

## 采矿与采石产业的爆破模型建模 采用 NAG Fortran 算法库

伦敦帝国理工学院 化学工程系

Martin Braithwaite

在许多露天的采矿工作中，每次的爆破中都会使用成吨的炸药，也因此商业上就有相当大的诱因来实施爆破优化的规划。采矿作业包含着许多需要考虑的因子，例如：碎石与巨大石头处理的成本、地面震动与相关危害的限制、避免爆破中产生的气体以及炸药与其辅助配件的控制(延迟、雷管)等。爆破优化可以透过正确的爆破设计(配置、炸药种类、装填延迟的时间等)来达成。毋庸置疑的失败的爆破将花费相当惊人的成本。

为了要能支持这样的工作，我们开发了计算机模型，它结合了炸药的稳态爆破与其所包覆岩层的地质力学[1]。本篇介绍的是关注在炸药与爆破的模型中，这里我们采用 NAG Fortran 算法库坚固的数值函数，其中应用到 CO5、D02N 与 E04 相关的函数。用户一般都会在高性能计算机上运行此仿真程序，然而任何软件上的运行错误都是不能被接受的，所以使用者都会透过任何可能的方式让专家透过远程进行协助。

商业用途的爆破炸药有相当多不同的种类，一般来说成分包含了氧化剂与化学感光剂燃料，例如：乳化炸药、微气泡炸药、ANFO 与水胶炸药等。相对于在国防上的大量炸药使用，高动能的材质是不能被使用的，也因此它的性能是无法由热流体动力学理论独自来进行预测[2]。在引爆过程中爆炸状态与装填直径与材料都有关，化学平衡并不会就此达成：它并不会与炸药的密度呈现线性的关系，震动正面是曲线的，爆炸反应区域相对较长且与包覆物有关。

就数值模拟上来说，以上的物理问题可以分成两个数学问题：

- (i) 在高温与密度下多相超临界介质的化学平衡测定[3]
- (ii) 一维与二维的 Reactive Euler equations (圆柱形) [4]

这些模拟的输出会建构出全部岩石破碎与飞散的过程模型。基本上，岩土模型需要压力历史才能够描述在爆破及其随后的膨胀间，岩石所受爆破材质及岩石表面的压力。

第一个问题要解决的是理想的爆破状态与等熵线 (isentropes)[3]。我们透过有效的统计基础开发出流体状态方程，且透过 Chebyshev 多项式以包含密度与温度的形式呈现。由于在这个应用中，固态物体只是很小的一部份，所以我们采用 Murnaghan Eos 形式[5]。程序使用 NAG Fortran 算法库的函数 (E04UCF, CO5NDF)，并针对不同的状态，求解有约束式的优化问题。公式如下：

$$\min A(n_{g_i}, n_{s_i}; V, T) \text{ subject to } 0 \leq n_{g_i}, n_{s_i} \leq N_{\max}$$

where  $A$  is the reduced Helmholtz Free Energy:  $n_{g_i}$  &  $n_{s_i}$  are moles of gas and solid phase species  $i$ ;  $V, T$  represent the total volume and temperature in the system.

这个计算的缺点是它并不允许有限反应，且径向流会与包覆材质有关。它表示了在与无限的包材质间最快的爆破速率。我们实施进一步的模拟来判定非理想的爆破行为[4]。这需要稳定反应尤拉方程 (steady reactive Euler equations)，包含了：

