



核形石灰岩单轴压裂试验设计和 裂纹演化特征

宋德朋

(江苏省南京工程高等职业学校 资源环境工程系, 南京 211135)

摘要: 船山组核形石灰岩是广泛分布于长江中下游及东南沿海各省的重要建筑材料。该文结合断裂力学理论, 通过偏光显微镜观察和扫描电镜研究, 探讨核形石灰岩在张应力作用下, 微裂纹扩展形成宏观破裂的过程。研究显示, 核形石颗粒界面、次生孔隙、粒间孔隙等处存在微裂纹, 微裂纹扩展需要消耗能量, 当裂纹扩至核形石附近时, 有绕过核形石或穿过核形石扩展两种不同的路径, 主要取决于核形石纹层类型、结构致密度、颗粒大小等结构因素。

关键词: 核形石灰岩; 单轴压裂试验; 裂纹演化; 破裂机制

中图分类号: P583

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230569

Uniaxial Fracturing Test and Crack Evolution Characteristics of the Oncolitic Limestone

SONG Depeng

(Department of Resources and Environment Engineering, Jiangsu Nanjing Engineering Vocational College, Nanjing 211135, China)

Abstract: The oncolitic limestone of Chuanshan Formation is an important building material widely distributed in the middle and lower reaches of the Yangtze River and southeastern coastal provinces. Based on the theory of fracture mechanics, this paper discusses the process of micro-crack propagation and macro-fracture of nuclear limestone under tensile stress by polarized light microscope and scanning electron microscope. Studies have shown that there are microcracks at the interface of oncolite particles, secondary pores, intergranular pores, etc., and micro-crack propagation needs to consume energy. When the crack expands near the oncoids, there are two different paths to bypass the oncoids or pass through the oncoids, which mainly depends on the structural factors such as the type of oncoids, structural density, and particle size.

Key words: oncolitic limestone; uniaxial fracturing test; crack evolution; fracture mechanics

工程建设中的岩石破裂规律研究一直是岩石力学领域关注的热点, 影响岩石破裂的因素很多, 除岩石所处的围压、温度、溶液、应力作用时间等外在因素外, 主要取决于岩石本身的成分、结构、构造等内在因素^[1]。对沉积岩材料来说, 沉积特征和沉积环境决定了岩石的物质组分和结构构造, 对沉积岩力学性质起着决定性的作用。

建筑材料的承载能力关乎地基基础和墙体的质量好坏, 因此岩石抗压强度和破裂规律的研究

一直是工程界关注的问题。扬子地层区上石炭统船山组核形石灰岩是广泛分布于长江中下游及东南沿海各省的重要建筑材料, 目前有关核形石灰岩力学性质的研究较少, 但部分学者针对岩石结构与力学性质关系的研究值得关注。文献 [2] 基于显微镜下对陆源碎屑岩的碎屑成分、颗粒粒径、胶结类型的定量统计, 建立了微观结构和宏观力学性质间的定量关系; 文献 [3] 对岩石裂纹扩展和破坏机理进行了理论分析, 得出射流水楔作用是岩石裂纹产生、扩展、贯通的重要方式; 文献 [4]

收稿日期: 2023-11-29; 修回日期: 2024-03-30

基金项目: 中国职业技术教育学会 2023 年度分支机构科研课题(ZJ2023B089); 中国陶行知研究会“十四五”规划课题(ztzj202340053)。

作者简介: 宋德朋(1983-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事矿物学、岩石学等方面的教学和研究。E-mail: 382084272@qq.com

在模拟试验条件下考察了矿物颗粒大小对材料力学性质的影响，发现大颗粒具有明显的增强特性，有阻止裂纹扩展的作用，且随着颗粒半径的增加趋势越明显；文献 [5] 研究了东河口滑坡体的岩石微观结构和宏观力学性质的关系，发现结构稳定性差的岩石容易发生碎裂破坏。不过，由于岩石颗粒结构、填隙物类型、孔隙发育等存在复杂变化，造成不同岩石力学性质存在较大差异，这给研究工作带来很大困难。近年来随着扫描电镜、高分辨率 CT 等技术的推广，岩石微观结构对宏观性质影响的研究取得了不少有价值的成果^[6-8]。虽然人们很早就认识到岩石的受力破坏主要受到岩石成分和结构的控制，但从岩石学的角度开展岩石破裂过程的研究，特别是核形石结构破裂过程的研究还很少，本文选择核形石这一碳酸盐岩的重要颗粒类型作为研究对象，在对核形石灰岩的岩石特征进行显微镜下观察的基础上，通过岩石单轴压裂试验的设计，从沉积学角度探讨核形石结构对岩石压裂过程的影响，对岩石抗压强度和破裂规律的研究有重要意义。

