https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.152



贺州大理岩稳定剪切破裂时双晶的发育特征

程 毅1,谢欣玥2,左昌群1,肖淑君3

1. 中国地质大学(武汉)工程学院,湖北武汉 430074

2. 宜昌市黄柏河流域管理局,湖北宜昌 443005

3. 广州市城市规划勘测设计研究院,广东广州 510060

摘 要:双晶滑移是大理岩产生塑性变形的微观机制之一.为探究剪切破裂时的双晶表现,首先在贺州大理岩试样中诱发不同发展程度的剪切破裂,接着对试样中双晶的发育特征进行了全断面观测与定量统计分析.结果显示:(1)剪切变形带范围内的双晶明显区别于外部双晶,具有局部化、扭折、增粗、分叉及尖灭的特征,具体表现受剪切方向与双晶面倾向之间的相对关系控制;(2)试样整体的双晶密度随加载略有增加,而双晶发生率则维持高位、无变化规律;(3)双晶平均宽度不受加载程度影响, 而双晶最大宽度则随剪切破坏程度稳定增加约3倍.以上结果表明低围压受压条件下,贺州大理岩整体双晶增生并不明显,而 是集中发育于剪切带内、主要体现为双晶宽度的增加,其表观特征受剪切方向与双晶面倾向之间的相对关系控制. 关键词:大理岩;双晶;剪切破裂;双晶密度;双晶宽度;岩土工程.

中图分类号: TU45 **文章编号:** 1000-2383(2025)06-2342-14 **收稿日期:** 2024-09-12

Characteristics of Twinning in Marble with Stable Faulting Process

Cheng Yi¹, Xie Xinyue², Zuo Changqun¹, Xiao Shujun³

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

2. Administration of Huangbai River Basin, Yichang 443005, China

3. Guangzhou Urban Planning Design & Survey Research Institute, Guangzhou 510060, China

Abstract: Twinning is one the micromechanisms of plastic deformation of marble. To investigate the twinning performance during faulting, shear ruptures with different deformations were induced in Hezhou marble. Microscopic observation and quantitative analysis were performed on twinning characteristics in cross sections perpendicular to faulting plane. The results show that the twinning in the faulting zone was obviously different from that outside of the zone, presenting the characteristics of localization, kinking, thickening, bifurcation and spiking out, which is largely controlled by the relation between the shear direction and twin plane dip. Twin density of the entire sample increased slightly after loading, while twin incidence fluctuated in high level. The average twin width was not affected by loading, however, the maximum twin width increased steadily up to three times with faulting deformation. The above results show that under low confining pressure, the twinning of Hezhou marble is unobvious overall, but concentrated in the shear zone, mainly manifested by the increase of the width of the twin. The apparent characteristics of twinning are controlled by the relationship between the shear direction and the inclination of the twin lamellae.

Key words: marble; twinning; faulting; twin density; twin incidence; geotechnical engineering.

基金项目:国家自然科学基金面上项目(No.42177161);湖北省自然科学基金资助项目(No.2022CFB105).

作者简介:程毅(1983-),男,博士,副教授,主要从事岩石断裂力学及工程地质等方面的研究工作.ORCID:0000-0001-9370-7109. E-mail: chengyi@cug.edu.cn

引用格式:程毅,谢欣玥,左昌群,肖淑君,2025.贺州大理岩稳定剪切破裂时双晶的发育特征.地球科学,50(6):2342-2355.

Citation: Cheng Yi, Xie Xinyue, Zuo Changqun, Xiao Shujun, 2025. Characteristics of Twinning in Marble with Stable Faulting Process. *Earth Science*, 50(6):2342-2355.

第6期

0 引言

岩石受压后的变形行为通常可以分为脆性和 延性两种.在典型的脆性破坏与延性变形之间存在 一个过渡阶段,应力一应变曲线表现为由明显软化 向不明显软化,甚至硬化过度,这种变形模式被一 些学者称为弱脆性或半脆性变形(Handin,1966;Paterson and Wong,2005).此时岩石最终依然可能出 现剪切破裂面,但剪切破裂的发展相对缓慢,可以 较稳定地呈现剪切破裂发展的中间过程,因而该阶 段也是地球构造变形与深部岩石工程研究的热点 之一(Carter and Kirby,1978;Kirby and Kronenberg, 1984;Fredrich *et al.*,1990;王子潮和王绳祖,1990; 张春生等,2010;张桂男等,2018;Sari *et al.*,2022).

不同岩石实现半脆性变形需要的加载条件不同.Westerly花岗岩在300°C的温度下需要接近1000 MPa的围压才可以实现试样从剪切破坏到均匀变形(延性变形)的转变,斜长岩的试验结果与此接近(Tullis and Yund,1992).这两种岩石在室温下实现半脆性变形比较困难.砂岩的条件受孔隙率等因素影响较大,Adamswilie砂岩室温下20 MPa的围压就能产生半脆性变形(Wong et al.,1997),不过Berea砂岩则需要40 MPa以上(Menéndez.,1996);Cararra大理岩常温下,50 MPa左右就可实现;Wombeyan大理岩在常温下,在5~10 MPa就可进入弱脆性变形阶段(Fredrich et al.,1990).由此可见大理岩是一种比较适合用于产生岩石半脆性变形、进而诱发剪切破裂稳定发展的研究对象.