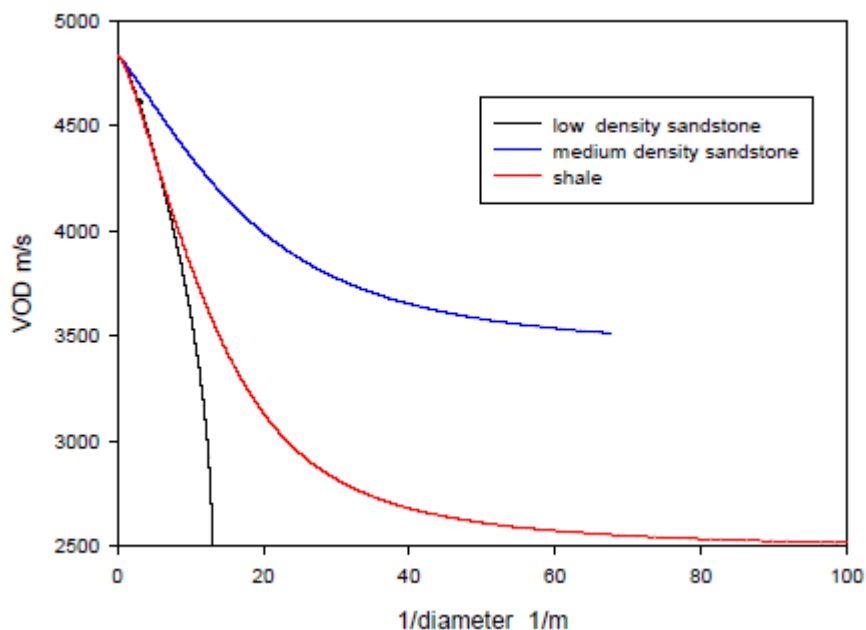
- 质量、动量与能量守恒
- 流体的未反应热力学方程 (简单来说就是对于未反应材料在理想爆炸状况下的等熵线，以及未反应材料的冲击压缩 (shock compression) 数据)

- 包覆物的应力与应变关系
- 聚合力表示式

严格来说，第二个分析需要解决边界问题，但因为运行速度的考虑，我们采用默认值问题 (D02NBF) 迭代求解的替代方法。此程序被运行在两个模型中，第一个模型是用来在量测出实验数据的速度方程式中拟合出速度的参数，此方程通常是基于已设计好外壳材料的直径倒数与爆震波速度。第二个模型是用来决定相同炸药的表现结果，在已经建立好的速度参数下对不同的材料进行分析 (如下)。

图中的结果显示典型爆破速度会随着外壳材料直径增加而递减，而随着外壳材料的强度增加而增强。在许多岩层中不对称的情形是因为爆炸时在封闭空间的音波影响力超过了爆震波的速度：这方面的理论是相当缺乏的！

本研究中所有的数值求解除了 ODRPACK (NIST, Boulder, USA) [6] 之外，其他的函数都采用 NAG 算法库。所开发的程序皆链接到不同 Windows 操作系统的图形化接口中，并广泛应用在全球采矿与爆破公司中 (AEL, DYN0, DeBeers, Sandvik Tamrock, Rio Tinto, LKAB, Anglo American & Codelco)，这些公司除了赞助外，也同时在实际的爆破模型优化问题中使用这些程序。



图一：典型的 ANFO 炸药的爆震波速度与不同材料的装药直径的关系

志谢：

作者感谢所有共同参与的人员 (于参考资料中所列)，还有各赞助公司，及自研究开始，NAG 公司 15 年来持续的协助。

参考资料：

1. Ruest, M., P. Cundall, A. Guest & G. Chitombo. "Developments Using the Particle Flow Code to Simulate Rock Fragmentation by Condensed Phase Explosives," in FRAGBLAST - 8 (8th International Symposia on Rock Fragmentation by Blasting, Santiago, Chile, May 2006), pp. 140-151. Santiago: Editec, 2006.
2. Fickett, W. & Davis, W. C., "Detonation: Theory and Experiment", Dover (2003)

3. Freeman, T.L.; Gladwell, I.; Braithwaite, M.; Byers Brown, W.; Lynch, P.M.; Parker, I.B. "Modular software for modelling the ideal detonation of explosives". Math. Eng. Ind. 3, No.2, 97-109(1991).
4. Braithwaite, M., Sharpe, G.J., & Chitombo, G.P., "Simulation of real detonations as an energy source term for the Hybrid Stress Blasting Model" in Fragblast-( 9th International Symposia on Rock Fragmentation by Blasting, Santiago, Chile, September 2009), Granada: Editec, 2009.
5. Braithwaite, M & Allan, N L., "Thermodynamic Representations for Solid Products in Ideal Detonation Predictions", 12th Intl Detonation Symposium, San Diego , ONR(2002)
6. ODRPACK - <http://www.netlib.org/odrpac/>

赞助商:

1. African Explosives Limited (AEL)
2. Dyno Nobel Asia Pacific Limited
3. Codelco Chile
4. Rio Tinto Limited
5. De Beers Group Services
6. Debswana Diamond Company (Pty) Ltd
7. Anglo American Operations (AOL)
8. Sandvik Mining and Construction
9. LKAB