文章编号：1001-1455(2014)06-0754-05 **DOI**：10.11883/1001-1455(2014)06-0754-05

岩石中化学爆炸气体渗漏行为的实验研究*

王铁良，王占江，卢 强，张自禄，文 潮
（西北核技术研究所，陕西 西安 710024）

摘要：通过小药量化爆模拟实验，研究了岩石中满足缩比关系的不同药量化学爆炸一氧化碳渗漏时间、渗漏份额与药量的关系。研究结果表明：相同介质中缩比爆炸实验气体渗漏时间大致与药量的三分之二次方成正比，渗漏停止时间也大致与药量的三分之二次方成正比；封闭空间内化学爆炸在爆室内产生的高温能够使爆室内一些物质分解产生非冷凝气体；对于不同药量的缩比实验，小药量实验的气体渗漏份额不小于大药量实验的气体渗漏份额。根据此研究结果，可以用小药量地下爆炸气体渗漏行为的监测结果预估大药量实验的气体渗漏行为。

关键词：爆炸力学；气体渗漏；缩比爆炸实验；化学爆炸
中图分类号：O381 **国标学科代码**：13035 **文献标志码**：A

地下化学爆炸过程中一氧化碳等有害气体在岩体中的渗漏行为研究对人员安全防护有重要参考意义，不少学者对气体渗漏行为进行过数值模拟和现场监测。在以往的地下爆炸实验中，对气体渗漏行为进行过大量的监测[1-2]。J. J. Nitao[3]开发的 NUFT、B. J. Travis[4]开发的 TRACR3D 都是多孔介质中流体运动和输运程序，应用于地下爆炸实验围岩和堵塞段中气体渗漏的模拟及示踪气体渗漏监测结果的分析。乔登江[5]分别用井筒一维多孔介质渗透模型、单一裂缝渗漏模型估算过花岗岩中封闭爆炸气体渗漏的速度和时间。王铁良等采用双孔隙度双渗透率模型对裂隙岩体中封闭爆炸气体渗漏行为进行过数值模拟[6]，在模型中考虑了渗透、扩散、热传导、热辐射等因素[7]。张建鑫等[8]用商业软件对高压驱动下非均匀介质内气体输运行为进行了数值模拟研究。

数值模拟中计算参数的选取与介质有关，往往要根据同一场地或类似介质中已经进行过的爆炸实验气体渗漏监测结果反演参数，再利用反演得到的参数对将要进行的爆炸实验气体渗漏行为进行数值模拟。如果相同介质中不同药量爆炸气体渗漏行为有一定的规律，就可以直接用以往爆炸实验的气体渗漏监测结果，估算将要进行的爆炸实验气体渗漏行为。

王铁良等[9]假设不同当量爆炸的埋深满足缩比关系，即不同当量实验的 $L/W^{2/3}$ 是相同的，L 表示埋深，W 表示爆炸当量。分别针对 3 种渗漏机理：(1)气体通过均匀多孔介质渗漏，(2)气体通过非均匀多孔介质渗漏，(3)气体通过贯通裂缝渗漏，通过理论分析和数值模拟研究了缩比化学爆炸实验气体渗漏时间、渗漏量与药量的关系。结论是，不论哪种渗漏机理，气体渗漏出介质的时间近似与 $W^{2/3}$ 成正比，气体最终的渗漏份额基本一致。

本文中，设计相同介质中的缩比实验，监测 CO 的渗漏时间和渗漏份额，与理论分析结果[9]对比。

1 实验设计

文献[9]的理论研究结果显示，如果相同介质中不同当量实验的埋深满足缩比关系，则气体渗漏时间与 L^2 或 $W^{2/3}$ 成正比，渗漏份额基本一致。根据理论研究结果，在不同尺寸花岗岩试样中进行缩比实验，在实验中监测 CO 渗漏情况，对监测结果进行总结分析。

选择陕西粗颗粒黑云母花岗岩，采集完整的未风化无裂缝的花岗岩石块，加工成立方体试样（见图 1）。由国土资源部西安矿产资源监督检测中心对岩石样品化学成分进行了检测，分别为：$w(SiO_2)=$

