

岩石破裂过程中的灾变

(国家自然科学基金资助课题)

唐春安 著

煤炭工业出版社

(京) 新登字 042 号

岩石破裂过程中的灾变

(国家自然科学基金资助课题)

唐春安 著

责任编辑: 井光山

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街 21 号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $850 \times 1168 \text{mm}^{1/32}$ 印张 $4^{1/2}$

字数 108 千字 印数 1—870

1993 年 6 月第 1 版 1993 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 7—5020—0830—6/O·1

书号 3584 G0256 定价 15.95 元

内 容 简 介

本书系统介绍了作者近年来在岩石破裂过程失稳的基础理论和应用方面的研究成果和一些新的观点。这些研究以现代灾变理论为基础，把加载机构和承载体看作一个系统，在运用损伤、统计理论建立岩石具有弱化性质本构关系的基础上，从理论和实验上研究了岩石破裂过程的失稳机制。本书讨论了应力-应变曲线的一般形态、在一般试验机上测定的方法、从稳定到灾变的转化条件等问题，以及这些观点在断裂韧度、地震预测、冲击地压等方面的应用等。

本书可供从事岩石力学、采矿工程、地震等应用基础理论研究的科技人员和高等院校的教师、研究生参考。

SUMMARY

The discovery of the complete stress-strain curve of rock and its measurement are taken as an important mark of rock mechanics development during the past decades. However, most of the researches about rock failure process are carried out only in stable loading conditions, which is incompatible with those real failure processes of rock mass under inconstant deformation rate in nature and rock engineering, such as earthquake, rockburst, etc. , which are completely unstable. The author of this book thinks that it is an more important aspect of studying the rock failure instability mechanism both theoretically and experimentally, especially paying attention to discontinuous characteristics nearby the critical point of the instability.

In this book, some of the author's new research results and viewpoints on the basic theory of rock unstable failure and its application are introduced. The discussions in the book focus on the mechanical properties of rocks, rupture patterns and its application on seismology, fracture mechanics, etc. , with special emphasis on the non-linear deformation of rock failure, catastrophe model of rock unstable failure, effect of stiffness of loading system on the stability of rock failure process, effect of frequency response characteristic of measuring and recording system on study of stability of rock failure and pattern of acoustic emissions in rock failure process.

The book has distinguishing features in following subjects: the application of damage theory on the study of the strain-weakening mode of rock failure, the instability behaviour of rock deformation and the experimental techniques for measuring rock complete stress-strain curve under instability conditions.

志 谢

在本书出版之际，作者要特别感谢徐小荷教授对本书所做的贡献。他不仅自始至终指导了作者的研究工作，而且书中的许多细节都凝聚着他的心血。作为他的学生，作者在其它方面也得益于他多年的教诲。作者也十分感激黄士芳教授和宋守志副教授，他们都向我提出了许多改进意见，尽管在有些问题上我偶尔固执己见。因此，本书如果留有错误，他们是没有责任的。本研究也得到了国家青年自然科学基金的部分资助，对此一并表示谢意。

书中难免有不当之处，恳切希望读者不吝赐教。

唐 春 安

1991. 7. 5. 于沈阳

目 录

第一章 引言	1
第一节 岩石的破裂过程和系统的失稳机制	1
第二节 研究失稳的理论途径	4
第三节 研究失稳的实验途径	6
第四节 研究失稳的应用前景	7
第二章 岩石破裂过程的非线性	10
第一节 概述	10
第二节 缺陷的概率分布与损伤参量	14
第三节 微元强度的概率分布与损伤参量	20
第四节 卸载及重新加载的特性	28
第三章 岩石破裂过程失稳的灾变模型	31
第一节 尖点灾变的数学描述	31
第二节 加载系统的力学模型	34
第三节 势函数及平衡曲面方程	35
第四节 失稳条件	38
第五节 突跳	39
第四章 加载系统的刚度对岩石破裂过程稳定性的影响	42
第一节 概述	42
第二节 试验机-岩样共同作用系统中各变量之间的关系	47
第三节 恒变形率加载和恒荷载率加载	49
第四节 试验机刚性对变形速率及荷载速率的影响	51
第五节 伺服控制的本质	52
第六节 附加刚性组件的刚性试验机系统分析	53
第五章 测试系统的频率特性对研究岩石破裂过程 稳定性的影响	58
第一节 概述	58
第二节 测试系统的基本特性	59

