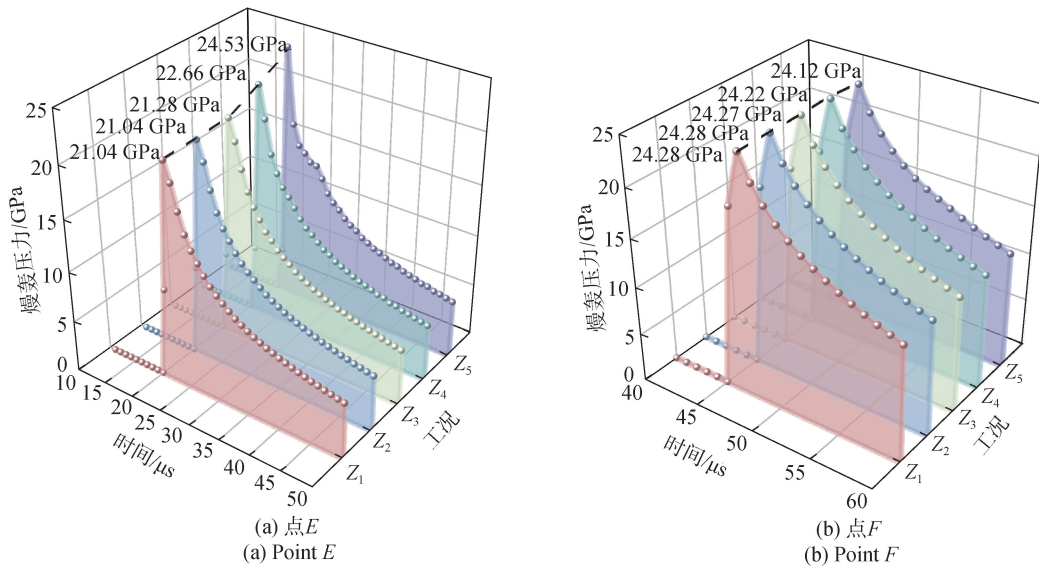


图 12 爆轰压力曲线  
Fig. 12 Detonation pressure profile

装药上部中心的孔洞缺陷预测区域体积为  $1728\text{ cm}^3$ ，其中缩孔体积为  $470.915\text{ cm}^3$ 。对此处只有空腔缩孔的情况与将整个预测区域都视为一个整体的孔洞缺陷的极限情况进行分析，存在孔洞缺陷的装药模型图如图 13 所示，其中点  $H$  为距离空腔孔洞缺陷最近的爆轰波观测点，点  $K$  为距离极限孔洞缺陷最近的爆轰波观测点。

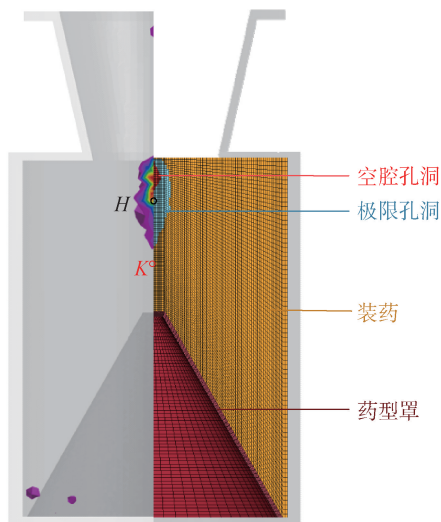


图 13 存在孔洞缺陷的装药模型  
Fig. 13 Charge model with cavity defects

爆轰波爆轰作用过程图如图 14 所示，当爆轰波经过孔洞缺陷时，由于孔洞尺寸较大，爆轰波形成两个曲面波直至绕过孔洞后相遇，同时孔洞缺陷受到压缩，产生高温高压、形成新的爆轰波曲面，后续逐

渐与主爆轰波合并。

在点  $H$  和点  $K$  处选取爆轰波观测点，点  $H$  与点  $K$  处爆轰压力曲线图如图 15 所示。通过对比无缺陷和存在孔洞缺陷的爆轰压力可以看出，在爆轰压力峰值处，存在空腔孔洞与极限孔洞缺陷的压力峰值较无缺陷的压力峰值分别降低约 20.1% 和 31.3%，随后无缺陷的爆轰压力曲线呈下降趋势，而存在孔洞缺陷的爆轰压力曲线由于孔洞内气体在爆轰波作用下被压缩，产生次峰值，导致爆轰曲线局部的不稳定。

