

钻孔剪切力学参数表征修正方法及其实验研究

张玉江^{1,2}, 郝武帅¹, 冯国瑞¹, 崔炳渊¹, 王千¹, 王怡宁¹, 朱德福¹, 袁红辉³, 吴祥业⁴

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山东能源集团博士后科研工作站, 山东 济南 250014; 3. 煤炭科学研究院有限公司 深部开采与冲击地压防治研究院, 北京 100013; 4. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要: 钻孔剪切法是现场快速实测岩石抗剪强度的重要方法, 但因测量误差较大导致其应用受限。通过对钻孔剪切原理及研究成果分析, 发现了不完全剪切是岩石钻孔剪切试验误差大的原因, 提出了基于压、剪不等面积的钻孔剪切法修正方法。设计实验装置开展钻孔剪切模拟试验, 研究了不同剪切板参数下砂岩剪切力学参数表征规律, 证明了所提方法的有效性和修正效果, 最后通过文献数据验证了该方法的适用性。具体结果如下: ① 岩石钻孔剪切试验误差大的根本原因是受压面积和剪切面积选取失真且不相等, 实际剪切破坏面积小于剪切齿齿间面积, 且不同剪切齿长度情况下修正受压面积和剪切面积均随法向力的增大线性增大。基于剪切齿参数、受压面积和剪切面积的关系式, 提出了钻孔剪切法修正方法。② 岩石钻孔剪切的剪应力-剪切位移曲线可分为压密阶段、似弹性变形阶段、塑性变形阶段和峰后阶段。随法向力增大, 不同剪切板参数下正应力、剪应力和剪切刚度均增大, 达到剪应力峰值时的位移减小。钻孔剪切参数与剪切力学参数表征值之间存在明显规律。随剪切齿齿长的增加, 黏聚力线性增大, 内摩擦角呈二次函数增大。随剪切板面积的增加, 黏聚力线性增大, 内摩擦角呈二次函数减小。③ 剪切齿齿长和剪切板面积增大可在一定程度上减少测量偏差。剪切齿齿长从1.0 mm增大到2.5 mm, 黏聚力和内摩擦角测量值的总偏差从62.96%降低到19.91%, 总修正提升值从30.8%提高到74.1%; 剪切板面积从400 mm²增大到520 mm², 黏聚力和内摩擦角测量值的总偏差从64.07%降低到37.69%, 总修正提升值从39.56%提高到56.05%。实验和文献数据验证均表明, 本修正方法可以使钻孔剪切法测得的黏聚力和内摩擦角准确度分别提升约50%和6%。

关键词: 原位测试; 修正方法; 钻孔剪切试验; 剪切强度; 力学参数

中图分类号: TD324 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)05-2257-13

Modification method of borehole shear mechanical parameter characterization and its experimental study

ZHANG Yujiang^{1,2}, HAO Wushuai¹, FENG Guorui¹, CUI Bingyuan¹, WANG Qian¹, WANG Yining¹, ZHU Defu¹, YUAN Honghui³, WU Xiangye⁴

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Postdoctoral Research Station, Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250014, China; 3. Deep Mining and Rock Burst Research Institute, Chinese Institute of Coal Science, Beijing 100013, China; 4. Institute of Mining Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

收稿日期: 2023-12-31 修回日期: 2024-04-03 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1775

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374100); 国家杰出青年科学基金资助项目(51925402); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(52004172)

作者简介: 张玉江(1986—), 男, 山东东营人, 副教授, 博士。E-mail: ylczyj@yeah.net

通讯作者: 冯国瑞(1976—), 男, 山西阳城人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: fguorui@163.com

引用格式: 张玉江, 郝武帅, 冯国瑞, 等. 钻孔剪切力学参数表征修正方法及其实验研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(5): 2257-2269.

ZHANG Yujiang, HAO Wushuai, FENG Guorui, et al. Modification method of borehole shear mechanical parameter characterization and its experimental study[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(5): 2257-2269.



移动阅读

Abstract: The borehole shear test is an important method to quickly measure the shear strength of rock in the field, but its application is limited due to its large measurement error. By analyzing the principle of borehole shear and the research results, it is found that incomplete shear is the reason for the large error of rock borehole shear test, and a correction method of borehole shear method based on the unequal area of pressure and shear was proposed. Experimental equipment was designed to carry out the simulated borehole shear test, and the characterization rules of sandstone shear mechanical parameters under different shear plate parameters were studied, which proved the effectiveness and correction effect of the proposed method. Finally, the applicability of the method was verified by literature data. Specific results are as follows: ① The root cause of large error in rock borehole shear test is that the selection of compression area and shear area is distorted and unequal, the actual shear failure area is less than the area between shear teeth, and the corrected compression area and shear area increase linearly with the increase of normal force under different shear tooth lengths. Based on the relationship between the parameters of shear tooth, compression area and shear area, a correction method of borehole shear test is proposed. ② The shear stress-shear displacement curve of rock borehole shear can be divided into compaction stage, elastic deformation stage, plastic deformation stage and post-peak stage. With the increase of normal force, the positive stress, shear stress and shear stiffness increase under different shear plate parameters, and the displacement decreases when the peak point of shear stress is reached. There are obvious rules between borehole shear parameters and the characteristic value of shear mechanical parameters. With the increase of the shear tooth length, the cohesion increases linearly, and the internal friction angle increases as a quadratic function. With the increase of the shear plate area, the cohesion increases linearly and the internal friction angle decreases as a quadratic function. ③ The increase of the shear tooth length and the shear plate area can reduce part of the measurement deviation. The shear tooth length increases from 1.0 mm to 2.5 mm, the total deviation of cohesion and internal friction angle decreases from 62.96% to 19.91%, the total improvement increases from 30.8% to 74.1%. The shear plate area increases from 400 mm² to 520 mm², the total deviation of cohesion and internal friction angle decreases from 64.07% to 37.69%, and the total improvement increases from 39.56% to 56.05%. Both experimental and literature data validation show that the correction method improves the accuracy of cohesion and internal friction angle by about 50% and 6%, respectively.

