

测定岩爆岩石弹性变形能量指数的新方法^①

冯涛 潘长良 王宏图[†] 曹平 王文星

(中南工业大学资源环境与建筑工程学院, 长沙 410083)

[†](重庆大学资源与环境学院, 重庆 630044)

摘要 对描述岩爆倾向的弹性变形能量指数 W_{ET} 进行了研究。岩石超声检测试验表明, 在单轴压缩条件下, 岩石试样中弹性波传播速度发生明显变化的特征区间, 正好与其强度的 80% 左右的应力水平具有良好的对应关系, 并据此提出了利用弹性波速度变化来控制卸载时机, 达到更准确测定 W_{ET} 的新试验方法。这一方法, 较好地克服了由于岩石力学性质离散度大对 W_{ET} 测定准确性的限制。

关键词 岩爆 应力 弹性应变能指数 弹性波

中图法分类号 TD326.1

国内外学者与工程界常用“冲击倾向”的概念来描述岩爆的破坏能力, 并采用所谓冲击倾向度的相应指标或指标组加以度量。

波兰学者奇代宾斯基以岩石应力-应变曲线为基础, 用岩样中储存的弹性变形能与由于永久变形和碎裂造成的耗损应变能之间的比值 W_{ET} 来定义岩爆倾向性。其具体方法是: 在单向压缩试验中, 将试件加载至应力达到其强度的 80% ~ 90%, 然后卸载至零, 得到应力-应变曲线如图 1 所示, 并用下式来计算 W_{ET} :

$$W_{ET} = \frac{\Phi_E}{\Phi_V} = \frac{\int_{\epsilon_p}^{\epsilon_e} f_1(\epsilon) d\epsilon}{\int_{\epsilon_0}^{\epsilon_1} f(\epsilon) d\epsilon - \int_{\epsilon_p}^{\epsilon_e} f_1(\epsilon) d\epsilon}$$

式中 Φ_E —弹性变形能, Φ_V —耗损应变能, Φ_E , Φ_V 分别由加卸载应力-应变曲线下的面积求得; ϵ_e —弹性应变, ϵ_p —塑性应变, ϵ_1 —总应变。

但是, 由于岩石力学指标的离散度大, 无法可靠地准确预计每块试件的强度并控制加载达到试件强度的 80% ~ 90% 时卸载, 限制了 W_{ET} 的准确性。因此, 寻求加载过程中能即时

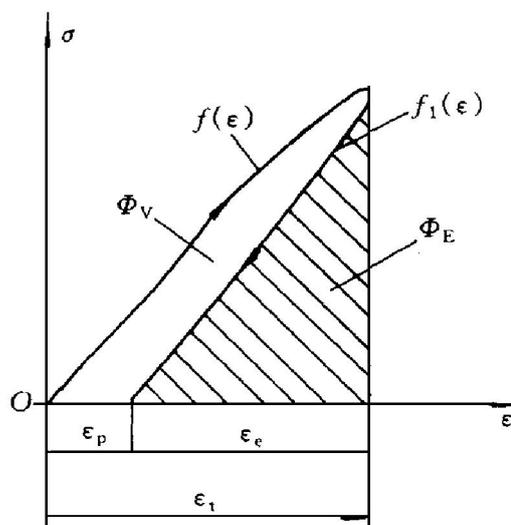


图 1 岩石弹性变形能指数计算模型

Fig. 1 Calculating model of elastic strain energy index of rock

预报载荷达到试件极限承载能力 80% ~ 90% 的控制手段, 在岩爆研究中具有实际意义。

1 研究思路和实验方法

我们设想, 在对岩样进行单向加载的过程中, 除应力、应变外, 如果还存在另外的也随

① 国家“九五”科技攻关计划资助项目(编号: 95-116-01-01-02)

收稿日期: 1997-06-12; 修回日期: 1997-12-18

冯涛, 男, 40岁, 副教授, 博士生

加载过程变化的物理量,并能较好地指示岩样内部结构变化和所达到的应力水平,而且又能随加载一起被检测出来,那么,就可能通过测定该物理量的变化来监测岩样的应力变化,准确地把握卸载时机。