1 样品和试验方法

在工程施工中选择符合设计强度的材料是确保施工质量的关键，根据《砌体结构设计规范》(GB 50003—2001)，天然石材强度一般根据边长 70 mm 立方体试件的抗压强度表示，取 3 个试件抗压强度的平均值^[9]。本次试验所用的灰岩样品采自安徽巢湖凤凰山东南坡船山组上部核形石灰岩层，主要为亮晶核形石颗粒灰岩、含生屑核形石颗粒灰岩、含核形石生物屑泥粒灰岩等；所用的微晶灰岩样品采自南京孔山西北坡船山组中部，在采集、运输和制备过程中均做到小心保管，避免操作原因产生新的裂隙和损伤。

岩石力学特征的不均匀性决定了岩石力学试验具有离散性大的特点，因此单个岩石的抗压试验结果不能反映岩体的实际情况，依据《工程岩体试验方法标准》(GB/T 50266—2013)的规定：“同一含水状态下每组试验试件的数量不应少于 3 个”，本试验基于这个标准来确定样品数量。岩石样品在南京大学切片室切割加工为边长 50 mm 的立方体岩块(以下简称岩样)，所有岩样分为 4 组 12 件，岩样都切有对应的岩石薄片，进行偏光显微镜下观察，然后在实验室对岩样进行单轴

压裂试验。

岩石单轴压裂试验采用南京大学土力学实验室的 TYA-2000 型电液式压力试验机进行，如图 1 所示，试验依照《工程岩体试验方法标准》规定操作，对岩样进行抗压强度试验时，以 0.5~1.0 Mpa/s 的速度加荷直至破坏，记录加载过程中出现的现象并拍照。

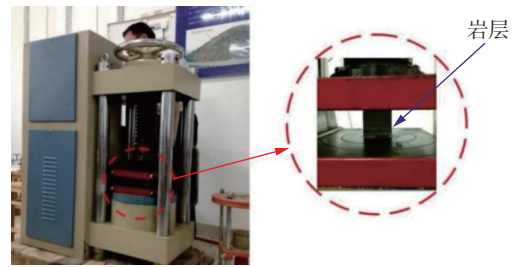


图 1 岩样单轴压裂试验装置图

2 试验结果和分析

单轴压缩试验只能取得破坏的最终形态，试验过程中颗粒的变化以及实际变形过程是无法看到的，因此需要通过观察岩样压裂试验后裂纹产生和扩展的规律，分析核形石与裂纹的联系，探讨岩石破裂机制。

岩石的宏观破裂有张裂和剪裂两种方式，在单轴压裂试验中，岩石在一个方向上受压并在此方向缩短，在与主压应力垂直方向的横向上应当伸长(泊松效应)，当岩石横向伸长超过一定限度时，根据最大线应变理论，岩石便发生开裂^[10]。岩样单轴压裂试验后的主要破裂方式包括以下 3 种，如图 2 所示。

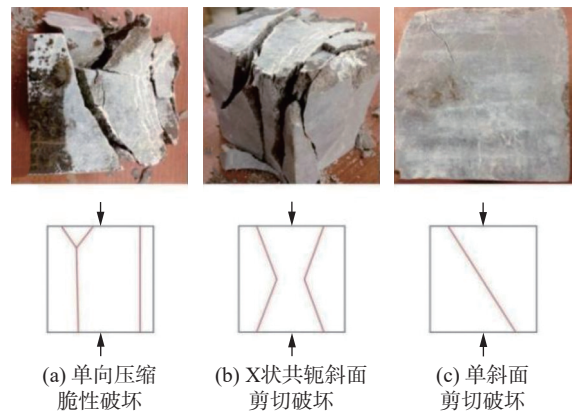


图 2 岩样抗压破裂特征

1) 单向压缩脆性破坏。岩样发生与最大压应力方向基本平行的张破裂，应力-应变曲线基本保

持线性,表示破裂前基本没有出现永久变形。

2) X状共轭斜面剪切破坏。岩样在破裂时先后出现与最大压应力成一定夹角(一般小于 45°)的剪破裂和平行于最大压应力方向的张破裂,断裂前有少量永久变形,但其应力-应变曲线没有明显的屈服或流动现象。