综上所述，当孔洞缺陷尺寸为小尺寸和中等尺寸时，缺陷邻近位置的爆轰压力峰值随着孔洞直径的增大而增大；当孔洞缺陷为大尺寸时，爆轰曲线峰值下降，且爆轰曲线会出现次峰值，对爆轰波波形产生影响。

### 2.3.2 大口径装药存在随机孔洞缺陷情况分析

以上分析结果表明，孔洞多出现于装药上部与锥角部分，但是孔洞缺陷在装药中的具体位置、大小具有随机性。人为控制孔洞的位置无法反映实际情况，随机生成的孔洞更贴近实际，使仿真模拟具有实用性。

文献[25]的仿真与 CT 检测结果如图 16 所示，图 16(a) 缺陷预测图中熔黑梯炸药在中上部出现疏松缩孔，图 16(b) 为药柱内部 CT 检测图，药柱中上部出现了明显的近球形空腔缩孔，周围出现了蜂窝状的疏松。为了使后续仿真更符合实际，在有限元仿真中对宏观缩孔使用近球形假设，对微观疏松使用随机分布函数进行设置。

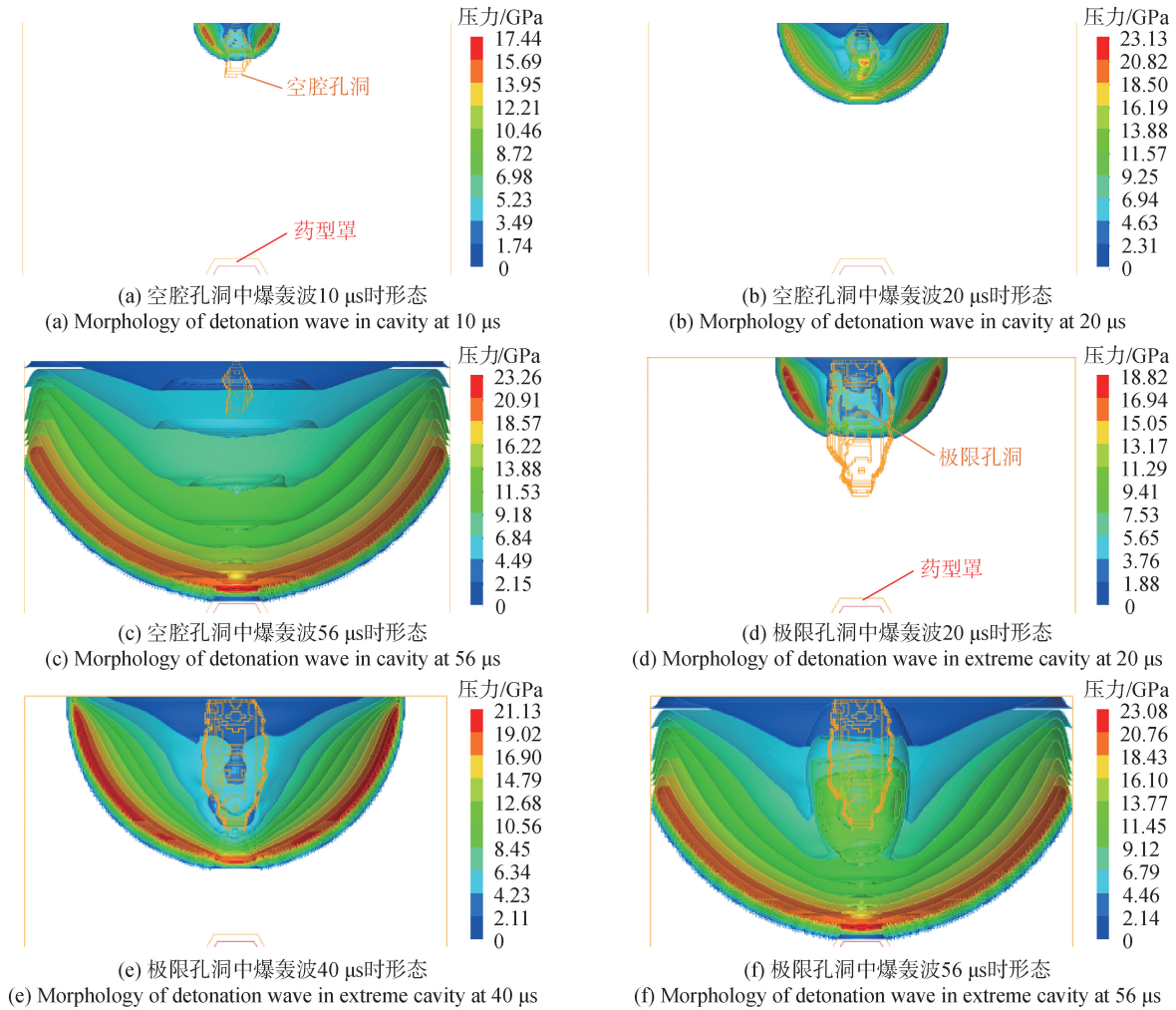


图 14 爆轰波爆轰作用

Fig. 14 Detonation wave interaction