低温下大理岩弱脆性变形的实现与双晶滑移 紧密相关.虽然微观变形机制与宏观变形没有绝对 的关联性,但前人研究表明多数情况下微裂隙主导 的变形机制往往导致脆性破坏,而双晶、位错、重结 晶等塑性变形机制占主导时,试样往往表现出延性 变形(Tullis and Yund,1992;Cheng *et al.*,2016;Rybacki *et al.*,2021).在方解石大理岩中,双晶滑移是 低温、小应变(<10%)条件下最普遍的塑性变形机 制,机械双晶出现的关键剪应力大致在10~15 MPa (Burkhard,1993;Covey-Crump *et al.*,2017),诱发出 现的机械双晶会受到温度、应变率、晶粒尺寸及应 力等因素的影响(Christian and Mahaja,1995). Burkhard (1993)发现随着温度的增加,方解石机械 双晶的形状依次表现为微双晶或细直双晶、厚双 晶、弯曲双晶与不规则形状双晶.Ferrill(1991)则认 为方解石中机械双晶的宽度和强度不仅受温度影 响,也受到应变的影响.例如当温度小于150~ 200℃时,应变增加导致双晶数量/密度的增加;当 温度高于200℃时,应变的增加导致双晶的宽度开 始变宽.牛露(2021)则进一步发现在较高温度下 (大于150~200℃),Carrara大理岩中的双晶密度随 着温度升高而降低.Rybacki *et al.*(2013)对Carrara 大理岩的研究不仅支持牛露(2021)的研究结果,而 且也与Ferrill(1991)的结论一致——双晶宽度不仅 与温度相关也与变形相关,他同时还提出了峰值差 应力与双晶密度的定量关系式与Rowe and Rutter (1990)的结果进行对比.

由于方解石中双晶所具有的以上特征,因而具 有重要的构造指示意义.首先,机械双晶由双晶滑 移造成,它的出现可以指示剪切变形的存在(胡玲 等,2009;张桂男等,2018;刘恒麟等,2020).例如 Rybacki et al. (2013) 和 González - Casado et al. (2006)发现颗粒内双晶密度在宏观剪切带附近比 远离剪切带显著增加.其次,双晶密度被用来评估 古构造应力.Weiss (1954)和Turner (1953)开发了 一种从变形方解石岩石中确定应力轴的方法; Rowe and Rutter (1990)、Sakaguchi et al. (2011)和 Rybacki et al. (2013)分别里提出了利用双晶密度定 量计算最大差应力的公式.最后,机械双晶的形状 可以用来推测古构造运动地质环境的温度与岩石 变质等级(Ferrill, 1991; Ferrill et al., 2004). 此外,双 晶滑移还是大理岩中穿晶裂隙一种可能的产生机 制.穿晶裂隙既可能在本晶粒内、双晶端部或宽度 变化处产生,也可能在相邻晶粒内、由于双晶的延 伸产生(Olsson and Peng, 1976; Cheng et al., 2016).

目前关于剪切破坏状态下双晶特征的研究较 为稀缺.本文以剪切破裂时的双晶表现为对象,首 先将直观展示大理岩剪切变形带内、外的双晶特征 及区别,接着定量分析双晶发育与变形程度(应变 大小)的关系.期望通过以上工作解释贺州大理岩 的宏观变形表现,揭示双晶在剪切破裂带形成中的 作用,为构造运动中双晶的发育特征提供数据.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

根据前人研究,双晶出现的概率及体积(宽度) 与颗粒粒径正相关(Rowe and Rutter,1990;Covey-Crump et al.,2017),为了更好地观察双晶现象,本 文选取了成分较单一的、粒径较大的贺州大理岩作为研究对象.该大理岩采样于贺州市平桂区姑婆山岩体南缘,其由上泥盆统融县组(D₃r)灰岩受中生代岩浆侵入作用形成(张学义等,2021).通过分别测量299个颗粒长轴A和短轴B的长度,最终得到平均粒径 $D = \sqrt{AB}$).对于矿物组成首先采用XRD(X-ray diffraction,X射线衍射)进行了矿物成分鉴定(图1),随后在显微镜下对大理岩的光薄片进行岩矿鉴定.两种方法鉴定结果基本接近,贺州大理岩中方解石含量为95%以上,另有少量白云石,是较为纯净的方解石大理岩.

在未加载的贺州大理岩中,方解石颗粒为他形 粒状、无色,颗粒呈镶嵌状分布,颗粒边界有一定曲 折,局部可见三边镶嵌的平衡结构.颗粒边界清晰, 内部边界裂隙与穿晶裂隙都很少(图2).光片中双 晶表现为各种灰度的细线,解理基本不可见(图2). 双晶纹平直、基本无尖灭、无扭折,而且不仅单个双 晶纹全长厚度无变化、颗粒内同组双晶的厚度也基 本接近,这些特征为区分原始双晶与加载产生的机 械双晶提供了对比依据.

1.2 试验方法

1.2.1 三轴压缩试验 根据 ISMR标准将大理岩制 成高 100 mm,直径 50 mm 的圆柱形试样,试样上下 两端平行且高度误差在 0.02 mm 以内.加载设备为 INSTRON-1346 岩石伺服系统试验机,轴压可达 2 000 kN,压力跟踪补给能力为 230 L/min.三轴加 载试验围压为 5 MPa,采用位移控制的加载方式,加 载速率为 0.001 mm/s.原计划分别将试样加载至进 人屈服阶段、峰值强度附近、峰后阶段和应力软化 阶段,然后卸载观察;实际试验中,发现峰值强度对 应的应变范围较大,故增补 2个试样,将其加载至峰 值强度内的不同应变点.所以本研究共对 6 个试样 进行了三轴加载.加载到目标状态后卸载,将试样 用胶带固定并小心存放.

1.2.2 CT试验 本研究所有样品,除加载至应力 软化阶段的试样 3-T-4外,其余试样外部破裂并不 明显,不能根据外部破裂确定内部剪切带的位置. 为准确的确定内部剪切带的空间位置及发育状况, 本研究使用了中国地质大学(武汉)工程学院实验 室的 Phoenix v|tome|x s CT 扫描系统(图 3).将大理 岩试样置入 CT 扫描设备内部实验台上,适当调整 位置并固定.试样从端部开始扫描,设置扫描剖面 间距 0.01 mm,最后成图剖面间距 0.1 mm.扫描结果







图 2 贺州大理岩原始微观结构显微图片 Fig.2 Microphotographys of Hezhou marble ①.颗粒边界;②.双晶

包括二维剖面图与三维重构图.在灰度图像中,空隙、微裂隙、破碎区表现为深色;完整岩石、无微观 缺陷区表现为浅色.

