

岩石断裂力学测试与理论研究^①

黎振兹 张静宜 刘大安 徐纪成 易建国 孙宗硕

(中南工业大学建工系, 长沙 410083)

摘 要

综合介绍了近几年来,在国家自然科学基金资助下,作者在岩石断裂力学领域内所进行的研究和所取得的部分研究成果,其中包括:试件型式, KIC 软件系统, 加工装置, 试件尺寸效应, 非线性修正, 试件与试验机匹配, 复合型断裂, 岩石试件 K_I 的三维边界元计算, 岩石动态断裂, 岩石断裂面形貌特征的分形理论研究等。

关键词: 岩石 静动态 断裂韧度 复合型断裂

近几年来,岩石断裂力学作为一门新兴的边缘学科,其理论与工程应用均取得了明显的进展。在工程应用上,具体表现在岩石破碎节能、地震预报研究、水利工程防护、流致裂开发、地质构造解释、矿块崩落条件、工程爆破设计、凿岩过程分析以及锚喷机理研究等方面;在理论研究上,主要有岩石断裂韧度的准确测定、岩石断裂机理、在任意加载下岩石的拉剪复合型断裂、岩石的压剪断裂、岩石动态断裂以及岩石断裂面的形貌研究等问题。

本文的目的是将断裂力学概念与观点引入岩石,介绍近几年来,我们在岩石断裂力学领域内所取得的部分研究成果。

1 试件加工及试验设备

1.1 适合岩石断裂试验的新试件^[1-3, 15]

鉴于岩石材料的特点,进行岩石断裂韧度试验存在两个难题—岩石试件不易预裂和预裂长度难以测量;因此,不能简单地搬用金属试件的形状与测试规范,必须采用新试件,发展新方法,根据岩石材料特性测定其断裂韧度。目前,国际上普遍采用 ISRM 建议的两种试验

方法:(1) V 型切口三弯岩芯梁试验(简称 CB 试验);(2) V 型切口短棒拉伸试验(简称 SR 试验)。进行这两种试验时,均要求连续地记录荷载(F)与位移(δ)的全过程试验曲线,并进行符合要求的反复加卸载控制,以供进行非线性修正。

1.2 ISRM KIC 软件系统^[4]

为了严格按照国际岩石力学协会(ISRM)的建议方法进行试验过程控制与数据图形处理,并快速准确提供试验研究成果,最近,我们成功地开发了岩石断裂韧度测试应用软件系统(即 ISRM KIC 软件系统),它是国家基金项目《岩石静、动态断裂韧度与压剪复合型断裂研究》中的一部分研究内容,也是为了更好地完成 ISRM 组织的岩石断裂韧度测试规范国际联合试验研究任务而做的工作之一。

ISRM KIC 系统具有以下主要功能:(1) 灵活丰富的采样与控制:能自选采样与控制信号通道,自动控制循环加卸载,自动转换控制模式,自动切换,自动与手动控制循环加卸载,试件破坏检测,峰值荷载捕捉,加载速度控制,传动器的上、下自由控制等等;(2) 多功能的数据图形处理:专用图形处理,交互式图形处理,多种多样的测试结果与曲线输出,增

① 国家自然科学基金资助项目 收稿日期:1993年10月23日

强的辅助分析,实用的外来试验曲线的输入和处理等等。

ISRM KIC 软件系统的开发,实现了采用计算机进行全部试验控制、数据采集、数据图形处理和结果分析,同时也为进行岩石断裂力学理论与试验研究提供了理想的工具。

1.3 试件加工及其装置^[1-3]

试件尺寸的加工质量直接影响测试结果的精度,而一般现有的岩样加工装置均不能满足岩石断裂试验中试件加工的需要。为了高质量地完成试件加工任务,我们自行研制了一台 MRF-1 型多功能岩样加工机。其主要功能为:具有可沿三轴方向自由移动的工作台,工作台具有俯仰角 45° 及平面内转角($\pm 180^\circ$)的调整机构;可切割任何角度的 V 型切口与斜裂纹,具有灵活的走刀机构与可调的刀架机构。特别适用于小型试件加工与特长试件的中部垂直切割与开槽,切口宽小于 1 mm。可进行平面的磨削与抛光加工,精度高(<0.25 mm),满足了各种岩样尺寸的加工要求。实践证明,该机结构合理,性能良好,使用方便,深受用户好评。

2 试验测试与分析

2.1 短棒拉伸试件的尺寸效应^[1, 13-14]

