

砂岩剪切破裂面形貌特征及粗糙度各向异性

朱谭谭^{1,2}, 朱焕焕¹, 李昂^{1†}, 宗西垒¹, 孙旭亮¹, 宿钟鸣², 何信²

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064;

2. 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室, 山西 太原 030032)

摘要: 岩体破裂面的形态特征是影响其剪切滑移破坏的重要因素, 法向应力是岩体剪切破裂面形态特征的重要影响因素. 为研究法向应力对砂岩剪切破裂面形貌特征和粗糙度的影响, 首先开展了砂岩双面剪切试验, 获得不同法向应力作用下砂岩剪切破裂面, 然后对直剪试验中形成的剪切破裂面进行三维光学扫描, 最后对不同法向应力作用下砂岩剪切破裂面进行三维重构. 分析了法向应力对剪切破裂面粗糙高度特征参数的影响, 基于各向异性参数研究了砂岩剪切破裂面粗糙度各向异性特征, 研究了砂岩剪切破裂面分形特征与粗糙度的关系. 结果表明, 砂岩剪切破裂面粗糙高度期望值、标准差、均值和最大起伏差都随法向应力的增大而增大; 剪切破裂面粗糙度表现出显著的各向异性, 随着与剪切方向夹角的增大, 砂岩剪切破裂面粗糙度先减小后增大; 法向应力为压应力时, 剪切破裂面粗糙度在与剪切方向成 $75^\circ \sim 90^\circ$ 时取得最小值; 剪切破裂面粗糙度极差和各向异性参数随法向应力的增大逐渐增大, 剪切破裂面各向异性特征增强; 砂岩剪切破裂面分形维数与粗糙度呈幂函数关系.

关键词: 剪切破裂面; 形貌特征; 粗糙度; 各向异性; 分形维数

中图分类号: TU45

文献标志码: A

Morphological Characteristics and Roughness Anisotropy of Sandstone Shear Fracture Surfaces

ZHU Tantan^{1,2}, ZHU Huanhuan¹, LI Ang^{1†}, ZONG Xilei¹, SUN Xuliang¹, SU Zhongming², HE Xin²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region, Taiyuan 030032, China)

Abstract: The morphological characteristics of rock fracture surfaces are key factors affecting their shear slip failure, and normal stress is an important influencing factor on the morphological characteristics of rock shear fracture surfaces. To study the influence of normal stress on the morphological characteristics and roughness anisotropy of sandstone shear fracture surfaces, double-sided shear tests were first carried out on sandstone to obtain shear fracture surfaces under different normal stresses. Then, the shear fracture surfaces formed in the direct shear test were scanned using three-dimensional optical scanning. Finally, the sandstone shear fracture surfaces under

* 收稿日期: 2024-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42307222), National Natural Science Foundation of China(42307222); 黄土地区公路建设与养护技术交通行业重点实验室开放课题(KLTLR-Y23-5), Open Fund of Key Laboratory of Highway Construction and Maintenance Technology in Loess Region(KLTLR-Y23-5); 山西省基础研究计划项目(20210302123359), Fundamental Research Program of Shanxi Province(20210302123359)

作者简介: 朱谭谭(1989—), 男, 山东泰安人, 长安大学副教授, 博士

† 通信联系人, E-mail: angli_613@chd.edu.cn

different normal stresses were reconstructed in three dimensions. The influence of normal stress on the roughness height indexes for the shear fracture surface was analyzed. Based on the anisotropic parameters, the anisotropic characteristics of sandstone shear fracture surface roughness were studied. The results showed that the expected value, standard deviation, mean of the roughness height, and maximum roughness difference of the sandstone shear fracture surface increased with the normal stress. The roughness of the shear fracture surface exhibited significant anisotropy, decreasing first and then increasing with the increase of the angle between the shear and normal stress direction. When the normal stress was compressive, the shear fracture surface roughness obtained a minimum value at an angle of $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$ to the shear direction. The range and anisotropy parameters of the roughness of the shear fracture surface gradually increased with the increase of normal stress, and the anisotropy characteristics of the shear fracture surface were enhanced. The fractal dimension of the sandstone shear fracture surface was a power function of the roughness.

Key words: shear fracture surface; morphological characteristics; roughness; anisotropy; fractal dimension

岩体破裂面形态对破裂面的内摩擦角、黏聚力、剪胀性、峰值剪切强度和位移等具有重要影响.学者们对岩体破裂面形貌特征开展了大量研究工作.

Barton^[1]基于直剪试验结果,提出了考虑粗糙度的经验公式预测未填充岩石节理的抗剪强度. Barton等^[2]描述了粗糙度从0到20的10个标准剖面线,用以定量描述岩体节理面粗糙度,由于该方法简单有效,被国际岩石力学学会建议为岩石节理粗糙度评价标准方法.基于该研究成果,众多学者针对粗糙度和剪切强度之间的关系开展了大量研究^[3-6]. Reeves^[7]提出了一种将岩石表面粗糙度参数与剪切强度联系起来的方法,该方法可以用来评估岩体破裂面粗糙度对剪切强度的影响. Özvan等^[8]选取了三种不同风化程度的花岗岩试样,评估了其表面粗糙度和风化程度对剪切强度的影响. Ban等^[9]提出了基于两个新的粗糙度参数的预估峰值剪切强度的方程,并通过试验数据验证了这种方法的可靠性. Tang等^[10]针对岩石节理形态和法向应力对其剪切强度的影响进行了研究,采用水泥砂浆材料制作了三组不同形态的岩石节理,并进行了恒定法向荷载剪切试验,研究结果表明剪切强度随节理粗糙度和法向应力的增大而增大,并提出了一种岩石节理峰值剪切强度预测准则. Belem等^[11]提出,使用三维平均倾角 θ_s 、表观各向异性度 K_s 、节理表面平均梯度 Z_s 和表面扭曲参数 T_s 等5个参数来描述破裂面的粗糙度,并基于这些参数预测剪切破裂面的力学行为. 破裂面的物理力学性质具有显著的各向异性特征, Zhang等^[12]通过光学扫描和3D打印技术制备了与剪切岩石试样相同的混凝土试样,并沿不同方向进行剪切试验,