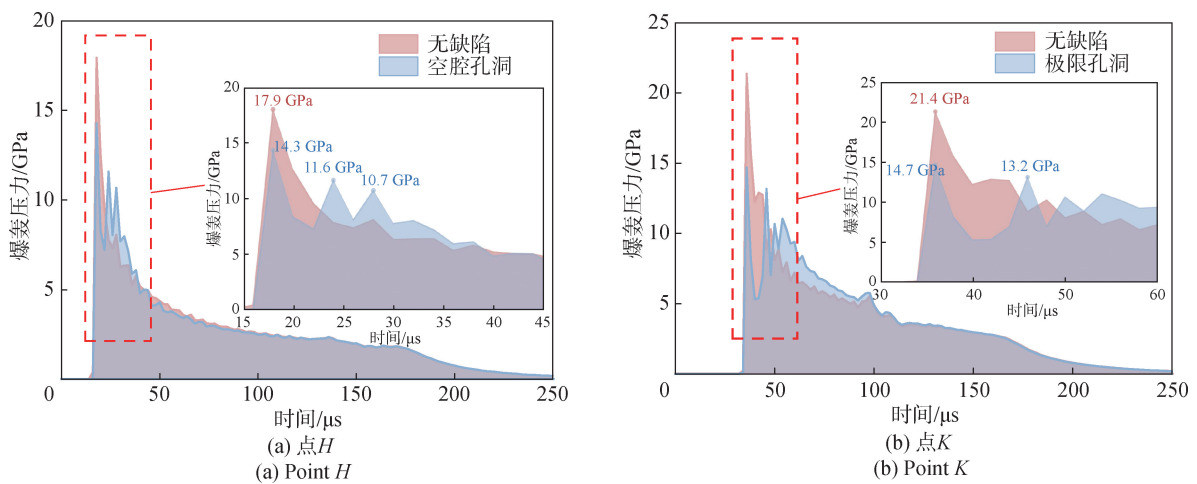


图 15 爆轰压力曲线

Fig. 15 Detonation pressure history

如图 17 所示,根据熔铸仿真所得的  $L_{max}$  仿真结果对孔洞分布位置进行划分,将熔铸仿真中的孔洞

预测区域导出,并导入有限元仿真中,存在孔洞缺陷的位置分为区域 1 和区域 2 两个部分,先将区域 1

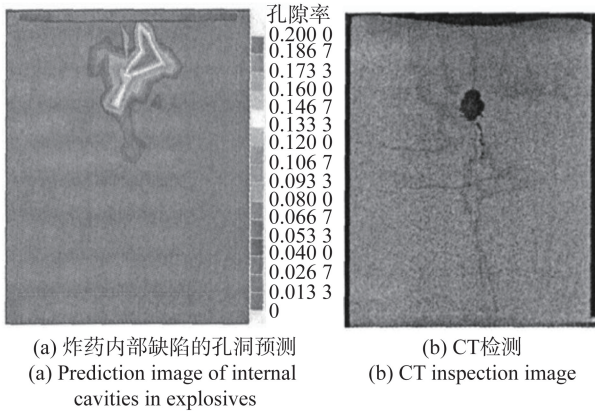


图 16 炸药内部缺陷的孔洞预测与 CT 检测结果<sup>[25]</sup>  
 Fig. 16 Prediction map of internal defect cavities in explosives and CT inspection results<sup>[25]</sup>

中的网格用球体区域框选并赋予空气材料以模拟宏观缩孔,然后将区域 1 中的剩余部分网格移入网格组 1,区域 2 的网格移入网格组 2。图 17 中,  $M$  点为炸药中心轴线上距离缺陷区域较近的一个点。

