

地下硐室岩爆的相似材料模拟试验研究^{*}

潘一山 章梦涛 王来贵 李国臻
(辽宁工程技术大学工程力学研究所, 阜新, 123000)

文 摘 提出了模拟岩爆的新的相似系数 E/λ 。指出不同 E/λ 的材料, 可模拟不同类型、不同震级的岩爆。研制出了模拟岩爆的系列脆性破坏材料, 可应用于不同模拟比例、不同类型和不同震级的岩爆模拟试验。对圆形硐室的岩爆进行了模拟试验研究, 证明所研制的相似材料可行, 试验还证明存在岩爆发生的临界荷载, 并验证了理论分析的结果。

关键词 岩爆, 相似材料模拟试验, 相似系数。

1 前 言

岩爆又称冲击地压, 是岩石工程中严重的自然灾害。本世纪初以来, 世界上各主要采矿国家相继对岩爆进行了大量研究, 特别是我国岩土工程界的科研工作者和工程技术人员在岩爆机理、预测和防治方面都取得了卓有成效的研究成果。尽管如此, 岩爆仍存在大量问题需要研究。目前, 对岩爆的研究偏于现场实际观测和工程实录, 而室内模拟试验研究开展较少。一方面是模拟岩爆这种特殊力学现象还没可依据的相似理论。另一方面是还没有找到能很好模拟岩爆的相似材料。Burget 等^[1]采用环氧树脂加 3%~5% 的硬化剂, 研制出模拟岩爆的相似材料。但由于该材料强度高, 只能放在压力试验机上定性演示煤柱岩爆。杨淑清等人^[2]采用了砂、水泥和松香等材料, 制成相似材料, 尝试模拟水电硐室岩爆。但水电硐室的岩爆多表现为硐室作用应力远小于岩石抗压强度情况下的岩石裂纹失稳, 所以这种岩爆模拟的重点是观察硐室周围的剥离、破坏部位, 模型作用荷载一般仅为材料强度的 1/4 左右。在岩石工程中对生产安全更具有危险性的不是这种类型的岩爆, 而是在高应力作用下岩石结构的整体失稳, 产生雪崩式破坏的岩爆。本文首先建立了模拟岩爆的相似理论, 即模拟岩爆应遵循的相似准则及相似材料应具有的性质。在这个理论指导下, 研制出系列脆性破坏相似材料并对圆形硐室岩爆进行了模拟试验。

2 相似材料模拟岩爆的相似理论

岩爆的模拟试验和其它类型的模拟试验一样, 需遵循相似理论。设原型岩石的力学物理参数分别为: 抗压强度 σ_c , 弹性模量 E^p , 泊松比 μ^p , 内摩擦角 φ , 容重 γ^p 等; 相似材料的相应参数分别为 σ_c^M , E^M , μ^M , φ^M , γ^M 。设模拟的几何比例为

$$\alpha = L^M/L^p \quad (1)$$

则原型参数和模型参数应有如下关系:

^{*} 煤炭部科学基金资助项目。

$$\sigma_c^M = \sigma_c^p \alpha \frac{\gamma^M}{\gamma^p}; \quad E^M = E^p \alpha \frac{\gamma^M}{\gamma^p}; \quad \mu^M = \mu^p; \quad \varphi^M = \varphi^p \quad (2)$$

但是, 岩爆是岩石破坏失稳现象^[3], 除满足上述基本方程外, 还需满足其它相似条件。为此, 首先研究影响岩爆的主要力学参数。文献^[4]对岩爆提出了动力失稳准则又称扰动响应准则。根据李雅普诺夫稳定性理论, 可通过研究系统受干扰后的响应来研究系统的稳定性。在地下岩石结构中, 干扰可以是硐室开挖, 工作面的推进、顶板岩层裂纹的突然开裂和放炮等, 这些扰动因素是不可避免的。设岩石结构在外荷载 P 作用下, 产生的塑性软化区的特征深度为 ρ , 产生的特征位移为 u , u 可以是硐室收敛位移或顶板下沉量, 此时岩石结构处于平衡状态。对于外荷载 P 的一个微小扰动 ΔP , 或硐室开挖 Δa , 工作面进尺 Δa 等一个微小扰动, 则塑性软化区深度的 ρ 增加到 $\rho + \Delta \rho$, 位移由 u 增加到 $u + \Delta u$ 。若响应 $\Delta \rho$ 或 Δu 是有界的、有限的, 则此时岩石结构的平衡状态是稳定的, 或表述为: 对于任意给定小数 $\varepsilon > 0$, 总有 $\delta > 0$ 存在, 使当扰动 ΔP 或 Δa 满足条件