Key words: in-situ test; remediation method; borehole shear test; shear strength; mechanical parameters

抗剪强度是描述岩石抵抗破坏的重要参数之一。如何快速且准确地测定岩石的抗剪强度是国内外研究的热点问题。常见的抗剪强度测试方法有实验室试验和原位实验 2 类^[1]。实验室试验采用的试样较小且脱离了原位环境;而大型原位测试存在取样难度大、操作困难等问题。钻孔剪切试验作为一种抗剪强度原位测试方法,通过在钻孔壁上进行剪切试验测定土体或岩体的黏聚力和内摩擦角,是解决上述问题的重要途径。

钻孔剪切试验的探究始于 19 世纪 60 年代末期,爱荷华大学的 HANDY R L 教授团队^[2]提出了原位钻孔抗剪强度的测试方法,研制了钻孔剪切设备。LUTENEGGER A J 等^[3-5]在多种土体中进行了抗剪强度原位测试,获得了其剪切强度。LV 和 ZHOU^[6]在土石混合体中进行钻孔压剪试验,发现试验结果与现场直剪结果间存在较强的线性相关性。李晶晶等^[7]和安然等^[8]分别对膨胀土和花岗岩残积土开展了原位钻孔剪切试验,探究了不同条件下土体抗剪强度的变化规律。于永堂等^[9-10]在钻孔剪切试验中增加了法向与

切向位移检测系统,获得了黄土的钻孔剪切位移-剪应力曲线变化规律。靖洪文等^[11]在平顶山矿区进行井下钻孔实测,得到了黏聚力和测试深度的关系。TAN 等^[12]在泥质夹层结构面进行了原位剪切试验,并通过数值模拟软件分析了泥质结构面剪切力学行为与破坏机理。HU 等^[13]研究了剪切齿的角度、齿间距、齿长度参数变化对水泥基材料剪切参数及剪切破坏面形态的影响。此外,原位钻孔试验方法也在边坡稳定性分析^[14]、钻孔桩承载力预测^[15]、生态护坡系统的维稳^[16]以及破碎围岩变形失稳原因探究^[17]中得到应用。钻孔剪切仪的剪切板分为两齿型和多齿型两类,在钻孔剪切试验中,岩体多采用两齿型钻孔剪切仪^[1,18],如 RBST 钻孔剪切仪;土体常采用多齿型钻孔剪切仪^[8-10],如 Iowa 钻孔剪切仪。

王玉杰等^[1]从原理、使用方法、数值模拟以及工程应用等方面对钻孔剪切仪进行了系统性阐述。贾志欣等^[18]在引进的钻孔剪切仪的基础上,研发了钻孔剪切弹模原位测试系统。王玉杰和贾志欣在泥岩中进行钻孔剪切试验,发现钻孔剪切测得的内摩擦角 φ

与直剪结果较为接近, 而黏聚力 c 降低了 25%~50%^[1,18]。冯文凯等^[19]对大光包碎裂岩体进行原位剪切试验, 将试验结果同 Hoek-Brown 准则估值对比, 发现黏聚力试验值偏小而内摩擦角试验值较为接近。张幼振^[20]等对混凝土进行了钻孔剪切试验, 试验结果与直剪结果相比, 内摩擦角小 13.11%~32.84%, 黏聚力小 24.77%~41.33%。

上述研究表明, 钻孔剪切法在土体中应用较多, 在岩体中应用较少且试验结果与实验室试验结果间存在较大误差。大量学者研究了剪切板尺寸、剪切厚度^[18]、钻孔竖直程度和孔壁完整性^[19]、岩体性质^[20]等因素对试验结果的影响, 但是现有方法仍然存在较大误差。究其原因, 剪切板参数对钻孔剪切试验结果的影响规律揭示不清, 剪切结果与剪切板参数的量化关系不明。因此, 开展实验室模拟钻孔剪切试验对解决这些问题有重要指导意义。

笔者在分析岩石原位钻孔剪切试验误差基础上, 提出了钻孔剪切试验的修正方法, 采用实验室试验研究剪切板参数对剪应力-剪切位移曲线的影响规律, 探究修正前后剪切板参数与剪切力学参数的量化关系, 并通过文献的试验结果验证钻孔剪切试验修正方法的效果和可靠性。

1 试验装置及原理

1.1 试验设计

1.1.1 试验设计原理

如图 1 所示, 岩石钻孔剪切主要是利用 2 块对称的剪切板压入钻孔孔壁内, 使剪切板上两平行剪切齿间形成一层岩片, 再通过剪切套杆提拉实现对剪切齿间岩片的直接剪切破坏^[1]。

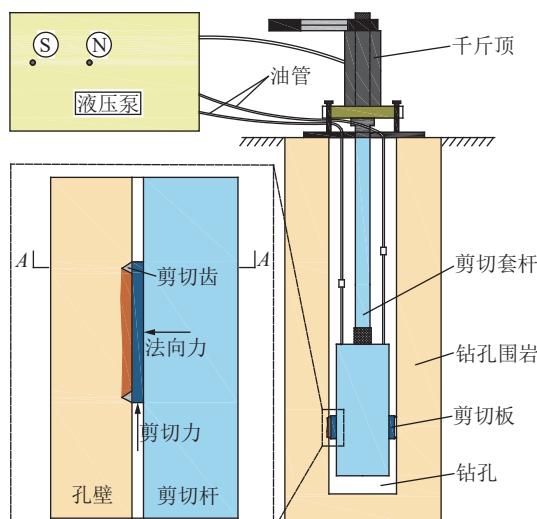


图 1 岩石钻孔剪切原理^[1]

Fig.1 Rock borehole shear principle^[1]