Singh 的实验分析^[1]指出,在单轴加载条件下,轴向波速随轴向压力增加而增加,横向波速随轴压增加而降低。小林良二(1977)^[2],蔡忠理(1986)^[3], Rao(1992)^[4]等人的研究表明,应力对波速的影响是通过岩石内部的裂隙起作用的,弹性波速可以用来监测试件在应力作用下的变形和破坏过程。断裂力学的研究成果指出,在单向加压条件下,岩石试件内部的裂纹扩展显示出一定程度上的择优取向,基本上都沿最大主应力方向排列。我们认为,这是致使与最大主应力垂直方向上的弹性波传播速度减小的原因。据此,可以拟定出实验研究方案:在岩样加载过程中测定岩石的应力-应变曲线,同时测定应力变化与P波速度变化的关系曲线,把握岩样内部应力、声波、应变这些物理量的相应变化特征,从而通过测定弹性波速度变化的特征点(或一个小区间)来控制卸载时机,实现我们的研究目的。

结合“九五”国家重点科技项目(攻关)子专题《岩爆预报技术研究》,选取冬瓜山矿床矿岩作为主要测试对象,将岩样加工成约为50 mm × 50 mm × 100 mm 的正方柱试件,在单轴加压条件下,利用脉冲透射技术,记录透射波在试件中运行的时间来进行波速测量。实验是在Instron 伺服控制材料试验机和 NYJ-200D 材料试验机上进行的。测量波速是在试件中部相对两侧面加非承压式换能器,分别作为发射和接收换能器,并通过声波岩石参数测定仪(SYC-2型)测量声波穿过试件的时间;测量应变是通过贴在试件中部另外两个相对侧面上的应变片及应变仪来实现的。

2 实验结果及分析

实验选用了大理岩、砂卡岩、闪长岩、粉

砂岩共四组试件,分别对应着图2(a), (b), (c)和(d)。图2是我们获得的应力-应变曲线和应力-波速关系曲线的一部分。

从应力-应变曲线可以看出,破坏前岩石的应力-应变曲线大致可以分成三段,即初始的非线性OA段(I),线性变形AB段(II),屈服变形BC段(III)。关于这三个变形阶段的微观机制目前比较一致的认识是: I段:裂隙在受压方向上压密闭合; II段:孔隙缩小,弹性能增强; III段:新裂纹产生和裂纹扩展,弹性能降低、岩石扩容。

从横波波速(v_s)-应力关系曲线来看,比较明显地反映出两个阶段,即波速基本不变阶段和波速明显降低阶段。文献[5]在研究应力与波速的关系时,在单向加载的承压端加了纵向承压换能器,测得纵向波速(v_p)在加速初期明显增加,与应力-应变曲线的I阶段对应,如图3。通过综合分析可知,声波速度的变化也有三个阶段,即随应力增加纵波波速 v_p 变化较快阶段(I),变化平缓阶段(II),横波波速 v_s 明显降低阶段(III),而且这三个阶段与应力-应变曲线的三个阶段有较好的对应性。特别是在(III)阶段,由于裂纹主要是平行于加载方向,横波速度随纵向应力的增加有比较明显的减小。为了进一步分析当横波发生较明显变化时所对应的应力水平,我们将四种岩石的应力阶段划分的特征值(应力、波速)的相对值列在表1中(表中: σ_c —岩石单向抗压强度; v_0 —载荷为零时的波速; σ_{II} , v_{II} —II阶段向III阶段过渡时的应力、弹性波速; v_{III} —接近破坏时的弹性波速;表中负号表示波速相对减小)。

从表1知道:对应于应力-应变曲线II阶段向III阶段的过渡点(或一个小区),岩样内部应力水平达到极限应力的80%左右,而在此之前,波速变化只占4%左右,进入这个阶段,弹性波速则出现较大幅度的降低。我们可以这样来认识这一现象的内在机制:在这个阶段,随着应力增加,平行于加载方向的裂纹互相逐渐贯通,使纵向裂纹的密度增加较快,横波传

