

文章编号: 1001-4888(2022)04-0488-09

高温作用后类岩石结构面剪切力学特性研究^{*}

李婷¹, 姜谔男¹, 张峰瑞¹, 万友生²

(1. 大连海事大学 道路与桥梁工程研究所, 辽宁大连 116026; 2. 南昌轨道交通集团有限公司, 江西南昌 330013)

摘要: 为研究高温对结构面剪切力学性质的影响, 开展了高温作用后类岩石结构面的剪切试验, 分析了高温作用后, 类岩石结构面剪切应力、剪切位移和岩壁抗压强度的变化规律。试验结果表明, 随着温度的增加, 剪切应力-剪切位移曲线发生明显的变化, 其中峰值剪切应力呈现降低的趋势, 而剪切位移逐渐增大; 并且法向应力的增大对高温引起的热损伤具有一定的抑制作用。根据试验结果, 考虑高温对结构面剪切力学性质的影响, 计算出 Barton-Bandis 准则里的结构面岩壁抗压强度(JCS), 构建了能够反映高温对 JCS 影响的关系式, 通过对试验曲线的拟合, 验证了关系式的正确性。本文研究结果对高温后岩体工程的稳定性评价具有一定的参考作用。

关键词: 高温; 结构面; 剪切力学特性; Barton-Bandis 准则; 结构面岩壁抗压强度

中图分类号: TU452 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-153

0 引言

在地下工程建设中, 岩体会受到高温作用的影响, 使其力学性质发生改变, 甚至会造成工程事故, 因此对高温岩体的力学特性进行研究具有重要的工程意义。天然岩体内部存在大量的节理、断层等结构面, 而结构面对岩体的变形和破坏起着控制作用^[1]。结构面抗剪强度是影响地下工程稳定的重要因素, 高温后结构面的抗剪强度发生劣化, 将会直接威胁地下工程的安全, 因此, 开展高温作用后结构面剪切力学特性的研究具有重要的理论意义与工程应用价值。

在常温结构面的剪切力学特性研究方面, Patton^[2]考虑规则结构面-锯齿状节理对岩体强度的影响, 提出了双线性抗剪强度准则。Barton 等^[3]提出了现在最为常用的结构面抗剪强度准则。Tse 等^[4]提出了一阶导数均方根、二阶导数均方根, 并与节理粗糙度系数(JRC)建立了函数关系式。Xia 等^[5]通过选取同一结构面不同间距处的二维轮廓线发现, 二维轮廓线难以准确反映真实结构面的形貌特征。Belem 等^[6]用 5 个参数表示了结构面的三维形貌特征。Grasselli 等^[7]在描述结构面的三维形貌特征时, 考虑了结构面的剪切方向分布规律。唐志成等^[8]提出了一种能够充分考虑剪膨胀效应并且满足莫尔-库仑定律要求的峰值抗剪强度准则。多位学者通过不同法向应力下的直剪试验, 分析了规则结构面的剪切强度、剪切变形以及剪切损伤机制^[9-11]。陈世江等^[12]通过对 3 种不同类型的结构面进行直剪试验, 研究了结构面的形貌特征和峰值强度之间的相互关系。许江等^[13]研究了循环剪切次数和不同填充材料对岩体抗剪强度的影响。

近年来, 国内外学者对高温岩体力学特性方面进行了大量的研究。Gautam 等^[14]通过研究不同热循环次数的花岗岩, 建立了热循环下的岩石损伤模型。Li 等^[15]通过高温试验统计了岩石裂隙的方向和

^{*} 收稿日期: 2021-06-23; 修回日期: 2021-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(No. 52078093); 辽宁省兴辽英才项目(No. XLYC1905015)资助

通信作者: 姜谔男(1971—), 男, 博士, 教授。主要从事岩土工程稳定性分析和多场耦合方面的研究工作。Email: jiangannan@163.com

数量,发现裂隙倾向于岩体薄弱面发展。Li等^[16]对高温后的花岗岩进行了水力压裂试验,研究了高温和循环次数对岩石水力性能的影响。Zhao等^[17]研究了高温条件下节理花岗岩的力学性质,分析了节理岩体的破坏规律。邵保平等^[18]建立了热作用下花岗岩剪切破坏强度准则。吴顺川等^[19]对花岗岩进行巴西劈裂试验,研究高温对花岗岩微观结构和声发射特性的影响,结果表明花岗岩热损伤阈值温度为400~600℃。朱谊^[20]进行了高温环境下的混凝土力学试验与数值模拟,得出了在高温下剪切应变的一般规律。吴阳春等^[21]研究了高温后花岗岩的物理力学特性与温度变化的关系。

