

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.2530

加载速率对砂岩抗拉强度的影响机制

邓华锋, 王晨玺杰, 李建林, 张吟钊, 王 伟, 张恒宾

(三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 为研究加载速率对砂岩抗拉强度的影响效应及影响机制, 设计开展 5 种加载速率的劈裂试验, 综合分析抗拉强度、破坏特征、能量参数和劈裂面微观形貌变化规律及相关性。结果表明, (1) 随着加载速率增大, 砂岩劈裂抗拉强度逐渐增大, 总体呈现先陡后缓的趋势, 加载速率在 0.01~0.10 kN/s 范围内时抗拉强度增长迅速, 0.10~1.00 kN/s 范围内时抗拉强度增长趋势渐缓; (2) 随着加载速率的增大, 岩样吸收的总能量增大, 弹性应变能占总能量的比值逐渐增大, 耗散能占总能量的比值逐渐减小, 加载至破坏时裂纹扩展形成宏观劈裂面的时间呈数量级减小, 达到峰值应力时弹性应变能的释放, 导致岩样破坏的突发性增强, 使得劈裂面形貌特征在宏观和微观上逐渐变得复杂, 对应抗拉强度逐渐增大; (3) 在岩石劈裂试验过程中加载速率、能量参数、劈裂面形貌特征与抗拉强度密切相关, 加载速率影响加载过程中能量的总量与分配, 能量参数的变化直接影响岩样的破坏过程及劈裂面的形貌特征, 最后宏观上表现为抗拉强度的差异。文中相关分析方法和思路可为类似试验提供较好的参考。

关 键 词: 加载速率; 劈裂; 微观形貌; 高度特征参数; 纹理特征参数; 能量

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 增 1-0079-010

Influence mechanism of loading rate on tensile strength of sandstone

DENG Hua-feng, WANG Chen-xi-jie, LI Jian-lin, ZHANG Yin-chai, WANG Wei, ZHANG Heng-bin

(Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area of Ministry of Education,
China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: In order to study how the tensile strength of sandstone influenced by loading rate, a series of splitting tests are carried out with five loading rates. Based on the comprehensive analysis of the splitting tensile strength, destructive features, the change rule and correlation between microstructure of the splitting surface and energy parameters, the results show that: (1) The split tensile strength of sandstone gradually decrease as loading rate increase, and generally go slow after the first steep upward trend. When loading rate is between 0.01 kN/s to 0.10 kN/s, the tensile strength grew significantly and then tended to slow down at 0.1 kN/s to 1.00 kN/s. (2) Total energy the sample absorbed increase as loading rate increase, and the ratio of elastic strain energy to total energy increases while dissipated energy go down, the time when the crack propagation formed into splitting surface is an order of magnitude less, which indicates the sudden destruction of rock sample enhanced resulted by release of elastic strain energy when peak stress reached, which result in tensile strength enhanced and increasingly complicated micro morphology characteristics. (3) During the rock splitting test, loading rate, energy parameter, features of splitting surface and tensile strength are closely related; first of all, the loading rate affects the total amount and distribution of energy, and the changes in energy parameters affects its destruction process and features of splitting surface; finally, the difference in tensile strength shows. The related analysis methods and ideas references can provide a better reference for similar tests.

Keywords: loading rate; splitting; microstructure; height feature parameters; texture feature parameters; energy

1 引 言

加载速率或者应变率对岩石的力学特性具有

显著影响, 是岩石力学领域研究的重要问题之一。根据应变率的大小荷载可以划分为几种类型, 即蠕变的应变速率在 $10^{-5}/s$ 以下、静态(准静态)的应

收稿日期: 2017-12-20

基金项目: 湖北省自然科学基金重点项目 (No. 2015CFA140); 国家自然科学基金项目 (No. 51679127); 国家自然科学基金重点项目 (No. 51439003)。This work was supported by the Natural Science Foundation of Hubei Province (2015CFA140), the National Natural Science foundation of China (51679127), and the National Nature Science foundation of China (51439003).

第一作者简介: 邓华锋, 男, 1979 年生, 博士, 教授, 主要从岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: dhf8010@ctgu.edu.cn

变速率在 $10^{-5}/\text{s} \sim 10^{-1}/\text{s}$ 、准动态的应变速率在 $10 \sim 10^1/\text{s}$ 、动态的应变速率在 $10^1/\text{s} \sim 10^4/\text{s}$ 和超动态应变速率在 $10^4/\text{s}$ 以上^[1]。较多学者考虑地震、爆炸等荷载对岩石的动力特性进行研究,而在考虑地质构造运动、工程开挖、岩体加固、大坝填筑等诱发的荷载时,由于应变率较小,一般都假设荷载处于静态或准静态,但一些学者考虑了不同加载速率对岩石抗压、抗剪和抗拉特性进行了大量的试验研究^[2-15]发现,即使在准静态或者静态加载速率情况下加载速率对岩石的力学特性仍然具有重要的影响^[16-17]。

文献[2-8]在准静态或静态范围内,考虑不同的加载速率分别对盐岩、煤岩、大理岩、花岗岩、凝灰岩、细砂岩等进行了单轴、三轴压缩试验,发现岩石抗压强度随加载速率的提高而明显增加。尹小涛等^[9]研究发现,加载速率增加使得材料力学性能表现出极大的伪增强,但破坏时更破碎。

在岩石抗剪强度特性方面,Crawford 等^[10]进行 4 种岩性的节理试样直剪试验,发现软岩节理峰值抗剪强度随剪切速率的增加呈现先增大后不变再减小的过程,中硬岩石节理的峰值抗剪强度与剪切速率无关,硬岩节理峰值抗剪强度随剪切速率的增加显著增大。李海波等^[11]研究发现,节理面的峰值剪切强度随剪切速率的增大而减小。Jafari 等^[12]研究得到了相似的规律。郑博文等^[13]发现岩石节理试样的摩擦角随剪切速率的变化呈现负对数变化规律。