$$|\Delta P| \leq \varepsilon, \quad |\Delta a| \leq \varepsilon \quad (3)$$

则响应 $\Delta \rho$ 或 Δu 总可以满足不等式

$$|\Delta \rho| < \delta, \quad |\Delta u| < \delta \quad (4)$$

反之, 若岩石结构处于非稳定平衡状态, 则无论扰动多么小, 都会导致塑性软化区大小或特征位移的无限增长, 即

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta P} = \frac{d\rho}{dP} = \infty \quad (5)$$

或

$$\frac{\Delta u}{\Delta P} = \frac{du}{dP} = \infty \quad (6)$$

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta a} = \frac{d\rho}{da} = \infty \quad (7)$$

$$\frac{\Delta u}{\Delta a} = \frac{du}{da} = \infty \quad (8)$$

上式即为岩爆发生的扰动响应准则。采用该准则, 考虑图 1 所示的半径为 a 的圆形硐室, 周边无支护, 在无限远处受静水压力 P 作用, 产生的软化区深度为 ρ , 岩石本构关系如图 2 所示, E 为弹性模量, λ 为峰值后降模量, σ_c 是抗压强度, 则可以得到发生岩爆的临界软化区深度 ρ^* 及相应的临界荷载 P^* 分别为

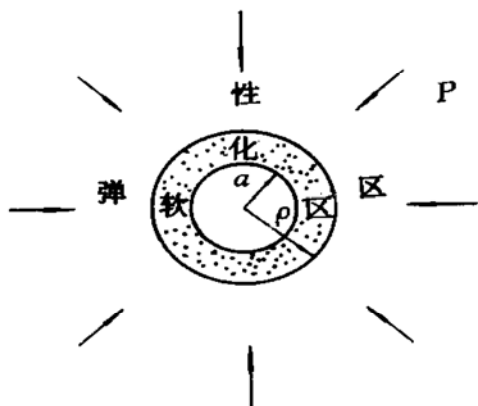


图 1 圆形硐室岩爆分析模型

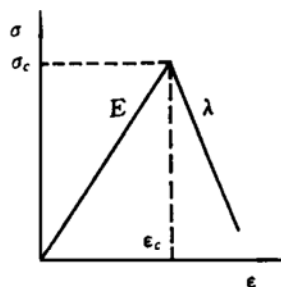


图 2 双线性岩石应力应变关系

$$\frac{\rho^*}{a^2} = 1 + \frac{E}{\lambda} \quad (9)$$

$$\frac{P^*}{\sigma_c} = -\frac{1}{q-1}\left(1 + \frac{\lambda}{E}\right) + 0.5 \frac{q+1}{q-1}\left(1 + \frac{\lambda}{E}\right)\left(1 + \frac{E}{\lambda}\right)^{\frac{q-1}{2}} - 0.5 \frac{\lambda}{E}\left(1 + \frac{E}{\lambda}\right)^{\frac{q+1}{2}} \quad (10)$$

式中 $q = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$; φ 为岩石内摩擦角。

分析上式表明, 决定硐室发生岩爆的主要力学参数为 E/λ ^[4]。当岩石降模量较大, 岩石峰值后下降曲线较陡, 岩石脆性大, E/λ 较小, 此时对应的临界软化区深度较小。极限情况是 $E/\lambda = 0$, $\lambda = \infty$, 即岩石在超过峰值强度后就迅速破坏, 岩石极脆, 此时临界软化区深度 $\rho^* = a$, 即硐室在载荷作用下, 周边刚有软化区出现时, 就能发生岩爆。这种情况多发生在脆性极强的岩石硐室中, 表现为硐室表面岩石的剥落、噼啪飞出和抛射等。当岩石的降模量 λ 较小, 岩石脆性弱、塑性变形较大时, E/λ 较大, 岩爆发生时, 相应的临界软化区深度较大, 所需要的临界荷载大, 所以不易发生岩爆, 但一旦发生, 由于软化区深度较大, 冲击将是雪崩式破坏, 破坏的岩石将瞬间充满硐室。这种情况的极限是 $\lambda = 0$, $E/\lambda = \infty$, 对应于理想塑性材料, 此时临界软化区深度 $\rho^* = \infty$, 即不可能发生岩爆。可见 E/λ 值是决定硐室岩爆发生类型、震级的重要力学参数。由此, 对于岩爆的模拟, 引入一个新的相似系数 E/λ 。由于 E/λ 是无量纲量, 根据相似理论, 原型岩石的值必须和相似材料的值相等, 即