研究发现破裂面在不同方向的剪切强度存在显著差异. Huang等^[13]用节理面正交方向的粗糙度权重比作为各向异性特征指标,提出了各向异性变化系数,推导得到了各向异性解析函数,并验证该函数能够反映各向异性分布趋势. 陈世江等^[14]通过高清数码相机获得结构面粗糙度信息,应用地质统计学原理,提出了采用变异函数参数表示结构面粗糙度的方法,并应用该方法深入探讨了结构面形貌各向异性和尺寸效应特征. 邹先坚等^[15]提出了一种钻孔图像结构面剖面线分析提取方法,精确还原了孔内原位岩石结构面形貌特征,并采用分形维数描述岩石结构面粗糙度特性和各向异性特征,用来判定岩体结构面的优势抗滑方向. Babanouri等^[16]通过剪切试验,研究了剪切峰值前后节理表面轮廓的破坏形式、面积和节理粗糙度的变化规律. 周枝华等^[17]利用三维激光扫描技术精确测量了岩石节理表面形态,分析了节理面几何特性参数的分布规律.

目前对岩体破裂面形貌特征的研究主要针对压剪破裂面,然而,地下硐室围岩和高陡边坡等常发生拉剪破坏,岩石拉剪应力和压剪应力下破裂面破坏机制和形貌特征存在显著区别. 由于拉剪试验技术上的困难,人们对拉剪应力下破裂面的粗糙度特征、分形特征、各向异性特征等的认识不足. 基于此,本文首先采用自研拉剪装置开展直剪试验,制作了不同法向应力下的剪切破裂面,然后通过光学扫描对剪切破裂面进行了三维重构,研究了不同法向应力作用下剪切破裂面的形貌特征、粗糙高度特征参数、粗糙度特征及其各向异性、粗糙度和分形维数的关系等.

1 试验方案

试验采用的砂岩取自三峡库区,呈暗红色,主要矿物为石英、方解石、长石及少量磁铁矿和赤铁矿.通过切割、打磨等工序将砂岩加工成 60 mm×60 mm × 120 mm 的长方体试样.试验系统及辅助装置如图 1 所示.为研究砂岩剪切破裂面形貌特征,首先通过双面剪切试验得到不同法向应力条件下的剪切破

裂面,然后采用 Cronos 三维光学扫描仪对剪切破裂面扫描重构.试验开始前,测得试样的平均抗拉强度为 1.61 MPa.因此,在开展双面剪切试验时,法向拉应力设置 -0.25 MPa、-0.5 MPa、-0.75 MPa、-1.0 MPa、-1.25 MPa 和-1.5 MPa 六个拉应力水平.为对比分析法向拉应力和法向压应力条件下剪切破裂面各向异性特征,设置 9 MPa、6 MPa、3 MPa 三个法向压应力水平.双面剪切试验工况及产生的剪切破裂面如表 1 所示.

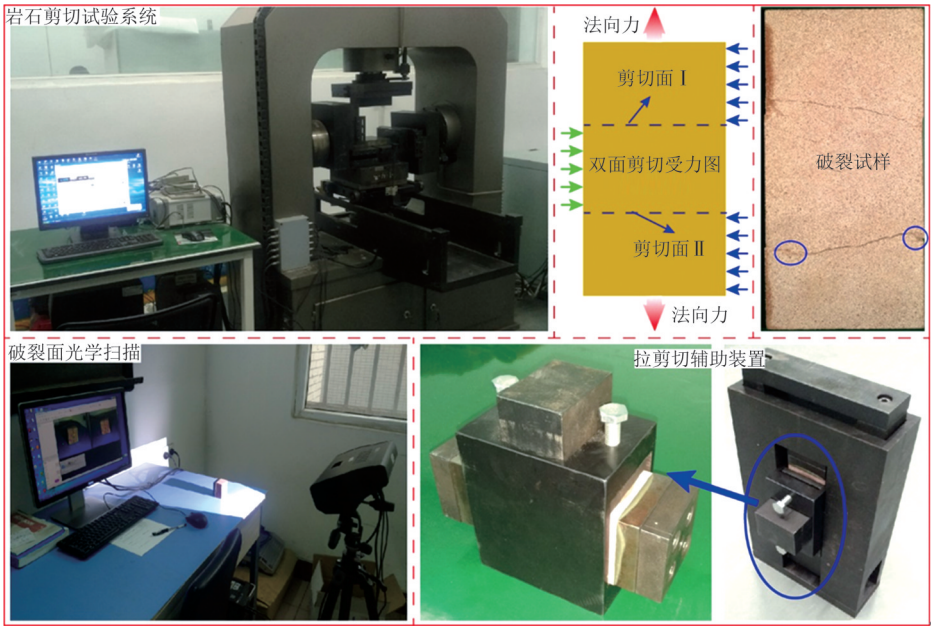


图 1 试验系统及辅助装置

Fig.1 Test system and auxiliary devices

表 1 双面剪切试验工况及对应的剪切破裂面

Tab. 1 Double-sided shear test conditions and shear fracture surfaces

试样	法向应力/ MPa	破裂面编号	试样	法向应力/ MPa	破裂面编号
1#	-1.50	T-1.5-1 T-1.5-2	6#	-0.25	T-0.25-1 T-0.25-2
2#	-1.25	T-1.25-1 T-1.25-2	7#	0	0-1 0-2
3#	-1.00	T-1.0-1 T-1.0-2	8#	3.00	P-3-1 P-3-2
4#	-0.75	T-0.75-1 T-0.75-2	9#	6.00	P-6-1 P-6-2
5#	-0.50	T-0.5-1 T-0.5-2	10#	9.00	P-9-1 P-9-2

双面剪切试验过程中,首先施加法向应力至设定值,加载方式为应力控制模式,加载速率为 0.05 kN/s,然后施加剪应力直至砂岩试样发生破坏.剪应力加

载采用位移控制模式,加载速率为 0.2 mm/min. Cronos 三维光学扫描得到的剪切破裂面点云为无序点云,通过 MATLAB 编程对点云数据进行处理可以得到剪切破裂面有序点云数据.