在岩石抗拉强度方面,吴绵拔^[14]通过试验发现花岗岩的抗压强度和抗拉强度的比值并非一个恒定值,会随加载速率的增大而增大。周辉等^[15]对硬脆性大理岩进行巴西圆盘劈裂试验,根据断口形貌特征分析了大理岩抗拉强度的加载速率效应。陈珂等^[18]对砂岩劈裂破坏过程中的声发射特征进行了统计分析,发现 AE 振铃率和 AE 能量率都随加载速率增大而增大。

综合上述研究成果来看,针对准静态或者静态荷载在岩石抗压强度、抗剪强度的加载速率效应及机制研究方面积累了丰富的研究成果,而对岩石抗拉强度的加载速率效应研究相对较少,现有研究也主要着重于加载速率对岩石抗拉强度值的影响,少数学者尝试从岩样破坏断口特征和能量参数对其影响效应进行分析,但相关不同加载速率下岩样劈裂面微观变化特征及其对抗拉强度的影响机制多为定性的讨论。岩石的破坏是微观损伤向宏观破坏的演化过程,岩石劈裂面的微观观定量地分析,可为揭示加载速率对砂岩抗拉强度的影响机制提供较好

的基础。

本研究针对工程岩体常见的准静态或静态荷载,考虑不同加载速率,进行砂岩劈裂抗拉强度试验,采用三维激光扫描技术对不同加载速率岩样劈裂面的微观形貌特征参数进行定量统计分析,研究了加载速率与抗拉强度、能量参数、劈裂面的微细观形貌特征参数及相互关系,综合能量参数变化规律、劈裂面的微细观形貌特征及相关关系分析了解释加载速率对砂岩劈裂抗拉强度的影响机制。

2 试验方案设计

2.1 岩样的制备

试验用砂岩采自三峡库区典型岸坡,微风化,无可见节理,完整性较好,为绢云母中粒石英砂岩。为了尽量减小试样的离散性和尺寸效应的影响,选择较大尺寸的试样,参考混凝土抗拉强度测试方法^[19],制备边长为 100 mm 的立方块岩样。试验之前先测试试样的纵波波速和密度进行试样筛选^[20],选取 20 余个岩样。

2.2 加载和测试方案

结合以往类似试验经验^[14-15, 18],按照规范^[21-22]要求,结合加载设备允许加载速率,设计了 5 种加载速率(0.01、0.05、0.1、0.5 kN/s 和 1 kN/s)。为了控制试验结果的离散性,每种加载速率至少进行 3 次成功试验(以劈裂面穿过加载线和岩样中心所在的平面为原则,判断试验是否成功)。劈裂试验在 RMT-150 C 上进行,试验后采用 ST500 三维非接触式表面轮廓仪对劈裂面进行扫描,见图 1。相关的微观形貌数据分析处理采用仪器自带的专业软件进行。



图 1 ST500 三维非接触式表面轮廓仪
Fig.1 ST500 three-dimensional non-contact surface profiler

2.3 抗拉强度计算公式

不同加载速率情况下劈裂抗拉强度^[9]为

$$\sigma_t = 2P / \pi A \quad (1)$$

式中: P 为破坏荷载; A 为岩样劈裂面面积。设计加载速率范围为 0.01~1.00 kN/s, 岩样破坏的荷载

值范围为 40~60 kN 左右, 岩样破坏时对应的应变值不超过 0.01, 加载至破坏所用的时间为 4 000~60 s, 对应加载阶段的应变速率在 10^{-6} ~ 10^{-4} /s 量级, 属于静态(准静态)范围。

3 试验结果分析

3.1 加载速率对砂岩抗拉强度影响分析

不同加载速率下部分典型岩样的荷载-变形曲线如图 2 所示。从图中可以看出, 不同加载速率下岩样的轴向荷载-变形曲线形态基本一致, 在达到峰值强度时应力跌落趋势明显。比较而言, 在加载速率较小时 (0.01~0.05 kN/s), 呈现一定的延性破坏趋势, 加载速率较大时应力跌落趋势近乎垂直, 脆性破坏特征明显。随加载速率的增大, 岩样的抗拉强度逐渐增大。砂岩抗拉强度统计值见表 1。

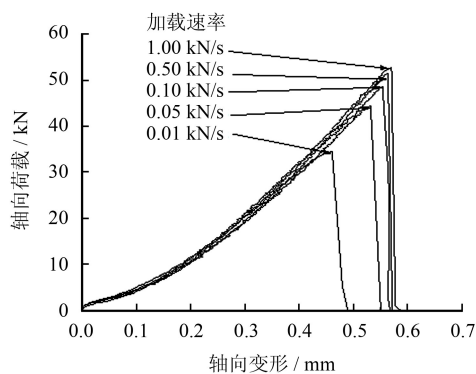


图 2 不同加载速率下典型岩样的应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of typical sample under different loading rate

表 1 不同加载速率下砂岩抗拉强度

Table 1 Tensile strengths of sandstone under different loading rate

加载速率 $v/(kN/s)$	抗拉强度				
	试验值/MPa		均值/MPa	增大比例/%	
0.01	2.71	2.55	2.43	2.56	0.00
0.05	3.20	2.96	2.69	2.95	15.23
0.10	3.28	3.32	3.20	3.26	27.34
0.50	3.30	3.83	3.48	3.54	38.28
1.00	3.83	3.72	4.10	3.88	51.56

从表 1 中可以看出, 最小抗拉强度出现在加载速率 0.01 kN/s 时, 为 2.43 MPa, 最大抗拉强度出现在加载速率 1.00 kN/s 时, 为 4.10 MPa, 相比加载速率为 0.01 kN/s 时最大值增大了 68.72%, 可见加载速率对砂岩抗拉强度的影响是非常显著的。

加载速率从 0.01 kN/s 增大到 0.05 kN/s 时抗拉强度均值增大了 15.23%, 从 0.05 kN/s 上升到 0.1 kN/s 时抗拉强度均值增大了 10.57%, 随着加载速

率的增大, 抗拉强度增大的趋势逐渐平缓, 加载速率从 0.50 kN/s 上升到 1.00 kN/s 时, 抗拉强度增大了 9.60%, 趋势逐步趋于稳定。数据拟合分析发现, 抗拉强度与加载速率的关系可用对数函数较好地描述, 如图 3 所示。

