

doi: 10.7690/bgzd.2021.06.015

爆炸模型的参数化建模方法

陈志文¹, 张春晓², 潘国强³

(1. 驻宜昌地区防化军代室, 湖北 宜昌 443600; 2. 防化军代局, 北京 100089; 3. 武警军代局, 北京 100071)

摘要: 针对爆炸模型常规参数化建模存在的问题, 提出一种新的建模方法。以常见的炸药—传播介质—结构模型为例, 论述常规的建模方式及其在参数化建模时的局限性, 提出一种新的建模和划网格方式以适应参数化建模, 给出炸药和井筒位于不同位置时的计算结果。模拟结果证明: 该方法能解决当炸药和井壁的投影相交时难以参数化建模的问题, 具有更强的灵活性和适用性, 可为从事爆炸研究的工程人员提供指导。

关键词: 爆炸; 参数化建模; 数值模拟

中图分类号: TJ510.2 **文献标志码:** A

Parametric Modeling Method of Explosion Model

Chen Zhiwen¹, Zhang Chunxiao², Pan Guoqiang³

(1. Military Representative Office of Chemical Defense in Yichang, Yichang 443600, China;

2. Military Representative Bureau of Chemical Defense, Beijing 100089, China;

3. Military Representative Bureau of Armed Police, Beijing 100071, China)

Abstract: Aiming at the problems existing in conventional parametric modeling of explosion model, a new modeling method is proposed. Taking the common explosive-propagation media and structure model as an example, the conventional modeling methods and their limitations are discussed. A new modeling and meshing method are proposed to adapt to parametric modeling. The calculation results are given when explosives and wellbore are located at different locations. The simulation results show that the proposed method can solve the problem that it is difficult to parameteric modeling when the projection of explosive and well intersect. The new parametric modeling method has stronger flexibility and applicability, which can provide guidance for engineers in explosion research.

Keywords: explosion; parametric modeling; numerical simulation

0 引言

发射井筒是导弹发射阵地的主要样式, 也是导弹贮存、检测、维护保养的重要基地。为保障发射井在受爆炸影响后仍安然无恙, 研究爆炸冲击波的传播特征及对发射井的力学影响具有重要意义^[1-2]。LS-DYNA 的显式算法能快速求解瞬态大变形动力学问题^[3], 在研究爆炸模型时被广泛应用, 如: 爆炸冲击波对金属板的损伤研究^[4-5]; 爆炸地震波对埋地油气管道的研究^[6]; 钢管混凝土柱的抗爆性能研究等^[7]。以上研究均是基于特定模型展开, 而工程人员往往希望通过简单输入几个特征参数灵活快速地实现任意模型的建立和模拟, 即参数化建模^[8]。2009年, 华康通过 PCL 语言开发, 实现了爆炸模型可参数化调整的建模程序^[9]; 2020年, 张涛基于 APDL 语言, 在研究爆炸问题时, 对缩聚梁模型减振垫位置实现参数化建模^[10]。目前关于爆炸模型的参数化建模原理和困难尚未见学者讨论。笔者以常

见的炸药—传播介质—结构模型为例, 提出一种新的建模和划网格方法, 并通过算例计算证明了该方法的建模灵活性。

1 计算模型

一个完整的爆炸模型通常由炸药、传播介质和结构 3 部分组成。以爆炸冲击波对发射井筒响应为例, 介绍常规的建模思路和划分网格方式^[11]。首先, 不考虑模型参数化过程, 计算模型如图 1 所示。炸药位于上方空气中, 下方为土壤, 在土壤中有 1 口被空气填充的井, 采用同心实体圆环模拟井壁, 井壁与土壤紧邻, 采用流固耦合方式定义井壁与土壤和空气的接触关系。该模型结构简单, 在 Ansys 中可容易地建立模型, 只需将空气、炸药、土壤、井孔分别建立, 然后采用相互切割和合并面的命令, 保证各 part 间共用线和面。