1.2.3 光学显微观测 光学显微观测的步骤较为 繁杂,主要包括:(1)根据CT扫描结果,选择合适的 竖直剖面将加载后的试样平均切割成两半;(2)将 一半试样平均分割成10块小试样以满足镶嵌及磨 抛设备的尺寸要求;(3)使用标乐公司Cast N'Vac 1000冷镶嵌机进行镶嵌;(4)利用土耳其Metkon公 司制造的Forcimat 102研磨抛光机进行试样磨抛, 包括磨平、粗磨、细磨、抛光等多个程序;(5)将抛光 好的试样置于Leica DM4500 P偏光显微镜下进行 观测,捕捉需要的图片用于后续分析及统计.整个 制备及观测流程见图4.相似的观测方法已经成功 应用到方解石大理岩的双晶观测中(Olsson and Peng,1976;Cheng *et al.*,2016). 本研究进行双晶发育特征定性分析时,利用了 所有10个小块的光片观测结果.进行双晶定量统计 分析时,由于双晶数据量很大,只对位于块1与块9 中间区域(图4中绿色阴影区)的所有颗粒进行了测 量统计.每块区域长约24 mm、高约0.6 mm,包含颗 粒40~50个.这个测量范围主要依据Rybacki *et al.* (2013)(测量6个区域,每个区域约20个颗粒)、 Covey-Crump *et al.*(2017)(测量范围4×4× 7 mm³)的研究方法确定.

1.2.4 双晶定量统计 双晶定量统计分析的步骤 为:将图4中块1与块9绿色阴影区域的显微图像按 照某一固定比例尺捕捉后拼接成连续的图像;在图 像中部横向布置一条测线,标记与测线相交的双晶 和颗粒;测量并记录颗粒次序、双晶数量、双晶宽度 数据;利用上述数据进行统计分析.

根据前人的研究方法(Rowe and Rutter, 1990;



图 3 Phoenix v|tome|x s CT 扫描系统 Fig.3 Phoenix v|tome|x s CT scanning system

Ferrill, 1991; Rybacki *et al.*, 2013; Covey-Crump *et al.*, 2017),本文选择双晶密度、双晶发生率、双晶 平均宽度和双晶最大宽度4项指标来评价双晶发育 情况.各指标定义分别为——双晶密度 N_L :测量范 围内与测线相交的双晶总数量与测线长度的比值; 双晶发生率 I_c :与测线相交的颗粒中,发育双晶的颗 粒数与所有颗粒数的比值;双晶平均宽度 L_a :测量 范围内与测线相交的双晶总宽度与双晶总数量的 比值;双晶最大宽度 L_m :与测线相交双晶宽度的最 大值.

统计测量时,显微图像中可辨识双晶的最小宽 度范围为1~3 μm.同时,为了确保数据的可靠性, 随机选取了7条与测线相交、粗细不等的双晶,分别 在不同比例尺下测量双晶宽度,对比两次测量结果 来确定测量误差.由表1可知,双晶宽度测量的绝对 误差在±0.45 μm、相对差值在-16%~3%;双晶越 细测量误差越大,总体较可靠.

2 宏观力学试验结果

2.1 应力一应变曲线特征

图 5a显示了加载到不同阶段卸载的6个试样的 应力一应变曲线.由于自然岩石试样个体之间的差 异性,试验曲线并没有完全重合,但整体来看6个试 样的应力一应变曲线趋势是大致相同的.曲线总体 包括初始裂隙闭合段、弹性段、屈服段、峰值平台段 及应变软化段.与常见的脆性破坏的岩石明显不 同,贺州大理岩屈服段明显、峰值平台宽、峰后应力 衰减缓慢、变形稳定,这表明此时贺州大理岩的变



图4 微观试样制备及观测流程图

Fig.4 Working flow of sample preparation for optical observation

蓝色面/线条示意剪切破裂带;红色线条表示切割位置;数字代表切割后小试块的序号;双晶的定量统计只对块1与块9中的绿色阴影 部分进行 形破坏处于脆性一半脆性阶段.

以图 5a 的曲线数据为依据,图 5b 归纳了贺州大 理岩的应力应变曲线及变形阶段,并在图 5 中标明 了各个加载试样卸载时所处的位置.需注意,图 5b 中对各个试样位置的归纳以应变/变形为基础,同 时参考了应力数据.例如,由于试样个体之间的差 异,虽然试样 3-T-5的应变大于试样 3-T-4,但是从 应力上看,前者刚刚跨过峰值平台、进入软化段,应 力下降不到峰值的 10%,而后者(3-T-4)已经进入 软化段较长时间,应力下降达到 30%,所以在图 5b 中,试样 3-T-5的位置被标注在 3-T-4之前.

由图 5b 可知试样 3-T-8 加载至屈服段;试样 3-T-7 加载至已进入峰值平台;试样 3-T-6、3-T-1 加 载至越过峰值点,二者之间差别不易区分;试样 3-T-5 加载至屈服平台末,可能已进入峰后缓慢软 化段;试样 3-T-4 则加载至明显软化阶段,应力下降 速率较快.各试样所处变形破坏阶段符合加载 计划.

2.2 变形与破坏特征

处于屈服阶段的 3-T-8 试样表面完整、无肉眼可见的破裂痕迹;试样中部区域的 CT 扫描结果也未显示任何微裂隙密集区(图 6a).进入峰值阶段的 3-T-7 试样表面有 4 cm 左右长度的破裂面;CT 扫描 结果显示试样为单面剪切破裂,上下两端已形成较 明显破裂面、中部未贯通(图 6b).位于峰值平台、越 过峰值点的 3-T-6、3-T-1 试样 CT 扫描结果为共轭 剪切破裂,微裂隙集中区呈对角线分布,破裂面不

明显;3-T-1试样微裂隙发育密度略大于3-T-6,故前者试样表面中部可见不太明显、2~3 cm长度的破裂面(图6c、6d).进入缓慢软化阶段的3-T-5试样表面存在约7 cm长度的破裂面、顶部未贯通;CT扫描结果显示试样为共轭剪切破裂,中部微裂隙密度明显大于试样3-T-6与3-T-1,左下端已形成较明显破裂面(图6e).位于明显软化阶段的3-T-4试样表明出现了贯通的剪切破裂面,破裂面从端部延伸至试样中上部,有一定的张开度,试样中部膨出;CT扫描结果显示试样为单面剪切破裂,破裂面斜向贯通整个试样,中部微裂隙密度小于共轭剪切破坏的试样(图6f).