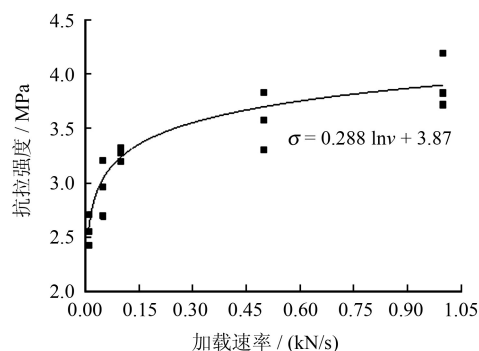


图 3 砂岩劈裂抗拉强度与加载速率关系曲线

Fig.3 Relation curve of tensile strength and loading rate of sample

3.2 不同加载速率下岩样破坏特征分析

不同加载速率下典型岩样破坏的照片见图 4。从岩样的劈裂破坏面形态来看, 岩样的劈裂面总体穿过岩样中心和上下加载线所在的面, 满足劈裂试验结果有效性要求。

加载速率较小时, 劈裂面基本沿加载线所在的平面开展, 侧面显示的开裂面平直、线性度较好; 随着加载速率增大, 劈裂面形态逐渐变得复杂, 侧面显示的开裂面出现局部弯折, 起伏度逐渐增大, 加载线附近局部压碎现象明显, 并出现了局部掉块现象, 说明加载速率对岩样劈裂破坏过程及劈裂面形态具有明显的影响。

在劈裂荷载作用下岩样中心点克服黏结强度首先开裂, 然后向两端加载线逐渐扩展演化成宏观劈裂面。加载速率较小时岩样内部裂纹在受拉面上有足够的扩展时间, 劈裂面形态规则。加载速率较大时应力增加速率明显快于裂纹扩展速率, 裂纹开展的突发性明显增强, 加载过程中裂纹会在应力较大的各个可能方向迅速扩展, 导致劈裂面起伏较大的不规则形态, 且在岩样劈裂面整体贯穿前, 快速增长的荷载导致加载线附近区域局部应力集中已经达到甚至超过了岩石材料的强度, 在加载线附近出现了局部压碎现象。

4 不同加载速率下岩样的能量参数分析

岩样加载破坏过程是能量积累和释放的过程,

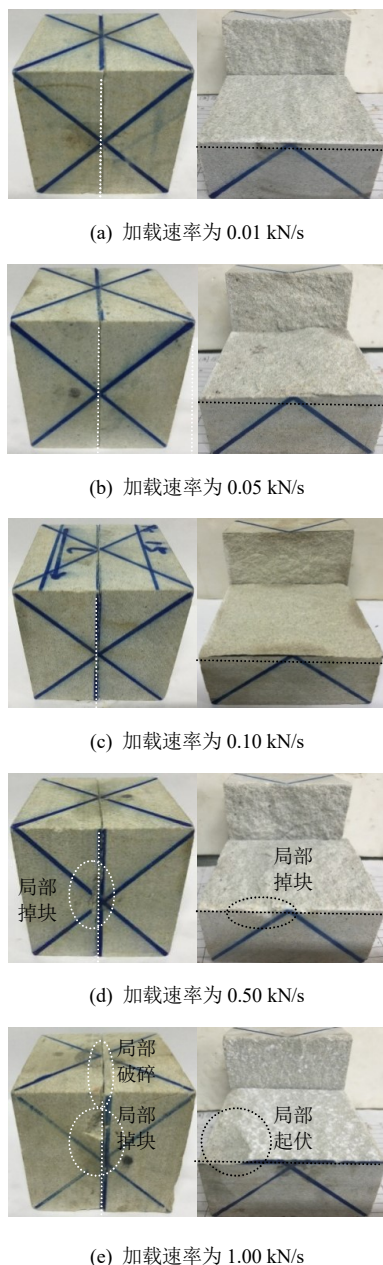


图4 不同加载速率下典型岩样劈裂破坏照片
Fig.4 Splitting failure photos of typical samples under different loading rate

以往较多学者通过能量参数的变化对不同加载速率下岩石的抗压强度变化规律进行了较好的分析解释^[5-6]。图2为不同加载速率下岩样的荷载-变形曲线。从图中曲线特征较好地反映了加载过程中能量参数的差异,本文对加载过程中岩样的能量参数进行定量统计,并对加载速率、能量参数和抗拉强度的相关性进行分析。

试验过程中试验机压头对岩样做功,一部分为积累在岩样内部的可释放的弹性变形能,另一部分用于岩样内部裂纹、损伤的发展耗散。以单位体积的岩样单元为例,轴向荷载作用下产生变形,假设

试验过程中岩样与外界没有热交换,由热力学第一定律有如下关系^[23]:

$$E=U^e+U^d \quad (2)$$

式中: E 为试验机对岩样做的功,为岩样吸收的总能量; U^e 为积累在岩样内部可释放的弹性应变能, U^d 为加载过程中岩石内部损伤、塑性变形等耗散的能量。

如图5所示,在加载作用下试验机对岩样做的功 U 为加载曲线下的面积,试样在卸载过程中释放的弹性应变能为卸载曲线下的面积,即图中的 U^e ,耗散能为加卸载曲线之间的面积,即图中 U^d ,由于本次试验中没有进行卸载过程,因而计算可释放弹性应变能 U^e 时,采用初始弹性模量近似替代卸载弹性模量进行计算^[23]。统计不同加载速率下岩样的各能量参数见表2。

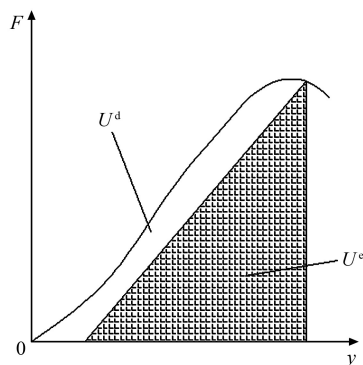


图5 加载过程中能量分配图
Fig.5 Energy distribution diagram during loading process

表2 不同加载速率下典型岩样能量参数统计
Table 2 Statistical of energy parameters of typical sample under different loading rates