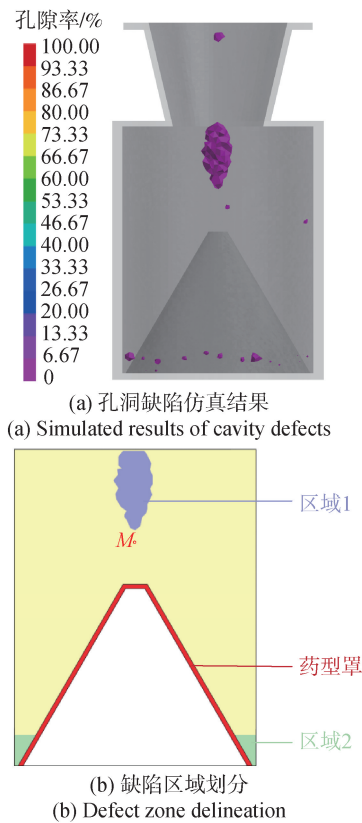


图 17 孔洞分布位置  
 Fig. 17 Cavity distribution locations

随后,其余的缺陷孔洞通过随机函数将网格组 1 和网格组 2 中的部分网格赋予空气材料,将其转换为空气以模拟实际缩松情况。孤立的空气网格

代表小尺寸孔洞缺陷;而相邻的网格聚合则自然形成了不同尺寸的孔洞缺陷。最后将网格组 1 和网格组 2 的其余网格赋予炸药材料。此方法自然地生成了随机尺寸的孔洞缺陷,这与实际装药中缺陷的既有大型缩孔又有弥散缩松的分布形态一致。在仿真设置孔洞缺陷时,使装药区域 1 的缺陷占比最高,区域 2 较少,对缺陷比例为 1%~5% 的情况进行仿真分析,其中存在 2% 的随机孔洞装药模型如图 18 所示。

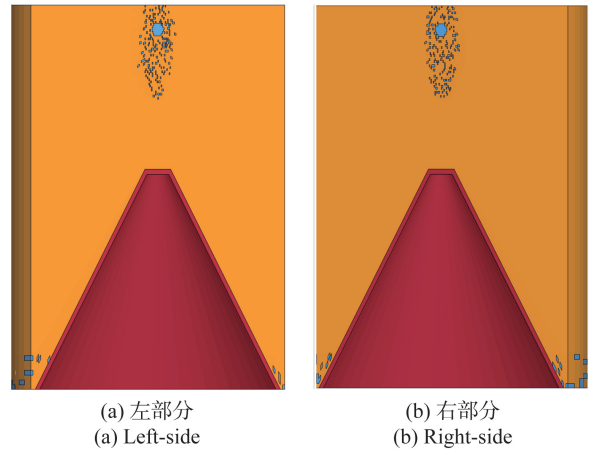


图 18 存在随机孔洞的装药模型  
 Fig. 18 Charge model with randomly distributed cavities

选取炸药中心轴线上的  $M$  点作为爆轰波观测点,绘制此观测点的爆轰压力曲线,如图 19 所示,从中可见随着孔洞缺陷比例的增加,爆轰波压力峰值降低。

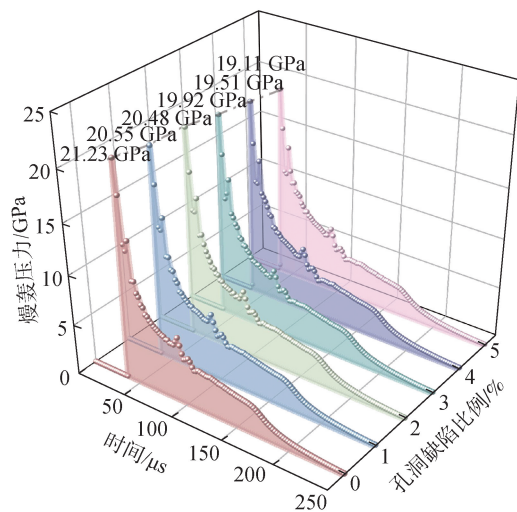


图 19 点  $M$  爆轰压力  
 Fig. 19 Detonation pressure at Point  $M$

以孔洞缺陷比例为 2% 的仿真为例,通过有限元仿真软件计算,可直观显示聚能装药起爆后聚能射流的成型过程。大口径聚能装药起爆不同时刻所得的聚能射流成型过程如图 20 所示。