3) 单斜面剪切破坏。岩样与最大压应力方向成一定角度(一般小于 45°)发生单一的剪破裂,其应力-应变曲线有下降段,在达到最大应力之前有较明显的永久变形发生^[11]。

笔者通过绘制若干岩样表面核形石与裂纹分布关系的照片素描图和轮廓示意图,如图3所

示,从形态分布上找到核形石对压裂过程影响的规律性,并将核形石对裂纹扩展可能的影响分为以下3种类型:

- 1) 裂纹绕过核形石;
- 2) 裂纹穿过核形石;
- 3) 裂纹进入并消失于核形石核心。

在单轴压裂试验中,岩石以张裂为主^[12],根据核形石和裂纹的轮廓分布(图3),裂纹经过核形石多数绕过或者沿着核形石排列方向延伸,符合张裂纹扩展规律;不过有时裂纹穿过核形石继续延伸或在核形石内部消失,对此需要通过观察核形石内部结构特征来解释。

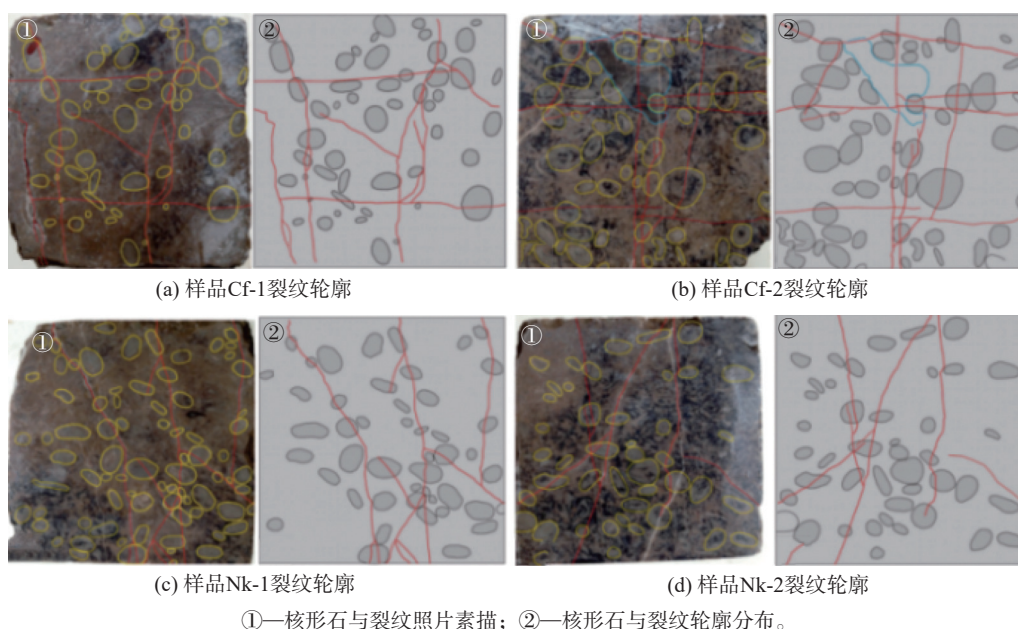


图3 核形石与单轴压裂纹分布图

3 核形石及裂纹的镜下特征

核形石是由包壳和核心组成的碳酸盐包粒,包壳围绕核心呈纹层状分布,在野外可肉眼观察到深浅不同的包壳纹层,但显微结构的研究需要借助偏光显微镜。

3.1 核形石纹层类型

根据包壳组分中是否有钙质骨骼、微生物群的差别等,将纹层分为藻泥粘结纹层、泥晶纹层、钙质藻纹层以及含有孔虫等微生物纹层4种类型,如图4所示。

1) 藻泥粘结纹层(图4(a)~图4(b))。由非骨架藻类丝状体分泌粘液,捕获和粘结碳酸盐灰泥形成,这类藻丝体不具有固定形态,不

能形成有内部显微结构的钙质硬体,仅以藻类遗迹形式出现(称“隐藻”)。藻泥粘结纹层的藻、屑分层富集,纹层亮暗相间,其中暗层为富藻纹层,富有机质,亮层为富屑纹层,为颗粒稍粗的泥晶或微亮晶,二者呈叠层状产出。