加载速率 $v/(kN/s)$	总能量 $U/(N \cdot m)$	弹性应变能 $U^e/(N \cdot m)$	耗散能 $U^d/(N \cdot m)$	$\frac{U^e}{U}$	$\frac{U^d}{U}$
0.01	7.20	5.17	2.03	0.72	0.28
0.05	9.34	7.37	1.97	0.79	0.21
0.10	10.54	8.62	1.92	0.82	0.18
0.50	11.66	9.90	1.76	0.85	0.15
1.00	12.39	10.75	1.64	0.87	0.13

绘制峰值强度时岩样吸收的总能量 U 、可释放弹性应变能 U^e 、耗散能 U^d 与加载速率的关系曲线如图6所示,不同加载速率情况下总能量中弹性应变能和耗散能占的比例如图7所示。由表2和图6、7中可以看出,(1)随着加载速率增大,岩样吸收的总能量逐渐增大,加载速率 $v=0.01$ kN/s时,总能量为7.20 N·m; $v=0.05$ 、0.10、0.50、1.00 kN/s时,总能量分别增大了29.72%、46.39%、61.94%、72.08%;

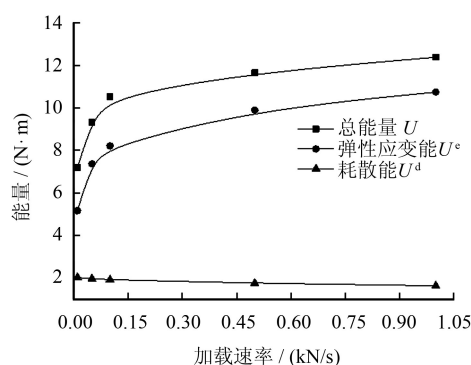


图 6 各能量参数和加载速率关系曲线

Fig.6 Relation curves between energy parameter and loading rate

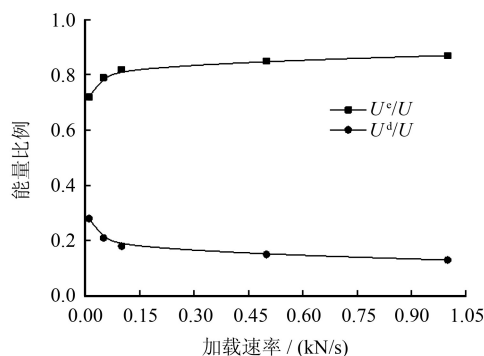


图 7 不同加载速率情况下的能量分配图

Fig.7 Energy distribution diagram under different loading rate

$v < 0.1$ kN/s 时, 岩样吸收总能量增长趋势较快; $v > 0.1$ kN/s 时, 总能量增加趋势明显趋缓, 总体呈现先陡后缓的规律, 与抗拉强度变化趋势类似。(2) 加载速率增大过程中岩样可释放的弹性应变能从 5.17 N·m 增大到 10.75 N·m, 呈现与总能量类似的变化规律, 而耗散能呈现一定的减小趋势, 从 2.03 N·m 减小到 1.64 N·m。在加载速率增大的过程中弹性应变能占总能量的比值逐渐增大, 耗散能占总能量的比值逐渐减小, 加载速率从 0.01 kN/s 增大到 1.00 kN/s 时弹性应变能所占的比例从 0.72 增大到 0.87 , 耗散能所占比例从 0.28 减小到了 0.13 。究其原因, 是由于在加载速率较小时岩样内部的损伤和裂纹得到了比较充分的发展和演化, 耗散能所占比例相对较大, 而加载速率增大, 微裂纹得不到足够的时间充分发展, 耗散能所占比例逐渐减小, 岩样内积累的弹性应变能逐渐增多, 达到峰值应力时弹性应变能的突然释放使得岩样破坏的爆发性更强, 导致岩样破坏时劈裂面更加复杂和局部破碎、掉块。

5 加载速率对砂岩劈裂抗拉强度影响机制分析

加载速率影响加载过程中的能量的总量及分

配, 对岩样劈裂面的形态特征也具有显著影响, 要比较清楚地解释加载速率对砂岩抗拉强度的影响机制, 不仅要分析能量参数与抗拉强度的相关性, 更要分析加载速率导致岩石能量参数、破坏特征差异的原因。本文针对不同加载速率下岩样劈裂破坏面的微观形貌特征参数进行定量地统计分析。

5.1 不同加载速率下岩样劈裂面微观形貌特征参数统计分析

不同加载速率下典型岩样劈裂面三维形貌照片如图 8 所示。

劈裂面微观形貌分析中采用最小二乘面作为形貌的基准面, 并运用 ST500 配套专业软件提取各微观形貌特征参数。参考以往类似研究^[24], 选取 5 个高度特征参数和 2 个纹理特征参数, 对劈裂面的微观形貌特征进行定量统计分析, 见表 3。不同加载速率下岩样劈裂面的微观形貌特征参数统计见表 4。绘制表中劈裂面微观形貌各特征参数与加载速率的相关曲线, 如图 9~10 所示。

由表 4 和图 9、10 可以看出, (1) 随着加载速率增大, 岩样劈裂面的高度特征参数和纹理特征参数逐渐增大, 呈现与抗拉强度类似的先陡后缓的变化趋势, 说明岩石的抗拉强度变化规律与其劈裂面的微观形貌特征是密切相关的; (2) 轴向加载速率从 0.1 kN/s 增大到 1.00 kN/s, 最大波峰高度 S_p 增长幅度为 55.40% , 在加载速率低于 0.10 kN/s 时增长趋势非常明显, 加载速率高于 0.10 kN/s 时, 随加载速率增加呈缓慢增大趋势。最大谷深 S_v 总体增长幅度相对较小, 为 39.03% , 增长趋势与 S_p 相似; 轮廓最大高度 S_z 总体增长幅度为 46.37% , 其增长规律为两者增长叠加。说明加载速率增大, 导致岩样劈裂面的最大波峰、最大谷深增大, 劈裂面轮廓高度明显增大; (3) 轴向加载速率从 0.1 kN/s 增大到 1.00 kN/s, 算数平均偏差 S_a 由 0.5314 增大到 0.8774 , 增大幅度达到 65.11% , 高度均方根 S_q 由 0.6931 增大到 1.0936 , 总体增大了 57.78% , 轴向加载速率由 0.01 kN/s 增加到 0.1 kN/s 时 S_a 、 S_q 的增长幅度分别为 33.21% 、 21.97% , 轴向加载速率高于 0.10 kN/s 时 S_a 、 S_q 呈缓慢增大趋势, 说明加载速率增大, 导致岩样劈裂面的表面粗糙度和波动性明显增大; (4) 轴向加载速率从 0.1 kN/s 增大到 1.00 kN/s 时, 坡度均方根 S_dq 由 0.3079 增大到 0.3357 , 增长幅度约为 9.03% , 展开界面面积比率 S_{dr} 由 4.3292 增大到 5.2591 , 增大幅度为 21.48% , 在加载速率低于 0.10 kN/s 时增长速度较快, 加载速率高