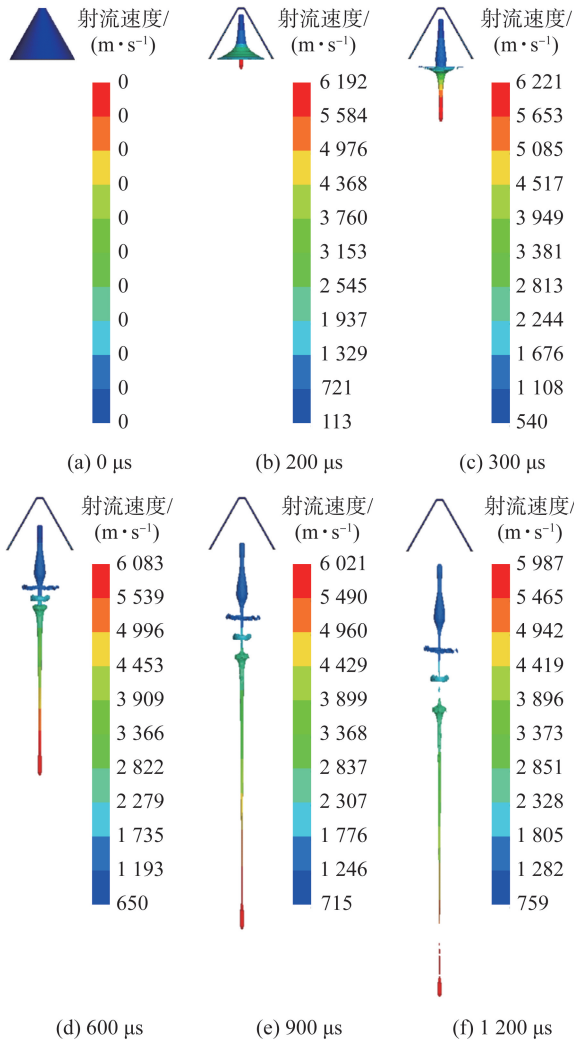


图 20 不同时刻聚能射流成型过程

Fig. 20 Formation process of shaped charge jet at different times

通过仿真分析可得装药存在不同孔洞缺陷比例所形成的射流参数如表 7 所示。

表 7 射流参数  
Table 7 Jet parameters

孔洞缺陷占比/%	$v_h/(m \cdot s^{-1})$	$v_t/(m \cdot s^{-1})$	$t_b/\mu s$	$L/mm$
0	6 036	696.8	1 198	2 656.1
1	6 037	696.3	1 196	2 640.3
2	6 038	695.9	1 184	2 639.2
3	6 039	695.4	1 192	2 637.3
4	6 039	695.1	1 164	2 635.4
5	6 041	694.8	1 170	2 630.5

注： $v_h$  为 800  $\mu s$  时射流头部速度， $v_t$  为 800  $\mu s$  时射流尾部速度， $t_b$  为射流断裂时间， $L$  为 800  $\mu s$  时射流有效长度。

对比射流首次发生断裂的情况可见：0%孔洞缺陷的大口径聚能装药在 1 198  $\mu s$  时断裂；1%孔

洞缺陷的在 1 196  $\mu s$  时断裂；2%孔洞缺陷的在 1 184  $\mu s$  时断裂；3%孔洞缺陷的在 1 192  $\mu s$  时断裂；4%孔洞缺陷的在 1 164  $\mu s$  时断裂；5%孔洞缺陷的在 1 170  $\mu s$  时断裂，相较无孔洞缺陷的情况，存在孔洞缺陷时，射流会发生提前断裂。对比 800  $\mu s$  时射流有效长度可以看出，在孔洞缺陷比例从 0%到 5%时，有效射流长度逐渐减少，从 2 656.1 mm 降至 2 630.5 mm。

分析可知，存在孔洞缺陷时所形成的金属射流总体都比较均匀，射流速度梯度比较适中，在装药孔洞缺陷比例从 0%逐步增加到 5%的过程中，射流头部速度变大，尾部速度减小，同一时间段射流有效长度减少，射流断裂时间不同程度地提前。

### 2.4 大口径装药孔洞左右分布不均分析

在熔铸装药生产过程中，模具厚度不均导致两侧散热速率不同、模具未水平放置导致药液偏向一侧流动、浇铸道口左右分布不均等原因，会使得左右两侧孔洞缺陷比例存在差异。文献[20]模拟了小尺寸聚能装药一侧出现多个较大孔洞缺陷的现象，且孔洞分布位置随机，但此现象在实际情况中并不常见，该仿真结果表明在孔洞缺陷的影响下射流会偏移轴线。鉴于孔洞缺陷会对爆轰波造成影响，从而使药型罩两侧微元产生速度差，因此需要研究大口径聚能装药中孔洞缺陷对射流偏移的影响。通过图 6 可知，当浇铸口偏移时，孔洞缺陷横向位置也会产生偏移，因此在装药左侧取 0.25%孔洞缺陷，右侧通过随机函数在区域内生成不同比例的随机孔洞缺陷，使两侧形成孔洞缺陷差。