综上所述,目前关于高温作用后岩体结构面剪切力学特性的研究并不多见。在高温的作用后,岩体的力学性质会发生不同程度的劣化,极易引发工程事故。鉴于此,本文对经过高温作用后的类岩石结构面进行直剪试验,分析高温和法向应力对结构面的剪切力学特性以及结构面岩壁抗压强度(JCS)的变化规律,所得结果可为高温地下工程稳定性的分析提供一定的参考。

1 试验方案

1.1 试件的制备

为了保持结构面的相对一致性,本文以劈裂方式得到花岗岩结构面,以花岗岩结构面为原型复刻出混凝土结构面,试件尺寸为200mm×100mm×100mm,配比为水:标准砂:硅酸盐42.5R水泥=1:2:4。先把被劈裂的花岗岩放入模具中,拧紧所有的螺栓使其固定好,并在所有与水泥砂浆接触的界面涂抹上凡士林,再将按上述质量比配制好的水泥砂浆放入搅拌机中均匀地搅拌,然后将搅拌好的水泥砂浆倒入模具中并用抹刀抹平,最后将整个装满水泥砂浆和花岗岩的模具放在振捣台上,每分钟振捣1次,共振捣3次,振捣完后将表面的气泡全部抹平,放置24h后进行拆模,最后把试件取出来放到混凝土标准的养护箱中,养护箱内湿润程度保持在95%以上,养护室内的温度控制在20℃,养护28d后,进行相应的高温试验,试件的制备如图1所示。

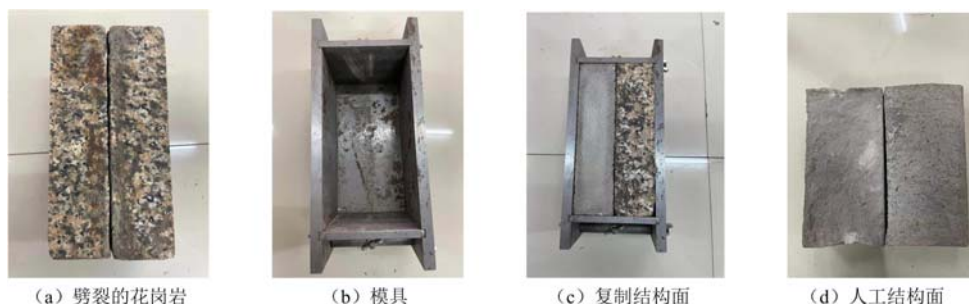


图1 试件的制备

Fig. 1 Preparation of specimen

1.2 试验设备

通过三维形貌激光测试仪获取结构面的三维形貌参数,该仪器由激光扫描仪、工作台、计算机和数据采集系统等组成。首先将试件放在工作台上,利用计算机控制试件的移动,通过激光扫描仪获取结构面起伏的形貌,然后通过数据采集控制系统得到试件结构面的形貌点集,最后借助图像处理软件得到试件的三维形貌图。

利用高温炉对试件进行高温加热,高温炉由箱体、循环风机和控制器组成,炉膛尺寸为400mm×250mm×160mm,最高加热温度为1000℃。首先,将试件以结构面向上的方式放在高温炉内,试件之间需要有一定的间隙,然后关闭炉门,通过控制器把温度设置成预设温度,最后打开控制器的开关,高温炉将以2℃/s的升温速度进行缓慢加热,加热到预设温度,关闭控制器的开关,并断开电源。为避免遭受热冲击,试件在炉内保温2h以保证岩样受热均匀。

采用JAW-600多功能剪切流变仪对试件进行剪切,该装置主要由剪切盒(200mm×100mm×100mm)、加载框架、法向加载系统、切向加载系统、传感器和采集系统等部分组成,可进行直剪试验。该装置的主要技术参数:(1)法向和切向荷载最高可以加载到600kN;(2)法向位移的范围为0~10mm,

剪切向位移范围为 0~25mm。对不同温度组的试件进行不同法向应力下的直剪试验,法向应力选取 5MPa、10MPa、15MPa、20MPa 4 个等级,试验设备如图 2 所示。