2) 泥晶纹层(图4(e)~图4(h))。由泥晶方解石组成,通常认为是藻丝体或微生物泥晶化作用形成的。泥晶纹层在手标本上为浅色,透射光下为暗色,外形圆滑规整,似鲕粒,厚度从几十 μm 到约 $500\mu\text{m}$ 间,仅有泥晶纹层时厚度可达 $1\sim 2\text{mm}$,纹层没有明显亮暗变化。

3) 钙质藻纹层(图4(i)~图4(l))。由多方向弯曲缠绕的钙质藻丝组成,缺乏明显的纹层构造,

藻纹层在手标本上呈深色，透射光下呈黑色、实心丝状体，隐粒结构，藻管在核形石边缘隐约可见，并蔓延到核形石内部。

4) 含微生物纹层(图 4(e)白色箭头处)。由有孔虫等微生物分泌粘液粘结灰泥而成，镜下可观察到明显的生物结构，纹层中能识别的除有孔虫外，还包括苔藓虫、其他不知名生物等，厚度一

般为 0.1~0.2 mm。

核形石通常由一种或几种纹层类型组成包壳，并形成不同层数的组合，如葛万藻-泥晶组合、有孔虫-泥晶组合等，包壳层数反映核形石生长时间的长短，也意味着控制微生物活动的环境变量的差别，如从安静环境(藻泥粘结交层)到高能环境(泥晶纹层)。

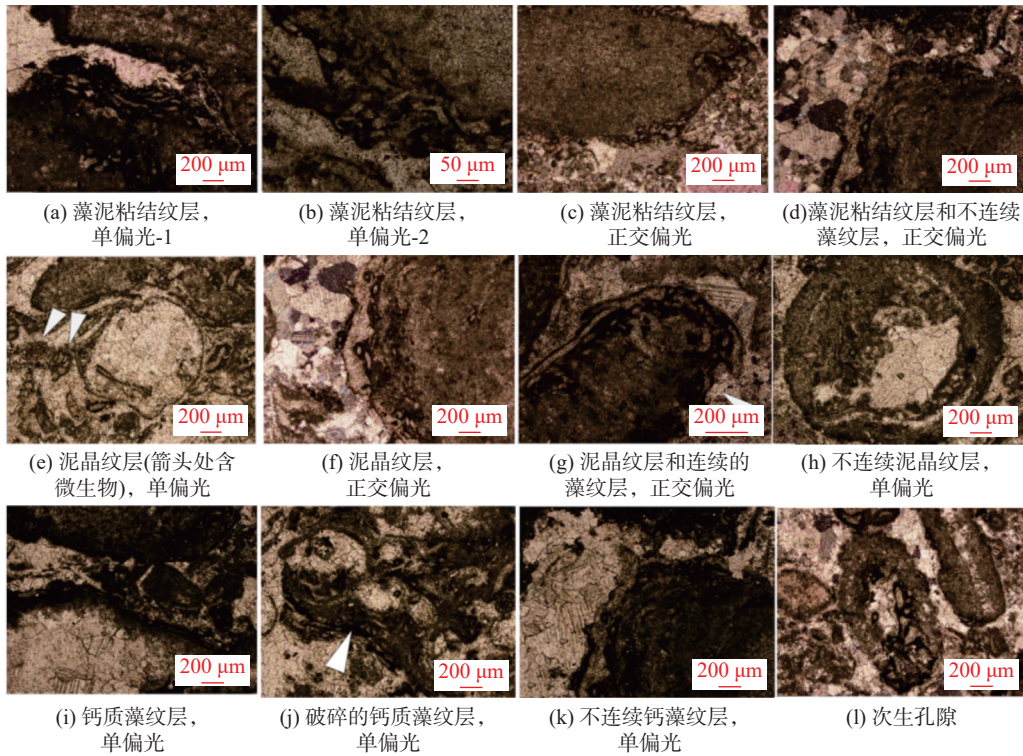


图 4 核形石纹层类型图

3.2 核形石显微结构

核形石具有围绕核心生长的明暗相间的同心纹层，不同分类的藻丝体或松散或紧凑地相互缠绕，形成形态各异的网格状或海绵状微观结构，这些结构是受到不同环境因素、不同生物种群影响形成的。