通过仿真分析可知，当装药一侧出现孔洞缺陷较多时，射流偏离轴线位置且出现弯曲现象，图 21 中偏移角度为射流尾部中心与射流头部中心的连线同竖直方向的夹角。通过图 21 可以看出，500  $\mu s$  时右侧孔洞缺陷占比每增加 0.25%，射流偏转角度增大大约 0.2°~0.5°。

### 3 结论

本文以装药内部的孔洞缺陷为研究对象，使用仿真软件对大口径聚能装药存在随机孔洞缺陷的情况进行了数值模拟研究。得出以下主要结论：

1) 当浇铸口未发生偏移时，孔洞缺陷多出现于装药上部与锥角处，其中上部为空腔缩孔与蜂窝状

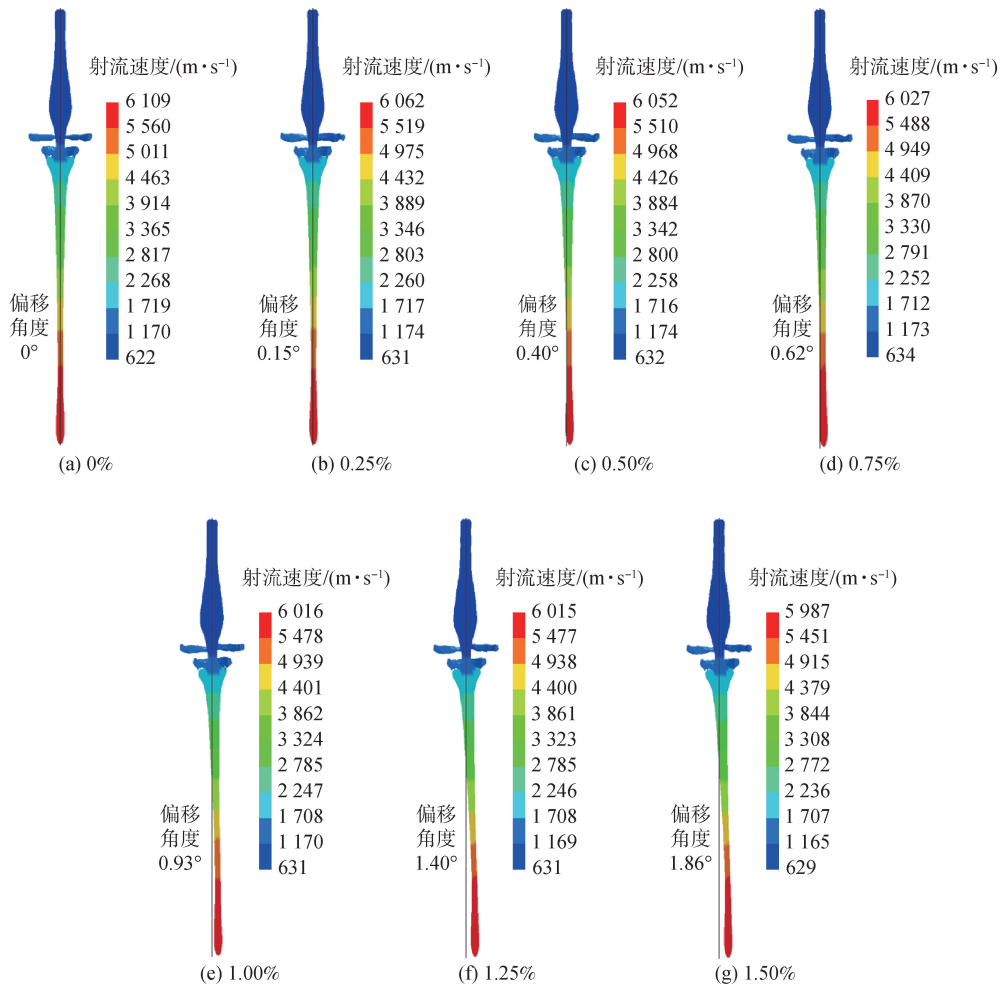


图 21 不同孔洞缺陷下聚能射流偏移情况

Fig. 21 Shaped charge jet deviation under difference in cavity fraction

缩松组成的大尺寸孔洞缺陷, 锥角处为小尺寸孔洞缺陷群; 当浇铸口偏移时, 装药上部的孔洞缺陷横向位置也会产生偏移。

2) 仿真分析表明, 孔洞缺陷尺寸小于反应区宽度时, 爆轰波可跨越缺陷而不受显著影响, 此时能量损失可忽略; 当孔洞缺陷为小尺寸、中等尺寸缺陷时, 距离孔洞缺陷较近处的爆轰波受到影响, 压力峰值随着孔洞尺寸的增大而增大; 当装药存在大尺寸孔洞缺陷时, 爆轰波会出现次峰值。