如图 1 中剪切破裂试样所示,在剪切试验过程中,试样除发生沿剪切面的剪切破坏,在试样表面也会发生局部剥落破坏.为了消除试样表面剥落对计算结果的影响,在计算剪切破裂面参数时,选择剪切破裂面中间区域作为研究范围.如图 2 所示,破裂面边缘各删除 2 mm 宽度,即研究范围为 56 mm×56 mm 的正方形.

2 试验结果与分析

2.1 剪切破裂面形貌特征

基于光学扫描得到的剪切破裂面点云数据,将破裂面高程最低点所在 XOY 平面(平行于试样端面)

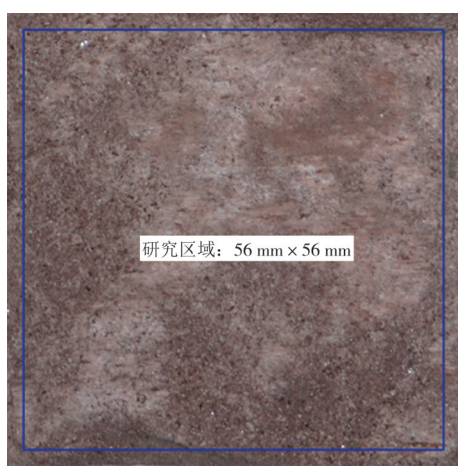
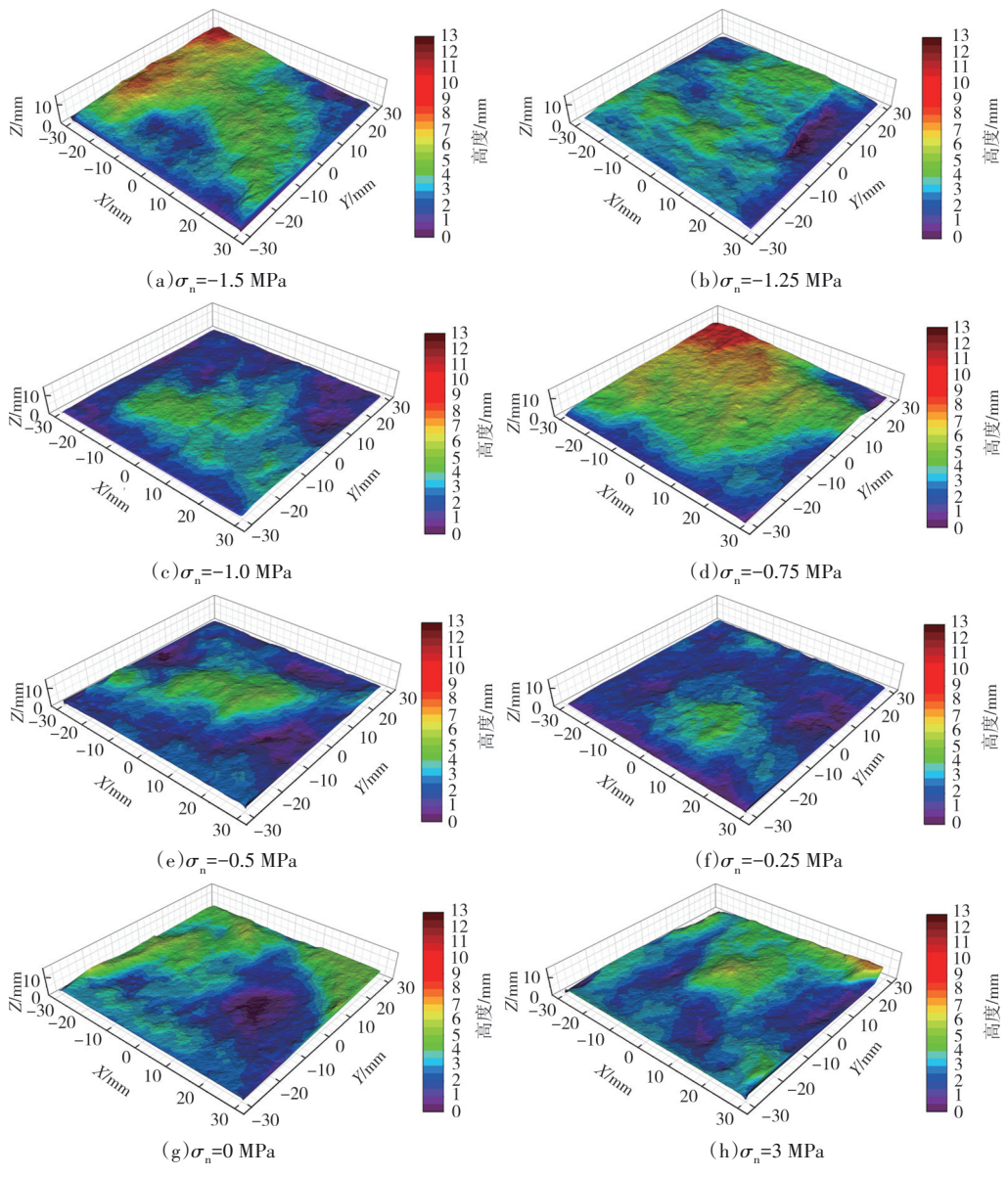


图2 试样表面剥落及剪切破裂面研究范围
Fig.2 Sample surface spalling and the research scope of shear fracture surface

高程坐标设置为零,对不同法向应力作用下砂岩剪

切破裂面进行三维重构,得到破裂面形貌特征如图3所示.由于篇幅原因,图3中相同法向应力下仅呈现了其中一个剪切破裂面.剪切破裂面最大高程范围为4.84~12.43 mm,最大值为12.43 mm,在法向应力为6 MPa时取得;最小值为4.84 mm,在法向应力为-0.25 MPa时取得.