综合以上结果,贺州大理岩在5 MPa围压下的 宏观破坏模式包括单面与共轭剪切破坏.随着加载 程度的增加,试样3-T-8,试样3-T-7、3-T-6、3-T-1, 试样3-T-5,试样3-T-4的破坏程度依次增加.

表1 双晶抽样测量误差 Table 1 Errors of sampling measurement of twin

双晶序号	宽度一(µm)	宽度二(µm)	绝对误(μm)	相对误差
1	2.15	2.56	-0.41	-16%
2	2.73	3.01	-0.28	-9%
3	14.76	14.46	0.30	2%
4	6.94	6.73	0.21	3%
5	5.89	5.99	-0.09	-2%
6	1.72	1.86	-0.14	-8%
7	3.29	3.75	-0.46	-12%



图5 贺州大理岩5MPa围压下应力一应变曲线特征(a)及各试样卸载位置(b)(红点)

Fig. 5 Stress-strain curve(a) and specimen unloading locations (b) (red dots) of Hezhou marble under pressure of 5 MPa



图6 贺州大理岩各阶段破坏照片及垂直破裂面的CT扫描剖面图

Fig.6 Photos of Hezhou marble at different damage stages and CT profiles perpendicular to the faulting surfaces 照片中箭头指向试样表面破裂面;CT图中深色区为裂隙发育密集区;试样 3-T-8破坏程度浅,为提高扫描精度只对中间部分进行了CT扫描

3 双晶发育特征

对于加载后的6个试样,定性上它们内部双晶 发育的表观特征并无明显不同;而每一个试样剪切 带内(主变形带内)与剪切带外的双晶则明显表现 不同.定量上双晶宽度则随变形阶段存在一定的变 化规律.

3.1 剪切带内双晶表观发育特征

因为试样中剪切带内(主变形带)与剪切带外 的双晶有着明显不同的表现,故将二者分开陈述. 结合前人对机械双晶的分析(胡玲等,2009),本节 将剪切带内机械双晶的表观发育特征归纳为4点.

3.1.1 双晶分布局部化 在未加载的天然贺州大 理岩中,原始双晶在晶粒内的分布基本是均匀的 (图2),而经历过加载试验后,新发育的双晶常常只 在颗粒内局部出现.在这种现象中,机械双晶常以 大宽度、高密度的方式出现在晶粒内部一个小范围 内;该范围上、下端部发育有主裂隙,双晶局部化形 成的条带将上、下端裂隙连接(图7).进一步变形 时,局部化条带内微裂隙发育,主裂隙最终贯 通(图7). 图 7 的 3 个例子中,连接两条主裂隙的双晶局 部化带(虚线所夹区域)的倾向都与双晶面的倾向 相反,这造成上、下主裂隙产生的位移无法通过单 个双晶的增宽来兼容,而只能通过产生大量双晶来 协调变形.这一推测在双晶扭折与增宽现象中得到 了支持.

3.1.2 双晶扭折 双晶扭折是岩石发生塑性变形的标志之一.解理面和双晶面等定向构造出现转折,但彼此之间并未丧失内聚力的现象称为扭折带.前人研究表明这种双晶特征通常在高温条件下出现,但是本研究在剪切带范围内也观察到这种现象(图8).

图 8 展示的双晶扭折现象中存在共性,即剪切 方向与双晶面大角度相交,双晶在整个颗粒内发 育、在扭折带明显增宽.因为剪切方向与双晶面近 似垂直,所以晶粒无法通过双晶滑移、增宽来协调 剪切变形,只能出现位错并产生晶格弯曲,形成双 晶扭折带.图 8b提供了剪切方向与双晶方向关系不 同时的对比——颗粒 A 中双晶面与剪切方向近似 垂直,所有双晶在扭折范围内增粗;颗粒 B 中双晶面





虚线指明双晶局部化发育的范围,箭头指向上下端裂隙,T.双晶

与剪切方向近似平行,所以只有部分双晶全长增粗 明显、没有扭折现象.

双晶扭折现象往往出现在剪切变形带内.扭折 处常见发育程度(长度、张开度)不同的裂隙,可能 是因为变形量超出了扭折的兼容范围,需要裂隙 协调.

3.1.3 双晶增宽及分叉 在天然贺州大理岩中,各 组原始双晶在单个晶体内的厚度基本是一致的(图 2),而对于加载后的贺州大理岩试样,颗粒内不同 组双晶之间、同组双晶不同条之间都常常存在明显





图 8 双晶扭折微观图 Fig.8 Microphotographs of kinked twins. a. 扭折处已发生破裂; b. 颗粒 A 中双晶扭折, B 内双晶增宽, 虚线 表示颗粒 A 边界; c. 扭折处左下端已产生微裂隙;箭头指示相对 位移方向; T. 双晶

厚度差异,甚至一条双晶自身也常见厚度突变及分 叉(图9).这是加载时晶粒内部应力分布不均匀,双 晶端部的应力集中程度不同导致双晶滑移量不同. 一般应力较集中区域、应变越大的区域的双晶宽度 更大.