在下一步划分网格时需要一定技巧。对于爆炸模型, 炸药和传播媒介交界面的网格节点需要共用,

收稿日期: 2021-03-03; 修回日期: 2021-03-28

作者简介: 陈志文(1982—), 男, 江苏人, 硕士, 工程师, 从事车辆工程、材料工程、特殊专业研究。E-mail: 787568644@qq.com。

这点通过各 part 相互切割的方式已经满足。另外，在爆炸模拟中，只有采用六面体网格，计算速度和精度才能得以保障；因此，在画网格过程中还需合理的切割模型，以保障每一个切割块的源面和目标面匹配，才能成功划分六面体网格。切割思路为将炸药和 4 个圆形井在竖直方向向两侧延伸，直至贯穿整个研究域。以不含炸药的空气域网格划分为例，图 2(a)为未做切割处理的空气域模型，上方为 1 个完整的方形面，下方为除掉 4 个圆形井口的方形面，当对该体域划分网格时，会提示“源面和目标面不匹配”的错误；图 2(b)为将井口圆面向 z 轴正向延伸后的空气域模型，此时空气域的上下面相匹配，六面体网格可成功被划分出来。

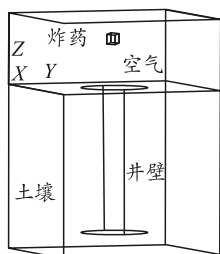
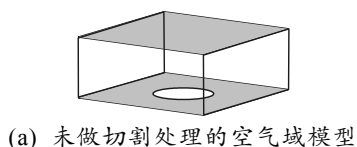
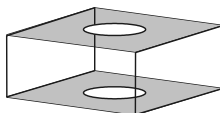


图 1 计算模型



(a) 未做切割处理的空气域模型



(b) 井口圆面向 z 轴正向延伸后的空气域模型

图 2 上方空气域模型

对于固定的 1 个模型，虽然通过上述贯穿切割的方式，可实现六面体网格划分和模拟，但当炸药和井口相对位置可任意改变时，该方法不再适用。

模型均由体、面、线、点组成，均对应唯一编号。在 Dyna 中的任何操作，如切割、合并元素等均是基于这些编号而执行，且在切割操作过程中，软件会自动为每一切割子块分配体元素编号。图 3 展示了参数化建模时的 2 种情况，其中图 3(a)为炸药的投影在井口外侧，图 3(b)为炸药的投影与井壁相交。在执行延伸且相互切割命令后，2 种情况下的每一体素的编号均已在剖面图中被示意出来。通过对比 2 幅图可看出：当炸药和井壁在 X-Y 面的投影重合时，切割操作后模型中会多出 1 个体元素，将导致后续基于模型 1 的操作命令流不再适用于模型 2。如在模型 1 中要对体素号为 2 的空气域分配

空气属性，若将同样的命令流用于模型 2，则变成了对体素号为 2 的炸药域分配了空气属性，而这明显是错误的。通过上述分析可知，常规的贯穿切割的建模方式不再适用于参数化建模的要求。

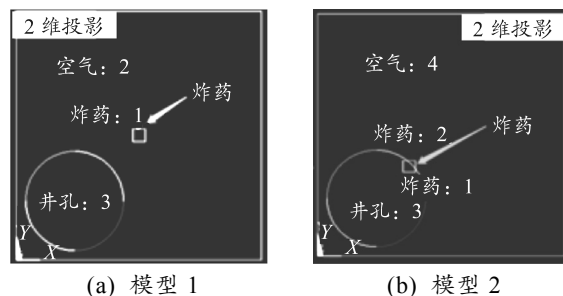


图 3 剖面

2 参数化建模的新方案

模型 1 的命令流不适用于模型 2 的主要原因：在贯穿切割建模过程中，模型 2 中产生了新的体素，会对后续的操作命令产生干扰。为了避免产生新的元素编号，即对 1 个 part 操作时不影响其他 part，提出一种新的建模方式。