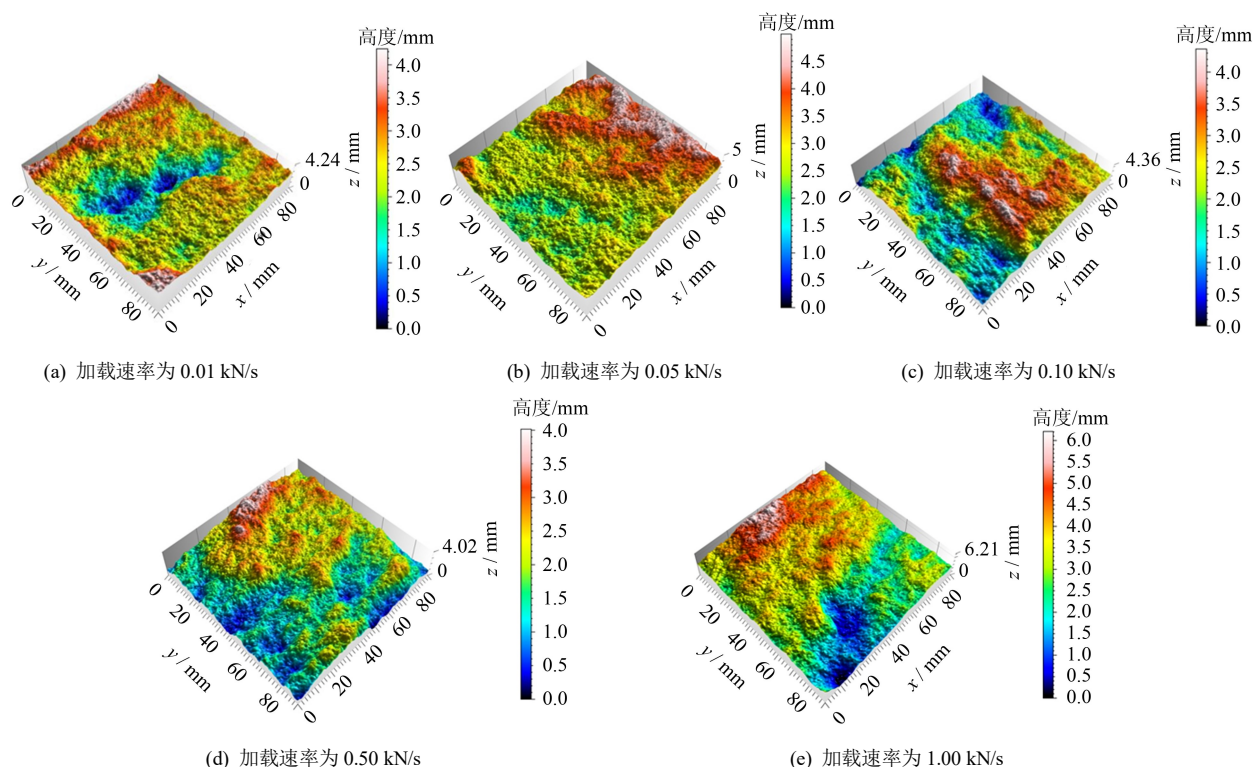


图 8 不同加载速率典型岩样劈裂面三维形貌图

Fig.8 Fracture surface photos of typical samples in three-dimension topography under different loading rates

表 3 微观形貌特征参数

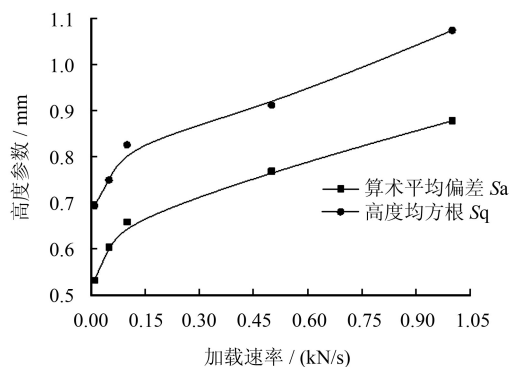
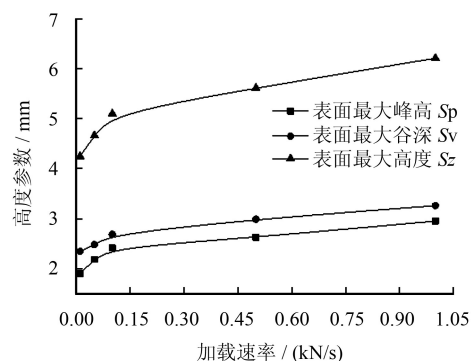
Table 3 Feature parameters of microstructure

类别	名称	表征微观形貌特征
高度特征参数	表面最大峰高 S_p	多个轮廓峰中最高点到基准面的距离
	表面最大谷深 S_v	多个轮廓峰中最低点到基准面的距离
	轮廓最大高度 S_z	轮廓最大高度 S_z 是前两者之和, 可以较好地反映扫描表面最大峰谷高度情况
	算术平均偏差 S_a	被测表面微观形貌分布高度偏离中位面的绝对平均值, 是表面粗糙程度的一个重要参数
	高度均方根 S_q	被测表面轮廓上各点到基准面距离平方和的平均值的平方根, 反映微观形貌的离散性和波动性
纹理特征参数	坡度均方根 S_dq	被测表面轮廓面一阶倒数的均方根, 与轮廓的倾斜状态、坡度值和轮廓形状有关
	展开界面面积比率 S_{dr}	反映被测表面的复杂情况, 理论上完全平整的面 S_{dr} 值为 0%, S_{dr} 值越大, 表面情况越复杂