* **收稿日期**：2013-04-17；**修回日期**：2013-06-10
作者简介：王铁良(1966—)，男，硕士，副研究员。



图 1 立方体花岗岩试样

Fig. 1 Cubic granite sample

69.2%，$w(Si_2O_3)$ = 15.06%，$w(TFe_2O_3)$ = 2.65%，$w(FeO)$ = 1.42%，$w(K_2O)$ = 4.00%，$w(Na_2O)$ = 4.25%，$w(CaO)$ = 2.12%。由贝士德仪器科技有限公司对花岗岩样品密度和孔隙度进行了测量，测得平均密度为 2 665.7 kg/m^3，平均孔隙度为 1.3%。花岗岩的抗压强度和抗拉强度分别为 154 和 12.2 MPa[10]。

花岗岩的试样尺寸、爆室尺寸、爆炸当量设计如表 1 所示。表中，a_g 为花岗岩试样的边长，d_c 和 l_c 分别为爆室的直径和高度，W_{TNT} 为炸药的 TNT 当量。根据理论计算，按本文中设计的比例爆室半径，化爆在岩石中产生的应力小于花岗岩的抗压强度，同时，爆后空腔内的静态压力小于花岗岩的抗拉强度，爆后不会出现试样破碎破裂现象。

装药孔和爆室设计如图 2 所示。为了增加回填物与孔壁的摩擦力，并有利于封闭，在装药孔的孔壁设置数个环形嵌槽，如图 3 所示。炸药固定在特制的钢支架中心(见图 4)，连同支架放入爆室后炸药在爆室中心。装药后用花岗岩芯和环氧树脂对装药孔密实回填。

装药后，将花岗岩试样放入 1.2 m×1.2 m×2.0 m 的矩形透明密闭室内，实验中监测密闭室内的 CO 浓度，并观察爆后现象。

各次实验之后，花岗岩试样外观与爆炸前一样，未见到花岗岩试样破裂现象，无喷发性泄漏，气体是通过花岗岩孔隙慢慢渗漏出来的。

表 1 实验设计

Table 1 Design of experiments

No.	a_g/mm	d_c/mm	l_c/mm	W_{TNT}/g
1	500	80	80	1.25
2	500	80	80	1.25
3	1 000	160	160	10.00
4	1 000	160	160	10.00

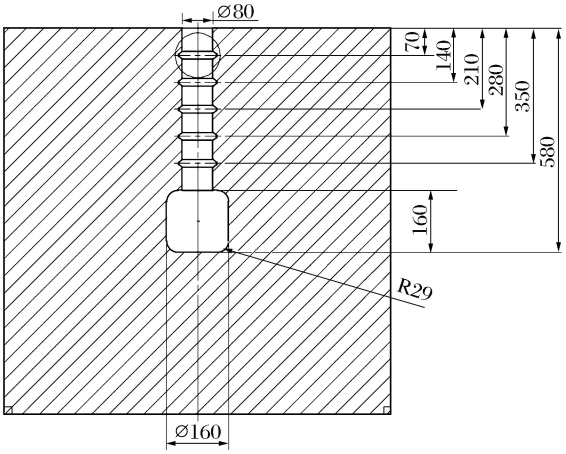

图 2 花岗岩试样中爆室设计图

Fig. 2 Design drawing of explosion cavity in cubic granite



图 3 装药孔壁的环形嵌槽

Fig. 3 Annular groove in the hole wall

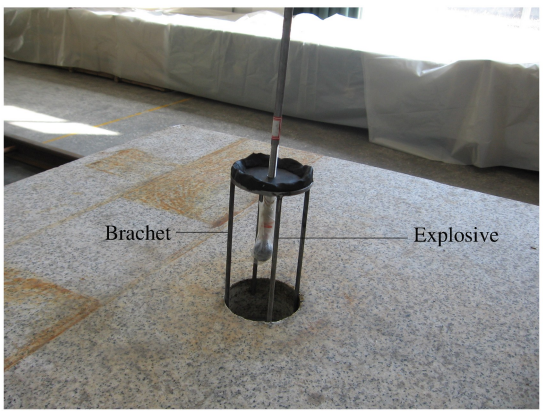

图 4 炸药固定在支架上放入爆室

Fig. 4 Explosive placed at the center of the steel bracket

2 CO 浓度监测结果

各次实验密闭室内 CO 浓度随时间的变化曲线如图 5 所示。由图可见,爆后初期 CO 浓度有所起伏,原因是爆后初期渗漏出来的 CO 并未在密闭室内混合均匀,后来起动密闭室内的搅动设备将密闭室内的气体混合均匀。实验 1～4 中气体渗漏出来的时间分别为 537、533、2 040 和 1 980 s。