$$E^M/\lambda^M = E^P/\lambda^P \quad (11)$$

式(1), 式(2)和式(11)一起, 构成了模拟岩爆的相似准则。

根据上述理论, 研制 E/λ 较小的材料, 可用来模拟脆性较大岩石中的岩爆, 如表面的爆裂、剥离和抛射等; E/λ 较大的相似材料, 可以用来模拟脆性较弱、可能发生雪崩式或大范围破坏的岩爆。但是, 当 E/λ 很大时, ρ^* 和 P^* 都很大, 很难发生岩爆。当 $E/\lambda = 3$, $\varphi = 40^\circ$, 则 $\rho^* = 2a$, $P^*/\sigma_c \approx 4.1$, 岩石结构所处地应力场很难达到 P^* 这样大的值, 所以几乎不可能发生岩爆, E/λ 小于 3 的材料属于脆性破坏材料, 所以研制通常所说的脆性破坏材料即可对岩爆进行模拟。

3 模拟岩爆的相似材料的研制

脆性破坏是指破坏前没有或很少发生永久变形, Heard(1960)规定岩石破坏前总应变不超过 3% 就是脆性破坏。目前这一规定已被广大岩石力学工作者所接受。脆性破坏的另一个特征是在岩石受载过程中伴随有不断的岩石微裂纹扩展, 从声发射曲线看出和应力应变曲线有一致性。

3.1 松香膨润土材料

通过大量试验发现, 松香和其它材料混合后具有脆性破坏特征。将松香熔化后, 加入膨润土, 以松香: 膨润土 = 2: 1 的比例混合, 凝固后进行破坏试验, 脆性破坏特征很好, 如图 3 所示。其抗压强度 σ_c , 弹性模量 E , 系数 E/λ 和容重 γ 如表 1 所示。

表 1 松香膨润土(2: 1)材料物理力学参数

参数	组 别					
	1	2	3	4	5	平均
σ_c (MPa)	6.1	5.9	5.9	6.2	6.2	6.02
E (MPa)	728	750	761	740	720	740
E/λ	0.62	0.91	0.77	0.86	0.73	0.78
γ (g/cm ³)	2.0	2.0	2.1	2.1	2.0	2.04

3.2 松香重晶石材料

以重晶石作骨料, 以松香作粘结剂配成的材料, 不仅有脆性破坏特征, 而且破坏过程中声发射现象十分显著, 如图 4。同时该种材料的容重和岩石平均容重十分接近。对于粒度为 0.8cm 的松香重晶石材料, 得到其参数如表 2 所示。这种材料强度低, 还具典型的脆性破坏特性, 适合于模拟小比例的岩爆问题。