图 4 为新建建模方法的核心步骤。图 4(a)为第 1 步，仍是建立图 1 所示的包含炸药、空气、土壤、井孔的模型，注意井孔仍需贯穿土壤，但无需贯穿上方的空气，采用切割与合并的命令以保证各 part 间共线和共面。第 2 步，分别将方形炸药的 8 个顶点与上方空气的 8 个顶点连接，用图 4(b)中形成的黑色面和炸药上下的各 4 个斜面分别切割空气域；此时，上方的空气域被划分为 6 个子块，除了炸药下面的子块无法做到源面和目标面匹配，其余 5 个子块均是可以划分六面体网格的。第 3 步在图 4(c)中，将方形炸药的上下端面及空气的上端面各切割出 1 个圆面，并将炸药上下面的圆面与空气域上下面的圆面分别组合成圆台体，以保障炸药上下的 2 个子块也能划分出六面体网格；第 4 步，用图 4(d)黑色圆柱体切割炸药，在井孔深度位置用 X-Z 横截面切割模型，保障土壤和井孔区域的源面和目标面匹配。

至此，模型建立完毕，按照图 4 的新分块切割方式可以保障每一个子块的源面和目标面匹配。不同于常规的贯穿切割方式，新分块切割的方法由于不受下方井孔的影响而没有产生新的体素，保障了炸药和井孔处于不同的相对位置时均可实现共用 1 套命令流进行参数化建模。1 个完整的参数化建模命令流包括：选择单元类别、定义材料模型、建立几何模型、划分网格、设置无反射边界及求解器设

置。图 5 给出了新参数化建模的命令流的核心部分，并给出相应解释。

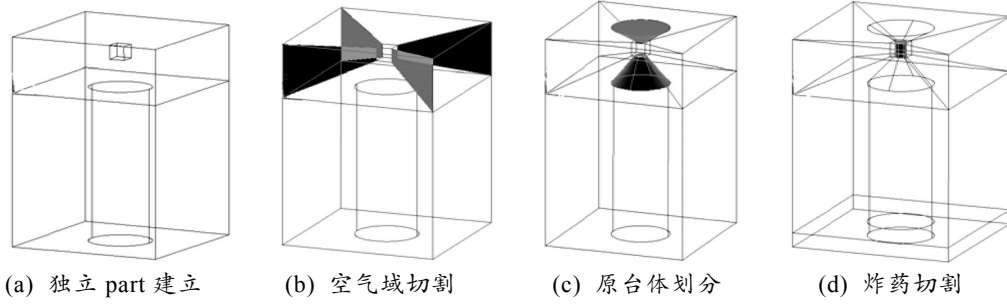


图 4 建模方法

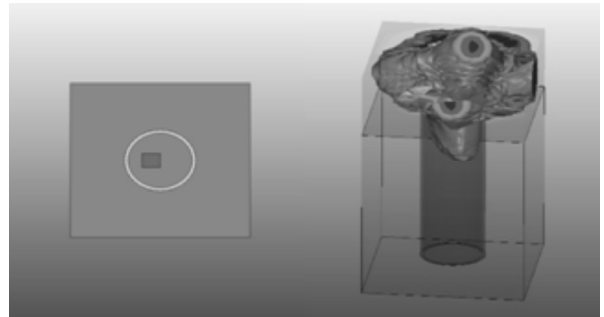
1	LSTR,	1,	13							
2	..									
3	LSTR,	8,	20	⊗ 炸药和空气四周的八个顶点分别连接成线						
4										
5	FLST,2,4,6,ORDE,2									
6	FITEM,2,1									
7	FITEM,2,-4									
8	VPTN,P51X			⊗ 用连接线形成的面切割空气域模型						
9	..									
10										
11	KWPLAN,-1,	14,	16,	13	⊗ 移动坐标系至炸药底面					
12	CYL4,5,5,3.5				⊗ 建立小圆					
13	KWPLAN,-1,	17,	18,	20	⊗ 移动坐标系至炸药顶面					
14	CYL4,5,5,3.5				⊗ 建立小圆					
15	KWPLAN,-1,	5,	6,	8	⊗ 移动坐标系至空气顶面					
16	CYL4,50,50,20				⊗ 建立小圆					
17										
18	V,	27,	28,	25,	26,	31,	32,	29,	30	
19	V,	39,	40,	37,	38,	35,	36,	33,	34	⊗ 小圆和大圆形成圆台
20	V,	32,	29,	30,	31,	36,	33,	34,	35	⊗ 炸药顶面和底面的小圆形成圆柱
21										
22	FLST,2,7,6,ORDE,2									
23	FITEM,2,1									
24	FITEM,2,-7									
25	VPTN,P51X									⊗ 用新形成的圆台和圆柱切割模型整体