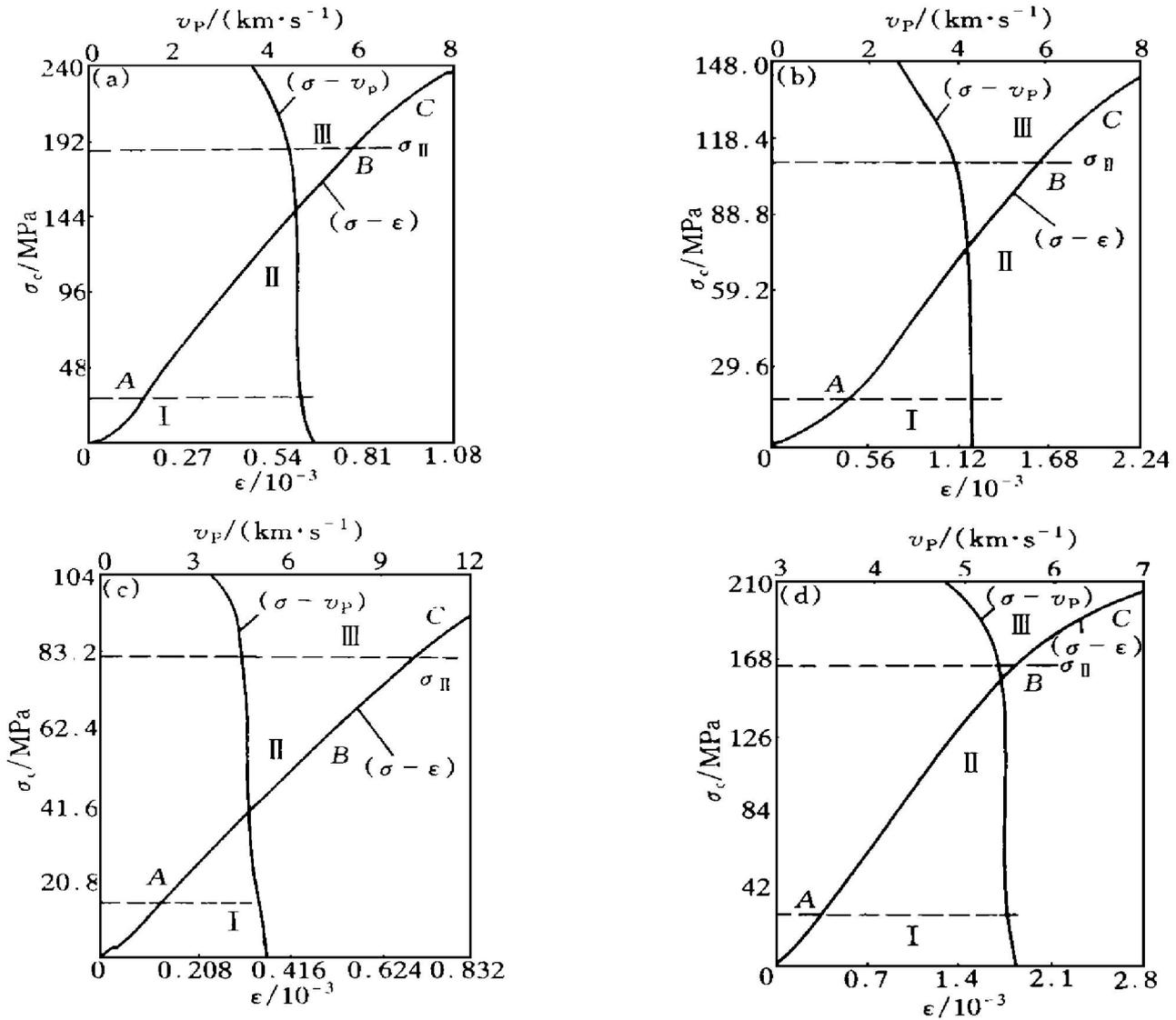


图2 单轴压缩下四种岩石的应力 σ_c 与波速 v_p 及应变 ϵ 典型关系曲线

Fig. 2 Typical curves of uniaxial (σ_c) vs velocity of elastic wave (v_p) and strain (ϵ) of rocks