粗糙高度是指破裂面上某高点距离基准面的高度,剪切破裂面起伏高度相对频率可以反映破裂面粗糙高度的分布规律.以 $z=0$ mm对应的平面作为基准面,计算扫描点的高程分布频度.粗糙高度期望值 μ 、标准差 S_q 、均值 S_a 、最大起伏差 S_p 等粗糙高度特征参数能够定量表征剪切形成的破裂面的形态特征.其中,粗糙高度最大起伏差 S_p 是剪切破面上最高点到计算参考面的垂直距离.砂岩试样剪切破裂面粗糙高度特征参数与法向应力关系如图4所示.



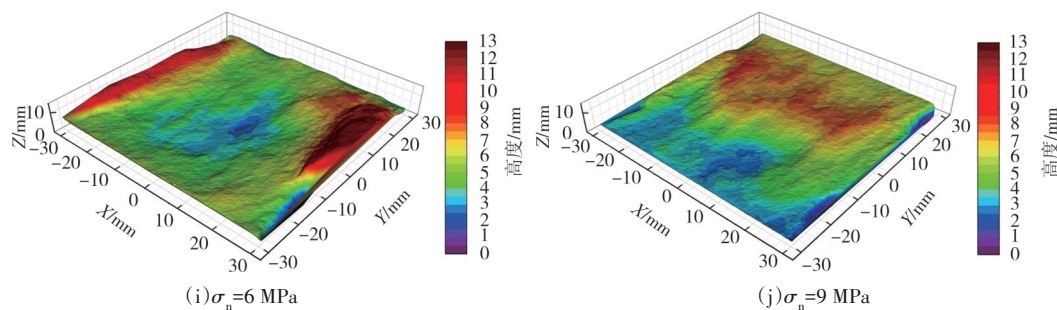


图 3 剪切破裂面三维重构

Fig.3 3D reconstruction of shear fracture surface

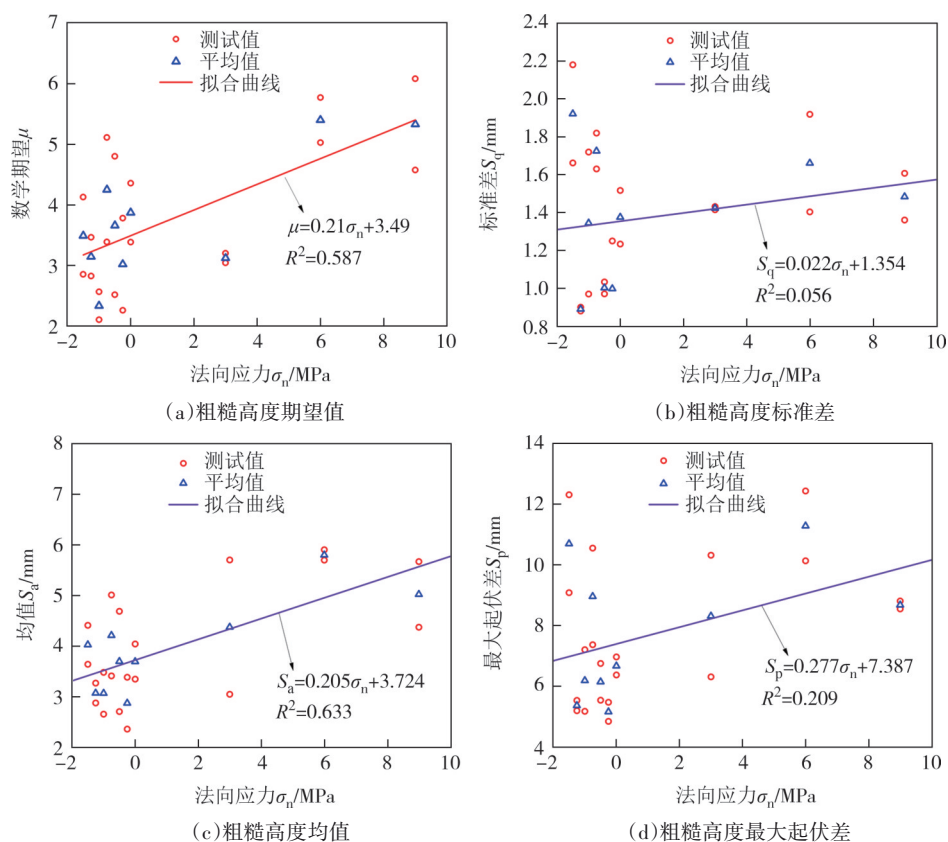


图 4 剪切破裂面粗糙高度特征参数

Fig.4 Variations of the roughness height indexes for the shear fracture surfaces

由图 4 可知,随着法向应力的增大,粗糙高度期望值、最大起伏差、标准差和均值均表现为逐渐增大.这是因为除局部锯齿状起伏会影响破裂面粗糙高度外,破裂面整体起伏同样会对粗糙高度产生影响.随着法向应力的增大,破裂面局部锯齿状起伏减小,但破裂面整体起伏增大,导致粗糙高度随法向应力的增大逐渐增大.黄达等^[18]通过砂岩剪切试验同样发现法向应力越大,剪切破裂面整体起伏越大;法向应力越小,剪切破裂面越平直,这与本试验结果相符.当法向应力为拉应力时,粗糙高度特征参数随法向应力的变化离散性较强,波动范围较大,规律性不

明显.当法向应力为压应力时,粗糙高度特征参数与法向应力的相关性更为明显,粗糙度特征参数波动范围减小.

2.2 粗糙度各向异性

试样剪切破坏后,假定采用一个平行于法相应力方向的平面将试样切开,每个破裂面与该平面有一条交线,该交线即为破裂面的剖面线.Barton 等^[2]给出了 10 个剖面线来表示破裂面的粗糙度,该方法被国际岩石力学与岩石工程学会推荐作为岩体破裂面粗糙度标准曲线.