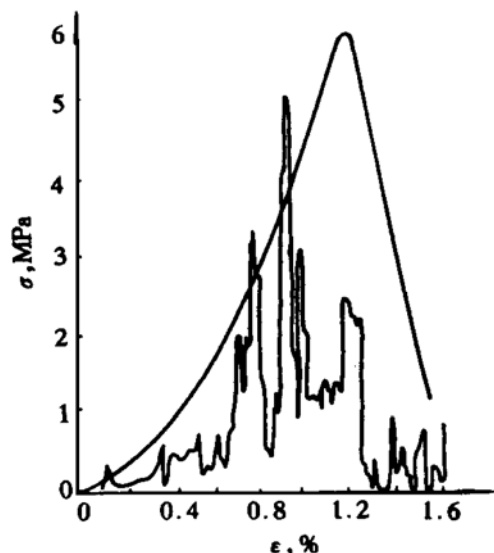


图 3 松香膨润土材料应力应变曲线及声发射

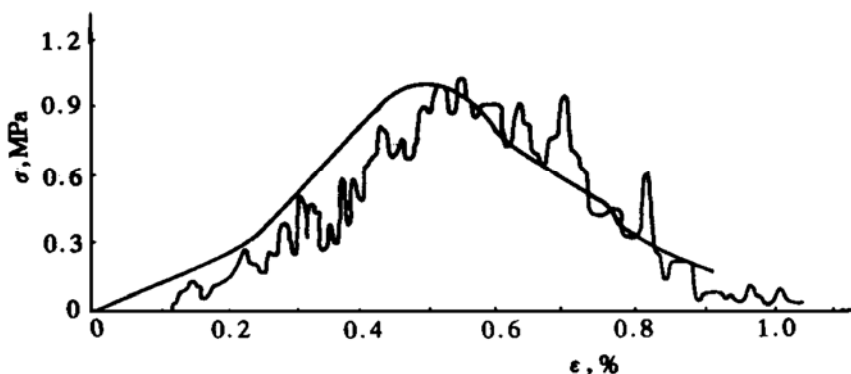


图 4 松香重晶石材料应力应变曲线及声发射

3.3 石膏-砂-松香材料

在通常的砂、石膏和水的混合材料中, 加入一定比例的松香, 配制后的材料具有脆性破坏特征, 其方法是, 将松香溶于酒精中, 再加入砂、石膏、水的混合物中, 比例为砂: 石膏水: 松香: 酒精= 78: 8: 2: 3。该种材料应力应变曲线如图 5 所示。在上述配比下, 其物理力学参数如表 3。这种材料强度低, 脆性破坏特征明显, 适合模拟硐室岩爆。

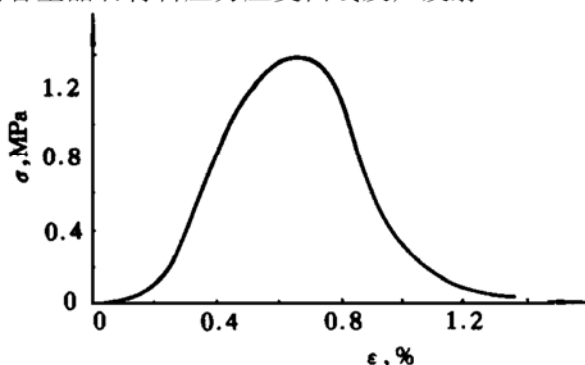


图 5 石膏-砂-松香材料应力应变曲线

表 2 松香重晶石材料物理力学参数

参数	组 别					
	1	2	3	4	5	平均
σ_c (MPa)	1	0.75	1.47	2.1	1.2	1.3
E (MPa)	579	472	803	869	590	662
E/λ	0.89	0.87	1.13	1.16	1.10	1.03
γ (g/cm ³)	2.3	2.46	2.46	2.76	2.4	2.48

表 3 石膏-砂-松香材料的物理力学参数

参数	组 别					
	1	2	3	4	5	平均
σ_c (MPa)	1.19	1.41	1.22	1.1	1.27	1.24
E (MPa)	324	370	341	360	387	356
E/λ	1.20	1.04	0.86	1.24	1.31	1.13
γ (g/cm ³)	1.50	1.46	1.52	1.48	1.55	1.50

3.4 松脂材料

将松香油加入松香中制成的材料, 称为松脂材料, 这种材料具有很好的脆性破坏特征。松香油是从松香中分馏出的, 松香可以完全溶解于松香油中。松脂的制作过程如下: 先将松香熔化, 在室温下冷却几分钟, 当其温度降到 100℃以下时, 将松香油加入其中, 搅拌均匀, 然后浇入模具中。该种材料的另一个优点是破坏后, 原来透明的材料变得浑浊。所以用于模拟采场工作面或硐室岩爆时, 可以直接从混浊区大小判断岩石结构的破坏范围。不同配比下松脂材

料的力学性质差别很大。图6给出松香油:松香=10:1时破坏曲线。通过试验测得松脂材料抗压强度 $\sigma_c = 2.6\text{MPa}$, 弹性模量 $E = 407\text{MPa}$, $E/\lambda = 0.31$ 。