表 4 岩样劈裂面微观形貌特征参数统计

Table 4 Statistical of surface microstructure feature parameters of rock specimen rupture surface

微观形貌特征参数	加载速率 v / (kN/s)				
	0.01	0.05	0.1	0.5	1
表面最大峰高 S_p /mm	1.899 2	2.183 1	2.414 3	2.627 7	2.951 5
表面最大谷深 S_v /mm	2.344 3	2.481 3	2.685 4	2.988 7	3.259 5
轮廓最大高度 S_z /mm	4.243 5	4.664 4	5.099 7	5.616 4	6.211 2
算术平均偏差 S_a /mm	0.531 4	0.583 7	0.707 9	0.768 2	0.877 4
高度均方根 S_q /mm	0.693 1	0.699 2	0.845 4	0.891 5	1.093 6
坡度均方根 S_dq	0.307 9	0.311 1	0.316 2	0.328 1	0.335 7
展开界面面积比 $S_{dr}/\%$	4.329 3	4.505 0	4.858 4	5.012 3	5.259 1

图 9 劈裂面高度特征参数与加载速率相关曲线
Fig.9 Correlation curves of splitting surface height feature parameters and loading rate

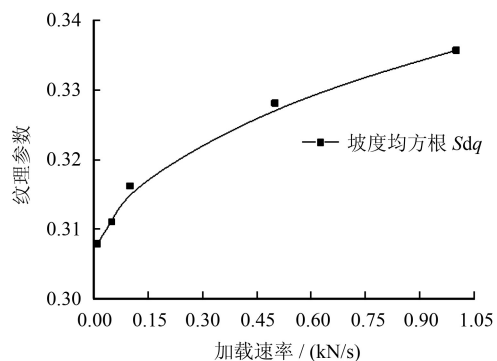
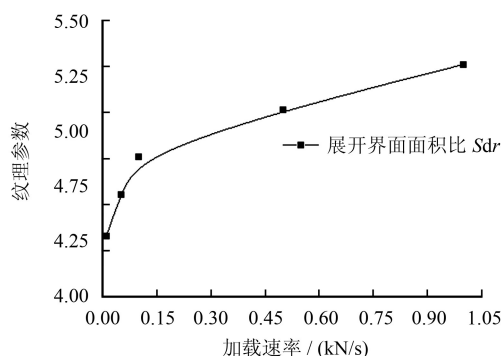
(a) Sdq 与 v 相关曲线(b) Sdr 与 v 相关曲线

图 10 劈裂面纹理特征参数与加载速率相关曲线
Fig.10 Correlation curves between splitting surface texture feature parameter and loading rate

于0.10 kN/s时 Sdq 和 Sdr 的增长趋势逐渐趋缓,说明加载速率增大,导致岩样劈裂面的表面局部坡度和起伏度明显增大,劈裂面形态更加复杂;(5)图11为轮廓最大高度 Sz 、展开界面面积比率 Sdr 与岩样抗拉强度的关系曲线。从图中可以看出,岩样劈裂面微观形貌特征参数与抗拉强度相关曲线可以用二次多项式较好拟合,这也说明了不同加载速率下岩样劈裂面的微观形貌特征变化是导致其抗拉强度差异的原因。

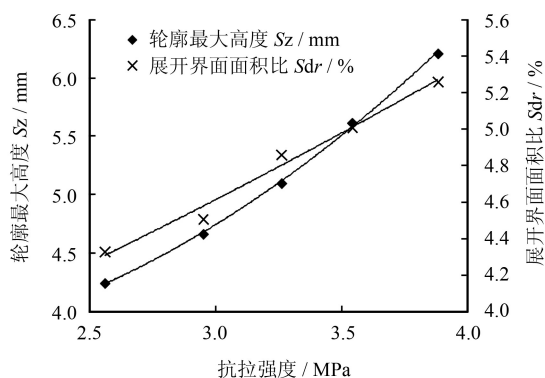


图 11 岩样劈裂面微观形貌特征参数与抗拉强度相关曲线
Fig.11 Correlation curves between rock tensile strength and splitting surface microstructure feature parameter

图12为总能量 U 、弹性能 U^e 与轮廓最大高度 Sz 、展开界面面积比 Sdr 的关系曲线。从图中可以看出,随着加载速率增大,总能量、弹性应变能与岩样劈裂面的轮廓最大高度、展开界面面积比可以用二次多项式较好的拟合,说明了能量参数的变化直接影响了岩样劈裂面微观形貌特征。

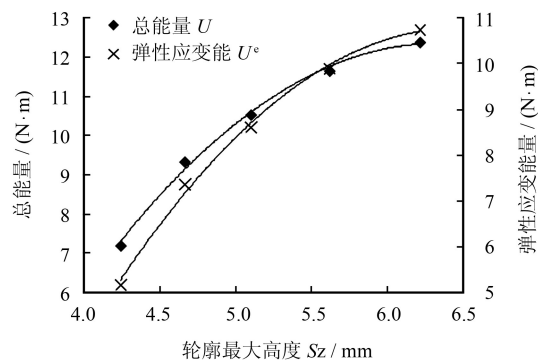
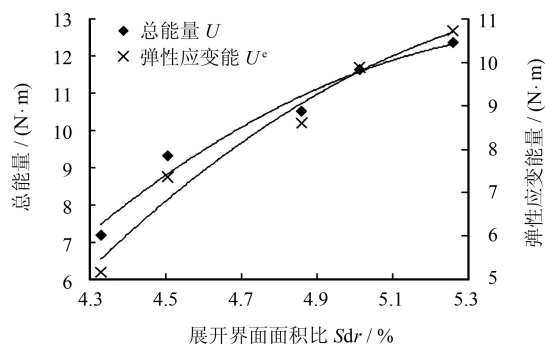
(a) 能量参数与轮廓最大高度 Sz 相关曲线(b) 能量参数与展开界面面积比 Sdr 曲线