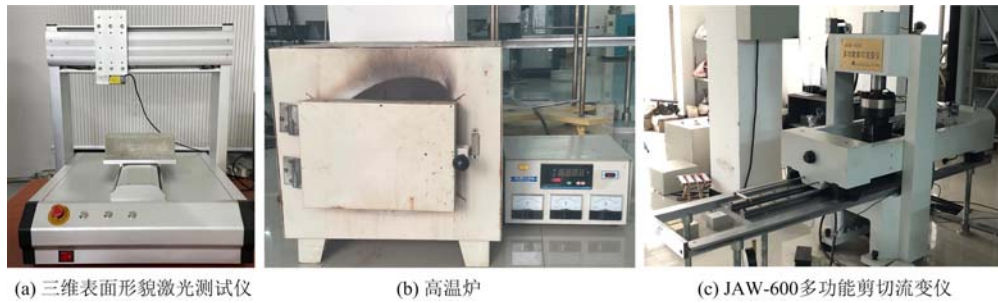


图 2 试验设备

Fig. 2 Test equipment

1.3 试验方案

本文试验主要研究高温对结构面剪切力学特性的影响,试验方案见表 1。由于人工结构面的离散性较小,仅选取典型试件的结果进行分析,结构面试件如图 3 所示。

表 1 试验方案

Tab.1 Test scheme

温度/℃	试件编号	法向应力/MPa	温度/℃	试件编号	法向应力/MPa
25	0-1	5	200	1-1	5
	0-2	10		1-2	10
	0-3	15		1-3	15
	0-4	20		1-4	20
400	2-1	5	600	3-1	5
	2-2	10		3-2	10
	2-3	15		3-3	15
	2-4	20		3-4	20
800	4-1	5			
	4-2	10			
	4-3	15			
	4-4	20			



图 3 结构面试件

Fig. 3 Structural interview piece

试验过程如下:

(1) 通过三维表面形貌激光测试仪获得节理面的三维坐标点云数据,计算得到节理面的三维形貌参数。

(2) 将试件分别加热至 200℃、400℃、600℃ 和 800℃,加热完成后,保温 2h 以保证试件受热均匀,避免遭受热冲击。

(3) 冷却至常温后,再通过三维表面形貌激光测试仪对不同温度的岩体进行结构面表面三维形貌量测,得到不同温度下的岩体结构面的三维形貌参数。

(4) 将试件放入上、下两个刚性剪切盒,上下结构面充分耦合;在试件上施加法向应力,使剪切向加载头与剪切盒接触,初始剪切应力为 0.5MPa,加载速率为 0.1MPa/min,分别加载 5MPa、10MPa、15MPa 和 20MPa 4 个等级的法向应力,直至试件破坏,记录试验结果。

(5) 试件被破坏后,先将法向应力卸载到 0,后将剪应力卸载到 0。

2 试验结果分析

2.1 剪切应力-剪切位移曲线分析

高温后试件在不同法向应力下的剪切应力-剪切位移曲线如图4所示。试验曲线总体趋势基本一致,剪切应力迅速上升至峰值后,开始下降并衰减至残余强度。在同一法向应力下,随着温度的升高,剪切应力下降,剪切位移增大。在法向应力为5MPa的情况下,随着温度的升高,峰值剪切应力由4.37MPa减少至2.41MPa,峰值剪切位移由0.528mm增加至0.941mm。