连续状纹层反映核形石在水中悬浮、自由生长状态，往往呈同心圆状纹层(图 5(a))，形成于水动力条件较强，有风浪持续搅动的环境；不连续状纹层反映核形石固着水底或有间断生长状态，不同纹层间有互相叠覆、包裹现象(图 5(b)和图 5(c))，形成于水动力条件相对较弱的环境^[13]。

核形石纹层有连续状(如图 4(g))和不连续状(如图 4(h)和图 4(k))两类，反映出核形石不同的生长状态。

核形石在后期受到波浪、潮汐等水流作用冲

刷、磨蚀，核形石纹层甚至核心内部结构遭到破坏，导致纹层不完整，甚至破碎(图 4(j))。破碎的核形石可以留在基质中，或者作为核心继续生长出纹层，形成新的核形石。

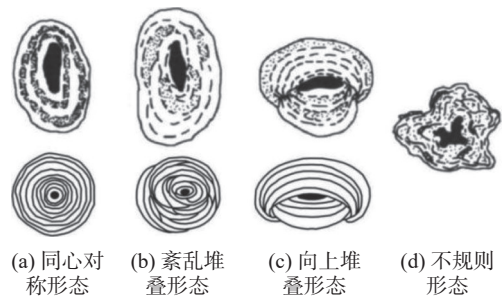


图 5 核形石形态和生长模式(据文献 [13] 改绘)

3.3 核形石与裂纹关系

在岩石压裂试验后，选择了破裂岩样的碎块切薄片，观察镜下特征，如图 6 所示。压裂产生

的新裂纹(以下简称裂纹)与原生裂隙的镜下区别在于未被方解石脉充填,磨片时被树胶填充。镜下岩石薄片的观察结果显示,核形石和裂纹的镜下特征与第2节关于核形石和裂纹的形态分布特征的观察和素描是吻合的。

1) 裂纹经过纹层完整致密且以泥晶为主的核形石时(图6(a)和图6(b))都是绕过核形石继续延伸的,可以看出该类型核形石同心纹层发育明显,并且以藻泥粘结纹层为主,成分主要为泥晶方解石和隐粒结构藻丝体,基本没有重结晶现象出现。裂纹经过该类型核形石时,不易穿过核形石进入内部,同时由于核形石壳层与充填物之间存在微裂隙,裂纹往往沿核形石界面扩展延伸。

2) 裂纹经过次生孔隙发育的核形石时(如图6(c)~图6(e))易穿过核形石,核形石内部有方解石重结晶现象,裂隙脉发育(图6(c)),纹层以钙质藻管纹层为主。该类型核形石或者纹层本身不连续状生长,或者存在原生裂隙或次生溶蚀孔隙,或者后期搅动过程中被风浪、潮汐等机械破坏,裂纹很容易通过裂隙或缺陷延伸进入核形石内部。

3) 裂纹在基质中的扩展基本沿着亮晶颗粒的间隙延伸(图6(f)),由于方解石晶体具有3组完全解理,有时遇到较大颗粒,裂纹也会沿着平整的解理面扩展(图中箭头处),解理面一般平行于面网间距最大、面网密度最大的晶面,也是晶体内部的明显薄弱面。