图 12 岩样劈裂面微观形貌特征参数与能量参数相关曲线
(单位: $N \cdot m$)

Fig.12 Correlation curves between rock energy parameter and splitting surface microstructure feature parameter
(unit: $N \cdot m$)

5.2 砂岩劈裂抗拉强度加载速率影响机制分析

综合上述不同加载速率下岩样抗拉强度、破坏特征、能量参数和劈裂面微观形貌特征变化规律分析可得,加载速率首先是影响加载过程中能量的总量与分配,而能量参数的变化直接影响岩样的破坏过程及劈裂面的形貌特征,宏观上表现为抗拉强度的差异:(1)在加载速率较小(<0.10 kN/s)时,劈裂面上张拉作用导致的微裂纹发展、汇集有足够的时间,有助于诱导宏观主劈裂面的形成,因此耗散能所占比例较大,弹性应变能比例较小,对应峰值应力时岩样破坏突发性较弱,呈现一定的延性破坏特征,劈裂面的形态比较规则,粗糙度较小,对应抗拉强度较小;(2)在加载速率较大(>0.10 kN/s)时,加载至破坏时裂纹扩展形成宏观劈裂面的时间

呈数量级减小, 劈裂面上的微裂纹没有足够的扩展时间, 对宏观主劈裂面形成的诱导作用明显减弱, 因此耗散能所占比例较小, 弹性应变能所占比例较大, 对应峰值应力时岩样破坏的突发性增强, 宏观主劈裂面在短时间形成过程中, 伴生了较多次生裂纹的扩展, 从而导致劈裂面形貌特征比较复杂, 粗糙度较大, 局部破碎和掉块现象明显, 对应抗拉强度较大。

6 结 论

(1) 加载速率对砂岩劈裂抗拉强度影响显著, 砂岩的劈裂抗拉强度随着加载速率的增加而逐渐增大, 总体呈现先陡后缓的变化趋势。

(2) 随着加载速率的增大, 劈裂面由比较平直逐渐变得局部弯折, 起伏程度也逐渐增大, 加载线附近局部破碎现象。劈裂面的高度特征参数和纹理特征参数都随着加载速率的增加而逐渐增大, 并呈先陡后缓的增长趋势, 与抗拉强度的变化规律一致。

(3) 随着加载速率增大, 岩样吸收的总能量、弹性应变能逐渐增大, 总体呈现先陡后缓的规律, 与抗拉强度变化趋势类似, 但耗散能呈现一定的减小趋势。弹性应变能占总能量的比值逐渐增大, 耗散能占总能量的比值逐渐减小。

(4) 在岩石的劈裂试验过程中加载速率、能量参数、劈裂面形貌特征与抗拉强度密切相关。加载速率首先影响加载过程中能量的总量与分配, 能量参数的变化直接影响岩样的破坏过程及劈裂面的形貌特征, 最后宏观上表现为抗拉强度破坏特征的差异。

本文不同加载速率劈裂试验对应的应变速率在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ /s范围内, 属于静态(准静态)加载速率范围, 在加载速率 $v < 0.10$ kN/s时岩样抗拉强度对加载速率比较敏感, $v > 0.10$ kN/s时抗拉强度的变化趋势不再明显, 文献[15]在不同加载速率大理岩劈裂试验中也得到了类似的变化趋势, 也说明一个问题, 在静态(准静态)加载速率范围内, 根据加载过程中岩样内部能量分配与转换过程及其对强度和变形的影响, 依然存在局部范围的静、动态强度划分, 比如本文得到的加载速率 0.10 kN/s, 即一个比较明显的静、动态强度转换点。

参 考 文 献

[1] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学(第二版)[M]. 上海: 同济大

学出版社, 2015: 66—83.

SHEN Ming-rong, CHEN Jian-feng. Rock mass mechanics(second edition)[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2015: 53—54.

[2] 纪文栋, 杨春和, 姚院峰, 等. 应变加载速率对盐岩力学性能的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(12): 2507—2513.

JI Wen-dong, YANG Chun-he, YAO Yuan-feng, et al. Effects of loading strain rate on mechanical performances of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(12): 2507—2513.

[3] 潘一山, 唐治, 李忠华, 等. 不同加载速率下煤岩单轴压缩电荷感应规律研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(3): 1043—1048.

PAN Yi-shan, TANG Zhi, LI Zhong-hua, et al. Research on the charge inducing regularity of coal rock at different loading rate in uniaxial compression tests[J]. **Chinese Journal of Geophysics**, 2013, 56(3): 1043—1048.

[4] 薛东杰, 周宏伟, 王子辉, 等. 不同加载速率下煤岩采动力学响应及破坏机制[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 595—602.

XUE Dong-jie, ZHOU Hong-wei, WANG Zi-hui, et al. Failure mechanism and mining-induced mechanical properties of coal under different loading rates[J]. **Journal of China Coal Society**, 2016, 41(3): 595—602.

[5] 黄达, 黄润秋, 张永兴. 粗晶大理岩压缩力学特性的静态加载速率效应及能量机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 245—255.

HUANG Da, HUANG Run-qiu, ZHANG Yong-xing. Experimental investigations on static loading rate effects on mechanical properties and energy mechanism of coarse crystal grain marble under uniaxial compression[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(2): 245—255.

[6] 徐小丽, 陈琳, 高峰, 等. 花岗岩的加载效率效应及能量机制研究[J]. 固体力学学报, 2015, 36(2): 154—163.