图 9a~9c 中上下端破裂/裂隙的连线与双晶面 倾向相同,使得两条破裂/裂隙之间可以通过部分 双晶的增宽来协调剪切变形(图 9a 中的剪切位移达 500 μm,所以虚线内颗粒双晶区域占据了主体).试 样中这一现象比双晶局部化、双晶扭折现象发育更



<u>100 μm</u> 图 9 双晶宽度差异及分叉现象微观图

Fig.9 Microphotographs of thickening and bifurcation of twins

a~c中箭头指向上、下端裂隙;d.中箭头指向两组不同的双晶面;e.中箭头指向双晶分叉点,上分叉点无裂隙,下分叉点处发育微裂隙.a中 虚线为颗粒边界,该颗粒大部分面积都被双晶占据.

为普遍.这一现象与双晶局部化、双晶扭折现象共同说明,双晶面走向与剪切方向之间的关系对双晶的表现有决定性影响.

图 9d 中的两组双晶,北东走向的一组宽度明显 大于北西向;而且北东向一组内部不同条双晶之间 也存在宽度明显不等的情况.这些都说明它们是由 于此次加载形成的机械双晶.

此外,加载新生的机械双晶时常可见分叉行为,即双晶在一段长度上表现为单条双晶,然而在 某处该双晶会出现分叉、分成两条甚至更多条厚度 减薄的双晶(图 9e).在分叉处时常存在微裂隙,但 并不必然存在.

3.1.4 双晶尖灭新生的机械双晶并不总是完全 贯穿单个晶粒,也可能会在传播的过程中于晶粒内 部自然终止.双晶在晶粒内部厚度逐渐减小直至完 全消失的现象叫尖灭(图10),它不同于双晶遭遇裂 隙或边界突然终止的情况.天然贺州大理岩中的双 晶未见尖灭特征.从图10中可以看出,当一组双晶 传播到某个位置后逐渐开始尖灭时,该组内不同双 晶的尖灭不是同时发生的,部分双晶可以传播更远 才会终止.

500 μm

3.2 剪切带外双晶表观发育特征

与原始试样相比,加载后6个试样剪切带外的 双晶数量和宽度略有增加(图11),但并不明显.3.1 节所描述的双晶表现,在剪切带外(主变形带外)很 少见到.

3.3 机械双晶定量发育特征

依据1.2.4节的统计方法,对背景样3-S及加载 后试样的块1和块9(图4)进行了双晶测量(试样 3-T-6与3-T-1应力应变水平大致相同,因此只取





图 10 双晶尖灭微观图像 Fig.10 Microphotographs of spiking out of twins 方框指示尖灭区域

3-T-6统计).结果分析如下.

3.3.1 双晶密度和发生率

表 2 不仅列出了各个试块的双晶密度,还提供 了依据各个文献公式得到的最大偏应力.与加载试 样真实经受的最大偏应力为65~70 MPa(图5)相 比,Rowe and Rutter (1990)公式的结果几乎是真实 值的 2 倍,Sakaguchi *et al.* (2011)公式的结果很接 近,而Rybacki *et al.* (2013)公式的结果则略偏小. 这个结果说明,虽然观察方法不同,本文的数据总 体上是可靠的.

图 12表明与背景试样相比,加载后试样的双晶 密度总体上有一定程度增加;然而这种增加并没有 随应变(破坏程度)稳定变化,而是出现了一定波动. 这说明贺州大理岩在 5 MPa 围压的加载条件下,虽 然双晶密度受到加载的控制作用,但仍然明显受到 其他因素(试样微观结构差异及测量误差等,见 3.3.3节)的影响.

试样双晶发生率在 65%~95% 范围内波动,背 景试样双晶发生率为 88.5%,高于几个加载后的试 样(图 13).这表明天然贺州大理岩中颗粒出现双晶 的概率很高;对于天然条件下就没有双晶的颗粒, 在 5 MPa 围压的室温条件下,加载不能够促使这些 颗粒产生双晶,因而不能提高双晶发生率.结合双 晶密度的统计结果——加载可以一定程度上提高 双晶密度,那么可以推测出新生双晶更大的概率是 出现在含原始双晶的颗粒内的.

综上所述,双晶密度与双晶发生率的统计结果 表明,天然条件下贺州大理岩已经具有很高的双晶 发生率,这导致其延性较强.在5 MPa围压的室温 条件下,对于不含原始双晶的颗粒,加载很难在这 些颗粒中诱发产生新双晶;对于存在原始双晶的颗



图 11 均匀破坏区内双晶微观图像 Fig.11 Microphotographs of twins out of the localized shear zone

表2 双晶密度 N_L统计及偏应力估算

		Table 2 St	atistics of twi	nning density N_L and estimat	ion of deviatoric stress	
试样	试块1	试块9	均值	偏应力一(MPa)*	偏应力二(MPa)**	偏应力三(MPa)***
	(mm^{-1})	(mm^{-1})	(mm^{-1})	$\sigma\!=\!-52.0+171.1 {\rm lg} N_{\rm L}$	$\sigma = 21.86 N_L^{0.57}$	$\sigma = (19.5 \pm 9.8) N_L^{0.5}$
3-S	3.13	5.59	4.36	/	/	/
3-T-8	9.86	7.18	8.52	159.2	74.1	56.9 ± 28.6
3-T-7	7.18	7.63	7.40	148.7	68.4	53.0 ± 26.7
3-T-6	5.23	5.02	5.13	121.5	55.5	44.2 ± 22.2
3-T-5	5.23	6.34	5.79	130.5	59.5	46.9 ± 23.6
3-T-4	8.57	6.63	7.60	150.7	69.5	53.8 ± 27.0

注:^{*}Rowe and Rutter (1990);^{**}Sakaguchi et al. (2011);^{***}Rybacki et al. (2013).





粒,加载可以一定程度上促进双晶在该颗粒内的 增生.

3.3.2 双晶宽度

(1)双晶平均宽度.在加载过程中,各试样双晶 平均宽度在1.4~2.2 μm内波动,受应变影响的规律 不明显(图14).这说明对于试样整体而言,加载导 致的双晶平均宽度增加可以忽略.