第三节	伺服控制加载系统的局限性	62
第四节	测量和记录系统的频率响应对试验结果的影响	63
第五节	失稳条件下岩石荷载-位移全过程曲线测试的 实验技术	65
第六章	岩石破裂过程中的声发射	70
第一节	概述	70
第二节	岩石声发射与本构关系之间的联系	71
第三节	Kaiser 效应及其函数表达式	73
第四节	岩石声发射模式与均质度之间的关系	76
第五节	岩石在不同加载条件下的声发射模式	82
第七章	地震学中的应用	86
第一节	地震孕育过程中的刚度效应	86
第二节	浅源地震的刚度效应模式	88
第三节	根据刚度效应模式描述的孕震序列特征	90
第四节	刚度效应孕震模式的特点	91
第五节	从简单模型中得到的一些重要结论	92
第六节	依据刚度效应模式进行地震预测的新探索	96
第八章	断裂力学中的应用	99
第一节	断裂韧度的传统定义	99
第二节	引起裂纹失稳扩展的刚度因素	101
第三节	失稳、失效与断裂韧度	107
第四节	含裂纹构件与一般结构物作用系统稳定性的分析	108
第九章	采矿工程中的冲击地压	112
第一节	冲击地压	112
第二节	冲击地压的机理	113
第三节	灾变理论处理冲击地压的适用性	113
第四节	矿柱岩爆及其预防	115
第五节	巷道周边岩爆及锚喷支护对岩爆的防治	117
结语		122
参考文献		126

CONTENTS

1 INTRODUCTION

- 1.1 Process of Rock Failure and Instability Mechanism of Loading System
- 1.2 Theoretical Way to Study Rock Failure Instability
- 1.3 Experiment Way to Study Rock Failure Instability
- 1.4 Application Prospects of Studying Rock Failure Instability

2 NON-LINEAR DEFORMATION OF ROCK FAILURE

- 2.1 Introduction
- 2.2 Statistic Distribution of Defects and Damage Parameter
- 2.3 Statistic Distribution of Micro-element Strength and Damage Parameter
- 2.4 Unload and Re-load Characteristic

3 CUSP CATASTROPHE MODEL OF ROCK UNSTABLE FAILURE

- 3.1 Mathematical Preliminary
- 3.2 Mechanical Model of Loading System
- 3.3 Potential Function and Equation of Equilibrium Surface
- 3.4 Instability Criterion
- 3.5 Sudden Jump

4 EFFECT OF STIFFNESS OF LOADING SYSTEM ON THE STABILITY OF ROCK FAILURE PROCESS

- 4.1 Introduction
- 4.2 Relation Between Variables of the Machine-specimen System
- 4.3 Two Extreme Conditions—Constant Strain Rate and Constant Load Rate
- 4.4 Effect of Stiffness of Loading Machine on Deformation Rate and Load Rate
- 4.5 Essentiality of Servo-controlled Loading
- 4.6 Stiff Loading Machine System

5 EFFECT OF FREQUENCY RESPONSE CHARACTERISTIC OF

MEASURING AND RECORDING SYSTEM ON STUDY OF STABILITY OF ROCK FAILURE

- 5. 1 Introduction
- 5. 2 Fundamental Characteristic of Measurement System
- 5. 3 Limitation of Servo-controlled System
- 5. 4 Effect of Frequency Response Characteristic of Measuring and Recording System on Test Results
- 5. 5 Experimental Technique for Measuring Rock Complete Stress-Strain Curve