Tse 等^[19]对剖面线进行了数字化,提出了岩体破裂面粗糙度和破裂面等高线之间的关系方程:

$$\text{JRC} = 32.2 + 32.47 \log Z_2 \quad (1)$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N-1} (Z_{i+1} - Z_i)^2}{(N-1)\Delta s^2}} \quad (2)$$

式中: Z_2 为剖面线一阶导数均方根, Z_i 为破裂面采样点的高程坐标, Δs 为剖面线上数据采样间隔距离(如图 5 所示). 标准剖面线和由其得到的粗糙度可以很好地描述曲线的粗糙特征. 然而, 岩体破裂面是一个三维曲面, 在破裂面上沿不同角度可以得到无数条剖面线, 且各剖面线的粗糙度不同, 因此, 单一标准剖面线法不能描述岩体破裂面粗糙度的各向异性特征. 为研究岩石剪切破裂面粗糙度各向异性特征, 基于剪切破裂面三维扫描得到的点云数据, 沿某一方向描绘出多条剪切破裂面剖面线, 根据式(1)和式(2)即可计算出每条剖面线的粗糙度, 以某一方向所有剖面线粗糙度的平均值作为剪切破裂面在该方向上的粗糙度:

$$\text{JRC}_\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \text{JRC}_{\alpha i} \quad (3)$$

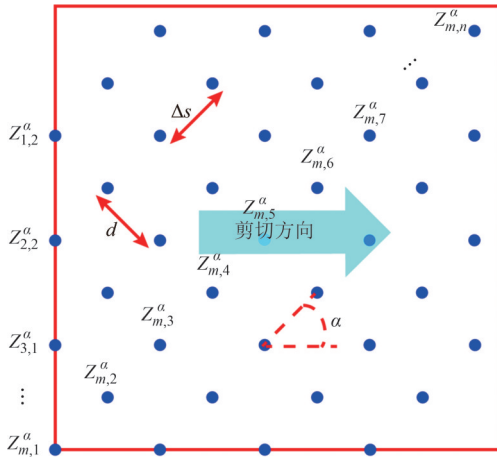


图 5 剪切破裂面粗糙度各向异性计算原理

Fig.5 Principle for anisotropy calculation of roughness

式中: JRC_α 为剪切破裂面在某方向上的粗糙度, $\text{JRC}_{\alpha i}$ 为在某方向上第 i 条剖面线的粗糙度. 岩石剪切破裂面粗糙度各向异性计算原理如图 5 所示. 其中 α 为剖面线在水平面上的投影与剪切方向之间的倾角, d 为相邻两条剖面线之间的距离, Δs 为剪切破裂面上数据点采样间隔, $Z_{m,n}^\alpha$ 为第 m 行和第 n 列测点的实测高度. 当倾角不等于 0° 时, 采用线性插值法得

到目标位置的高度.

不同法向应力作用下, 剪切破裂面粗糙度随 α 的变化规律如图 6 所示. 在不同法向应力下, 粗糙度整体上表现为先减小后增大. 当法向应力大于 0 时, 粗糙度基本呈轴对称分布, 其对称轴的范围为 $75^\circ \sim 90^\circ$; 当法向应力小于 0 时, 粗糙度虽然随着倾角 α 的增大先减小后增大, 但粗糙度并不呈轴对称分布.

粗糙度极差为砂岩剪切破裂面不同方向上最大粗糙度和最小粗糙度的差值, 可以用来定量描述岩体破裂面在不同方向上粗糙度差异. 不同法向应力作用下, 砂岩剪切破裂面粗糙度极差变化规律如图 7(a) 所示. 随着法向应力的增大, 砂岩剪切破裂面粗糙度极差整体上表现为逐渐增大, 破裂面各向异性特征增强, 特别是当法向应力为压应力时, 各向异性随法向应力的增大而增大这一特征更为显著. 剪切破裂面粗糙度极差与法向应力之间的关系可用线性方程表示:

$$\text{JRC}_R = 0.45\sigma_n + 3.37 \quad (4)$$

各向异性参数 DAC 可以用来定量描述破裂面粗糙度的各向异性程度^[20], 其取值范围为 0~1, DAC 越大, 破裂面各向异性特征越显著; DAC 越小, 各向异性越不明显. 各向异性参数可用下式计算:

$$\text{DAC} = 1 - \frac{1}{e^{\text{CV}}} \quad (5)$$

$$\text{CV} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{\alpha=0}^n (\text{JRC}_\alpha - \overline{\text{JRC}})^2}}{\overline{\text{JRC}}} \quad (6)$$

$$\overline{\text{JRC}} = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=0}^n \text{JRC}_\alpha \quad (7)$$

式中: JRC_α 是倾角为 α 时破裂面的粗糙度, $\overline{\text{JRC}}$ 为 JRC_α 的平均值, CV 为破裂面统计方向上粗糙度的变异系数. 各向异性参数与法向应力的关系如图 7(b) 所示. 由图可知, 砂岩剪切破裂面各向异性参数随着法向应力的增大整体上呈逐渐增大趋势, 这表示破裂面各向异性特征随法向应力的增大逐渐增强. 各向异性参数与法向应力的关系可用式(8)表示:

$$\text{DAC} = 0.056(\sigma_n + 1.91)^{0.32} \quad (8)$$

2.3 分形特征

Xie 等^[21]提出了一种使用高阶凸起的平均基长和平均高度来定义分形维数的方法, 分形维数可用式(9)计算:

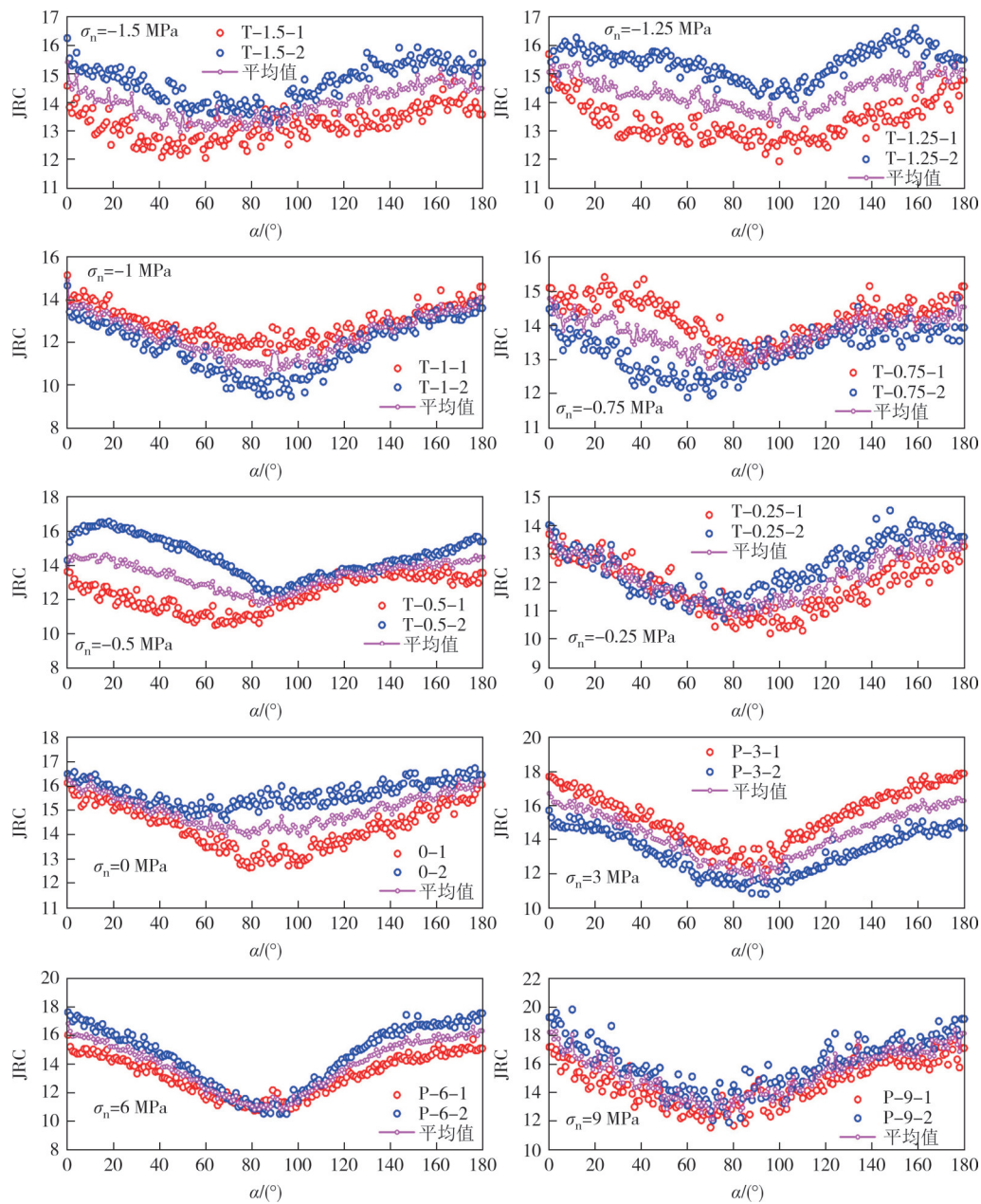
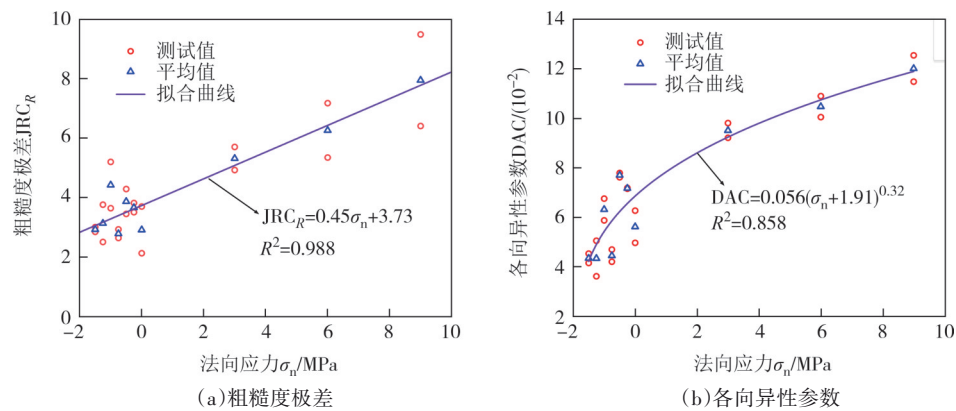
图 6 剪切破裂面粗糙度随倾角 α 的变化规律Fig.6 Changes in the JRC of shear fracture surfaces with the dip angle α 

图 7 粗糙度各向异性指标变化规律

Fig.7 Variation of roughness anisotropy index

$$D = \frac{\log 4}{\log \left\{ 2 \left[1 + \cos \left(\arctan \frac{2H}{L} \right) \right] \right\}} \quad (9)$$

$$H = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i \quad (10)$$

$$L = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i \quad (11)$$

其中: D 为分形维数, h_i 和 l_i 分别为剪切破裂面剖面线第 i 个斜坡的高度和长度.

根据光学扫描得到的点云数据和式(9)可以计算出每条剖面线的分形维数.不同法向应力下砂岩

试样剪切破裂面分形维数与粗糙度的关系如图8所示.在不同的法向应力下,剪切破裂面的分形维数呈非线性增加.当剖面线粗糙度趋近于0时,分形维数趋近于1,这是因为粗糙度 $JRC=0$ 时,剪切破裂面是一个光滑平面,式(9)中斜坡平均高度 $H=0$, $D=1$.

如图8所示,粗糙度和分形维数之间的关系可以用式(12)来表示:

$$JRC = a(D - 1)^b \quad (12)$$

式中: a 和 b 是拟合参数.法向应力在 $-1.5 \sim 9$ MPa范围内,参数 a 的取值范围为 $65.90 \sim 82.57$,参数 b 的取值范围为 $0.43 \sim 0.49$.