图 5 参数化建模命令流截取

3 模拟结果

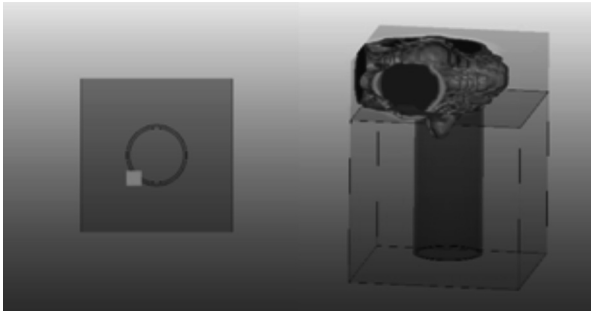
对于爆炸模拟，当以命令流形式参数化建模形成 K 文件后，还需对 K 文件添加和修改关键字，包括状态方程添加、ALE 单元的设置、part 引用的设置等^[12]。将修改后的 K 文件用 Dyna 求解器计算，用 LS-PerPost 处理结果。

图 6 展示了炸药和井筒处于不同相对位置时，炸药分别在 0 ms 和 0.2 ms 时的体积变化情况。通过图 6(a)与图 6(b)的对比发现：大部分炸药碎片主要在上方空气中扩散，直至传到无反射边界后被吸收；小部分炸药碎片对井孔结构产生影响，碎片在井筒中逐渐向井底扩散。由于图 6(b)中炸药正位于井孔上方，因此，爆炸后的碎片更多进入井筒。



(b) 炸药投影与井孔分离

图 6 炸药体积随时间变化情况



(a) 炸药投影与井孔相交

图 7 展示了炸药和井筒处于不同相对位置时，井口和井底的压强变化结果，其中图 7(a)和图 7(b)分别表示炸药和井口的 2 维投影相交和分离的情况。图中实线表示井口某单元，虚线表示井底某单元，可以看出，井口处首先受到压力，当冲击波沿井壁传递到井底时，井底单元压力曲线开始波动。在图 7(a)中，当炸药位于井口上方时，井口受到的压力较大，最大为 350 MPa，冲击波在井中传递过程中，井口和井底的受力均以正压力为主；在图 7(b)中，爆炸的能量更多进入到井筒中，井口受到的压力最大，但不到 120 MPa，最终井壁上下端均以承受负压力为主。

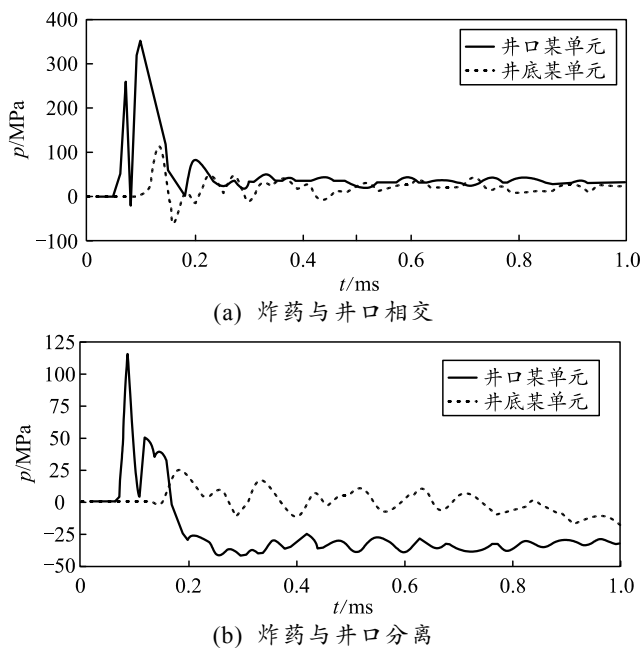


图 7 井筒监测点的压强—时间曲线

图 8 展示不同情况下井壁所受等效应力随时间变化的曲线，可以看出，炸药爆炸一段时间后，冲击波才到达井口位置，井壁受力。2 种情况下，井壁的全局最大应力均出现在井口附近。在图 8(a)中，炸药投影与井口分离时，最大应力出现在 0.11 ms 左右，最大等效应力为 112 MPa；在图 8(b)中，炸药投影与井口相交时，最大应力在 0.13 ms 左右，最大等效应力为 264 MPa。