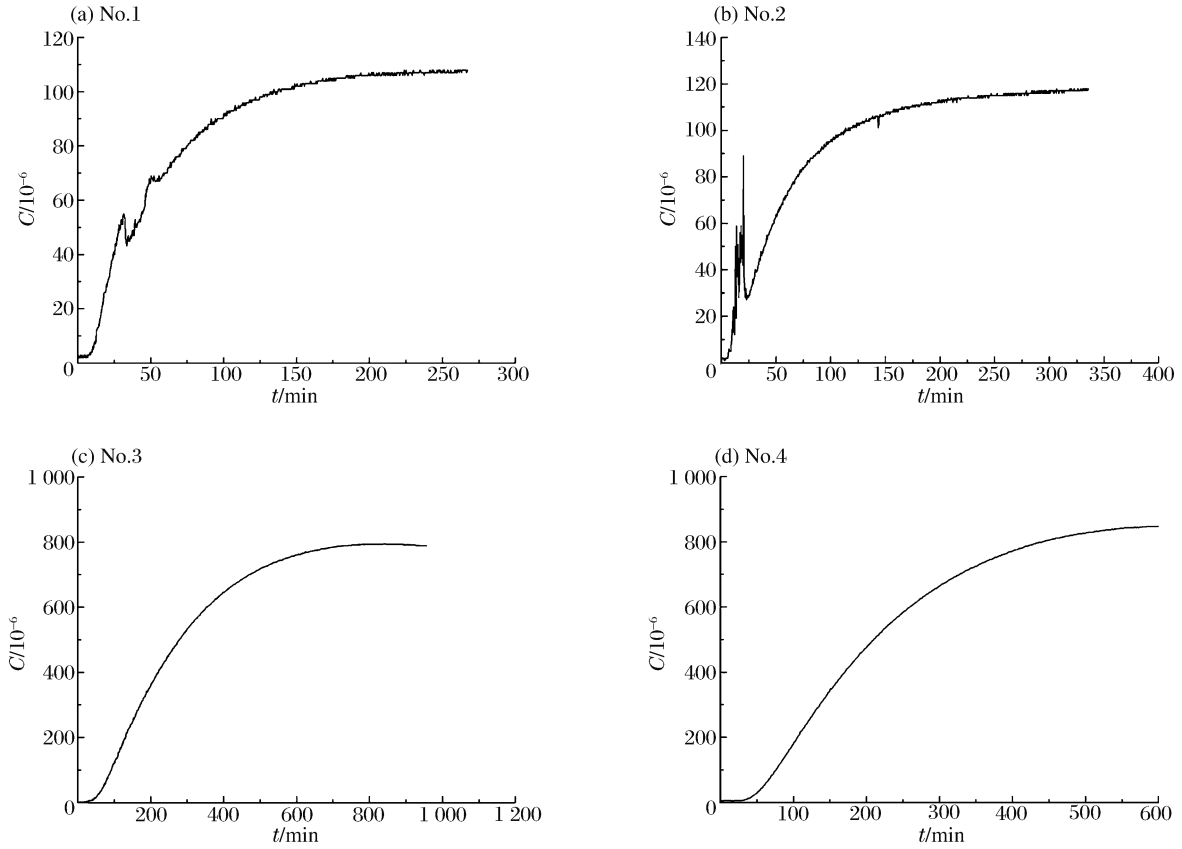

图 5 各次实验的 CO 浓度曲线

Fig. 5 Metrical CO concentration in airproof room

3 实验结果分析

3.1 气体渗漏时间

根据文献[9]的理论研究结果,如果介质相同,药量越小,气体渗漏越早。边长 0.5 m 花岗岩中,1.25 g TNT实验与边长 1 m 花岗岩中 10 g TNT 实验之间有 1∶2 的缩比关系,10 g TNT 实验与 1.25 g TNT 实验气体渗漏时间有约 4 倍的关系。由实验结果,10 g TNT 实验与 1.25 g TNT 实验 CO 渗漏出来的时间倍数为约 4,实验结果与理论分析结果基本一致。

