

# 应用数值试验方法, 推进岩石力学实验的教学<sup>1)</sup>

朱万成 唐春安 梁正召 杨天鸿

(东北大学岩石破裂与失稳研究中心, 沈阳 110004)

**摘要** 把岩石破坏过程分析数值模拟系统 RFPA 引入岩石力学实验课程的教学, 进行岩石变形与破裂过程的数值试验. 数值试验可以再现许多物理实验所不能观察到的力学现象 (例如岩石破裂过程中的应力场), 从而使学生对岩石的变形与破坏过程有更加清晰的认识, 提高岩石力学实验的教学质量.

**关键词** 岩石力学, 数值试验, 变形与破坏, 教学

## 1 引言

在岩石力学课程的教学, 岩石的基本力学性质试验 (包括单轴压缩试验、常规三轴试验、劈裂试验以及三点弯曲试验等) 是必不可少的环节. 通过岩石力学实验既要深化和巩固学生所学的基础理论知识, 又要培养学生良好的分析解决问题的能力. 近年来, 新的测试技术以及手段, 例如: 三维 CT 扫描、红外热像、核磁共振等技术也在岩石等材料的测试中得到了应用, 这使得人们可以通过试验了解更多的岩石变形尤其是破裂过程的信息. 但是, 这些试验所得到的结果是有限的. 由于数值方法以及计算机技术的发展和进步, 用成熟的数值方法以及计算机程序进行岩石等材料变形与破裂过程的数值试验已经成为可能. 在证明数值模拟方法及其计算机程序正确性的基础上, 用该程序进行岩石变形与破裂过程的数值试验, 必将为岩石力学的研究和教学起到重要的推动作用.

“数值试验”这一术语来自英文 “numerical test” 一词. 尽管数值试验与数值模拟 (numerical simulation) 同为利用数值计算方法研究力学的各种问题, 但数值模拟主要是指通过数值计算方法再现已知的现象, 强调运用数值模拟的结果加深对实际试验中观测到的已知现象的解释. 而数值试验则更侧重于通过数值计算方法, 对一些由于经费、时间等因素的制约而在实验室难以再现的未知现象进行虚拟显现. 更强调运用数值试验的结果加深对未知现象的探索. 在岩石力学课程中采用数值试验, 一方面可以替代部分的实验室物理试验, 另一方面还可以观察到许多物理试验所不能观察到的力学现象 (例如岩石破裂过程中应力场), 从而使学生能够对于岩石的变形与破坏过程有更加清晰的认识, 促进岩石力学的教学工作. 经过多年的研究, 笔者自行研制开发了岩石破坏过程分析系统 RFPA<sup>2D</sup>, 该系统能够进行材料破坏过程二维数值试验<sup>[1~3]</sup>. 以往的计算机辅助教学软件或课件中, 往往是把已知的试验结果存放在计算机上, 通过人机交互对这些结果的显示来为学生演示实验过程及结果<sup>[4]</sup>. 本文的数值试验是建立在力学模型和数值方法基础上的, 一方面要再现已知的试验结果, 更重要的是要对未知试验结果进行预测. 因此, 这种数值试验更有利于拓宽学生的思路, 开发学生的创造性.

## 2 数值试验的实施过程

2003-04-07 收到第 1 稿, 2003-07-08 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金项目 (50174013, 50204003) 资助.

岩石力学的数值试验是用笔者自行研究开发的 RFPA<sup>2D</sup> 来实现的. 在数值试验中, 数值模拟方法承担在物理试验中“试验机”的地位. 与真实的岩石力学试验机相比, 数值试验机具有使用灵活、简单与方便等优点, 可以大大地降低试验成本. RFPA 系统具有友好的用户界面, 学生可以方便地选择岩石的材料模型 (数值试样)、进行加载试验和试验结果处理. 岩石力学的数值试验包括以下 3 方面的内容:

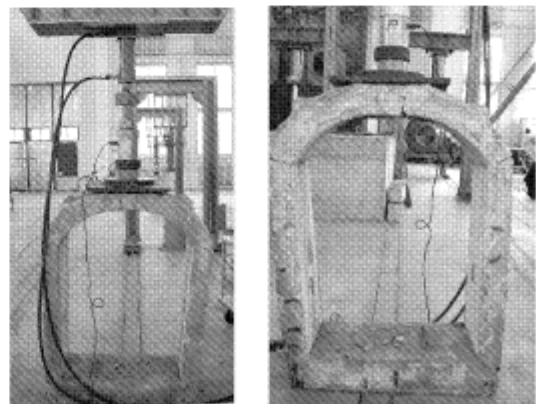
(1) 试验前的准备 数值试验应该在相应的教学工作之后, 学生对具体知识点有所了解的基础上进行. 学生应该对该试验的加载条件 (例如, 试验机的基本参数、加载的边界条件、应变片、位移及载荷传感器的位置等) 有较为清晰的认识, 这将为建立数值模型提供依据.

(2) 数值试验的过程 依据真实的试验条件, 用 RFPA 建立数值模型 (数值试样), 给定岩石的材料参数, 设定边界条件 (包括加载的控制方式、加载速率等), 进行该试样的变形与破坏过程数值试验. 针对该数值试验, 利用笔者编写的《岩石破裂过程数值试验》和《混凝土损伤与断裂——数值试验》作为采矿工程专业岩石力学课程和土木工程专业混凝土结构课程的试验指导书.

(3) 分析数值试验结果, 填写试验报告 从数值试验可以得到试样中任意位置的变形与应力信息. 此外, 通过数值试验, 我们可以观察到岩石试样中裂纹的萌生、扩展与贯通过程, 以及变形局部化和应力重分布等复杂的断裂现象.

## 3 实例分析

下面以混凝土拱形巷道模型 (如图 1 所示) 变形与破裂过程的数值试验为例来说明数值试验的具体实施及结果. 图 1 给出了该模型的实验室试验的结果. 从该实验中, 我们可



(a) 试验装置及加载条件 (b) 最终的破裂模式

图 1 单轴加载条件下混凝土拱形巷道的破坏过程 (物理试验结果)

以通过应变片测试个别部位的应力,可以通过载荷及位移传感器得到施加载荷的大小和加载板的位移.此外,可以用摄像机拍摄整个加载过程试样外部的破裂形态.数值试验得到的破裂过程如图 2 所示.在该图中,颜色灰度反映了最大剪应力的相对大小,颜色较亮的部位具有较大的最大剪应力.从图 2 可以清晰地看出裂纹萌生、扩展的顺序.即:首先在拱顶内部表面形成拉裂纹,然后在两侧拱肩外侧产生拉伸裂

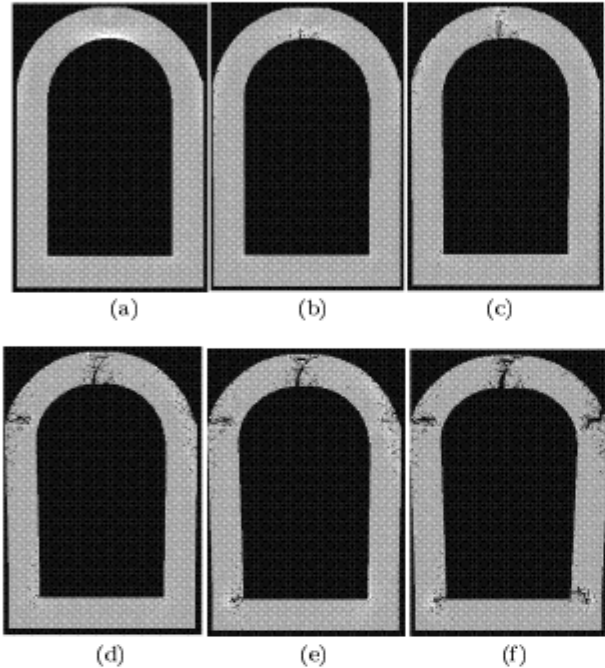


图 2 单轴加载条件下混凝土拱形巷道破坏过程的数值试验结果  
(图中(a)~(f)表示变形与破裂的过程)

纹,最后在底部两个拱角处产生裂纹.在图 1(b) 给出的物理试验结果中,我们可以清晰地看到在拱顶和拱肩处的裂纹,在拱底部的裂纹不明显.根据数值试验结果我们可以预测,随着外部载荷的继续施加,在原有裂纹继续扩展的同时,在底部拱角处必将产生明显的裂纹.不仅如此,数值试验还充分表现出其突出的优点,能够给出试样变形与破裂过程内部任意点的应力分布.