3.5 环氧树脂材料

环氧树脂材料的应力应变曲线如图7所示, $\sigma_c = 69.1\text{MPa}$, $E = 3343\text{MPa}$, $E/\lambda = 0.14$ 。

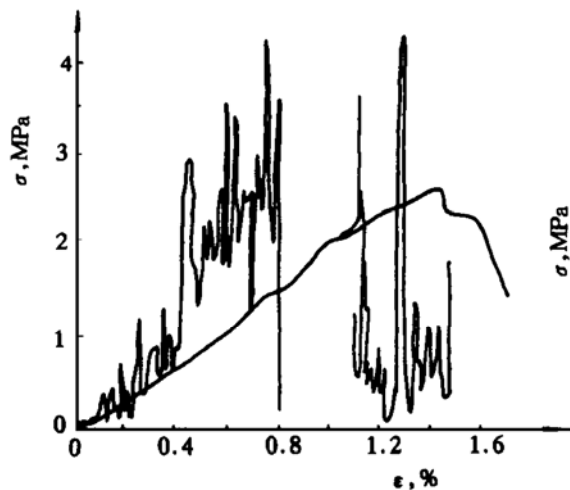


图6 松脂材料的应力应变曲线及声发射

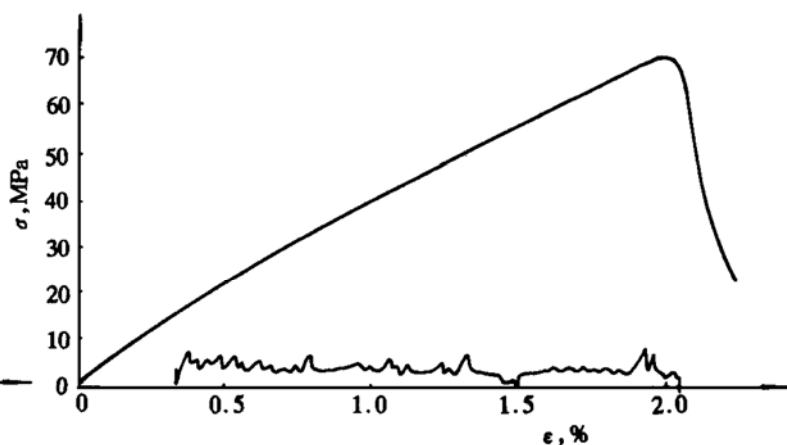


图7 环氧树脂材料应力应变曲线及声发射

3.6 不同相似材料模拟不同类型的岩爆

实际岩石结构中存在不同类型的岩爆,如煤柱岩爆、硐室岩爆、工作面岩爆、断层岩爆及顶板岩爆等。通过试验发现,对于煤柱岩爆,采用松香膨润土材料或松香重晶石材料较好。对于硐室岩爆,采用石膏—砂—松香材料较好。对于断层岩爆,用松脂材料或环氧树脂材料来模拟较好。对顶板岩爆,采用松香重晶石材料较好。

4 圆形硐室岩爆的模拟研究

4.1 模拟试验中岩爆发生的判别准则

以往岩爆模拟试验,定性观察及演示性居多。为了能从模拟试验中获得定量化的结果,需给出硐室岩爆模拟试验中岩爆发生的具体判别准则,使得能从记录到的曲线和数据中识别出哪一点是岩爆发生点。由式(6)的岩爆发生准则 $\frac{\Delta u}{\Delta P} = \frac{du}{dP} = \infty$, 可得到岩爆发生准则的另一种形式为

$$\frac{\Delta P}{\Delta u} = \frac{dP}{du} = 0 \quad (12)$$

可见,硐室作用载荷 P 和收敛位移 u 曲线的极大值点就是岩爆发生点。所以只要设计试验装置,测得硐室作用载荷及收敛位移,即可对岩爆进行定量分析。

4.2 模拟试验装置

试验是在自制的通过两台油泵完成的双向加载装置上进行的。当进行等压加载时,由一个油泵完成。为了实现平面应变条件,在模型材料的两侧(前面,后面)装有20mm厚的有机玻璃板。在有机玻璃板和相似材料之间放两块聚脂薄膜,以减少相似材料和有机玻璃板之间的摩擦。硐室所加载荷由油压传感器接到 $x-y$ 记录仪的 y 轴上直接给出。位移测量采用自行研制的位移测量环,其制作方法是取一段闹钟发条,分别冲3个 $\varnothing 3\text{mm}$ 的孔。两边孔对齐,穿上M3螺栓,再用螺母紧固。在环的螺栓左右两边分别贴上应变片,标定后即可测量位移。该传感器精度高,线性重复性好,量程大,精度和千分表相同,量程可达6mm。对于岩爆模拟试