图 2 给出了 $A-A$ 截面上剪切齿切入孔壁的示意, 图中, r_1 为钻孔半径; r_2 为剪切板外缘的半径。现有岩石钻孔剪切仪剪切板外径 76 mm, 剪切齿长 1 mm, 用于钻孔剪切试验的钻孔孔径为 78~90 mm^[1]。根据剪切板弧度、钻孔弧度和剪切齿长的几何关系可知, 当剪切齿中央完全没入孔壁时, 剪切齿边缘也已压入孔壁, 可见剪切齿和孔壁是充分接触的。因此, 可以把剪切板和孔壁近似看作平面, 在实验室中模拟剪切板对孔壁剪切的过程。

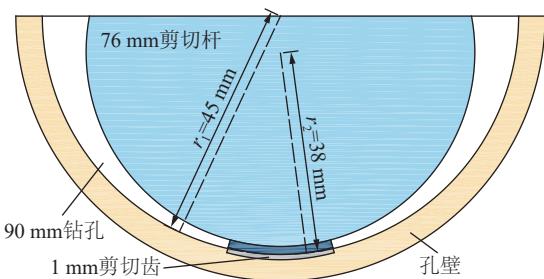


图 2 $A-A$ 钻孔剪切截面俯视图

Fig.2 Top view of $A-A$ drilled shear section

模拟钻孔剪切试验和直剪试验的原理相同。试验测得的法向力与剪切力可通过式(1)和式(2)计算得到正应力 σ 和剪应力 τ :

$$\sigma = \frac{P}{S} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{Q}{S} - \sigma f \quad (2)$$

式中, P 为法向力, N; S 为试样剪切破坏面面积, m^2 ; Q 为剪切力, N; f 为滚轴排滚动摩擦因数, 取 0.005。

对测得的多组 σ 和 τ 的值进行数据拟合, 由式(3)莫尔-库仑 (Mohr-Coulomb) 破坏准则求得试样的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (3)$$

1.1.2 试验系统

如图 3 所示, 试验系统由 TAJW-2000 三维动静载多场耦合试验机 (以下简称三维试验机) 和自制的模拟钻孔剪切试验装置组成。如图 3(a) 所示, 三维试验机可以实现水平、垂直加载, 配合模拟钻孔剪切试验装置可以实现实验室钻孔剪切。在图 3(a) 中, 三维试验机的水平加载装置提供剪切力, 通过水平滚轮把中间箱体移动到垂直加载装置下方施加法向力。在承压柱正下方布置模拟钻孔剪切试验装置 (图 3(b))。模拟钻孔剪切试验装置包括剪切装置 (图 3(c)) 和围压装置 (图 3(d))。

如图 3(c) 所示, 模拟钻孔剪切试验装置上方为剪切装置, 其由滚轴排、剪切盒、剪切板和承压柱组成;

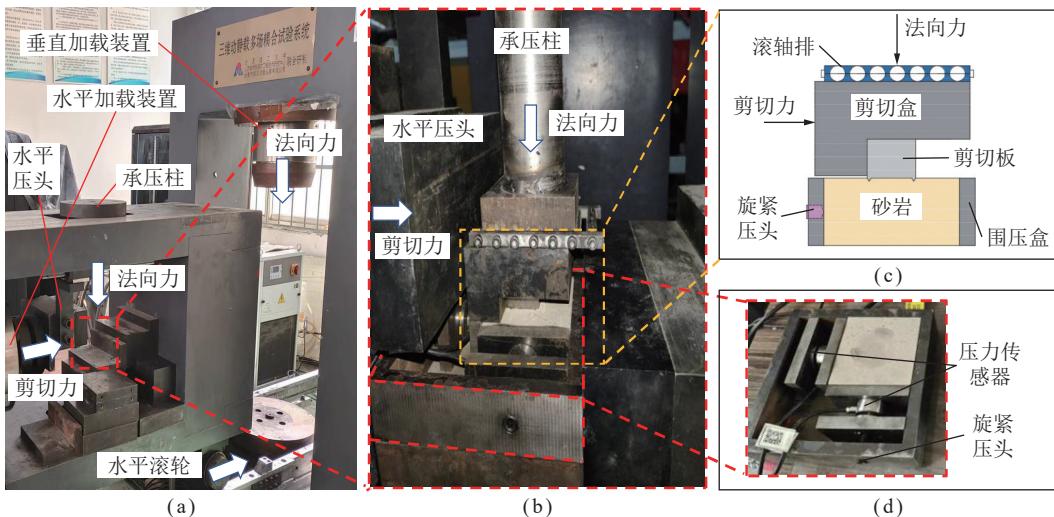


图3 模拟钻孔剪切试验系统

Fig.3 Simulated borehole shear test system

下方为围压装置,由围压盒、旋紧压头、压力传感器组成,各部分位置关系如图3(c)、(d)所示。实验时,利用三维试验机的水平压头和承压柱分别传递剪切力和法向力,经由剪切盒传递到剪切板上,剪切盒上方的滚轴排可以减少水平方向摩擦力的影响。围压装置可以对试样施加围压,使其在剪切过程中保持稳定。采用旋紧压头对围岩施加压力,通过压力传感器控制围压大小。

1.2 试样制备

选择煤矿常见的砂岩作为试验材料。如图4所示,参考《岩石物理力学性质试验规程》剪切试验要求,制备 $7\text{ cm} \times 7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$ 的正方体试样进行直剪试验,测得砂岩的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 分别为8.72 MPa和 37.25° ,为后续模拟钻孔剪切试验结果提供参考。同时,制备 $7\text{ cm} \times 7\text{ cm} \times 3.5\text{ cm}$ 的长方体试样开展模拟