6 ACOUSTIC EMISSIONS IN ROCK FAILURE PROCESS

- 6. 1 Introduction
- 6. 2 Acoustic Emissions and Their Relation to Constitutive Law of Rock
- 6. 3 Kaiser Effect and Its Expression
- 6. 4 Patterns of Acoustic Emissions and Heterogeneity of Rock
- 6. 5 Patterns of Acoustic Emissions of Rock under Different Loading Conditions

7 APPLICATION IN SEISMOLOGY

- 7. 1 Stiffness Effect in Earthquake Source Development
- 7. 2 Stiffness Effect Model for Shallow Earthquake
- 7. 3 Seismic Sequence according to the Stiffness Effect Model
- 7. 4 Characteristic of Stiffness Effect Model of Earthquake Source Development
- 7. 5 Some Important Conclusions from Simple Model
- 7. 6 Possibility of Predicting Earthquakes According to Stiffness Effect Model

8 APPLICATION IN FRACTURE MECHANICS

- 8. 1 Traditional Definition of Fracture Toughness
- 8. 2 Stiffness Factor Causing Unstable Development of Crack
- 8. 3 Instability, Lose Effectiveness and Fracture Toughness of Rock
- 8. 4 Analysis of Stability Characteristic of Interaction Between Crack Contained Component and Its Surrounding Structure

9 APPLICATION IN MINING ENGINEERING

- 9. 1 Underground Impact Pressure

- 9. 2 Mechanism of Underground Impact Pressure
- 9. 3 Applicability of Catastrophe Theory to Handle Problem of Underground Pressure
- 9. 4 Pillar Rockburst and Prevention
- 9. 5 Rockburst in Underground Excavation and Prevention by Using Shotcrete and Bolting Support

REFERENCES

第一章 引言

第一节 岩石的破裂过程和系统的失稳机制

众所周知,岩石应力-应变全过程曲线的发现和测定,是近代岩石力学发展的一个重要标志。它对于建立有关的岩石力学模型和本构关系,特别是对于解决岩石破裂的力学过程和有关工程实际问题,具有重要的意义。

但是,过去的研究都是在稳定加载的条件下进行的。在许多情况下,诸如研究地震、冲击地压、岩爆机制等,进行实验模拟时,往往需要研究失稳过程本身。因此,在理论和实验上深入研究岩石在加载系统下的失稳机制,尤其是失稳临界点附近的非连续性态,无疑会更有实际意义,也是岩石应力-应变全过程曲线研究的一个新的方向。

通常认为在普通材料试验机上测不出岩石应力-应变全过程曲线的原因,是试验机的刚度不够,以致在加载的过程中,试验机的机体中贮存的能量,在岩石破裂后区突然释放,造成对岩样的冲击,使测试无法进行。

为了解决上述问题,以往人们都着眼于试验机的改进,或者是提高试验机的刚度,采用刚性组件,加大试验机框架尺寸和采用水银液压变换器等;或者用电热膨胀、电液伺服控制试验机控制加载速率等。总之,是围绕着试验机刚度对岩石力学性质试验结果的影响,以及如何提高试验机的刚度等问题。多年来,特别是近 10 年来,国内外许多岩石力学学者做了大量的研究工作,研制了多种不同原理、不同结构的刚性试验机,并进行了大量岩石试样的压缩试验,从而对获得岩石的应力-应变全过程曲线的试验技术进行了许多有益的探索,促进了岩石力学实验方法的发展和

提高。

但是，也必须看到，由于通过提高试验机的刚度，人为地降低了岩石试样在破坏后区的加载速率，延缓了试样破坏的过程，使岩样的破坏处于给定或控制的恒应变速率条件下进行，这与自然界和工程中许多岩石（岩体）的真实破坏过程是不相符的。