#### 4 结 语

本文提出了用数值试验方法代替部分实验室物理试验,同时还能够使我们了解岩石变形与破裂过程的应力场、应变局部化等更复杂的岩石破裂信息,对于加深学生对岩石力学课程相关知识的理解,推动岩石力学实验课程的教学将起到重要的作用.但是,数值试验的应用并不能完全取代实验室试验,这是因为数值试验时我们仍然需要提供岩石的细观力学参数等信息,而且只有在证明数值试验方法正确的基础上才能使用它进行岩石力学的数值试验.由于 RFPA 程序的正确性已得到验证,目前该系统正在被推广到三维变形与破坏的数值试验程序 RFPA<sup>3D</sup>,用 RFPA 数值试验程序进行岩石力学实验的教学将具有更加广泛的发展前景.

#### 参 考 文 献

- 1 朱万成,唐春安,杨天鸿等.岩石破裂过程分析(RFPA<sup>2D</sup>)系统的细观单元本构关系及验证.岩石力学与工程学报,2003,22(1):24~29
- 2 唐春安,朱万成.混凝土损伤与断裂——数值试验.北京:科学出版社,2003.1
- 3 朱万成,赵启林,唐春安等.混凝土断裂过程的力学模型与数值模拟.力学进展,2002,32(4):579~598
- 4 赵彤,韩明.钢筋混凝土结构的计算机辅助教学.天津:天津大学出版社,1998

(上接第 88 页)

```
> eq:=leastsquare([x,y],y=a*x^6+b*x^5+c*x^4+
d*x^3+e*x^2+f*x+g,{a,b,c,d,e,f,g}) ([X0,Y0]);
# 采用最小二乘法对离散实验数据进行拟合.
y = 2.999 - 7.246x + 50.96x^2 - 244.8x^3 + 628.0x^4 -
783.4x^5 + 373.9x^6 (1)
> y:=373.9394607*x^6-783.4267304*x^5+628.0145853*
x^4-244.7522496*x^3+50.95720823*x^2-7.246314068
*x+2.992632174; # 输入拟合结果.
> K:=subs(x=d/b,y); # 符号代换.
K = 2.999 - 7.246*(d/b) + 50.96*(d/b)^2 - 244.8*(d/b)^3 +
628.0*(d/b)^4 - 783.4*(d/b)^5 + 373.9*(d/b)^6 (2)
> g1:=plot(zip((x,y)->[x,y],X0,Y0),style=point); # 绘离
散数据组图形.
> g2:=plot(rhs(eq),x=0..0.6); # 绘拟合多项式图形.
> display([g1,g2]); # 合并图形.
> sigma[n]:=F/((b-d)*delta); # 最大平均应力 sigma_n.
```

```
> F:=43*10^3; sigma[xy]:=100*10^6; # 已知条件,其中
sigma_xy = [sigma].
> delta:=15*10^(-3); b:=100*10^(-3); # 已知条件.
> eq1:=K<=sigma[xy]/sigma[n]; # 应力集中因数满足的
条件 K = [sigma]/sigma_n.
> eq2:=K>=2; # 应力集中因数下限.
> eq3:=K<=3; # 应力集中因数上限.
> solve({eq1,eq2,eq3},{d}); # 求解孔径的最大允许值.
```

$$\{d \leq .03737901730, -0.001009566600 \leq d\}$$

舍负根,得到孔径的最大允许值为  $[d] = 37 \text{ mm}$ .

#### 解的稳定性讨论

我们采用了 6 次多项式拟合应力集中因数.如果对程序稍作修改可以计算任意次多项式拟合或其它函数拟合的计算结果.采用线性拟合,则  $[d] = 32.50 \text{ mm}$ ;采用 2 次拟合,则  $[d] = 38.12 \text{ mm}$ ;采用 3 次拟合  $[d] = 37.09 \text{ mm}$ ;采用 4 次拟合  $[d] = 36.75 \text{ mm}$ ;采用 5 次拟合  $[d] = 37.03 \text{ mm}$ .可见采用 6 次多项式拟合已经具有足够的精度满足工程需要.