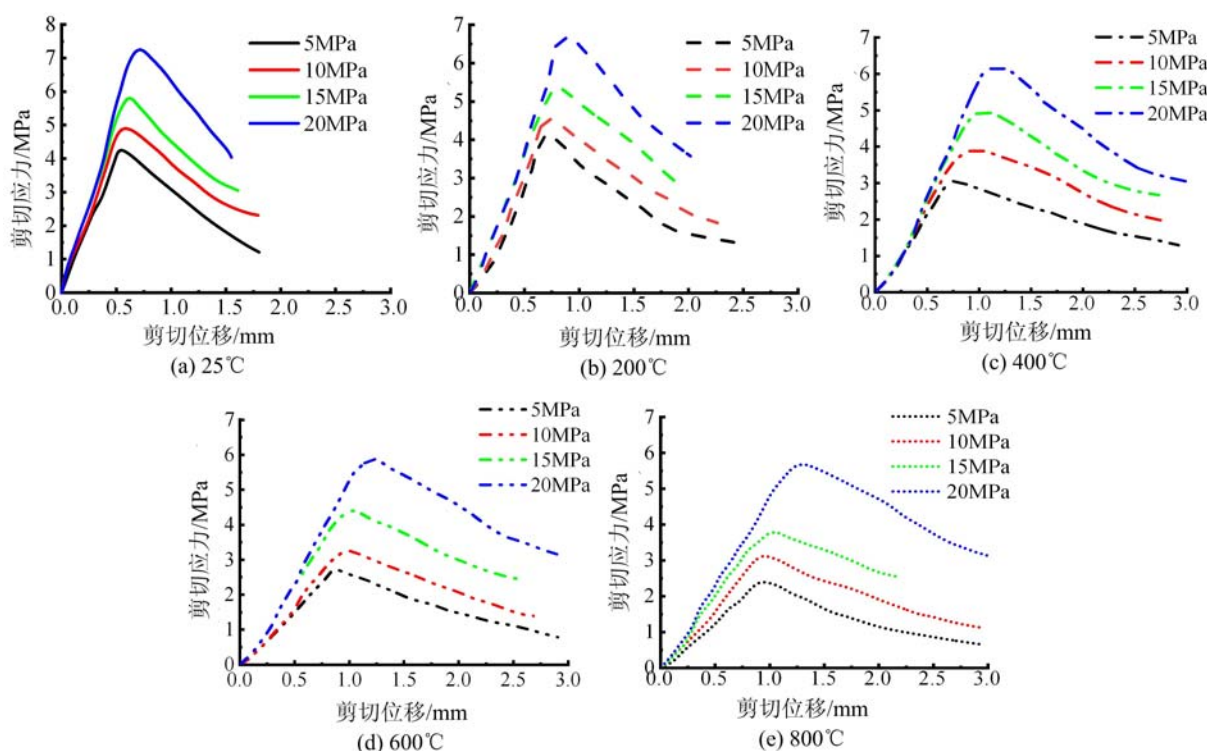


图4 不同温度下剪切应力-剪切位移关系曲线

Fig. 4 Shear stress-shear displacement curves under different temperatures

然而在同一温度下,随着法向应力的增大,剪切应力和剪切位移都增大。在常温(25°C)情况下,随着法向应力的增加,峰值剪切应力由4.37MPa增加至7.31MPa,峰值剪切位移由0.528mm增加至0.731mm。在200°C情况下,随着法向应力的增加,峰值剪切应力由4.05MPa增加至6.67MPa,峰值剪切位移由0.733mm增加至0.838mm。在400°C情况下,随着法向应力的增加,峰值剪切应力由3.07MPa增加至6.20MPa,峰值剪切位移由0.768mm增加至1.159mm。在600°C情况下,随着法向应力的增加,峰值剪切应力由2.76MPa增加至5.91MPa,峰值剪切位移由0.866mm增加至1.215mm。在800°C情况下,随着法向应力的增加,峰值剪切应力由2.42MPa增加至5.69MPa,峰值剪切位移由0.941mm增加至1.329mm。这是因为,人工试件是由水泥与砂浇筑而成,经过高温处理后,试件内部水汽蒸发,水汽膨胀使得试件产生损伤微裂缝,导致试件强度变低。而法向应力的增加使得试件上下结构面的咬合程度有所提高,提高了试件的抗剪强度。

由图4可以看出,曲线的变化规律基本相同。大体上可以分为3个阶段:(1)弹性变形阶段(OA段):在剪切试验初期,剪切应力小于结构面上的静摩擦力,结构面无法发生相对位移。此时剪切位移随着剪切应力呈线性增长关系,剪切应力迅速增长而剪切位移却增长很小。(2)强度弱化阶段(AB段):剪切应力开始增大,超过静摩擦力,结构面开始发生相对位移。此时剪切位移和剪切应力呈非线性关系,曲线斜率增大,变形变缓,这是因为上下结构面存在一定的咬合力,使得剪切变形速度变缓。(3)残余强度阶段(BC段):剪切应力达到峰值剪切应力时,上下结构面凹凸不平的骨料开始被磨损,继续提供承载力,剪切位移继续增大,剪切应力开始下降直至被试件剪断,剪切应力趋于平缓,逐渐达到剪切残

余强度,剪切位移趋于稳定(图 5)。

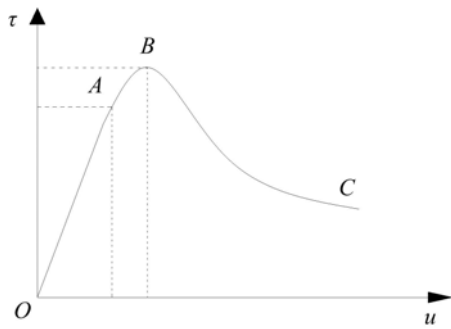


图 5 剪切应力-剪切位移曲线

Fig. 5 The curve of shear stress-shear displacement

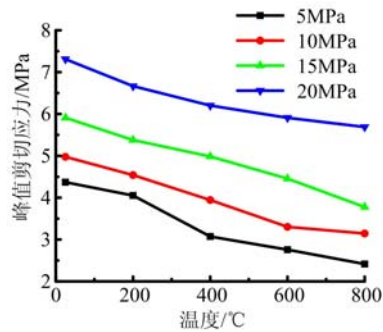


图 6 不同法向应力下的峰值剪切应力随温度变化曲线

Fig. 6 Variation of peak shear stress with temperature under different normal stresses

2.2 峰值剪切应力随温度变化的规律

图 6 为不同法向应力下的峰值剪切应力随温度变化的关系曲线。4 种法向应力下的峰值剪切应力受温度影响的变化趋势一致,峰值剪切应力均随着温度的升高而降低。这主要是由于经过高温处理后的人工试件已经超过了材料的极限强度,此时人工试件内部就会产生微裂隙,导致人工试件本身承受变形的能力下降,随着温度的上升,对热应力的作用也会愈加明显,热应力增大,试件内部产生较多微裂隙,原生的裂纹会在热应力的推动下逐渐扩展、加宽和贯通,从而使得试件的峰值剪切应力下降。