3.2 密闭室内 CO 浓度基本稳定时间

如果把密闭室内 CO 浓度基本稳定的时间看作气体渗漏基本停止的时间,2 次 1.25 g TNT 实验在爆后约 200 min 时 CO 浓度基本稳定,而 2 次 10 g TNT 实验在约 800 min 时 CO 浓度基本稳定。10 g TNT 实验与 1.25 g TNT 实验气体停止渗漏时间有约 4 倍关系。

3.3 气体渗漏份额

实验所用的炸药为黑索金。根据黑索金的反应方程式可知,1 g 黑索金爆炸产生的 CO 在标准状态下约 300 ml。由于 1 g 黑索金相当于 1.5 g TNT 当量,所以,计算出 1.25 g TNT 当量实验和 10 g TNT 当量实验 CO 的产生量分别为 250 和 2 000 ml。

密闭室内部体积为 2.88 m^3，气体搅动设备体积为 0.33 m^3，CO 变送器体积为 0.05m^3，10 g TNT 实验花岗岩试样体积 1 m^3，1.25 g TNT 实验花岗岩试样体积 0.125 m^3。由此算出，1.25 g TNT 实验密闭室内空间体积为 2.47 m^3，10 g TNT 实验密闭室内空间体积为 1.5 m^3。

根据各次实验炸药爆炸 CO 生成量、密闭室浓度稳定值及密闭室内空间体积，计算出实验 1～4 中渗漏到密闭室内的 CO 占炸药爆炸生成的 CO 的份额分别为：1.06、1.15、0.59 和 0.56。

由实验结果，对于缩比实验来说，小药量实验气体渗漏份额大于大药量实验气体渗漏份额。而且，部分实验 CO 渗漏份额已经大于 1，说明实验中除了炸药产生 CO 之外，还有其他物质产生 CO。

爆室内除了炸药之外，还有其他一些物质，如塑料袋、胶带、电缆皮等。实验研究显示，聚乙烯的半分解温度（在真空中加热 30 min 后重量损失一半所需的温度）为 414 ℃，在 800 ℃的高温下，质量约 1 g 的聚乙烯仅需 1～2 min 就能完全分解。由于炸药爆炸后爆室内高温会持续一段时间，所以，会将一些物质分解为气体。

文献[9]的理论研究结果显示，不同药量缩比实验的气体渗漏份额基本相同，而本文中实验结果是小药量实验气体渗漏份额大于大药量实验气体渗漏份额。可认为在实验中爆室内安装炸药所用的塑料袋、胶带等物质分解产生一定量的非冷凝气体，这就改变了爆室内非冷凝气体及 CO 的初始条件。1.25 g TNT 实验和 10 g TNT 实验药量不同，但爆室内可分解材料绝对量相差不大，小药量实验因材料分解而增加的非冷凝气体相对量大于大药量实验。由监测结果推导渗漏份额时并未考虑材料分解增加的非冷凝气体，所以，推出的小药量实验气体渗漏份额大于大药量实验的气体渗漏份额。

本文中认为，药量越大，材料分解产生的气体与炸药爆炸所产生的气体之比越小，所以可以推测，当炸药质量远大于胶带和电缆皮的质量之后，缩比实验的气体渗漏份额将基本相同。这方面还需要进一步的实验验证。

聚乙烯分解产生的气体改变了不同药量实验气体渗漏份额的关系，但气体渗漏时间的关系仍与理论分析结果基本一致。原因是材料分解时吸收热量，虽然爆室内气体增加了，但温度降低了，二者对压力的贡献有一定的抵消作用，而气体渗漏速度决定于压力梯度，所以对气体渗漏速度影响不大。上面只是定性的分析，定量分析还需要进一步开展工作。

4　总　结

为研究花岗岩中不同药量缩比爆炸实验气体渗漏行为之间的关系，设计了满足缩比关系的当量分别为 10 g TNT 和 1.25 g TNT 的化学爆炸实验，监测了渗漏出来的 CO 浓度历程。通过研究得到如下结论：