(a) —Diorite; (b) —Skarn; (c) —Marble; (d) —Sandstone

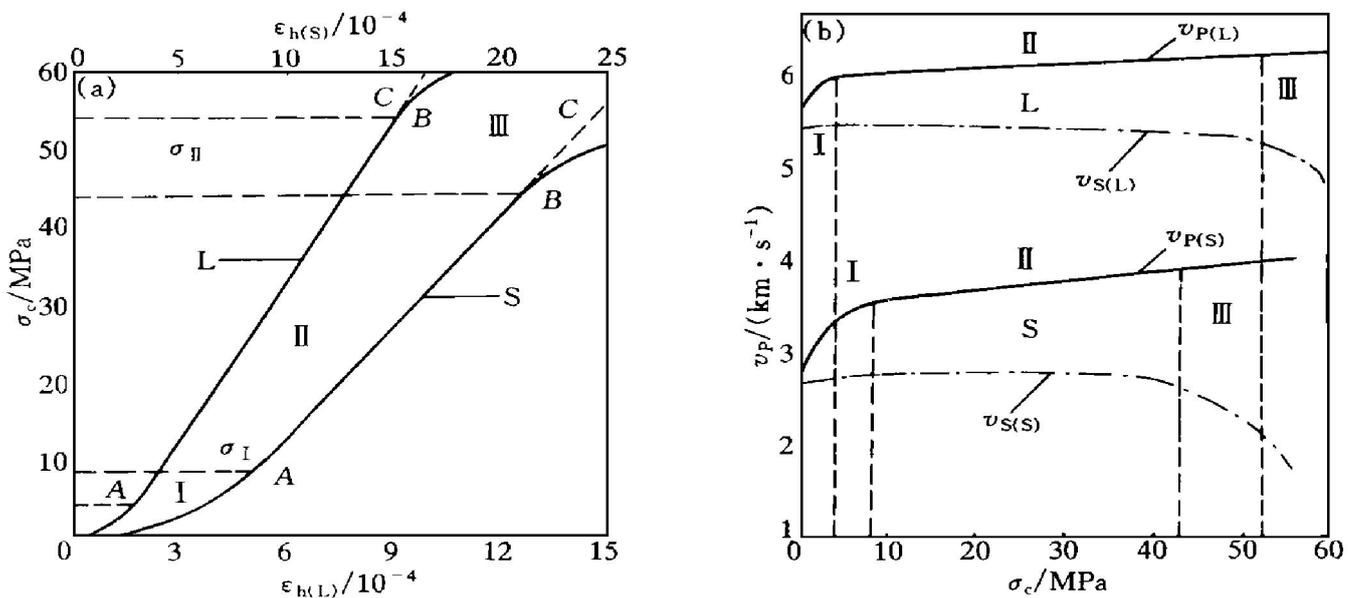


图3 细粒砂岩及灰岩的单轴应力 σ_c 与波速 v_p 及应变 ϵ 关系曲线

Fig. 3 Uniaxial stress (σ_c) vs velocity of elastic wave (v_p) and strain (ϵ) curves of rocks

S—Sandstone; L—Limestone

表 1 单轴压缩条件下, 岩石应力
阶段划分的特征值(应力、波速)相对值

**Table 1 Relative value of feature value to
divide stage of rock stress**

Sample	$\frac{\sigma_{II}}{\sigma_c} \times 100\%$	$\frac{v_{II} - v_0}{v_0} \times 100\%$	$\frac{v_{III} - v_0}{v_0} \times 100\%$
Marble	80.8	- 4.5	- 22.6
Skarn	77.0	- 3.9	- 24.3
Sandstone	81.1	- 5.5	- 28.5
Diorite	83.0	- 4.9	- 17.5

播速度明显降低。因此, 横波速度明显降低区的初始特征值, 对应于应力达到强度 80% 左右这一良好的对应关系, 给我们测试 W_{ET} 时通过 P 波速度变化来控制卸载时机, 提供了较可靠的控制信息。

3 结论

(1) 应力-波速曲线的各变化阶段与应力-

应变曲线有良好的对应关系。

(2) 横波速度明显变化阶段的特征值, 对应着岩样强度 80% 左右的应力水平。

(3) 测量横波变化, 可以掌握岩样内部不同阶段的应力变化, 从而在载荷达到岩石强度的 80%~90% 这个范围, 即时卸载, 获得满意的加卸载应力-应变曲线, 更准确地计算 W_{ET} 。

REFERENCES

- 1 Sungh B. Colliery Guardian, 1960, 201: 719- 724; 769- 772.
- 2 Kobayashi Ryoji *et al.* J Min & Metal Inst Jpn, 1977, 1: 7.
- 3 Cai Zhongli (蔡忠理) *et al.* Rock and Soil Mechanics (岩土力学), 1986, 2: 27.
- 4 Rao M V M S *et al.* Rock Mech Rock Engng, 1992, 25(4): 237- 251.
- 5 Wang Hongtu (王宏图) PhD thesis. Chongqing: Chongqing University, 1995.

A NEW METHOD FOR DETERMINING ELASTIC STRAIN ENERGY INDEX OF BURST ROCKS

Feng Tao, Pan Changliang, Wang Hongtu[†], Cao Ping and Wang Wenxing
College of Resource, Environment and Civil Engineering,

Central South University of Technology, Changsha 410083, P. R. China

[†] *Chongqing University, Chongqing 630044, P. R. China*

ABSTRACT The elastic strain energy index (W_{ET}) for describing rockburst tendency was studied. The ultrasonic measurements for rock samples under uniaxial compression showed that there is a good correspondence between the feature zone that the velocity of elastic wave is evidently changed and the stress level that about 80% of the rock's compression strength. Based on the conclusion, a new experimental method for determining W_{ET} was proposed, which can conquer the limit to accuracy of W_{ET} resulting from the dispersion ratio of rock mechanical properties.

Key words rockburst stress elastic strain energy index elastic wave

(编辑 何学锋)