岩石在工程中的两大状态，一是稳定平衡，二是失稳破裂。长时期来，人们对前者的研究较为广泛和深入，而对后者则研究得较少。研究稳定平衡无疑会指导人们对工程结构的防护采取相应的控制措施；而对岩石破裂过程失稳，则主要是研究非人为控制条件下岩石的破坏性态，旨在认识自然力或工作施载条件下岩石破裂过程所显现的特殊现象（如矿井中的岩爆、地震等），探索其自然规律，从而寻求出有关失稳的前兆条件，进行相应的预报措施（在许多不能控制的情况下，尤其需要这样）。

过去，人们的注意力往往集中在对岩石强度（包括残余强度）的研究上，追求提高试验机的刚度，以获得接近于恒变形速率的稳定加载过程，而没有注意到岩石试样在既定的加载系统中失稳破裂特性本身所显示的重要意义。实际上，在实验室演示岩石破裂的失稳过程，一般均能正确反映出特定和客观的自然规律。许多现实中结构失稳的例子，都与相应的加载机构——承载体共同作用系统的失稳有着惊人的相似之处。破坏的过程有稳定破坏和不稳定破坏之分（或急缓之分）。过去研究强度只关心“破坏”而不关心破坏过程的急缓即强烈程度，但诸如岩爆、采空区冒落、地表沉陷乃至地震、压力容器爆炸等现象，不仅与结构物（或地质体）的强度有关，而且更可能与加载机构、承载体之间共同作用系统的失稳密切相联。在这些情况下，我们不仅关心“破坏”本身，而且更为关心破坏所经历的“过程及猛烈程度”。

失稳和稳定是两个具有同等科学价值的不同研究领域。以地质学、地震学为例，地质工作者力图查明地壳在漫长的地质年代中运动发展的过程，了解地壳中各种变形（例如褶皱）和破裂（例如断层、节理等）分布的时空规律，并进而找出它们与地下矿藏

分布之间的关系。而地震工作者则力图查明现今和可以预见的将来，完整的地壳岩石突然破裂或原有断层突然错动的可能性，找出破裂和错动前各种前兆现象和变化规律，以便根据这些前兆，较准确地预测出将要发生地震的地点、时间和规律。从过去人们对岩石进行的各种实验结果可以看出，无论是构造地质学中变形和破裂有关的各种现象，还是大地震前后的许多现象，都可以在实验中找到它们的缩影。

对于采矿等地下工程而言，情况更是如此，失稳和稳定一样处处可见。我们知道，一般结构物的稳定性常用结构材料的极限强度加安全储备作为衡量标准。但是，对于地下工程结构来说，沿用这种衡量标准却是不合适的。因为，实践证明，对于许多地下工程结构来说，进行预报和防止失稳研究比单纯研究强度极限更为重要。而在另一些情况下，如矿井生产、边坡、凿岩和爆破，特别是在深部开采的矿井生产中，又经常会遇到“岩爆”、“煤爆”等冲击地压现象。这种现象不仅严重破坏了地下工程结构，而且威胁着生产人员的安全。但恰恰在这里，传统的破坏判据是失效的。因此，判断此类工程结构的稳定性，有待于一种新的理论。

目前，岩石力学正进入一个全新的发展阶段。它的一个明显目标是改进力学的理论基础，使它能更接近现场实际，从而摆脱理想、简单化的做法，其发展的重要标志之一，就是将研究的领域从岩石破裂前的性态延伸到更加关注破裂之后的性态，或者说从传统破坏判据的左侧跨到了右侧。人们不只简单地寻求象Mohr-Coulomb提出的那种以岩石在实验室条件下出现整体破坏为根据的强度准则，因为它不适用于受载变形过程的研究，目前的注意点是如何建立描述岩石损伤的演化方程。在这一点上，Cook(1965)提出的岩石应力-应变全过程概念具有划时代的意义。它使人们认识到，岩石不仅在达到最大强度前能承受载荷，而且在此之后仍具有一定的承载能力，破坏不再被看成是一种状态，而是一种过程，人们把这个过程称作材料的劣化。讨论包括破坏全过程的岩石应力-应变全过程曲线，是一个时期以来的热点之一。