（1）相同介质中缩比实验气体渗漏出来的时间大约与药量的三分之二次方成正比，渗漏停止时间也大约与药量的三分之二次方成正比；

（2）封闭化学爆炸在爆室内产生的高温能够使爆室内一些物质分解产生非冷凝气体；

（3）对于不同药量的缩比实验，理论分析认为气体渗漏份额基本相同，但在实验中，由于胶带、电缆皮等材料的分解产生非冷凝气体，这些气体对于较小药量实验的影响较大，所以较小药量实验的气体渗漏份额大于较大药量实验的气体渗漏份额。

参考文献：

[1] Schoengold C R, DeMarre M E, Kirkwood E M. Radiological effluents released from US continental tests: 1961 through 1992[R]. Nevada: Bechtel, 1996.

[2] Hudson B, Stubbs T. Summary of LLNL containment: Diagnostics data 1985－1993[C]// Proceedings of the Seventh Symposium on Containment of Underground Nuclear Explosions. CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1993.

[3] Nitao J J. User's manual for the USNT module of the NUFT code, Version 2.0[CP]. CA: Lawrence Livermore

National Laboratory, 1998.

[4] Travis B J. TRACR3D: A model of flow and transport in porous/fractured media[CP]. New Mexico: Los Alamos Laboratory, 1984.

[5] 乔登江.地下核爆炸现象学概论(下册)[M].北京:国防工业出版社,2002:51-59.

[6] 王铁良,张建鑫,曹渊.地下爆炸气体输运的一种双孔隙度数学模型[J].应用力学学报,2011,28(6):565-569.
Wang Tie-liang, Zhang Jian-xin, Cao Yuan. A dual porosity model of gas transportation on underground detonation [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2011,28(6):565-569.

[7] 王铁良,曹渊,张建鑫.地下爆炸空腔压力和温度历程数值模拟[J].计算物理,2011,28(5):713-718.
Wang Tie-liang, Cao Yuan, Zhang Jian-xin. Numerical simulation of cavity pressure and temperature in underground detonation[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2011,28(5):713-718.

[8] 张建鑫,王宏亮,王铁良.高压驱动下非均匀介质内气体输运数值模拟[J].地下空间与工程学报,2011,7(增刊 2):1677-1682.
Zhang Jian-xin, Wang Hong-liang, Wang Tie-liang. Numerical simulation of gas diffusion driven by high pressure in the heterogeneous media[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011,7(suppl 2):1677-1682.

[9] 王铁良,田宙,王占江,等.缩比地下化学爆炸气体泄漏规律研究[J].计算物理,2013,30(2):209-213.
Wang Tie-liang, Tian Zhou, Wang Zhan-jiang, et al. Regularity of gas leakage from scaled underground chemical explosion[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2013,30(2):209-213.

[10] 王占江,张德志,张向荣,等.蓝田花岗岩冲击压缩特性的实验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(5):797-802.
Wang Zhan-jiang, Zhang De-zhi, Zhang Xiang-rong, et al. Testing study on shock compression for Lantian granite [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(5):797-802.

Experimental research on gas leakage from chemical explosion in rock *

Wang Tie-liang, Wang Zhan-jiang, Lu Qiang, Zhang Zi-lu, Wen Chao
(*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024, *Shaanxi*, *China*)

Abstract: Small-scale chemical explosion simulation experiments were carried out to investigate the leakage time and percentage of CO gas from different-scale chemical explosions in rock. The different-scale chemical explosions meted a scaling relation. The researched results show as follows: (1) the beginning time and stopping time of gas leakage are approximately proportional to the two-third power of the explosive quantities in scaled explosion experiments in similar media; (2) some materials in a sealed blast chamber can decompose into non-condensable gas under high temperature caused by explosion; (3) the percentages of the leaked CO in smaller charge scale experiments are not less than those in the larger charge scale experiments. According to the researched results, one can estimate the gas leakage in larger charge scale underground explosion by the metrical results in smaller charge explosion.

Key words: mechanics of explosion; gas leakage; scaled explosion experiments; chemical explosion

* Received 17 April 2013; Revised 10 June 2013
Corresponding author: Wang Tie-liang, wangtieliang@nint.ac.cn

(责任编辑 丁 峰)