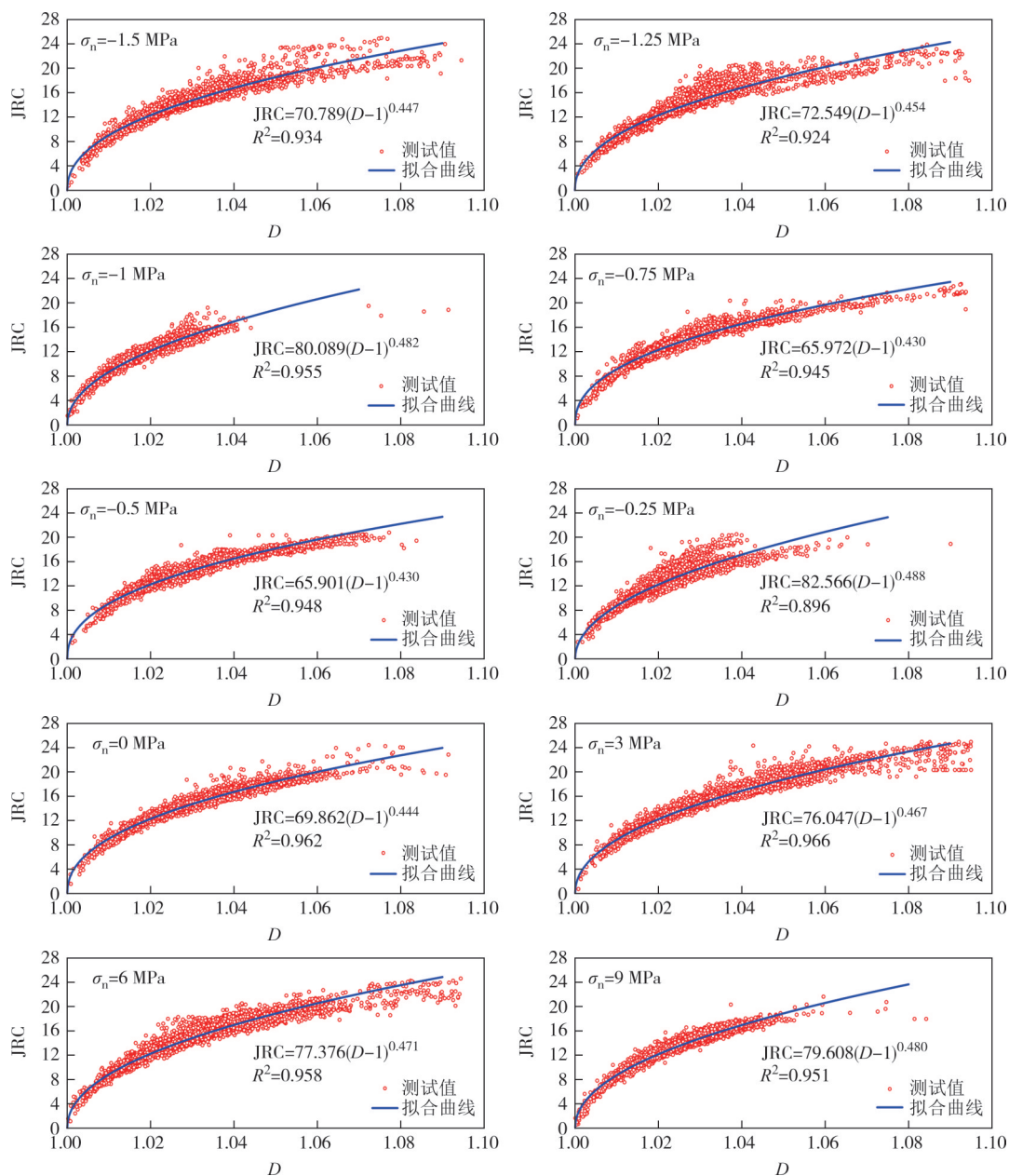


图8 粗糙度与分形维数的关系

Fig. 8 Relationship between roughness and fractal dimension

如图9(a)所示,参数 a 和 b 存在强线性关系:

$$a = 281.47b - 55.13 \quad (13)$$

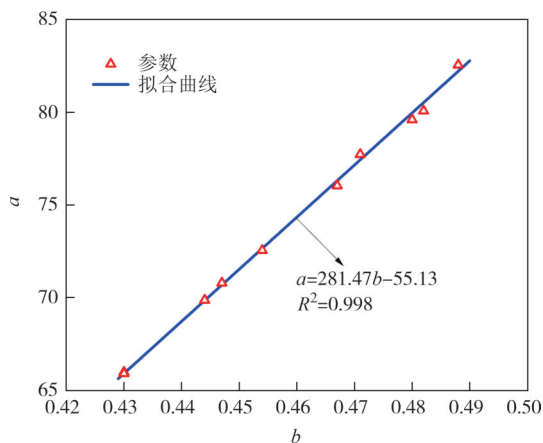
将式(13)代入式(12),砂岩剪切破裂面粗糙度与分形维数的关系可以改写为:

$$\text{JRC} = (281.47b - 55.13)(D - 1)^b \quad (14)$$

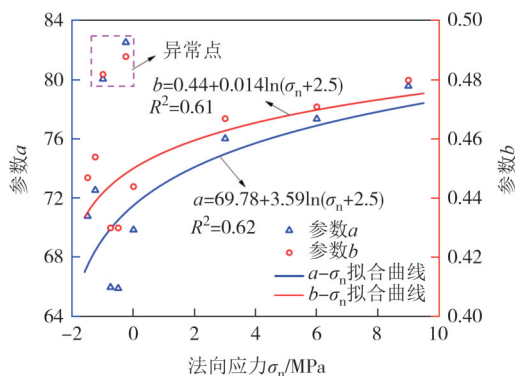
参数 a 和 b 随法向应力的增大整体表现为逐渐增大.如图9(b)所示,由于砂岩材料是非连续非均质材料,当法向应力为-1 MPa和-0.25 MPa时,两个参数明显偏离了数据的整体变化趋势,可认为这两组数据异常,在曲线拟合时忽略这两组数据.参数 a 和 b 与法向应力的关系可用对数函数表示:

$$a = 69.78 + 3.59 \ln(\sigma_n + 2.5) \quad (15)$$

$$b = 0.44 + 0.014 \ln(\sigma_n + 2.5) \quad (16)$$



(a) 参数 a 和 b 关系曲线



(b) 参数 a 和 b 与法向应力关系

图9 拟合参数 a 和 b 变化规律

Fig.9 Changes in fitting parameters a and b

3 结论

为研究砂岩剪切破裂面形貌特征和粗糙度各向异性特征,开展了不同法向应力作用下砂岩剪切试

验,并对剪切破裂面进行了三维扫描和重构,研究了砂岩剪切破裂面的形貌特征、粗糙度特征及其各向异性、粗糙度和分形维数关系等,可以得到以下主要结论:

1)砂岩试样剪切破裂面粗糙高度期望值、最大起伏差、标准差和均值随法向应力的增大整体逐渐增大.

2)剪切破裂面的粗糙度具有显著的各向异性特征.随着与剪切方向夹角的增大,剪切破裂面粗糙度先减小后增大.法向应力为压应力时,粗糙度基本呈轴对称分布,对称轴的范围为 $75^\circ \sim 90^\circ$.

3)粗糙度与分形维数之间的关系可用 $\text{JRC} = a(D-1)^b$ 描述,其中参数 a 和 b 随法向应力的增大呈非线性增大, a 和 b 呈强线性关系.

参考文献

- [1] BARTON N. Review of a new shear-strength criterion for rock joints[J]. Engineering Geology, 1973, 7(4): 287-332.
- [2] BARTON N, CHOUBEY V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics, 1977, 10(1): 1-54.
- [3] LI B, MO Y Y, ZOU L C, et al. Influence of surface roughness on fluid flow and solute transport through 3D crossed rock fractures[J]. Journal of Hydrology, 2020, 582: 124284.
- [4] MA S M, SINGER G, CHEN S H, et al. Objective-driven solid-surface-roughness characterization for enhanced nuclear-magnetic-resonance petrophysics[J]. SPE Journal, 2021, 26(5): 2860-2879.
- [5] 金磊磊,魏玉峰,黄鑫,等. 基于节理面三维形貌的岩石节理抗剪强度计算模型[J]. 岩土力学, 2020, 41(10): 3355-3364.
- [6] JIN L L, WEI Y F, HUANG X, et al. Shear strength calculation model of rock joints based on three-dimensional morphology of joint surface [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(10): 3355-3364. (in Chinese)
- [7] YANG Z Y, LO S C, DI C C. Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using Z2[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, 34(3): 243-251.
- [8] REEVES M J. Rock surface roughness and frictional strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1985, 22(6): 429-442.
- [9] ÖZVAN A, DINÇER İ, ACAR A, et al. The effects of discontinuity surface roughness on the shear strength of weathered granite joints [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(3): 801-813.
- [9] BAN L R, QI C Z, LU C S. A direction-dependent shear strength

- criterion for rock joints with two new roughness parameters [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, 11(16): 466.
- [10] TANG Z C, LIU Q S, HUANG J H. New criterion for rock joints based on three-dimensional roughness parameters [J]. *Journal of Central South University*, 2014, 21(12): 4653–4659.
- [11] BELEM T, HOMAND-ETIENNE F, SOULEY M. Quantitative parameters for rock joint surface roughness [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2000, 33(4): 217–242.
- [12] ZHANG Q Z, WU C Z, JANG B A, et al. Shear behavior of greenschist along foliation plane considering anisotropy [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2019, 108(5): 1755–1761.
- [13] HUANG M, HONG C J, MA C R, et al. Characterization of rock joint surface anisotropy considering the contribution ratios of undulations in different directions [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 17117.
- [14] 陈世江, 朱万成, 刘树新, 等. 岩体结构面粗糙度各向异性特征及尺寸效应分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(1): 57–66.
- CHEN S J, ZHU W C, LIU S X, et al. Anisotropy and size effects of surface roughness of rock joints [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(1): 57–66. (in Chinese)
- [15] 邹先坚, 王益腾, 王川婴. 钻孔图像中岩石结构面三维形貌特征及优势抗滑方向研究 [J]. *岩土力学*, 2020, 41(增刊1): 290–298.
- ZOU X J, WANG Y T, WANG C Y. Three-dimensional morphological feature of rock structural surfaces and dominant anti-slip direction using the borehole images [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(Sup.1): 290–298. (in Chinese)
- [16] BABANOURI N, KARIMI NASAB S. Modeling spatial structure of rock fracture surfaces before and after shear test: a method for estimating morphology of damaged zones [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(3): 1051–1065.
- [17] 周枝华, 杜守继. 岩石节理表面几何特性的三维统计分析 [J]. *岩土力学*, 2005, 26(8): 1227–1232.
- ZHOU Z H, DU S J. 3D statistic analysis of geometrical properties of a rock joint [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(8): 1227–1232. (in Chinese)
- [18] 黄达, 张永发, 朱谭谭, 等. 砂岩拉-剪力学特性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(2): 272–276.
- HUANG D, ZHANG Y F, ZHU T T, et al. Experimental study on tension-shear mechanical behavior of sandstone [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(2): 272–276. (in Chinese)
- [19] TSE R, CRUDEN D M. Estimating joint roughness coefficients [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1979, 16(5): 303–307.
- [20] 宋磊博, 江权, 李元辉, 等. 不同采样间隔下结构面形貌特征和各向异性特征的统计参数稳定性研究 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(4): 1121–1132.
- SONG L B, JIANG Q, LI Y H, et al. Stability of statistical parameters of discontinuities morphology and anisotropy based on different sampling intervals [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(4): 1121–1132. (in Chinese)
- [21] XIE H P, PARISEAU W G. Fractal estimation of joint roughness coefficients [J]. *Science in China (Series B)*, 1994, 37(12): 1516–1524.