但是,由于人们的注意力仅集中在对岩石破裂性质的研究上,追求的是试验机刚度的提高,以获得接近于恒变形速率的稳定加载过程,而忽视了作为一种机制,当将试验机-试样作为一个系统来讨论它的稳定性时,它的意义可能远远超过了对岩石破裂过程本身研究的意义。因为不仅许多现实中结构失稳的例子与这种试验机-试样系统的失稳有着惊人的相似之处,而且更重要的是,诸如象地震之类的自然现象,不仅与岩石介质的强度有关,而且与介质系统的失稳更加密切相联。因此,在许多情况下,诸如岩爆、采空区的冒落、地表沉陷乃至地震、压力容器爆炸等等,我们不仅关心“破坏”本身,而且更为关心破坏所经历的过程以及强烈程度。在这些情况下,破坏过程的研究就常常显得比研究是否破坏的判据本身更为重要。

现以机械工程和岩石工程(包括地震)对破坏判据理论提出的基本要求列表对比如下:

项 目	机械工程	岩石工程(或地震)
对象	金属	岩石
关心的范围	弹性阶段	破裂阶段
介质材料强度	已知	未知
按强度判据预见破坏	可预见(因为强度已知)	不可预见(因为强度未知)
所关心的问题	失效	过程的稳定性(灾变性)
衡量破坏性的标准	达到弹性极限	变形速率突然增大
破坏的对象	本身	构筑物等

由此可见,两者在如此之多的方面表现出差异,能够适应于两者的破坏判据,自然也应该具有各自的特殊性。

第二节 研究失稳的理论途径

与其它力学的基本量一样,荷载、变形同样是研究岩石破裂过程的两个基本量。只有建立了荷载与位移(变形)之间的关系,

力学分析的方法才是可能的。因此，研究岩石材料的本构关系具有重要的意义。但是，研究的困难在于，在复杂应力状态下，岩石达到破坏之前，已经不符合弹性条件了，即使在弹性状态下，也是属于非线性问题；而且岩石经常有裂纹、弱面等缺陷，从连续介质力学角度分析破裂的物理根基就不牢。对于许多岩石，尤其是软的或高度渗水的沙岩、凝灰岩、页岩等等，它们在相当狭窄的应用范围内发生的是弹性的行为，而在岩石工程中却往往超过这一狭窄的应用范围。这就需要发展非弹性变形的本构理论，包括破坏和破坏后的响应。

近年来，损伤力学的发展，为岩石材料的非弹性性质和破坏机理给出了一种可资借鉴的解释模式。人们已经逐渐习惯地称岩石为有初始损伤的材料，并开始采用某些特征参数来合理地描述岩石内部缺陷的分布状态。在变形的过程中，岩石内部的缺陷会进一步恶化，这个过程是用损伤演化来描述的。

具有弱化性质的本构关系，是岩石力学性质的一个显著特点。岩石变形的稳定性与岩石介质的弱化性质有着密切的联系，如冲击地压，就是具有应变弱化性质的介质和其余的未处于应变弱化阶段的介质组成的变形系统的平衡而进入的一种非稳定状态。这种非稳定状态的发生，就是人们在数学上所说的灾变。

70年代初期，由法国数学家 Thom 创立的灾变理论* (Catastrophe Theory)，是研究不连续现象的一个新兴数学分支，其主要数学渊源是根据势函数把临界点分类，将各种领域的灾变现象归纳到不同类别的拓扑结构中去，进而研究各种临界点附近非连续性的特征，即为有限个数的若干个初等灾变。把这些得到的知识与对不连续现象的理论分析和观察资料相结合，就可以建立数学模型，从而更深入地认识不连续现象的机理并作预测。