钻孔剪切试验。

1.3 试验方案

岩石钻孔剪切仪的剪切板(标准剪切板)尺寸为长 \times 宽 $=25\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 。剪切板在长边的两端各有一条20 mm长的剪切齿,两剪切齿平行,齿间距为22 mm,剪切齿横断面呈三角形,角度为 60° ,高为1 mm。剪切齿间可嵌入的岩片面积为 $22\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ ^[1]。本试验针对岩石钻孔剪切仪进行研究,仅考虑剪切板为两齿的情况。

如图5所示,为探究钻孔剪切试验中剪切板参数对剪切力学参数的影响,保持剪切齿的角度 60° 和剪切板的宽度20 mm不变,分别改变剪切板面积和剪切齿齿长,设计了7个不同规格的剪切板。考虑到剪切板外径与钻孔孔径的匹配,保持剪切板的板宽度不变,通过控制板长度改变剪切板面积。剪切板具体参数见表1。



图4 砂岩试样

Fig.4 Sandstone specimens



图5 剪切板实物

Fig.5 Actual drawing of the shear plates

根据剪切齿压入曲线,测得剪切齿完全压入试样的平均法向力为6.9 kN。模拟钻孔剪切预试验表明法向力小于6 kN时,剪切破坏效果差,剪切面积很小;法向力为18 kN时,试样整体破裂。结合预试验结果及剪切力学参数相近文献^[13],设置6、9、12、15 kN四个法向力加载水平。

模拟钻孔剪切试验的基本步骤为:①将试样放入

表1 剪切板参数

Table 1 Shear plates parameter table

剪切板编号	剪切齿齿长/mm	剪切板面积/mm ²
1	1.0	440
2	1.5	440
3	2.0	440
4	2.5	440
5	1.0	400
6	1.0	480
7	1.0	520

围压装置内, 旋紧压头将试样固定后, 将围压装置和试样放入三维试验机。②将剪切板置于试样上表面中央后, 再依次放置剪切盒、滚轴排和承压柱。把安装好的中间箱体移动到垂直加载装置下方, 准备加载。③首先按照设计的法向力加载水平施加法向力, 待法向力示数稳定后, 保持法向力大小不变, 对剪切板施加剪切力。其中, 法向力加载速度为0.5 kN/s, 剪切力加载速度为0.01 mm/s。④持续施加剪切力, 直到发生明显滑移后终止试验, 导出位移-剪切力曲线, 记录试样破坏结果。

2 修正方法

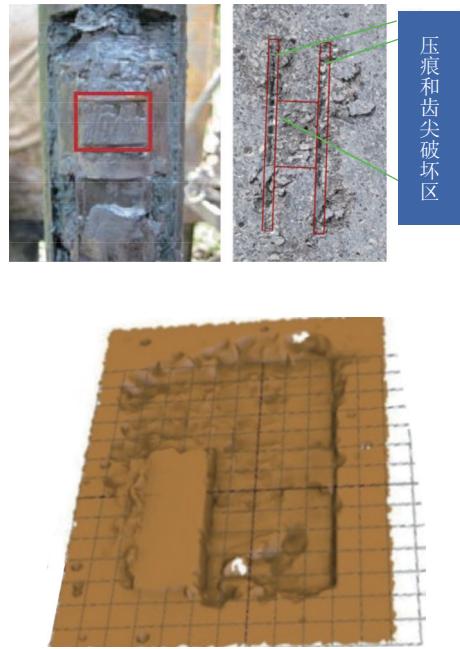
2.1 误差原因分析

由文献[18-20]可知, 岩石原位钻孔剪切测得的黏聚力和内摩擦角基本都小于实验室测试结果。分析式(1)~(3)可知, 在正应力不变的情况下, 剪应力减小会使黏聚力的值降低, 剪切力和剪切面积又直接影响剪应力。在法向力和剪切力不变的情况下, 剪切面积增大会使剪应力减小。进一步分析文献[13,18]中两剪切齿间岩片未被完全剪切的现象(图6), 可知实际剪切破坏面积小于两剪切齿间的面积。说明抗剪强度计算使用了较大的剪切面积是产生误差的可能原因。具体原因如下:

(1)与直剪试验相比, 钻孔剪切厚度小, 多呈现岩片破坏特征, 且岩片常表现为破碎状, 剪切破坏面不完整^[18]。

(2)剪切齿在正应力作用下贯入孔壁, 造成孔壁破碎^[13], 导致剪应力偏小。该现象是钻孔剪切试验的必然现象。

(3)如图2所示, 剪切板以及钻孔孔径具有一定的弧度, 根据剪切板和孔壁的弧度关系可知, 实际钻孔剪切试验中, 剪切板和孔壁是充分接触的。但是由于钻孔与剪切板弧度不完全一致, 且存在孔壁不平的情况, 导致剪切齿边缘贯入孔壁的深度不完全, 造成剪

图6 钻孔剪切的不完全剪切现象^[13,18]Fig.6 Incomplete shear phenomenon of borehole shear^[13,18]
切面积偏小。

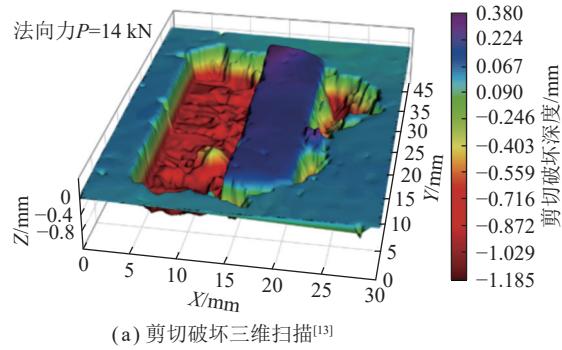
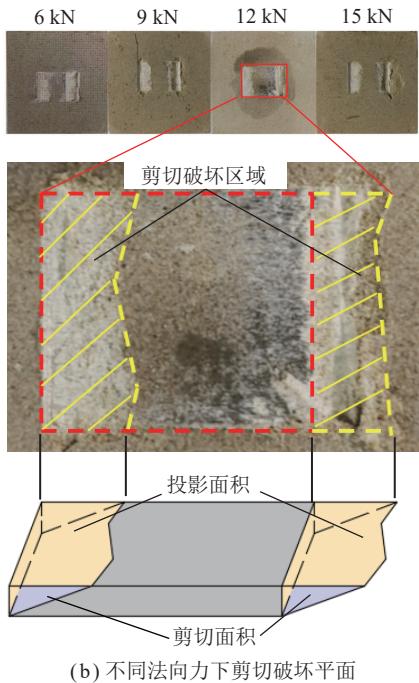
上述原因均会造成实际剪切面积小于计算剪切面积, 导致剪切应力降低。因此, 修正实际剪切面积对于提升钻孔测试精度具有重要意义。