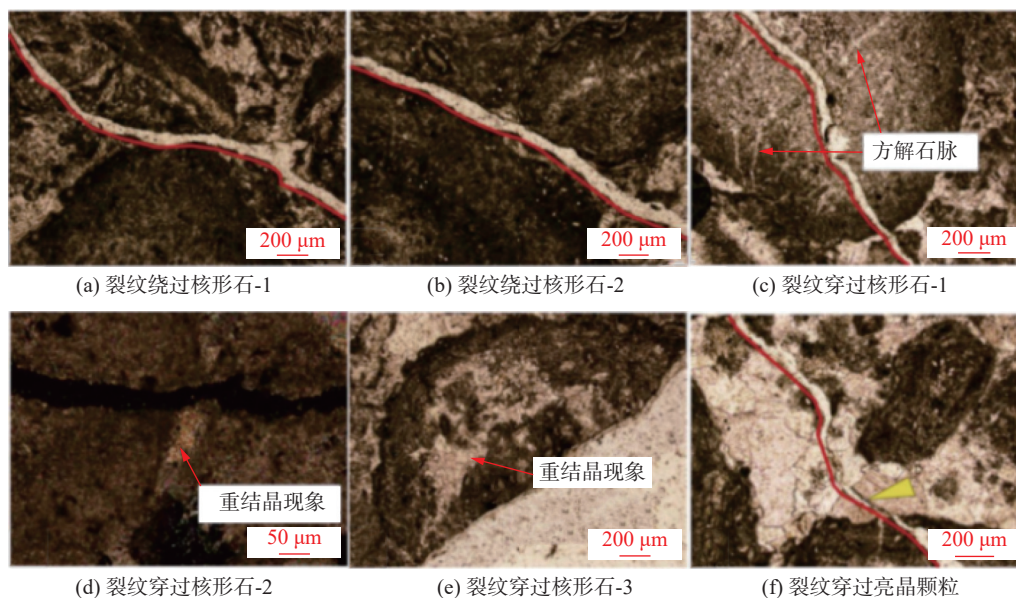


图6 裂纹经过核形石的几种情况

4 核形石破裂面扫描电镜观察

灰岩单轴压裂试验后,选择部分破裂岩样的碎块进行了扫描电镜的观察,以了解岩石中核形石的显微结构及其他微裂隙对裂纹扩展的影响,主要分为以下3种情形。

4.1 裂纹绕过核形石

核形石完整,呈球状或椭球状,核形石与基质为结晶程度明显不同的方解石晶体,其中基质为细小等粒的微晶方解石颗粒,核形石包壳规整连续,属颗粒不可见的隐粒结构(隐藻或泥晶化纹层)。岩石沿核形石和基质的接触边缘发生破裂,使核形石包壳界面完整出现在岩石开裂面,如图7所示。

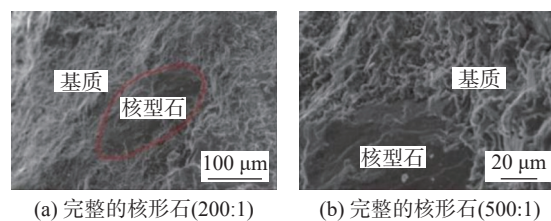


图7 裂纹绕过核形石

4.2 裂纹穿过核形石

核形石包壳已剥落,核心暴露在破裂面上,即岩石沿着纹层和核心的微裂隙发生破裂,如图8所示,核形石和基质均为粒状微晶方解石(重结晶现象),隐约可见椭球状、同心环状结构的核形石形态,可判断是岩石破裂剥开的核形石,即裂纹穿过核形石形成破裂面。

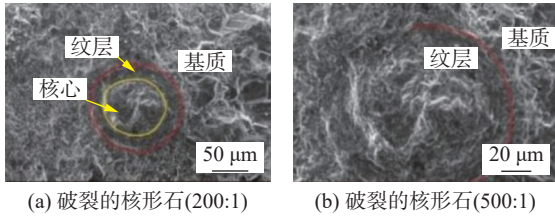


图 8 裂纹穿过核形石

4.3 裂纹在基质中扩展

核形石灰岩的基质主要为细小的等粒微晶方解石，微晶方解石晶粒之间存在微裂隙，裂纹在基质中主要沿微裂隙延伸。方解石晶体具有 3 组完全解理，在应力作用下很容易沿着解理面破碎成平行六面体小块，有时会在受力方向出现不沿着解理面的不规则裂开，如图 9 所示。

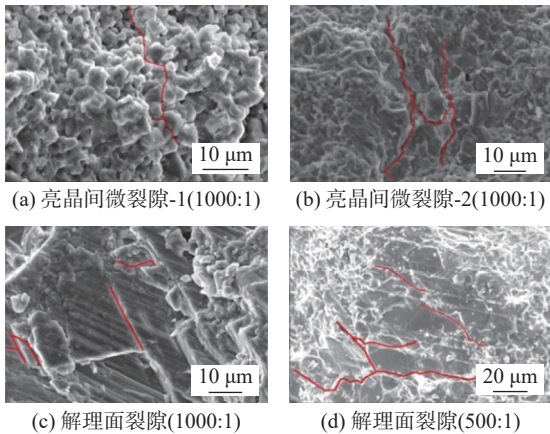


图 9 裂纹在基质中延伸

5 岩石破裂机制讨论

有关岩石破裂机制的基本原理是从材料力学的断裂理论引进的，下面结合断裂理论的研究和试验结果，讨论核形石灰岩单轴压裂的破裂机制。

5.1 从变形到发生破裂的过程

文献 [14] 将压缩条件下脆性材料宏观破裂前的应力-应变行为分为 4 个阶段：

- 1) “下弯”阶段；
- 2) 近乎理想的线弹性阶段；
- 3) 微破裂及扩容的发展阶段(包括微裂纹的稳定发展)；
- 4) 微裂纹的不稳定发展阶段，因局部弱而导致某个宏观破裂的增长。