XU Xiao-li, CHEN Lin, GAO Feng, et al. Studies on

- loading rate effects and energy mechanism of granite[J]. **Chinese Journal of Solid Mechanics**, 2015, 36(2): 154—163.
- [7] CHO S H, OGATA Y J, KANEKO K. Strain-rate dependency of the dynamic tensile strength of rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40(5): 763—777.
- [8] BIENIAWSKI Z T. Time-dependent behavior of fractured rock[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1970, 2(3): 123—137.
- [9] 尹小涛, 葛修润, 李春光, 等. 加载速率对岩石材料力学行为的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊 1): 2610—2615.
- YIN Xiao-tao, GE Xiu-run, LI Chun-guang, et al. Influences of loading rates on mechanical behaviors of rock materials[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Suppl.1): 2610—2615.
- [10] CRAWFORD A M, CURRAN J H. The influence of shear velocity on the frictional resistance of rock discontinuities[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1981, 18(6): 505—515.
- [11] 李海波, 冯海鹏, 刘博. 不同剪切速率下岩石节理的强度特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(12): 2435—2440.
- LI Hai-bo, FENG Hai-peng, LIU Bo. Study on strength behaviors of rock joints under different shearing deformation velocities[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(12): 2435—2440.
- [12] JAFARI M K, HOSSEINI K A, PELLET F, et al. Evaluation of shear strength of rock joints subjected to cyclic loading[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2003, 23(7): 619—630.
- [13] 郑博文, 祁生文, 詹志发, 等. 剪切速率对岩石节理强度特性的影响[J]. 地球科学与环境学报, 2015, 37(5): 102—110.
- ZHENG Bo-wen, QI Sheng-wen, ZHAN Zhi-fa, et al. Effect of shear rate on the strength characteristics of rock joints[J]. **Journal of Environment and Earth Science**, 2015, 37(5): 102—110.
- [14] 吴绵拔. 加载速率对岩石抗压和抗拉强度的影响[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(2): 97—106.
- WU Mian-ba. The effect of loading rate on the compressive and tensile strength of rocks[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(2): 97—106.
- [15] 周辉, 杨艳霜, 肖海斌, 等. 硬脆性大理岩单轴抗拉强度特性的加载速率效应研究——试验特征与机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1868—1875.
- ZHOU Hui, YANG Yan-shuang, XIAO Hai-bing, et al. Research on loading rate effect of tensile strength property of hard brittle marble—Test characteristics and mechanism[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(9): 1868—1875.
- [16] 黄润秋, 黄达. 高地应力条件下卸荷速率对锦屏大理岩力学特性影响规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 21—33.
- HUANG Run-qiu, HUANG Da. Experimental research on affectionlaws of unloading rates on mechanical properties of Jinping marble under high geostress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(1): 21—33.
- [17] MOUTHEREAU F, FILLON C, MA K F. Distribution of strain rates in the Taiwan orogenic wedge[J]. **Earth and Planetary Science Letters**, 2009, 284(3-4): 361—385.
- [18] 陈珂, 赵伏军, 张柏, 等. 不同加载速率下砂岩巴西劈裂声发射试验研究[J]. 矿业工程研究, 2015, 30(2): 37—42.
- CHEN Ke, ZHAO Fu-jun, ZHANG Bai, et al. Experimental research on acoustic emission of Brazilian split sandstone under different loading rate[J]. **Mineral Engineering Research**, 2015, 30(2): 37—42.
- [19] 中国建筑科学研究院. GB/T 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- China Academy of Building Research. GB/T 50081-2002

- Standard for tests method of mechanical properties on ordinary concrete[S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2002.
- [20] 邓华锋, 李建林, 邓成进, 等. 岩石力学试验中岩样选择和抗压强度预测方法研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3399—3403.
- DENG Hua-feng, LI Jian-lin, DENG Cheng-jin, et al. Analysis of sampling in rock mechanics test and compressive strength prediction methods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(11): 3399—3403.
- [21] 水利水电规划总院. GB/T 50266-99 工程岩体试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- Hydropower Planning and Institute. GB/T 50266-99 Standard for tests method of engineering rock masses[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [22] 长江水利委员会长江科学院. SL 264-2001 水利水电工程岩石试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission. SL 264-2001 Specifications for rock tests in water conservancy and hydroelectric engineering[S]. Beijing: China Water Power Press, 2001.
- [23] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003—3010.
- XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun, et al. Criteria for strength and structural failure of rocks Based on energy dissipation and energy release principles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(17): 3003—3010.
- [24] 陈瑜, 曹平, 蒲成志, 等. 水-岩作用对岩石表面微观形貌影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(11): 3452—3458.
- CHEN Yu, CAO Ping, PU Cheng-zhi, et al. Experimental study of effect of water-rock interaction on micro-topography of rock surface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(11): 3452—3458.

基于建造过程地基土工程特性基础设计理论和方法

著译者: 滕延京 版次: 第一版 出版时间: 2018-03 开本: 小 16 开
出版单位: 中国建筑工业出版社 标准书号: 978-7-112-21182-1

【内容简介】建筑地基基础设计理论的发展, 重要的问题是要解决采用现代分析技术的地基基础计算模型及计算参数获取的试验方法。基础建造过程, 特别对于深、大基础建造, 地基土经历卸荷再加荷过程, 地基土的工程特性因其应力历史、应力路径不同, 而表现出特殊的性质。正确认知这些特性, 并在地基基础计算分析中使用, 可以得到包括完整过程的地基基础工程行为, 这是地基基础优化设计的基础。书中重点介绍的饱和软粘土抗剪强度的试验方法与抗剪强度指标的关系、地基土回弹再压缩变形的特征及计算方法、支挡结构设计基于基坑开挖应力路径条件下地基土工程特性的试验研究等成果。工程实践证明, 采用工程地基土实际应力历史、应力路径条件下的试验确定地基基础设计参数, 分析地基基础的荷载变形过程, 得到了符合工程实际的分析结果, 进而取得了最优设计成果。

本书可供从事岩土工程勘察、设计、施工的工程技术人员, 以及科研、教学的科技工作者及大专院校师生学习参考。

【读者对象】本书可供从事岩土工程勘察、设计、施工的工程技术人员, 以及科研、教学的科技工作者及大专院校师生学习参考

【目录】第 1 章 概述 第 2 章 与建造过程相关的地基土工程特性 第 3 章 结构与地基基础荷载传递及共同作用分析方法 第 4 章 基于建造过程地基土工程特性的基础结构分析 第 5 章 基于基坑开挖过程地基土工程特性的支挡结构设计 第 6 章 基础结构分析技术发展展望 参考文献