由图 6 可知,在高温作用后,峰值剪切应力随温度增加呈递减趋势,且降低幅度也在减小。当法向应力为 5MPa 时,峰值剪切应力由 4.37MPa 下降到 2.41MPa,降低了 44.85%。当法向应力为 10MPa 时,峰值剪切应力由 4.98MPa 下降到 3.14MPa,降低了 36.95%。当法向应力为 15MPa 时,峰值剪切应力由 5.91MPa 下降到 3.78MPa,降低了 36.04%。当法向应力为 20MPa 时,峰值剪切应力由 7.31MPa 下降到 5.69MPa,降低了 22.16%。由此可见,高温作用使得峰值应力发生衰减,法向应力对温度引起的衰减起到一定的抑制效果。

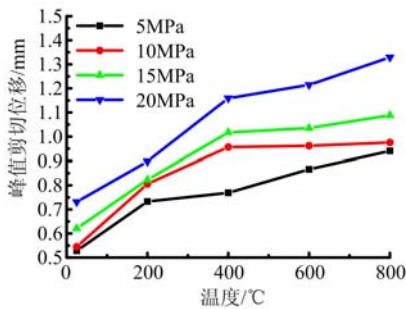


图 7 不同法向应力下的峰值剪切位移随温度的变化

Fig. 7 Variation of peak shear displacement with temperature under different normal stresses

2.3 峰值剪切位移随温度变化的规律

图 7 为不同法向应力下的峰值剪切位移随温度变化的关系曲线。4 种法向应力下的峰值剪切位移的变化趋势一致,峰值剪切位移随着温度的升高而升高。这主要是由于试件在高温的作用下,温度会直接使试件的伸延性大大提高,温度的不断升高将直接导致试件内部空间不断产生相互连续贯穿的多个温度区域裂纹,将形成砂浆过程中的惰性气体分散开来从而形成若干个独立的温度区域,试件内部分子的热运动增强,使其黏聚力减弱,温度越高,试件内部产生微裂纹的机会越大,从而使剪切位移增加。

由图 7 可知,在高温作用后,峰值剪切位移的增长幅度发生改变。当法向应力为 5MPa 时,峰值剪切位移由 0.528mm 增加至 0.941mm。当法向应力为 10MPa 时,峰值剪切位移由 0.545mm 增加至 0.976mm。当法向应力为 15MPa 时,峰值剪切位移由 0.621mm 增加至 1.088mm。当法向应力为 20MPa 时,峰值剪切位移由 0.731mm 增加至 1.329mm。由此可以看出,在法向应力一定的情况下,高温对试件强度特性有较大的影响,法向应力的增加,剪切位移的增量也越大。

2.4 温度损伤机制分析

试件受热而使内部水分蒸发,水汽膨胀使试件内部产生新的微裂纹,导致试件峰值应力下降,峰值位移增大,此时温度对试件的剪切力学性质具有削弱作用。随着时间的推移,试件内的温度达到最高,

人工试件内部混凝土和砂等颗粒继续相互挤压,造成内部产生热损伤,衍生出新的裂纹,同时这种热损伤随着温度的升高而进一步增大。当试件内部温度均匀时,应力降低到零,结构面将很有可能产生较大裂缝,最终导致试件的峰值应力降低,峰值位移增大,整体性质劣化。

200℃时,由于高温作用,试件内部发生水化反应,自由水脱离,降低了试件的黏结力;400℃时,试件内部的硬化物发生分解,结合水脱出,进一步降低黏结力,从而降低试件的抗剪强度;600℃时,试件内部骨料加速分解,Ca(OH)₂分解为 CaO 和 H₂O, CaO 与空气中的水结合又形成 Ca(OH)₂,试件发生剧烈膨胀,抗剪强度进一步下降;800℃时,骨料发生崩解,试件内部损伤严重。

3 不同温度下结构面岩壁抗压强度 JCS 与剪切强度准则的关系

3.1 高温对结构面形貌参数的影响

通过三维形貌激光测试仪获取试件结构面的形貌数据,借助图像处理软件可以得到未经过高温处理试件的形貌图,如图 8 所示。高温处理后通过三维激光扫描仪发现结构面形貌图没有发生显著变化,但是,实际上高温作用使试件发生热损伤,结构面细观特征会发生改变。但限于试验条件,未开展电镜扫描等微观试验,笔者将在下一步开展研究。