这个理论经 Brace、Paulaing、Scholz 详细阐述，目前已被广泛接受。

岩石载荷-位移以及物理性质变化曲线显示，

核形石灰岩从受力变形到破裂的过程为以下 4 个阶段，如图 10 所示。

1) I 阶段称为孔隙压缩阶段，岩样体积压缩，波速和电阻率增加，声发射频度和渗透性下降，表示岩样内核形石与基质紧密接触，孔隙和微裂隙被压实。

2) II 阶段称为弹性变形阶段，岩样体积、波速、电阻率、声发射频度和渗透性变化不大，岩样应力-应变曲线近似一条直线。

3) III 阶段为微裂纹开始萌生和扩展阶段，岩样体积开始膨胀，声发射频度和渗透性显著上升，随着应力增长，微裂纹扩展速度很快，形成主裂纹，并将继续到峰值应力以后的第 IV 阶段。

4) IV 阶段以微裂纹明显局部化开始为起点，为体积急剧膨胀的阶段，张应力开始集中于局部薄弱点(原生裂隙、次生溶蚀、粒间孔隙等)，微破裂从某一局部弱点开始直至发生宏观破裂，这时岩样瞬间破裂，岩屑飞溅，并伴有响声。

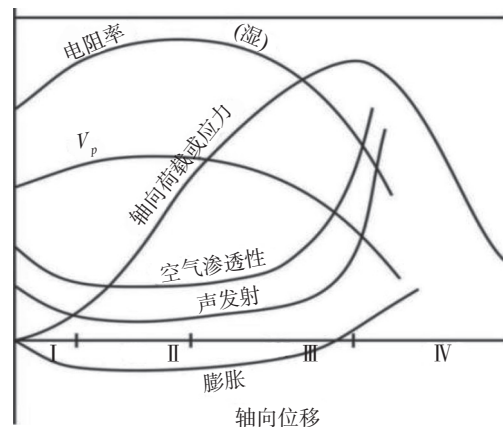


图 10 岩样载荷-位移曲线

5.2 裂纹形成和扩展过程分析

核形石灰岩有着颗粒、填隙物、孔隙等复杂内部结构，颗粒本身有粒径大小、排列方式、接触关系以及内部显微结构的差异，填隙物则有亮晶、泥晶、生屑等不同成分以及结晶程度的差异，这些结构差异使岩石不同组分间以及组分内部存在大量的微裂纹，影响岩石的破裂过程。

文献 [15] 提出固体和液体一样，其界面具有表面张力，因而有相应的势能，根据参数计算，平面裂纹的表面应变能为：

$$W = \pi a^2 P^2 / E \tag{1}$$

式中： a 为裂纹半长， P 为垂直裂纹方向的外加张应力， E 为该物体弹性模量。

文献 [15] 认为材料内部有很多微裂纹存在,脆性物质的强度受控于物质内部最初存在的微裂纹,当出现新的界面条件,就会形成新的自由表面,并具有相应表面张力,从而增加表面能,而这一裂纹释放出的应变能 W 的一部分又可转化成表面张力 T 。当外加张应力 P 达到临界值 P_c 时,导致固体的脆性破裂,此时 $P_c = \sqrt{2ET/\pi a}$,表明临界值 P_c 和 T 成正比,和裂纹半长 a 成反比。裂纹延长(a 增大),裂纹继续延长所需的 P_c 就小了,因此在张应力不变的情况下,裂纹持续扩展下去成为宏观裂面^[16]。

由于核形石内部微裂隙的大量存在,裂纹主要沿原生微裂隙发展,在施加张应力 P 的情况下,微裂隙最大表面张力从某一局部弱点出现,围绕着微裂隙的端点张应力集中,形成最早的张破裂^[17]。