3) 当大口径装药存在随机孔洞缺陷时, 随着孔洞缺陷的增加, 射流头部速度增加, 尾部速度减小, 同一时间段射流有效长度减少, 射流断裂时间不同程度地提前。

4) 当装药两侧存在孔洞缺陷差时, 药型罩两侧微元存在速度差导致射流偏转, 装药左右两侧孔洞缺陷占比每相差 0.25%, 射流偏转角度增大约 0.2°~0.5°。

### 参考文献 (References)

[1] 黄正祥. 聚能装药理论与实践[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.  
HUANG Z X. Theory and practice of poly energy loading [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014. (in Chinese)

[2] 王林剑. 高固含量熔铸炸药凝固成型过程温度场与应变动态测试[D]. 太原: 中北大学, 2022.  
WANG L J. Dynamic testing of temperature field and strain during solidification molding of high solid content molten explosives [D]. Taiyuan: North University of China, 2022. (in Chinese)

[3] ZONG H Z, XIAO L, HAO Y J, et al. The effect of micro-nano TKX-50 particle gradation on the properties of TNT based castable explosives [J]. Journal of Energetic Materials, 2023, 41(4): 465-482.

[4] 孙鑫欢, 崔庆忠, 熊冰, 等. 改性 B 炸药凝固模拟验证[J]. 兵工自动化, 2020, 39(1): 77-81.  
SUN X H, CUI Q Z, XIONG B, et al. Solidification simulation and verification of modified B explosive [J]. Ordnance Industry Automation, 2020, 39(1): 77-81. (in Chinese)

[5] 李敬明, 田勇, 张伟斌, 等. 炸药熔铸过程缩孔和缩松的形成与预测[J]. 火炸药学报, 2011, 34(2): 17-20, 55.  
LI J M, TIAN Y, ZHANG W B, et al. Formation and prediction of