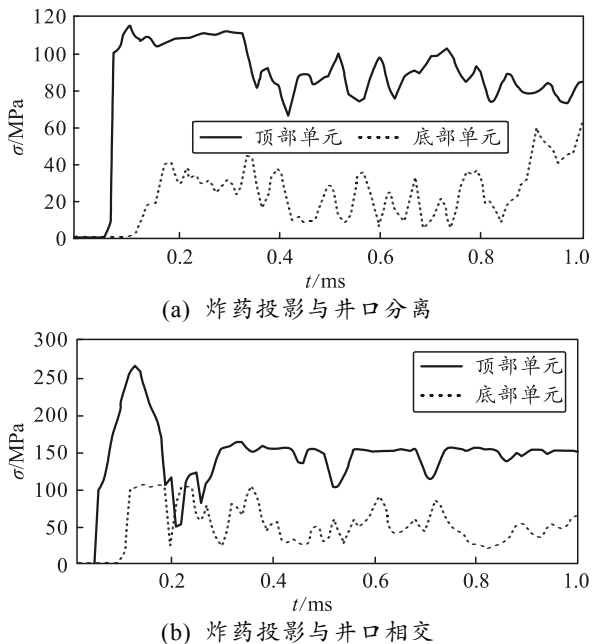


图 8 最大等效应力—时间曲线

4 结论

笔者提出一种新的爆炸建模方式，通过 2 个算例论证了新方式在参数化建模中的优点，结论如下：

1) 对于炸药—空气—土壤—发射井模型，常规建模方式形成的命令流文件无法被用于某些模型的建立，如在炸药和井壁的投影相交情况下，切割操作时会多出 1 个体元素，导致后续命令流失效。

2) 提出一种新的建模方式，新的命令流文件不受各部分位置的影响。在参数化建模过程中，只需 1 个命令流文件即可实现炸药和井筒的任意位置摆放。

3) 爆炸模拟结果表明：用新参数化建模的方式建立不同爆炸模型和模拟时，均能得到正确的模型和计算结果。

参考文献：

- [1] 吴小宁, 张秀刚. SS-18 导弹研制技术综述[J]. 飞航导弹, 2019(5): 13-19.
- [2] Tshipis K, 于开山. 核爆炸对导弹地下井的影响[J]. 国外导弹技术, 1982(1): 1-34.
- [3] 时党勇, 李裕春, 张胜民. 基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 1-10.
- [4] 陈赞, 冯顺山, 王芳. 爆炸冲击波作用下的金属板损伤 P-I 图仿真[J]. 科技导报, 2010, 28(18): 52-56.
- [5] 黄开书, 万力伦, 陈洋, 等. 含某金属粉炸药爆轰性能分析[J]. 兵工自动化, 2020, 39(9): 94-96.
- [6] 湛贵宇, 纪冲, 王蒙昱. 爆炸地震波作用下埋地油气管道动力响应研究[J]. 天然气与石油, 2015, 33(5): 1-5.
- [7] 吴赛. 爆炸荷载作用下钢管混凝土柱的动力响应及损伤评估[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [8] 徐鹏飞, 王洪申, 豆永坤. 基于命令流方法实现 ANSYS 系统参数化建模[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(4): 51-53.
- [9] 华康. 连续玄武岩纤维复合材料船体抗爆性能分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [10] 张涛, 胡会朋, 卢丙举. 爆炸冲击载荷下复杂细长结构减振系统优化[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(19): 42-46.
- [11] 董靖宇, 李志刚, 于存贵. 基于动网格的炮口制退器两相流场数值模拟[J]. 兵工自动化, 2020, 39(6): 65-68.
- [12] 李裕春, 时党勇, 赵远. ANSYS 10.0/LS-DYNA 基础理论与工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 130-145.