首先采用 Tse 等^[4]的公式计算结构面二维剖面线 JRC 值:

$$JRC = 32.2 + 32.4 \lg Z_2 \quad (1)$$

式中: $Z_2 = \left[\frac{1}{L} \sum_{i=1}^{N-1} \frac{(y_{i+1} - y_i)^2}{(x_{i+1} - x_i)^2} \right]^{\frac{1}{2}}$; L 为结构面剖面线的长度; x_i 和 y_i 为剖面线上各点的坐标, n 为样点的总个数。

由结构面剖面线的加权平均可以获得结构面的三维粗糙度:

$$JRC^{3D} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m JRC_i \quad (2)$$

式中: JRC^{3D} 为三维结构面粗糙度; JRC 为每个剖面线的粗糙度; m 为剖面线的个数。

高度均值 u_z 反映了结构面的起伏形态,表达式为

$$u_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (3)$$

式中: z_i 为每个样点的高度。

平均倾角 θ 反映了节理表面平均起伏度, Homand 等^[22]于 2001 年提出节理平均倾角 θ , 表达式为

$$\theta = \arctan \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^m \left| \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \right| \right] \quad (4)$$

轮廓面积比 A_0 是面对剪切方向的微元面积总和 A_f 与粗糙节理面实际面积 A_r 的比值, 它能较好地反映表面粗糙程度, 其值越接近 1, 表明表面越光滑; 反之, 表面越粗糙。轮廓面积比的公式为

$$A_0 = \frac{A_f}{A_r} \quad (5)$$

根据结构面三维形貌扫描数据, 按照式(1)~(5)计算得到的三维形貌参数, 见表 2。

表 2 结构面形貌特征参数

Tab. 2 Morphology characteristic parameters of structural surfaces

	粗糙度系数	高度均值/mm	平均倾角/(°)	最大接触面积比
结构面	13.68	0.48	13.18	0.36

Barton 等^[3]在大量试验的基础上, 综合考虑法向应力、节理粗糙度 JRC 和结构面岩壁抗压强度 JCS 的影响, 提出了如下抗剪强度公式:

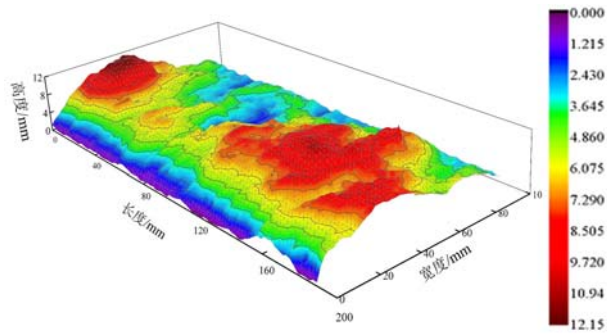


图 8 试件的三维形貌图

Fig. 8 Three-dimensional morphology of the specimen

$$\tau = \sigma_n \tan \left[\varphi_b + \text{JRC} \lg \left(\frac{\text{JCS}}{\sigma_n} \right) \right] \quad (6)$$

式中: τ 为节理抗剪强度; σ_n 为节理法向应力; φ_b 为摩擦角, 可取 30° ; JRC 为节理粗糙系数; JCS 为结构面岩壁抗压强度。

高温扫描过后, 发现结构面的形貌参数没有改变, 故根据式(6)在 $\sigma_n \neq 0$ 的情况下可以反求出 JCS:

$$\text{JCS} = \sigma_n \times 10^{\frac{\arctan(\frac{\tau}{\sigma_n}) - \varphi_b}{\text{JRC}}} \quad (\sigma_n \neq 0) \quad (7)$$

3.2 高温对结构面岩壁抗压强度 JCS 的影响

将试验数据代入式(7), 可以得到在同一法向应力下, 结构面岩壁抗压强度 JCS 和温度的关系, 如图 9 所示。图中, 试件的摩擦角为 30° , JRC 为 13.68, τ 为峰值剪切应力, 法向应力分别取 5MPa、10MPa、15MPa 以及 20MPa。由图 9 可知, 结构面岩壁抗压强度 JCS 随着温度的增高而降低, 符合线性关系, 二者之间的函数表达式为