- shrinkage hole and shrinkage porosity in explosive during casting process [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2011, 34(2):17-20,55. (in Chinese)
- [6] 刘瑞鹏,罗一鸣,王红星,等. TNT、DNAN 和 DNTF 单质凝固过程中温度和缩松的数值模拟及实验研究[J]. 火炸药学报, 2016,39(3):43-47,52.
- LIU R P, LUO Y M, WANG H X, et al. Experimental study and numerical simulation on temperature and shrinkage porosity of TNT, DNAN and DNTF during solidification process[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2016,39(3):43-47,52. (in Chinese)
- [7] 刘瑞鹏,贾宪振,王永顺. DNTF 凝固过程显微疏松的模拟计算和试验研究[J]. 火炸药学报, 2019,42(5):485-489.
- LIU R P, JIA X Z, WANG Y S. Numerical simulation and experimental study of microporosity of DNTF during solidification process[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2019, 42(5):485-489. (in Chinese)
- [8] YU L D, LI H N. Comparison of ultrasonic nonlinear beamforming algorithms for defect imaging in crystalline particle-filled explosives [J]. Crystals, 2025, 15(2):175.
- [9] 杨治林,李昂,余瑶,等. 战斗部顺序凝固装药过程数值模拟研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022,43(9):193-200.
- YANG Z L, LI A, YU Y, et al. Research on numerical simulation of sequential solidification charge process of warhead [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(9):193-200. (in Chinese)
- [10] 朱锦书,王继章,朱德运. 一种注装药梯度护理凝固技术[J]. 兵工自动化, 2024,43(1):19-22,42.
- ZHU J S, WANG J Z, ZHU D Y. Injection-charge gradient nursing solidification technology [J]. Ordnance Industry Automation, 2024,43(1):19-22,42. (in Chinese)
- [11] 白志鑫,蒋城露,刘福生,等. 含能材料“热点”点火研究进展[J]. 火炸药学报, 2023,46(4):285-298.
- BAI Z X, JIANG C L, LIU F S, et al. Progresses of “hot spot” ignition in energetic materials [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2023,46(4):285-298. (in Chinese)
- [12] 黄龙杰,刘睿,高飞艳,等. 含缺陷分布的  $\beta$ -HMX 单晶动态拉伸变形及破坏机理[J]. 兵工学报, 2023,44(12):3872-3883.
- HUANG L J, LIU R, GAO F Y, et al. Dynamic tensile deformation and failure mechanism of  $\beta$ -HMX single crystal with defect distribution [J]. Acta Armamentarii, 2023,44(12):3872-3883. (in Chinese)
- [13] 胡秋实,尚海林,吴兆奎,等. PBX 炸药缝隙挤压加载下的破裂模式及点火响应[J]. 兵工学报, 2024,45(9):3135-3146.
- HU Q S, SHANG H L, WU Z K, et al. Fracture mode and ignition response of PBX explosives under crack extrusion loading [J]. Acta Armamentarii, 2024,45(9):3135-3146. (in Chinese)
- [14] 成丽蓉,汪德武,贺元吉. 侵彻单层和多层靶时战斗部装药损伤及热点生成机理研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(1):32-39.
- CHENG L R, WANG D W, HE Y J. Research on the damage and hot-spot generation in explosive charges during penetration into single-or multi-layer target [J]. Acta Armamentarii, 2020,41(1):32-39. (in Chinese)
- [15] 许礼吉,段卓平,白志玲,等. RDX 基 PBX 炸药热损伤演化行为的量化表征[J]. 兵工学报, 2023,44(7):2002-2013.
- XU L J, DUAN Z P, BAI Z L, et al. Quantitative characterization of thermal damage evolution of RDX-based PBX explosives [J]. Acta Armamentarii, 2023,44(7):2002-2013. (in Chinese)
- [16] 张思危,张路,余剑,等. 含多个气孔缺陷的多内孔药柱结构完整性分析与性能验证[J]. 固体火箭技术, 2025, 48(1):149-155.
- ZHANG S W, ZHANG L, YU J, et al. Structure integrity analysis and experimental verification of multi-bore grains with pores [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2025, 48(1):149-155. (in Chinese)
- [17] HUANG L J, LI Y, WANG Y J, et al. Understanding the deformation and fracture behavior of  $\beta$ -HMX crystal and its polymer-bonded explosives with void defects on the atomic scale [J]. Crystals, 2025, 15(4):376.
- [18] 王宇,芮久后,冯顺山. 装药缺陷对熔铸炸药爆速影响的实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2011,31(7):757-760.
- WANG Y, RUI J H, FENG S S. Experimental research of the charge defects' influence on detonation velocity of melting-cast explosive [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2011,31(7):757-760. (in Chinese)
- [19] 李砚东,冯顺山,陈赓,等. 非轴对称装药对杆式射流初速影响的数值仿真[J]. 系统仿真学报, 2012, 24(10):2076-2078,2082.
- LI Y D, FENG S S, CHEN Y, et al. Numerical simulation on influence of axial asymmetric charge on initial velocity of rod-like jet [J]. Journal of System Simulation, 2012, 24(10):2076-2078,2082. (in Chinese)
- [20] AYISIT O. The influence of asymmetries in shaped charge performance [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35(12):1399-1404.
- [21] 梁国祥,曹红松. 熔铸装药过程缩孔缩松的预测及工艺优化[J]. 兵器材料科学与工程, 2014,37(2):47-50.
- LIANG G X, CAO H S. Prediction of shrinkage porosity and process optimization during explosive casting process [J]. Ordnance Materials Science and Engineering, 2014,37(2):47-50. (in Chinese)
- [22] 谭多望. 高速杆式弹丸的成形机理和设计技术[D]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2005.
- TAN D W. Forming mechanism and design technology of high-speed rod-type shot [D]. Mianyang: China Academy of Engineering Physics, 2005. (in Chinese)
- [23] 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.
- SHI D Y, LI Y C, ZHANG S M. Explicit dynamic analysis using ANSYS/LS-DYNA 8.1 [M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)
- [24] XU M Y, HUANG Z X, ZU X D, et al. Mesoscale simulation of shaped charge jet forming and free flight based on B-spline and domain interpolation material point method [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023,181:104728.
- [25] 李敬明,田勇,张明,等. 熔黑梯炸药凝固过程的数值模拟与实验验证[J]. 含能材料, 2009,17(4):428-430,435.
- LI J M, TIAN Y, ZHANG M, et al. Numerical simulation and experimental validation of RHT solidification process [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(4):428-430,435. (in Chinese)