验, 由于岩爆发生时相似材料将冲入硐室内, 所以没有把位移传感器安装在硐室内, 而是安装在硐室模型边缘的加载板上, 将位移信号接入 $x-y$ 记录仪的 x 坐标。这样, 硐室加载过程中的荷载 P 和位移 u 的曲线就可自动绘制出来。硐室模型尺寸为 $20\text{cm} \times 20\text{cm} \times 7\text{cm}$ (长、宽、厚), 中间有直径为 5cm 的圆形硐室。模型是在一个专用木制模具上制作出来的。

4.3 相似材料的选取

上面研制的脆性材料中, 除了环氧树脂之外, 都可用作硐室岩爆的模型材料。松脂材料的优点是破坏后其透明的特点消失而变得混浊, 所以可以观察破坏区范围。但是该材料强度偏高, 需要很高的荷载。松香膨润材料也存在同样的问题。松香重晶石材料, 虽然其强度低, 但对于平面应变模型, 该材料与有机玻璃板的摩擦力较大。通过试验发现, 石膏-砂-松香材料模拟平面应变硐室岩爆较合适。

4.4 等压情况下硐室岩爆模拟结果分析

(1) 当荷载加到 $P = 1.53\text{MPa}$ 时, 突然发生岩爆, 加载框架振动, 荷载回落, 岩爆发生点正好对应 $P-u$ 曲线的峰值点。经测量, 被冲击到硐室的材料为 126g , 岩爆发生后硐室直径缩小 1cm 。图 8 为 $P-u$ 曲线。

(2) 硐室第一次发生岩爆后, 荷载回落, 硐室又处于稳定状态。如果继续加载, 当超过第一次岩爆荷载后, 又会出现第二次岩爆, 如图 8 所示。而且第二次岩爆强度要高于第一次。如果把第二次冲击对应于现场发生的岩爆, 则第一次冲击相应于大型岩爆的前兆, 而两次之间的区段相应于岩爆发生前的平静期。唐山矿 3652 采场硐室在 1991 年 6 月 12 日曾有一段时间的硐室底鼓变形很大, 围岩表面有辟啪响声、围岩深部有沉闷的岩石破裂声, 之后出现了一段时间的平静期, 这相应于试验中的第一次冲击和其后的平静期。到 6 月 13 日零点, 发生了 2.5 级的硐室岩爆, 近百米的硐室被摧毁, 硐室直径由 5m 缩小到 1m 。

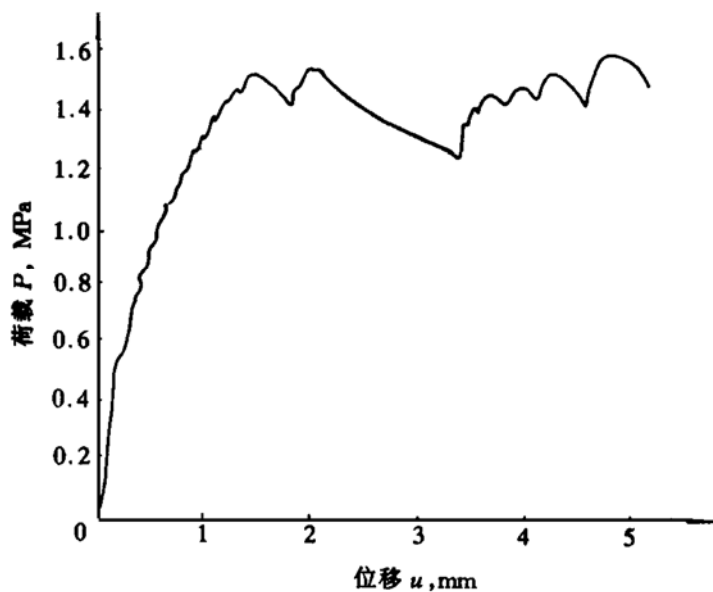


图 8 硐室所受荷载与硐室位移曲线

试验中发现, 第二次冲击后, 再继续加载, 还可以不断产生冲击。但由于冲击到硐室中的材料形成了一种支护作用, 所以后续几次岩爆所需的荷载越来越大, 震级越来越小, 最后硐室被完全堵死。