(2)双晶最大宽度.与双晶平均宽度不同,试样 中双晶最大宽度则表现出明显的随着应变的增加 趋势(图15a).在峰值阶段前,试样3-S与3-T-8双晶 最大宽度均值很接近,在5.5 μm左右;达到峰值阶 段后,双晶最大宽度随着应变稳定增加,从试样 3-T-7的5.9 μm持续增加到试样3-T-4的14.6 μm. 结合双晶平均宽度的结果可知,加载导致的双晶宽 度的明显增加只发生在极少量双晶中;这一点与前 述的剪切带内双晶增宽明显、剪切带外双晶增宽不 明显的观察结果是一致的.

双晶最大宽度由每个试块中宽度最大的双晶



Fig.13 Correlation between twin incidence and strain





决定,即一条双晶的宽度就代表了试块的结果,统 计随机性较大.为此,对测量范围内每个颗粒中宽 度最大的双晶进行统计,将宽度累加得到图15b.

可以看到,随着应变的增加,累计双晶最大宽





度也逐渐增加,并在到达峰值应力后逐渐趋于稳定. 峰值应力末端试样 3-T-6的结果(100.2 μm)是背景 试样 3-S(31.9 μm)的3倍左右.

根据宽度统计结果、结合图像观察可知,在 5 MPa围压的室温条件下,加载总体上只能促使剪 切带范围内的少数颗粒及其他颗粒中的极少数双 晶发生明显增宽行为.这部分双晶数量占总体双晶 数目比很小,以致双晶最大宽度随加载有明显增 加,而双晶平均宽度基本不随加载变化.

3.3.3 粒径的影响

晶粒中产生双晶时需要的应力称为临界剪应 力(critical resolved shear stress),多数研究者认为试 样中不同位置产生双晶时需要的临界剪应力是不 同的(Christian and Mahaja, 1995; Covey-Crump et al.,2017),双晶更易于在应力、应变集中的地点 产生,比如颗粒边界与晶格缺陷点,因此双晶的形 成对岩石的微观结构较为敏感.部分研究结果显示 双晶密度随着颗粒粒径的增加而增加,而双晶发生 率则与粒径无关(Beyerlein et al.,2011);而另外的 研究者则发现双晶发生率随着颗粒粒径的增加而 增加,而双晶密度则与粒径关联不明显(Rowe and Rutter,1990).总体而言,双晶产生受到平均粒径与 粒径分布的影响,粒径越小、越不容易产生机械双 晶(Covey-Crump et al.,2017).

本研究选用的贺州大理岩粒径大、分布较不均 匀.现将双晶测量时的测线长除以被测量的颗粒数 可得到各试块的"平均粒径"(表3),以此来评价各 个试块中颗粒尺寸的相对大小.

虽然计算方法不同,但表3的数据显示该评价 方法得到的总体平均粒径(0.50 mm)与1.1节的

表	3	各试	样统	计	数据	
Table 3	Sta	tistic	data	of	each	sample

			1		
试样	测线长	115 水台 米台	平均粒径	双晶数	
	(μm)	米贝 个业 安义	(μm)		
3-S	53 108	80	664	226	
3-T-8	47 280	49	965	404	
3-T-7	47 541	104	457	352	
3-T-6	47 789	152	314	245	
3-T-5	50 373	107	471	290	
3-T-4	49 283	99	498	375	
总计	29 5374	591	500	1 892	

0.48 mm 很接近,这证明了粒径结果的可靠性.其 中,试样 3-T-8、3-T-6与平均粒径表现出较大的偏 差——前者粒径是后者的3倍以上.根据上述关于 粒径对双晶行为影响的研究结论,可以推测在相同 荷载下,试样 3-T-8应该具有较高的双晶密度或双 晶发生率,试样 3-T-6则应具有较低的双晶密度或 双晶发生率.该推论不影响3.3.1节的结论,但部分 解释了图12和图13中的不正常波动,即试样3-T-8 表现出最高的双晶密度与双晶发生率、而试样 3-T-6却表现出最低的双晶密度与双晶发生率.

4 讨论

本研究发现剪切变形带内机械双晶的表现明显不同于变形带之外的区域,双晶的增宽、局部化、 扭折等特点集中于剪切带内,剪切带外只零星存在. 这表明双晶的增殖受到剪应变的控制,这一点前人 在其他大理岩及灰岩的研究中也已经发现 (Burkhard,1993;Ferrill *et al.*,2004;González-Casado et al.,2006; Rybacki et al.,2013).然而,前人的研究更为关注温度、应力、应变、粒径等因素对双晶发育定量指标(双晶密度、厚度等)的影响(Rowe and Rutter,1990; Burkhard,1993; Ferrill et al.,2004; Rybacki et al.,2013,2021; 牛露,2021),他们观测的试样基本都位于应变硬化阶段,微观变形机制以双晶为主,少见微观裂隙,没有将宏观剪切破裂与双晶行为结合研究,因此本研究揭露的双晶表观特征与微裂隙及剪切方向紧密相关的现象前人未有系统总结.

大理岩的组成成分主要为方解石与白云石,不 同矿物组成的大理岩的宏观力学性质(谢欣玥等, 2024) 及受力时微裂纹发展(赵小平等, 2012) 有很 大的区别;特别地,白云石只有一组双晶滑移系,而 方解石则有3组(Barber and Wenk, 1979).本文的贺 州大理岩为较纯净的方解石大理岩,因此,白云石 大理岩应该较难得到本文观察到的现象与结论.针 对全部矿物近似为方解石的大理岩,它们的宏观力 学性质也有一定可能存在较大区别,例如Saillon大 理岩在5 MPa 围压时表现出明显脆性、且峰值应力 接近200 MPa,这明显区别于Wombeyan、Cararra与 贺州3种大理岩(Fredrich et al. 1990;谢欣玥等, 2024). 后 3 种大理岩在 5~10 MPa 围压的条件下, 都呈现出稳定的塑性变形、且最终出现应变软化, 对应峰值应力也低于100 MPa.从这个角度出发,本 文由贺州大理岩得到的现象与结论很可能适用于 Wombeyan与Cararra大理岩,可能适用于Saillon大 理岩;但不同的大理岩得到该现象的围压存在不同.