图7(a)给出了文献[13]钻孔剪切破坏三维扫描图, 图7(b)、(c)分别给出了本文模拟钻孔剪切试验的剪切破坏平面图和侧视图。文献试验和本文试验的破坏形式是一致的。理想的剪切面积应该为两剪切齿间所夹岩片的面积, 但由图7可知, 剪切破坏的实际面积由后齿造成的剪切破坏面积和前齿造成的剪切破坏面积两部分组成。因此, 使用剪切板两齿间所夹面积作为剪切面积计算黏聚力和内摩擦角会造成较大误差, 应修正钻孔剪切试验的剪切面积。

2.2 修正方法的提出

对于直接剪切试验, 剪切面积为被剪试样与剪切力方向平行的破断面面积, 受压面积为剪切面积在法向力方向上的投影, 两面积大小相等。而对钻孔剪切来说, 剪切面积和受压面积小于两剪切齿间面积, 且两面积不相等。

如图7(b)所示, 为获得钻孔剪切面积, 将试验后砂岩试样的剪切面垂直摄像, 划分出剪切破坏区域, 再测量每一剪切破坏区域的相对面积。由于两剪切齿间实际面积已知, 则可通过剪切破坏区域和剪切齿间区域相对面积的比例(图7(b)中黄色区域和红色方框区域)求得剪切破坏部分的投影面积, 即修正受压面积。考虑到剪切齿的压入深度, 修正剪切面积应为剪切斜面的面积。

(a) 剪切破坏三维扫描^[13]

(b) 不同法向力下剪切破坏平面



(c) 剪切破坏侧视图

图 7 模拟钻孔剪切破坏区域示意

Fig.7 Schematic diagram of simulated borehole shear failure area

由图 7(b) 可知, 钻孔剪切会形成 2 个剪切区域。以任意一处剪切破坏区域为例, 受压区域为不规则多边形, 通过测量其水平投影得到修正受压面积, 用 S_{ni} 表示。将其近似等效为矩形, 则其等效长度为 a_i , 宽度为 b_i 。修正剪切面积 S_{ti} 近似等效为矩形时, 其等效长度为 l_i , 宽度为 b_i 。任意一处剪切破坏区域的修正受压面与修正剪切面间夹角为 α_i , 如图 8 所示。任意一处剪切破坏区的修正剪切面积 S_{ti} 与修正受压面积 S_{ni} 之间的关系可用式(4) 表示:

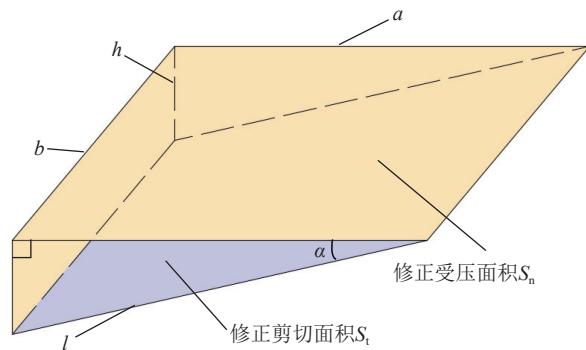


图 8 修正剪切面积计算原理示意

Fig.8 Schematic diagram of the calculation principle of the corrected shear area

$$S_{ti} = \frac{S_{ni}}{\cos \alpha_i} \quad (4)$$

其中, $S_{ni} = a_i b_i$, $\cos \alpha_i = \frac{a_i}{\sqrt{a_i^2 + h^2}}$; h 为剪切齿齿长。将 S_{ni} 和 $\cos \alpha_i$ 代入式(4), 可得任一剪切破坏区修正剪切面积为

$$S_{ti} = \sqrt{a_i^2 b_i^2 + b_i^2 h^2} \quad (5)$$

考虑到剪切破坏区域不规则, 修正受压面积以实测为准。因此, 用 S_{ni}^2 代替式(5) 中的等效矩形面积 $a_i^2 b_i^2$ 。同时由于存在 2 个剪切破坏区域, 所以总修正剪切面积 S'_t 为

$$S'_t = \sum_{i=1}^2 \sqrt{S_{ni}^2 + b^2 h^2} \quad (6)$$

式中, S_{ni} 为任一修正受压面积, m^2 ; b 为剪切板板宽, 本次试验值为 0.02 m。

将修正受压面积与修正剪切面积代入式(1) 和式(2) 计算得到模拟钻孔剪切试验的正应力和剪应力, 再由式(3) 求得砂岩试样的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。

2.3 剪切面积修正

不同剪切板参数下模拟钻孔剪切试验受压面积和剪切面积的修正结果见表 2、3。各剪切板在不同法向力下得到的剪切面积都不相同, 修正剪切面积略大于修正受压面积。

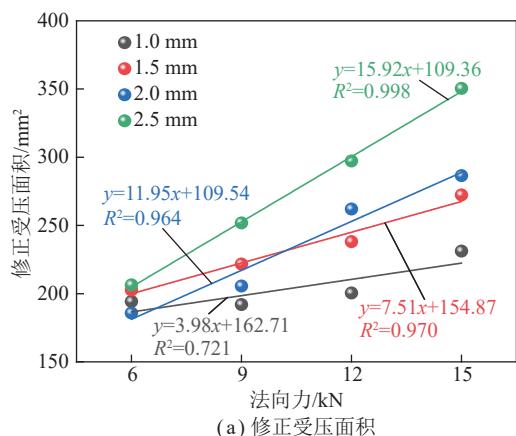
图 9 给出了不同剪切齿齿长下修正受压面积与修正剪切面积随法向力的变化趋势。修正受压面积和修正剪切面积均随法向力的增加而线性增大, 且随着齿长的增加, 拟合曲线的斜率增大。