$$\text{JCS} = a + b \times T \quad (8)$$

式中: a 、 b 为拟合系数。

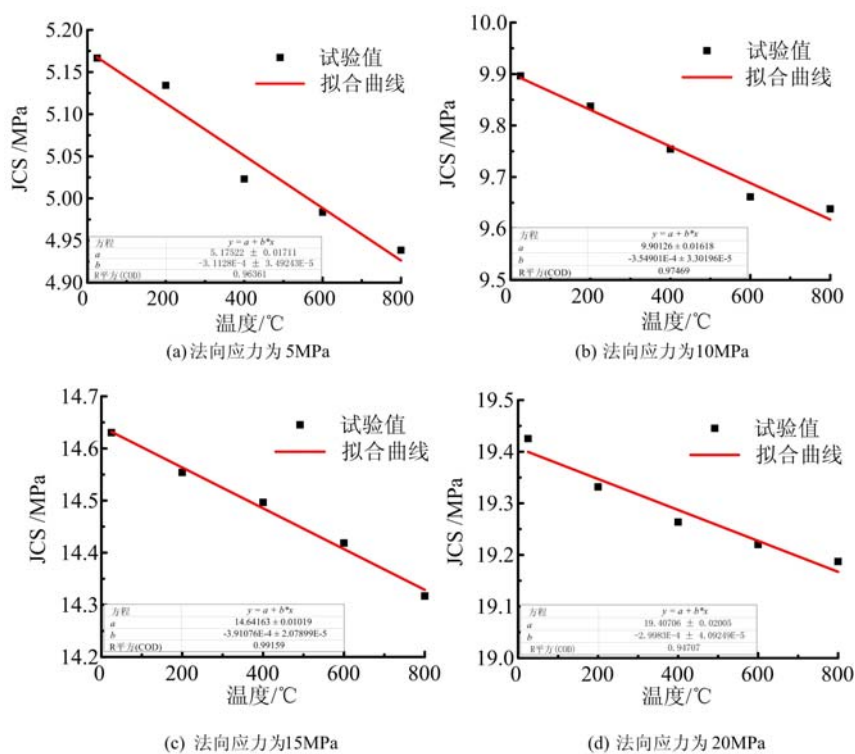


图 9 不同法向应力下 JCS 随温度变化曲线

Fig. 9 JCS curves with temperature under different normal stresses

从图 9 可以看出, 在 4 种法向应力的作用下, JCS 均随着温度的增大而减小。这主要是由于高温使试件内部骨料加速分解, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 分解为 CaO 和 H_2O , CaO 与空气中的水结合又形成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 试件发生剧烈膨胀, 又在热应力的作用下, 试件产生微裂隙, 使试件的抗压能力弱化, 而且随温度升高, 试件产生更多微裂隙或使裂隙扩展、加宽和连通, 表现为试件结构面抗压岩壁强度随温度的增加而降低。从图 9 中还可以看出, 拟合结果中的决定系数均在 0.94 以上, 属于高度相关, 表明本文提出的式(8)能够很好地反映试件在温度作用下结构面岩壁抗压强度的变化。

4 结论

本文主要研究了高温后结构面的剪切力学性质, 主要结论如下:

(1) 通过分析不同温度下剪切应力-剪切位移曲线, 发现在不同温度的作用下, 剪切应力和剪切位

移的大小会发生变化,但是曲线的变化趋势基本相同,首先剪切应力迅速上升到峰值后,逐渐衰减到残余强度。曲线主要可以分为3个阶段:弹性变形阶段、强度弱化阶段、残余强度阶段。

(2) 由试验结果可以看出,影响结构面的剪切力学性能的主要因素是温度和法向应力。剪切应力随着温度的升高而减小,而剪切位移随着温度的升高而增大;剪切应力与剪切位移均随着法向应力的增大而增大。高温作用使结构面的剪切力学性能发生劣化,而法向应力能够在一定程度上起到抑制作用。

(3) 采用三维形貌激光测试仪对结构面扫描后发现,在宏观上高温对结构面的节理粗糙度 JRC 没有太大影响。通过反算本文引用的抗剪强度公式,推导出常温下受法向应力和结构面粗糙度影响的 JCS 公式,再代入试验数据,发现 JCS 与温度成线性关系,试验曲线和通过关系式拟合的曲线高度吻合,验证了关系式的正确性与合理性。

参考文献:

- [1] 孙广忠. 岩体力学基础[M]. 北京: 科学出版社, 1983 (SUN Guangzhong. Fundamentals of rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1983 (in Chinese))
- [2] Patton F D. Multiple modes of shear failure in rock[C]//Proceedings of the First Congress of International Society of Rock Mechanics, 1966:509—513.
- [3] Barton N, Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1977, 10(1/2):1—54.
- [4] Tse R, Cruden D M. Estimating joint roughness coefficients[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1979, 16:303—307.
- [5] Xia C C, Tang Z C, Xiao W M, et al. New peak shear strength criterion of rock joints based on quantified surface description[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(2):387—400.
- [6] 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.
- [7] Grasselli G, Wirth J, Egger P. Quantitative three-dimensional description of a rough surface and parameter evolution with shearing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(6):789—800.
- [8] 唐志成, 刘泉声, 刘小燕. 节理的剪切力学性质与含三维形貌参数的剪切强度准则比较研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 873—879 (TANG Zhicheng, LIU Quansheng, LIU Xiaoyan. A comparative study of shear mechanical properties of joints and shear strength criteria with three-dimensional morphology parameters [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5):873—879 (in Chinese))
- [9] 沈明荣, 张清照. 规则齿型结构面剪切特性的模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(4):713—719 (SHEN Mingrong, ZHANG Qingzhao. Model test on shear behavior of regular tooth structural plane [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(4):713—719 (in Chinese))
- [10] 张清照, 沈明荣, 丁文其. 结构面在剪切状态下的力学特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(2):37—42 (ZHANG Qingzhao, SHEN Mingrong, DING Wenqi. Study on mechanical properties of structural plane under shear condition [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2012, 39(2):37—42 (in Chinese))
- [11] 周辉, 程广坦, 朱勇, 等. 大理岩规则齿形结构面剪切特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(3):852—860 (ZHOU Hui, CHENG Guangtan, ZHU Yong, et al. Experimental study on shear behavior of regular dentate structural plane of marble [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(3):852—860 (in Chinese))
- [12] 陈世江, 高臻炜, 谷运峰, 等. 类岩体结构面峰值剪切强度尺寸效应分析[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(4):88—95 (CHEN Shijiang, GAO Zhenwei, GU Yunfeng, et al. Size effect analysis of peak shear strength of discontinuum [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(4):88—95 (in Chinese))
- [13] 许江, 瞿佳美, 刘义鑫, 等. 循环剪切荷载作用下充填物对结构面剪切特性影响试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(5):1627—1637 (XU Jiang, QU Jiamei, LIU Yixin, et al. Experimental study on the influence of backfill on shear properties of structural plane under cyclic shear loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5):1627—1637 (in Chinese))
- [14] Gautam P K, Dwivedi R, Akshay K, et al. Damage characteristics of jalore granitic rocks after thermal cycling

- effect for nuclear waste repository[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(1):235–254.
- [15] Li Z H, Wong L N Y, Teh C I. Influence of thermal and mechanical loading on development of microcracks in granite[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(5):2035–2051.
- [16] Li N, Zhang S C, Wang H B, et al. Thermal shock effect on acoustic emission response during laboratory hydraulic fracturing in laizhou granite[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(9):4793–4807.
- [17] Zhao F, Shi Z M, Sun Q. Fracture mechanics behavior of jointed granite exposed to high temperatures[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(5):2183–2196.
- [18] 邵保平, 吴阳春, 王帅, 等. 青海共和盆地花岗岩高温热损伤力学特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(1):69–83 (XI Baoping, WU Yangchun, WANG Shuai, et al. Experimental study on mechanical properties of granite under high temperature and thermal damage in Gonghe Basin, Qinghai Province [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(1):69–83 (in Chinese))
- [19] 吴顺川, 郭沛, 张诗准, 等. 基于巴西劈裂试验的花岗岩热损伤研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(S2):3805–3816 (WU Shunchuan, GUO Pei, ZHANG Shihuai, et al. Study on thermal damage of granite based on Brazilian splitting test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(S2):3805–3816 (in Chinese))
- [20] 朱谊. 高温环境下混凝土力学试验与数值模拟研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2020 (ZHU Yi. Research on mechanics test and numerical simulation of concrete under high temperature environment [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2020 (in Chinese))
- [21] 吴阳春, 邵保平, 王磊, 等. 高温后花岗岩的物理力学特性试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(1):193–203 (WU Yangchun, XI Baoping, WANG Lei, et al. Experimental study on physical and mechanical properties of granite after high temperature [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(1):193–203 (in Chinese))
- [22] Homand F, Belem T, Souley M. Friction and degradation of rock joint surfaces under shear loads [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2001, 25(10):973–999.

Study on shear mechanical properties of rocklike discontinuities after high temperature

LI Ting¹, JIANG Annan¹, ZHANG Fengrui¹, WAN Yousheng²

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China;

2. Nanchang Railway Transportation Group Co. Ltd, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: To explore the effect of high temperature on the shear mechanical properties of structural plane, the shear test of artificial specimens at high temperature was carried out. The effects of high temperature on shear stress, shear displacement and joint wall compressive strength were analyzed. The test results show that the shear stress displacement curve changes obviously with the increase of temperature. The peak shear stress shows a decreasing trend, while the shear stress displacement increases obviously. Moreover, the increase of normal stress weakens the thermal damage caused by high temperature to some extent. According to the test results, considering the influence of high temperature on the shear mechanical properties of structural plane, the joint wall compressive strength (JCS) in Barton-Bandis criterion is obtained in reverse. The relationship of rock wall compressive strength of structural plane which can reflect the influence of high temperature is constructed. The correctness of the equation is verified by fitting the test curve. The research results provide some theoretical reference for the stability evaluation of high temperature rock mass engineering.

Keywords: high temperature; structural plane; Barton-Bandis criterion; joint wall compressive strength