岩石短棒拉伸试件测出的断裂韧度与试件尺寸有关,具有随直径增大而上升的趋势。各种岩石材料的试验结果表明,经非线性修正后的断裂韧度 K_{SR} 值与圆盘紧凑拉伸试验(满足 ASTM E399 标准)结果符合的相当好,且基本上和试件尺寸无关。这充分证明了短棒试件的有效性。

2.2 关于岩芯梁试验^[1, 5, 8, 15]

在国家基金项目和国际联合试验研究中,通过对岩芯梁与短棒拉伸试验结果的比较,我们发现, F_{max} (峰值荷载)、 K_{CB} 与 K_{SR} 彼此较为接近,但经非线性修正后的 K_{CB} 与 K_{SR} 值则相差较大,这分别说明了 ISRM 建议方法的成功与不足之处。然而,要着重指出的是,对于花

岗岩试件,一般有 K_{CB} 小于 K_{SR} ;而对于凝灰岩试件则相反,一般有 K_{CB} 大于 K_{SR} 。由此可见,造成岩芯梁与短棒试验结果存在差别的原因,不仅和试件形式以及材料性质有关,也和非线性修正方法中 F_c 值的确定有关。对于短棒试件一般有 K_{CB} 大于 K_{SR} ;但对于花岗岩三弯试件, K_{CB} 反而低于 K_{CB} ,这种情况的出现,我们认为是不合理的,可能和 F_c (计算点荷载)值过于偏低有关,究竟应该如何来确定 F_c ,尚待作进一步探讨。

2.3 试件与试验设备的匹配^[1]

研究指出,在相同材料的情况下, V 型切口试件的刚度比直切口试件为小,因此,采用 V 型切口试件更便于在普通材料试验机上进行试验,从而获得全过程曲线。但由于试验机的拉伸试验刚度小于其压缩试验刚度,故采用带 V 型切口的三弯圆形梁试件更为有利。

3 讨 论

3.1 大理岩拉剪与压剪断裂试验及理论研究^[7, 9, 11-12]

在综合现有的十余个复合型准则和我们用三种大理岩试件测得 79 个实验点的基础上,建立了一个适用于岩石的新复合型脆断准则即等效周向应变准则,该准则将 K_{IC} 与 K_{Ic} 值放在同等地位来考虑。试验结果表明,新准则也适用于混凝土材料。此外,还提出了两个适用于脆性岩石的经验准则,并在试验中得到一些规律性的结果(如 K_I-K_{II} 间呈线性关系,裂纹张开角的变化等等)。

3.2 V 型切口岩石矩形梁试件应力强度因子的三维边界元计算^[10]

综合 ISRM 建议方法中的 V 型切口岩芯梁试件与国内常采用的矩形梁直切口试件,我们建议了一种 V 型切口矩形梁试件;矩形梁在金属中广泛使用,因此,将它用于岩石中有利于迅速推广。但由于 V 型切口的三维性,且具有折角边界,难以用解析法寻求 K_I 的闭合解,必须借助于数值解法。边界元法是近十余年发展

起来的一种数值方法,将该法用于解三维V型切口矩形梁试件尚未见报导,为此,我们对这类试件的 K_I 进行了三维边界元法计算;由于三弯梁试件的对称性,仅在一半试件上划分172个常单元,在V型切口前缘采用密布单元,运用裂纹尖端的位移场公式,对6种岩样的切口扩展状态下的 K_I 值进行了探索性计算,从而获得了新试件 K_I 与 a/w 的计算机拟合的近似关系式。程序的调试与计算是在我校计算中心SIMMENS7570C计算机上进行的。

3.3 岩石的动态断裂^[2, 6, 11]

准确测定岩石动态断裂韧度是一项难度较大的基础性工作。目前,岩石动态断裂韧度尚无统一的标准测试方法,因此,使用各类试件和不同测试方法所得到的为数极少的结果报导不能进行比较。为了发展岩石断裂动力学以及这门新学科在采矿、爆破与地震等许多工程部门中的应用,我们运用最新开发的KID程序,在Instron高级材料试验机上,进行了岩石动态断裂试验与理论研究;结果表明,在试验机的最高加载速度下,试件的动态加载速度可接近 $10^3 \text{ MPa m}^{1/2} \text{ s}^{-1}$,裂纹扩展速度达 10 m/s ,岩石动态断裂韧度高于静态断裂韧度,且动态复合型试验结果和我们新近提出的歪应变能动态复合型脆断准则基本符合。

3.4 岩石不规则断裂面的形貌研究^[6]