裂纹扩展需要消耗能量,当裂纹发展至核形石附近时,无论绕过或穿过核形石颗粒扩展,都扩大裂纹表面能,从而消耗更多能量。不同扩展路径主要取决于消耗能量的高低,如岩石结构致密度、颗粒大小、填隙物成分等因素。核形石以泥晶等致密组分为主时,裂纹较易绕过;核形石纹层不完整,或方解石重结晶出现次生孔隙,则裂纹较易穿过。裂纹扩展路径与核形石颗粒大小也有关系,颗粒较大则绕过核形石消耗能量更多,裂纹较易穿过核形石,反之则绕过核形石。裂纹穿过核形石时需要克服核形石内部颗粒的局部压应力,消耗很大能量,因此裂纹尖端进入核形石后多停止扩展,从而对岩石破裂起到控制作用。

6 结束语

本文在对核形石灰岩的岩石特征和沉积环境研究的基础上,探讨核形石结构与单轴压裂试验之间的关系,可以得出以下 3 个结论。

1) 核形石颗粒的形成需要其核心在水体中充分翻转滚动,核心的成分和形状决定了颗粒最初形态。随着水体扰动和翻转,藻类粘结碳酸盐灰泥形成不同组分和形态的纹层,并形成最终形态。

2) 理想条件下核形石纹层呈亮暗相间的同心圆状,内部有网格状或海绵状微观结构,实际生长过程中,不同纹层反复堆叠、超覆,并形成各种显微结构。在外加应力作用下,不同结构界面间的微裂隙相互作用并将张应力集中于某条微裂隙端点,当达到岩石强度临界值时发生宏观破裂。

3) 微裂纹扩展需要消耗能量,核形石结构对裂纹扩展方向起到控制作用,主要取决于纹层类型、结构致密度、颗粒大小等结构因素。

参考文献

- [1] 刘招伟,李元海.含孔洞岩石单轴压缩下变形破裂规律的实验研究[J].工程力学,2010,27(8):133-139.
- [2] 孟召平,彭苏萍,屈洪亮.煤层顶底板岩石成分和结构与其力学性质的关系[J].岩石力学与工程学报,2000,19(2):136-139.
- [3] 熊继有,钱声华,孙文涛,等.石油工程中岩石裂纹扩展与破坏机理研究[J].地下空间,2002(2):157-160.
- [4] 许尚杰,尹小涛,党发宁.晶体及矿物颗粒大小对岩土材料力学性质的影响[J].岩土力学,2009,30(9):2581-2587.
- [5] 孙萍,殷跃平,吴树仁,等.东河口滑坡岩石微观结构及力学性质试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(S1):2872-2878.
- [6] 时贤,程远方,蒋恕,等.页岩微观结构及岩石力学特征实验研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S2):3439-3445.
- [7] 屈永龙,杨更社,奚家米,等.低温-加载作用下白垩系砂岩的变形破坏特性试验研究[J].岩土力学,2022,43(9):2431-2442.
- [8] 熊良锋.循环荷载下岩石材料力学特性研究进展[J].岩石力学与工程学报,2023,42(3):780.
- [9] 经来旺,蒋浩杰,郑霖.不同填充裂纹位置与尺寸下的类岩石试样破坏研究[J].山东煤炭科技,2024,42(4):123-127.
- [10] 赵永,古旭升,王述红,等.不同岩性岩石单轴压缩破坏共性前兆特征[J].东北大学学报(自然科学版),2023,44(9):1309-1317.
- [11] 赵娜,卫帅,王来贵,等.含不同倾角单裂隙岩石单轴压缩破裂演化过程分析[J].实验力学,2024,39(4):518-528.
- [12] 闫顺玺,刘铭哲,常文帅.岩石单轴压缩变形特征分析[J].煤矿现代化,2023,32(2):45-47.
- [13] FLUGEL E.碳酸盐岩微相:分析、解释及应用[M].2版.马永生,刘波,郭荣涛,等译.北京:地质出版社,2016:111-130.
- [14] BRACE W F, PAULDING B W Jr, SCHOLZ C. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks[J]. Journal of Geophysical Research, 1966, 71(16): 3939-3953.
- [15] GRIFFITH A A. The phenomena of rupture and flow in solids[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, 1921, 221: 163-198.
- [16] 李传龙,俞然刚,马国良,等.含裂隙岩石微裂纹起裂扩展及损伤演化分析[J].水电能源科学,2023,41(8):166-169.
- [17] 屈小磊,赫建明,陈杰,等.页岩水力压裂微裂纹扩展演化试验研究及力学机制分析[J].岩石力学与工程学报,2023,42(S1):3151-3159.