(3) 图 8 可见, 每次大的冲击之前, $P-u$ 曲线并不是光滑的。如果把每一个局部曲线放大, 与整个曲线是相似的。也就是说, 在每次大的岩爆之前, 实际上是伴随着一系列小的岩爆失稳。试验中表现为材料的剥落甚至是抛射, 在现场中表现为大的劈裂声、片帮等, 这些都可看作岩爆的前兆。

(4) 通过试验发现, 对于一种材料, 存在一个发生岩爆的临界荷载, 当作用荷载大于此值时, 必然发生岩爆。为了进一步验证这个规律, 进行了 5 组同样试验, 以观察试验的重复性。

试验发现5组所得结果在读数精度范围内临界荷载值大小完全一样。在多数岩石力学参数测试极为离散的情况下, 得到如此好的重复试验结果, 说明临界荷载的规律是可信的。

事实上, 根据文献^[4]及本文公式(10), 理论上存在一个硐室发生岩爆的临界荷载, 它是硐室岩石结构的固有性质。根据前面试验测得相似材料的 $E/\lambda = 1.13$, $\varphi = 30^\circ$, $\sigma_c = 1.24\text{MPa}$, 可得理论计算临界荷载 $P^* = 1.31\text{MPa}$ 。这和试验测得 $P^* = 1.53\text{MPa}$ 的结果是接近的。

4.5 非等压情况下岩爆模拟结果分析

非等压情况下模拟了三种方案。

(1) 水平方向不加荷载, 而给位移为零约束, 在垂直方向加压, $P-u$ 曲线如图9所示。和等压情况相比, 发生岩爆的临界荷载减小, 约为等压时临界荷载的 $1/2$, 而且冲击后硐室的收敛位移较大。

(2) 等压加载到 $P_0 = 0.68\text{MPa}$, 保持水平方向压力为 $P_x = 0.68\text{MPa}$, 增加垂直方向荷载, $P-u$ 曲线如图10所示。在此情况下, 硐室第一次岩爆临界荷载 $P = 1.2\text{MPa}$, 约为等压情况临界荷载的 0.78 倍, 但第二次较大冲击临界荷载为等压情况的 1.1 倍。

(3) 第三种方案为等压加载到 $P_0 = 1.36\text{MPa}$, 保持水平方向压力为 $P_x = 1.36\text{MPa}$, 施加垂直方向荷载, $P-u$ 曲线如图11所示。第一次岩爆临界荷载约为等压的 0.87 倍, 但第二次较大岩爆的临界荷载为等压情况荷载的 1.16 倍。