从微观角度出发,本次试验贺州大理岩的微观 变形机制特征是在微裂隙大量产生的同时发育有 较多双晶.这一特征在Tennessee方解石大理岩 (Olsson and Peng, 1976)与Carrara方解石大理岩 (Cheng et al. 2016; Rybacki et al. 2021)中都有观察 到,而且二者中都存在个别双晶增宽的现象与贺州 大理岩一致.结合上述宏观力学性质的比较,可以 比较确信本文的现象及结论适用于Wombeyan、 Cararra与Tennessee大理岩;可能适用于Saillon等 其他方解石大理岩,这取决于在某一特定围压条件 下,这些大理岩能否在产生宏观剪切破裂的同时可 以发育较多双晶.

5 结论

本研究通过低围压下的三轴压缩试验,在贺州

大理岩中诱发了不同发展程度的剪切破裂.随后利用CT扫描选择了最佳剖面进行显微观察,重点分析了剪切破裂时双晶在试样整体及剪切变形带中的不同表现,并讨论了双晶密度、双晶发生率、双晶宽度等定量特征与加载变形程度的关联性.研究结果表明在5MPa围压条件下:

(1)原始双晶的普遍存在是贺州大理岩显示弱 脆性变形(宽缓塑性平台)的微观机制;机械双晶的 增生、增宽集中于剪切变形带,表明机械双晶的出 现主要受剪切应变控制.

(2)剪切变形带的双晶明显区别于外部双晶, 具有局部化、扭折、增粗、分叉及尖灭的表观特征, 具体表现受剪切方向与双晶面倾向之间的相对关 系控制.然而,这些定性特征在屈服后的不同破裂 阶段并无明显不同.

(3)试样整体的双晶密度随加载略有增加,而 双晶发生率则维持高位、无明显变化规律.

(4)双晶平均宽度不受加载影响,而双晶最大 宽度则随试样变形破坏程度稳定增加,这证明当前 的加载条件总体上只能促使少数双晶发生明显增 宽行为.

References

- Barber, D.J., Wenk, H.R., 1979. Deformation Twinning in Calcite, Dolomite, and Other Rhombohedral Carbonates. *Physics and Chemistry of Minerals*, 5(2):141-165. https: //doi.org/10.1007/bf00307550
- Beyerlein, I.J., McCabe, R.J., Tomé, C.N., 2011.Effect of Microstructure on the Nucleation of Deformation Twins in Polycrystalline High-Purity Magnesium: A Multi-Scale Modeling Study.*Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 59(5): 988–1003. https://doi. org/10.1016/j. jmps.2011.02.007
- Burkhard, M., 1993. Calcite Twins, Their Geometry, Appearance and Significance as Stress-Strain Markers and Indicators of Tectonic Regime: A Review. Journal of Structural Geology, 15(3-5): 351-368. https://doi.org/ 10.1016/0191-8141(93)90132-t
- Carter, N.L., Kirby, S.H., 1978. Transient Creep and Semibrittle Behavior of Crystalline Rocks. *Pure and Applied Geophysics*, 116(4): 807-839. https://doi. org/10.1007/ bf00876540
- Cheng, Y., Wong, L.N.Y., Maruvanchery, V., 2016. Transgranular Crack Nucleation in Carrara Marble of Brittle Failure. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(8): 3069-3082. https://doi. org/10.1007/s00603 - 016 -

0976-2

- Christian, J. W., Mahaja, S., 1995. Deformation Twinning. *Progress in Materials Science*, 39(1-2): 1-157.
- Covey-Crump, S.J., Schofield, P.F., Oliver, E.C., 2017.Using Neutron Diffraction to Examine the Onset of Mechanical Twinning in Calcite Rocks. *Journal of Structural Geolo*gy, 100: 77-97. https://doi. org/10.1016/j. jsg.2017.05.009
- Ferrill, D. A., 1991. Calcite Twin Widths and Intensities as Metamorphic Indicators in Natural Low - Temperature Deformation of Limestone. *Journal of Structural Geolo*gy, 13(6):667-675.https://doi.org/10.1016/0191-8141 (91)90029-I
- Ferrill, D.A., Morris, A.P., Evans, M.A., et al., 2004. Calcite Twin Morphology: A Low - Temperature Deformation Geothermometer. *Journal of Structural Geology*, 26(8): 1521-1529.https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.11.028
- Fredrich, J. T., Evans, B., Wong, T.F., 1990. Effect of Grain Size on Brittle and Semibrittle Strength: Implications for Micromechanical Modelling of Failure in Compression. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 95(B7): 10907-10920.
- González-Casado, J.M., Gumiel, P., Giner-Robles, J.L., et al., 2006. Calcite E-Twins as Markers of Recent Tectonics: Insights from Quaternary Karstic Deposits from SE Spain. Journal of Structural Geology, 28(6):1084-1092. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2006.03.019
- Handin, J., 1966. Section 10: STRENGTH and Ductility. In: Clark, S.P., ed., Handbook of Physical Constants. Geological Society of America, U.S.A., 223-290. https:// doi.org/10.1130/mem97-p223
- Hu, L., Liu, J.L., Ji, M., et al., 2009. Identification Manual of Deformation Microstructure. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Kirby, S.H., Kronenberg, A.K., 1984.Deformation of Clinopyroxenite: Evidence for a Transition in Flow Mechanisms and Semibrittle Behavior. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 89(B5):3177-3192.https://doi.org/ 10.1029/jb089ib05p03177
- Liu, H.L., Li, Z.Q., Yuan, S.H., et al., 2020. Microstructural Characteristics of Shuipuzi-Lishugou Ductile Shear Zone on the West Side of Miyun Reservoir in Beijing, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 47(4):395-410, 442(in Chinese with English abstract).
- Menéndez, B., Zhu, W.L., Wong, T.F., 1996.Micromechanics of Brittle Faulting and Cataclastic Flow in Berea Sandstone.*Journal of Structural Geology*, 18(1):1-16.https:

//doi.org/10.1016/0191-8141(95)00076-p

- Niu, L., 2021. Experimental Study on Unsteady Rheology of Marble and Granite (Dissertation). Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing(in Chinese with English abstract).
- Olsson, W. A., Peng, S. S., 1976. Microcrack Nucleation in Marble. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 13(2):53– 59.https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90704-x
- Paterson, M.S., Wong, T.F., 2005. Experimental Rock Deformation—The Brittle Field. Springer, Netherlands.
- Rowe, K.J., Rutter, E.H., 1990.Palaeostress Estimation Using Calcite Twinning: Experimental Calibration and Application to Nature. *Journal of Structural Geology*, 12(1):1– 17.https://doi.org/10.1016/0191-8141(90)90044-Y
- Rybacki, E., Evans, B., Janssen, C., et al., 2013. Influence of Stress, Temperature, and Strain on Calcite Twins Constrained by Deformation Experiments. *Tectonophysics*, 601: 20-36. https://doi. org/10.1016/j. tecto.2013.04.021
- Rybacki, E., Niu, L., Evans, B., 2021. Semi-Brittle Deformation of Carrara Marble:Hardening and Twinning Induced Plasticity.Journal of Geophysical Research:Solid Earth, 126(12): e2021JB022573. https://doi. org/10.1029/ 2021jb022573
- Sakaguchi, A., Sakaguchi, H., Nishiura, D., et al., 2011. Elastic Stress Indication in Elastically Rebounded Rock. Geophysical Research Letters, 38(9):L09316.https://doi.org/ 10.1029/2011g1047055
- Sari, M., Sarout, J., Poulet, T., et al., 2022. The Brittle-Ductile Transition and the Formation of Compaction Bands in the Savonnières Limestone: Impact of the Stress and Pore Fluid. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 55(11): 6541-6553. https://doi.org/10.1007/ s00603-022-02963-z
- Tullis, J., Yund, R., 1992. Chapter 4 The Brittle-Ductile Transition in Feldspar Aggregates: An Experimental Study. Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks: A Festschrift in Honor of W. F. Brace. Elsevier, Amsterdam, 89—117. https://doi.org/10.1016/s0074-6142(08) 62816-8
- Turner, F.J., 1953. Nature and Dynamic Interpretation of Deformation Lamellae in Calcite of Three Marbles. American Journal of Science, 251(4): 276-298. https://doi. org/10.2475/ajs.251.4.276
- Wang, Z.C., Wang, S.Z., 1990. Experimental Study on Semi-Brittle Behavior of Rocks at Temperature and Pressure Corresponding to Middle-Lower Crust. Seismology and

 $Geology,\,12(4){:}\,335{-}\,342,\,390({\rm in}$ Chinese with English abstract).

- Weiss, L.E., 1954. A Study of Tectonic Style Structural Investigation of a Marble Quartzite Complex in Southern California. University of California Publications in Geological Science, 30(1):79-80.
- Wong, T.F., David, C., Zhu, W.L., 1997. The Transition from Brittle Faulting to Cataclastic Flow in Porous Sandstones: Mechanical Deformation. *Journal of Geophysical Research:Solid Earth*, 102(B2): 3009-3025. https://doi. org/10.1029/96jb03281
- Xie, X.Y., Cheng, Y., Li, S.L., et al., 2024. Influence of Mineral Composition and Grain Size on Mechanical Properties of Marble. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 43(Suppl. 1): 3280-3295(in Chinese with English abstract).
- Zhang, C.S., Chen, X.R., Hou, J., et al., 2010. Study of Mechanical Behavior of Deep-Buried Marble at Jinping II Hydropower Station. *Chinese Journal of Rock Mechanics* and Engineering, 29(10): 1999-2009(in Chinese with English abstract).
- Zhang, G.N., Song, M.S., Li, J.F., et al., 2018. Microstructural Characteristics and Deformation Mechanism of Carrara Marble in Axial Compression Experiments. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(5): 786-797(in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. Y., Sun, W. Y., Fan, J. P., et al., 2021. Geological Characteristics and Genesis of the Shuijingshan Marble Deposit in the Pinggui District, Hezhou City, Guangxi. Geology and Exploration, 57(5):1087-1098(in Chinese

with English abstract).

Zhao, X. P., Zuo, J. P., Pei, J. L., 2012. Meso - Experimental Study of Fracture Mechanism of Bedded Marble in Jinping. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 31(3):534-542(in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 胡玲,刘俊来,纪沫,等,2009.变形显微构造识别手册.北京: 地质出版社.
- 刘恒麟,李忠权,袁四化,等,2020.北京市密云水库西水堡 子-梨树沟韧性剪切带显微构造特征.成都理工大学 学报(自然科学版),47(4):395-410,442.
- 牛露,2021.大理岩和花岗岩的非稳态流变实验研究(博士学 位论文).北京:中国地震局地质研究所.
- 王子潮,王绳祖,1990.中下地壳温度压力条件下岩石半脆性 蠕变的实验研究.地震地质,12(4):335-342,390.
- 谢欣玥,程毅,李松龄,等,2024.大理岩矿物成分及粒径对力 学性质的影响.岩石力学与工程学报,43(增刊1): 3280-3295.
- 张春生,陈祥荣,侯靖,等,2010.锦屏二级水电站深埋大理岩 力学特性研究.岩石力学与工程学报,29(10):1999-2009.
- 张桂男,宋茂双,李建峰,等,2018.Carrara大理岩在轴向压缩 实验过程中的显微构造特征及变形机制研究.大地构 造与成矿学,42(5):786-797.
- 张学义,孙文燕,樊晋鹏,等,2021.广西贺州平桂区水井山矿 区大理石矿床地质特征及成因.地质与勘探,57(5): 1087-1098.
- 赵小平, 左建平, 裴建良, 2012. 锦屏层状大理岩断裂机制的 细观试验研究. 岩石力学与工程学报, 31(3):534-542.