图 10 给出了不同剪切板面积下修正受压面积与修正剪切面积随法向力变化的曲线。相同剪切齿长和剪切板面积条件下, 由于剪切齿长较小, 修正后的受压面积和剪切面积相差较小。法向力从 6 kN 提高到 9 kN 时, 修正受压面积和修正剪切面积无明显变

表2 不同剪切齿齿长下面积修正

Table 2 Correction of the area under different cutting teeth lengths

剪切齿齿长/mm	法向力/kN	修正受压面积/mm ²	修正剪切面积/mm ²
1.0	6	194.22	195.25
	9	192.03	193.07
	12	200.54	201.53
	15	231.18	232.05
1.5	6	202.70	204.91
	9	221.78	223.80
	12	238.10	239.98
	15	272.37	274.02
2.0	6	185.81	190.07
	9	205.67	209.52
	12	262.09	265.13
	15	286.51	289.29
2.5	6	206.48	212.44
	9	251.81	256.73
	12	297.22	301.40
	15	350.53	354.08



(a) 修正受压面积

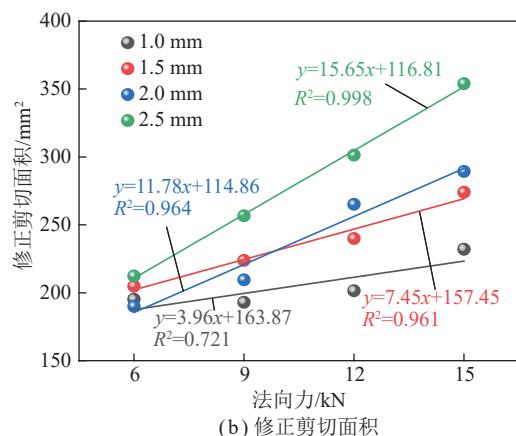
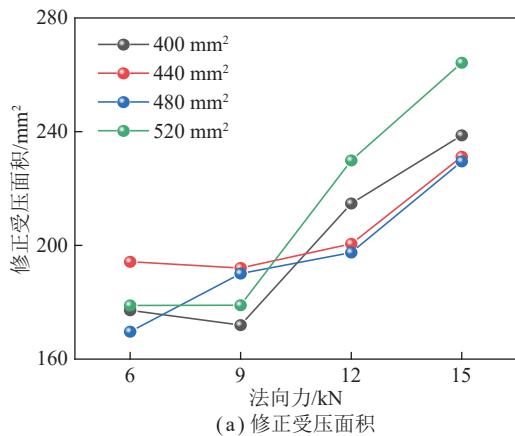


图9 剪切齿齿长和法向力与修正面积的关系

Fig.9 Corrected areas of different cutting teeth lengths and normal forces



(a) 修正受压面积

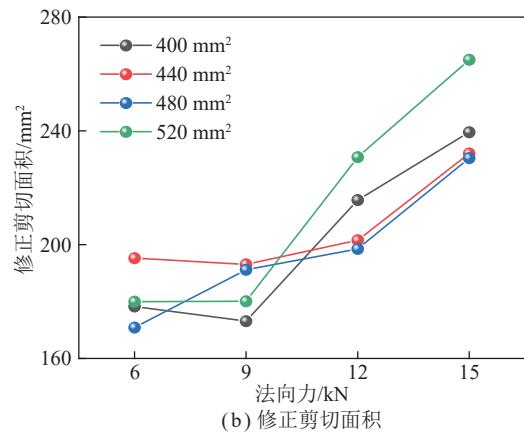


图10 剪切板面积和法向力与修正面积的关系

Fig.10 Corrected areas of different shear plate areas and normal forces

化规律;9 kN之后,修正受压面积和修正剪切面积随法向力的增加快速增大。

3 试验结果及讨论

3.1 钻孔剪切应力位移曲线特征

根据表2和表3中的修正面积计算正应力和剪应力峰值,见表4。

表4 不同剪切板参数下的试验结果

Table 4 Test results under different shear plate parameters

齿长/mm	面积/mm ²	法向力/kN	剪切力/峰值/kN	正应力/MPa	剪应力/峰值/MPa
1.0	440	6	4.57	30.89	23.41
		9	7.06	46.87	36.57
		12	8.01	59.84	39.75
		15	11.01	64.88	47.45
1.5	440	6	5.30	29.60	25.87
		9	7.45	40.58	33.29
		12	9.37	50.40	39.05
		15	12.05	55.07	43.98
2.0	440	6	5.92	32.29	31.15
		9	8.20	43.76	39.14
		12	11.03	45.79	41.60
		15	13.42	52.35	46.39
2.5	440	6	6.50	29.06	30.60
		9	9.00	35.74	35.06
		12	11.53	40.37	38.25
		15	14.88	42.79	42.02
1.0	400	6	5.06	33.87	28.38
		9	6.47	52.34	37.37
		12	9.41	55.88	43.63
		15	11.79	62.84	49.22
1.0	480	6	4.61	35.36	26.98
		9	7.08	47.34	37.04
		12	8.76	60.77	44.14
		15	10.58	65.35	45.92
1.0	520	6	4.94	33.54	27.45
		9	6.35	50.29	35.26
		12	9.14	52.20	39.61
		15	11.03	56.77	41.62