作为一种旨在应用的理论，灾变理论的出现时间虽不长，却已取得了许多应用成果。在数学、力学和物理学中，借助灾变理

* 也译为突变理论。

论,不仅能加深对已有定律的认识,并已取得了一些新的成果。许多现象很难用其它数学方法处理,却可以应用灾变理论进行处理;有些长期以来难以用微分方程得出满意解释的难题,用灾变理论进行预测,得出的结果与实验很相符。正因为如此,灾变理论不仅在力学、物理学、生物学等领域渗透很快,而且也已被用于研究地学中的非稳定性问题,如火山爆发、相变、浊流、断层运动和地震等。

由于岩石在加载系统作用下的破裂过程,除了在特殊控制的条件下进行外,通常都不是一个稳态的过程,在更多的情况下是由稳态发展到失稳的过程,属包括试验机和试样在内的岩石力学系统的一种失稳现象,这正是一种具有灾变性质的过程。因此,用灾变理论来研究这一过程是恰当的。

另一方面,过去研究失稳大多只研究失稳的状态,即主要关心失稳的判据,所回答的科学问题是“失稳”或“不失稳”的二元逻辑问题。这种对“状态”的研究由于不涉及“过程”,因此很难回答有关失稳前兆规律的问题。对于岩石的破裂而言,失稳只是它的应变速率达到了极值。但在稳定和失稳这两个极端之间,还存在无穷多个状态,即使系统不发生数学意义上的失稳,但岩样在加载系统作用下的变形速率,仍可能是很大的(否则为什么会发生不同强度的地震?)。这种介于稳定和失稳之间的亚临界失稳过程,只能通过应变速率这个连续变量来加以描述。事实上,由于实际中我们通常观测的是地球介质的应变或应变速率,因此从理论上研究这些量与系统参数之间的关系及其变化规律,对于了解失稳发生的前兆规律具有更重要的价值。因为前兆规律的研究有利于对失稳的发生进行预测和预报,是研究失稳的根本目的之一。

第三节 研究失稳的实验途径

在刚性试验机或伺服控制试验机上测定岩石的应力-应变全过程曲线,是在恒定或接近恒定的应变速率条件下进行的。因此,

它的结果无法用于研究岩石破裂的失稳过程。

过去人们一直认为，由于通常的试验机刚度不够，而不可能在这种试验机上测出岩石的应力-应变全过程曲线。作者则认为，尽管刚度不够会造成试验机在加载后期产生贮能突然释放，但它也只不过是在客观上造成了对岩样的冲击，使加载变成了动态过程。然而，能否记录这个由静态变动态的过程，却并不取决于加载系统，而是取决于测试记录系统的工作频率响应大小和频带宽窄。事实上，失稳发生时的实际应变速率不会超过动态应力波加载时应变速率的数量级。而对于后者，现有的测试技术是完全能够满足要求的。因此，在失稳情况下研究岩石的应力-应变全过程曲线，在试验技术上是可行的。如果通过改变传感器的频率特性，并提高测试记录系统的频率响应，就完全能够在普通试验机上直接测到具有失稳过程（可听见有剧烈的爆裂声）的岩石应力-应变全过程曲线。

因此，在试验方法上，不仅要进一步提高载荷传感器和位移传感器的频率响应，而且更重要的是要提高测试系统的频率响应特性，拓宽工作频带，使之不仅能够适应岩石破裂前的静态测试要求，而且能同时满足岩石破裂后期的动态测试要求。

在试验内容上，由于指导思想上的根本变化，我们可以不再象借助刚性试验机那样避开失稳来研究岩石的破裂过程。因此，这种在失稳条件下研究岩石破裂全过程的实验，不仅可以使我们通过实验直接观察岩石在自然力（非人为控制的力）作用下的破裂过程，而且对于在模拟试验中研究冲击地压、矿井深部岩爆和地震的孕育过程等等，都是十分有益的。

第四节 研究失稳的应用前景

尽管有关失稳条件下岩石破裂过程的研究主要是在岩石单轴压缩条件下进行的实验室试验，但由此得到的一些概念和由此发展的失稳理论的应用却不限于实验室。岩石破裂过程失稳的研究，在如下几个方面将具有广阔的应用前景。