岩石的宏观断裂、裂纹与节理的扩展和分叉,均与岩石内晶格大小、内部缺陷以及微裂纹等有关。实验表明,岩石断裂韧度和岩石断裂面的形貌有关。分形理论是研究不规则现象的重要而有效的数学工具。用分形理论研究岩石不规则断裂面的形貌特征,从而研究它与岩石断裂韧度、亚临界裂纹扩展速度等断裂力学参数的内在联系,对完善岩石断裂力学理论与测试手段以及深入研究岩石断裂机理具有重要理论意义和实用价值。

在这一方面,我们获得的主要研究成果有:(1)全面而深入地开展了岩石节理形貌学的研究,并将研究结果与节理力学联系起来,提出了含波纹节理闭合模型与有关节理剪切强

度公式;(2)应用节理形貌参数,对不同力学成因的节理表面进行了系统对比分析,得到了张节理与剪节理在基本形貌参数方面的差异,这将对贯穿节理的节理力学参数的估计、节理断裂损伤等方面的研究均有重要的参考价值;(3)揭示了硬岩和中硬岩节理非线性闭合变形的规律与特点;(4)开发了一批有实用价值的软件,以便使理论研究用于岩体力学、水利工程和工程地质等学科中。

4 结束语

岩石断裂是一个极其复杂的过程,涉及的内容非常广泛;岩石断裂的机理也会因不同的荷载与环境而表现不同,对它的认识只能是一个逐渐深化的过程,永远不会停留在一个水平上。目前,我们正在开展第三个国家自然科学基金项目《岩石Ⅱ型断裂及其真复合型断裂的研究》,要注意在更广泛的实验应用中采用新兴学科的理论成果,这是当前国际岩石断裂力学工作的特色。此外,揭示出更多的岩石断裂机理,是今后岩石断裂力学工作的主攻方向。为了开拓更广阔的应用前景,进一步缩小理论与实践之间的差距,今后的发展方向将是:(1)岩石断裂机理探讨;(2)岩石断裂过程及其非线性分析;(3)在裂纹面闭合情况下岩石压剪断裂的研究;(4)岩石动态断裂及其快速裂纹扩展;(5)岩石在各种介质中的亚临界裂纹扩展;(6)天然大尺寸岩体的断裂分析等。

参考文献

- 1 孙宗颀,黎振兹等.岩石断裂韧度与复合型断裂的研究,国家自然科学基金项目研究报告,(84)科基地准字第003号.
- 2 孙宗颀,黎振兹等.岩石静态断裂韧度与压剪复合型断裂的研究,国家自然科学基金项目研究报告,(88)地4880136.
- 3 孙宗颀,黎振兹等.岩石Ⅱ型断裂及其真复合型断裂规律的研究,国家自然科学基金项目研究报告,(92)地49272151.
- 4 刘大安等.中南矿冶学院学报,增刊3,102—109.

- 5 Sun Zongqi *et al.* Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr 1986, 23(6).
- 6 Li Zhenzi *et al.* Elsevier Applied Science Publisher, London U. K. 1989.
- 7 Li Zhenzi *et al.* In: Proc of the Int Sym on Modern Mining Technology, 1988, 10.
- 8 黎振兹等. 见: 岩石断裂韧度及其非线性修正, 南宁广西科技出版社, 1991.
- 9 黎立云. 四弯试件 K_{Ic} 、 K_{IIc} 的简便计算方法, 1989, (9), 54—59.
- 10 戴松涛, 黎振兹. 第四届岩石、混凝土等工程材料学术会论文集, 1989. 10.
- 11 黎振兹编著. 见: 工程断裂力学基础, 长沙: 中南工业大学出版社, 1990. 1.
- 12 Li Liyun, Li Zhenai. Int Conf Advanced Experimental Mechanics, 1988.
- 13 Wei Yupu *et al.* Int Conf on Rock & Concrete Fracture, Houston, U S A, 1987, 6: 17—19.
- 14 Li Chunlin *et al.* Int J Rock Mech Min Sci & Geo Abstr.
- 15 孙宗顺. 见: 岩石和混凝土断裂力学, 长沙: 中南工业大学出版社, 1991, 437—482.
- 16 夏才初, 孙宗顺等. 中南矿冶学院学报, 1991. 增刊 3. 95—100.

• 产品广告 •

株洲冶炼厂向国内广大用户 推荐“火炬牌”系列产品



火炬牌

锌锭、铅锭、电解铜、镉锭、铋锭、镉锭、金、银、碲、热镀锌合金锭、铸造锌合金锭、锌基稀土合金、电池锌饼、锌粉、电缆护套铅锭、铅钙合金锭、铅砷合金锭、氧化钴、二氧化硒、硫酸铜

厂址: 湖南省株洲市清水塘

联系电话: (0733)391240

邮码: 412004

传真: (0733)391244、391303