进一步绘制不同齿长和剪切板面积的剪应力-剪切位移曲线,如图11和图12所示。图中,A、B、C、D依次为6、9、12、15 kN四个法向力作用下的剪应力峰值点, K_{SA} 、 K_{SB} 、 K_{SC} 、 K_{SD} 分别为直线段的斜率。

由表4和图11、12可知,不同齿长和剪切板面积情况下,剪应力峰值随法向力增大而增大,峰值点位移随法向力增大而减小。通过直线段的斜率换算得到剪切刚度^[22],剪切刚度随着法向力增大而增大。

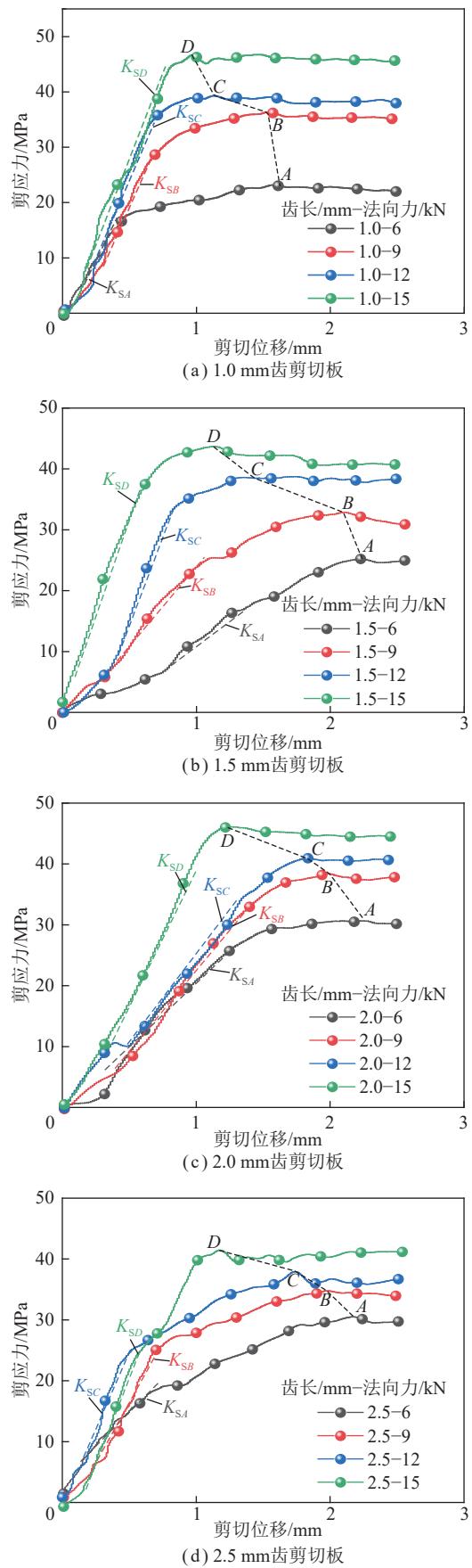


图11 不同剪切齿齿长的应力位移曲线
Fig.11 Stress displacement curves under different cutting teeth lengths

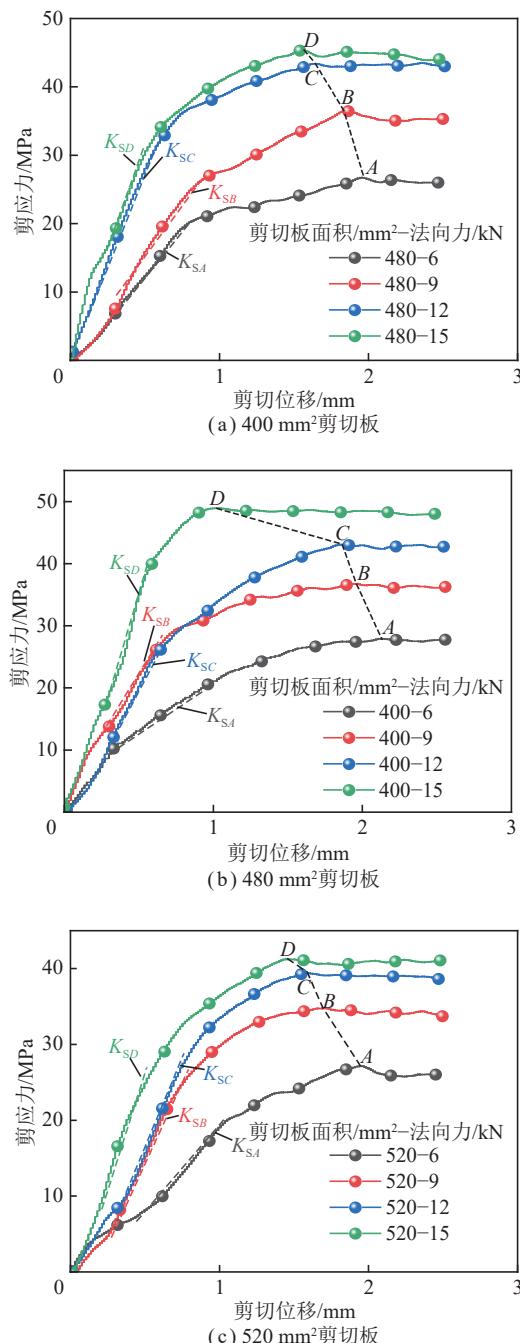


图 12 不同剪切板面积的应力位移曲线

Fig.12 Stress displacement curves under different shear plate areas

不同剪切齿齿长下, 剪切力峰值随法向力的增大而增加。

由图 11、12 可知, 各剪应力-剪切位移曲线均呈现相似的变化规律。现以图 11(a) 中 9 kN 法向力作用下的曲线为例, 研究模拟钻孔剪切试验中剪应力-剪切位移曲线的特征。如图 13 所示, 剪切过程大致可划分为 4 个阶段。