所以, 在非等压情况下硐室第一次发生较小岩爆的荷载值比等压情况下发生岩爆的荷载值小, 而硐室第二次发生的较大岩爆的荷载值比等压情况下发生岩爆的荷载值大。

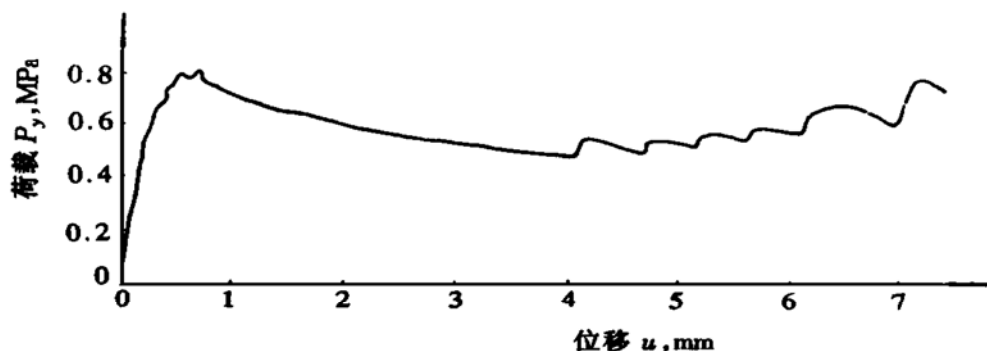


图9 水平约束垂直方向加压时硐室 $P-u$ 曲线

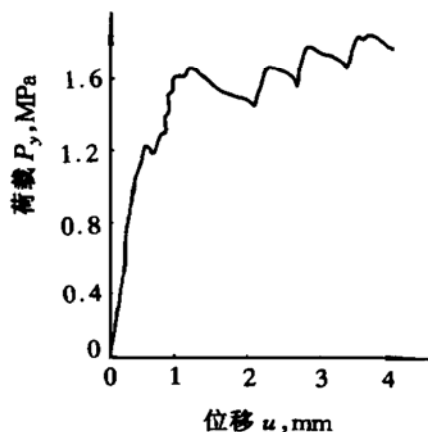


图10 水平压力 $P_x = 0.68\text{MPa}$ 硐室 $P-u$ 曲线

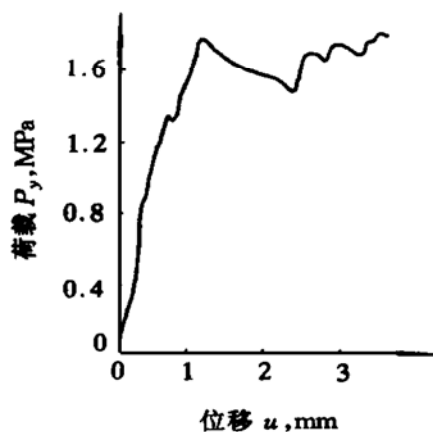


图11 水平压力 $P_x = 1.36\text{MPa}$ 硐室 $P-u$ 曲线

5 结 论

(1) 研究表明, 凡是具有应变软化性质的脆性破坏材料, 都可用来模拟岩爆问题。本文提出了模拟岩爆的材料相似系数 E/λ 。不同的 E/λ 材料, 可模拟不同类型、不同震级的岩爆。 E/λ 较小的材料, 可用来模拟脆性极强的岩爆问题, 如表面煤爆、岩爆。 E/λ 较大的材料可用来模拟破坏范围大、雪崩式岩爆。

(2) 研制出了系列脆性破坏相似材料, 这些材料 E/λ 不同, 而且强度跨度大(从 $\sigma_c = 1\text{MPa}$ 到 $\sigma_c = 100\text{MPa}$), 可望应用于不同比例尺(从 1:1 到 1:100)、不同类型、不同震级的岩爆模拟试验。

(3) 圆形硐室的岩爆模拟试验证明了所研制的相似材料的实用性, 试验还证明存在岩爆发生的临界荷载, 和理论分析结果一致。

参 考 文 献

- 1 Burgert W, Lippman M. Models of Translatory Rock Bursting in Coal. Int J Rock Mech Sci & Geomech. Abstr, 1981, 18: 285~ 294.
- 2 杨淑清等. 隧洞岩爆机制物理模型试验研究. 见: 第二届全国岩石力学数值计算与模型试验学术讨论会论文集. 上海: 同济大学出版社, 1990. 598~ 606.
- 3 章梦涛. 冲击地压失稳理论及数值模拟. 岩石力学与工程学报, 1987(3): 197~ 204.
- 4 潘一山等. 稳定性动力准则的圆形硐室岩爆分析. 岩土工程学报, 1993, 15(5): 59~ 66.

Study on Rockburst by Equivalent Material Simulation Tests

Pan Yishan Zhang Mengtao Wang Laigui Li Guozhen

(Liaoning Engineering Technology University, Fuxing 123000)

Abstract This paper puts forward a new equivalent coefficient E/λ in equivalent material simulation test on rockburst, where E is elastic modulus and λ is descending modulus. The paper concludes that different rockbursts can be simulated by the equivalent materials with different values of E/λ . A series of brittle failure equivalent materials are developed and can be used in different types of rockbursts tests. For the circular chamber rockburst, the simulation tests are made and prove that the developed equivalent materials are suitable for the simulation tests of rockbursts. The tests also demonstrate that there is a critical load for rockburst in circular chamber and the theoretical analysis result is verified.

Key words rockburst, equivalent material simulation test, equivalent coefficient.