(1) 压密阶段。剪切齿入岩后, 其周围存在压实核和破碎区^[21], 导致剪应力-剪切位移曲线呈现先凸后

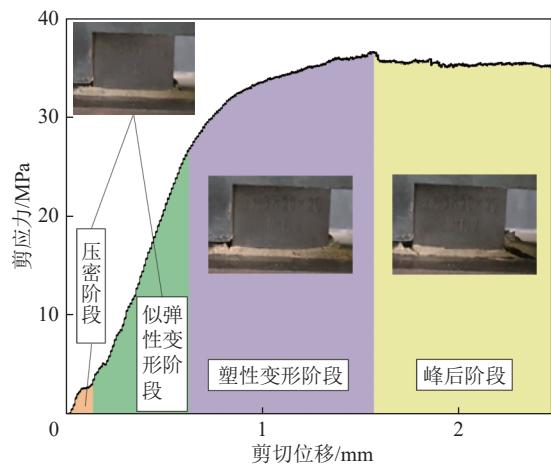


图 13 剪应力与剪切位移关系曲线

Fig.13 Curve of shear stress and shear displacement

凹或下凹 2 种形式。

(2) 似弹性变形阶段。随剪切位移的增加, 剪切应力快速增大, 该阶段的剪应力-剪切位移曲线近似呈线性。

(3) 塑性变形阶段。随剪切位移的增加, 剪应力增速放缓, 曲线斜率减小, 直至剪应力达到峰值。

(4) 峰后阶段。剪应力峰后出现应力降和剪切滑移现象。随剪切位移继续增加, 剪应力趋于稳定, 即达到残余剪切强度。

3.2 钻孔剪切参数对剪切力学参数的影响

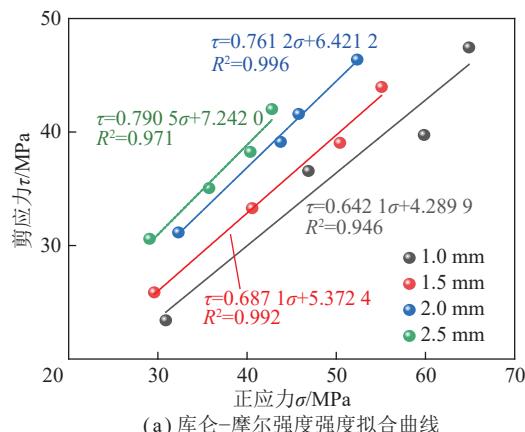
3.2.1 剪切齿齿长对剪切力学参数的影响

如图 14(a) 所示, 对不同正应力和相应的剪应力峰值进行线性拟合, 得到不同齿长下试样的库仑-摩尔强度曲线及 c 、 φ 值。相关性系数 R^2 均大于 0.94, 表明不同齿长下库仑-摩尔强度拟合曲线的拟合度较好。

图 14(b) 给出了剪切齿齿长与黏聚力 c 、内摩擦角 φ 的拟合曲线, 其中, 虚线为直剪试验测得的 c 、 φ 值。由图 14(b) 可知, 黏聚力随剪切齿齿长的增加线性增大。当剪切齿长为 3.2 mm 时, 钻孔剪切法测得的黏聚力与直剪试验测得的黏聚力相等。内摩擦角随剪切齿齿长的增大呈二次函数增大。当剪切齿长为 2.1 mm 时, 2 种方法测得的内摩擦角相等。

为了进一步评估剪切板参数对剪切力学参数的影响, 定义总偏差为 c 、 φ 值相对误差的绝对值之和。本试验与直剪试验测得 c 、 φ 值间的相对误差和总偏差见表 5。

由表 5 可知, 随着剪切齿齿长的增大, 测得的黏聚力和内摩擦角均不断增大。相较于齿长为 1.0 mm 时, 齿长每增加 0.5 mm, 测得的黏聚力分别增加 25.17%、49.65%、68.76%; 相应的内摩擦角增幅分别



(a) 库仑-摩尔强度强度拟合曲线

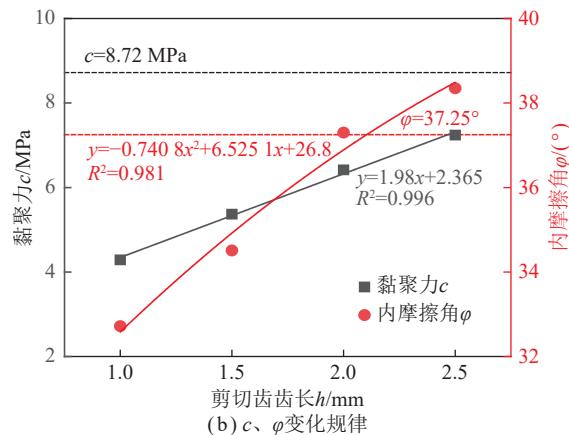


图 14 不同剪切齿齿长下试样剪切力学参数曲线

Fig.14 Curves of shear mechanical parameter under different cutting teeth lengths

表 5 不同剪切齿齿长下试样剪切力学参数及误差

Table 5 Shear mechanical parameters and errors of specimens with different cutting teeth lengths

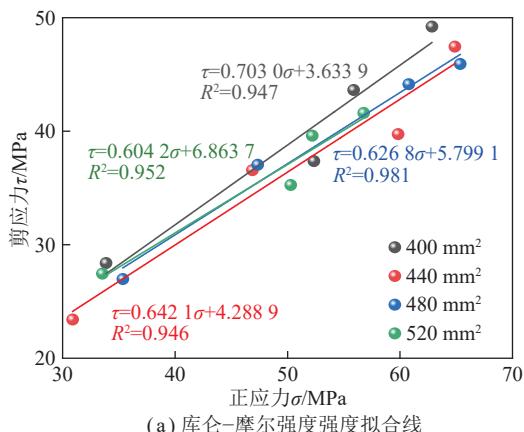
齿长/mm	c/MPa	c的误差/%	φ/(°)	φ的误差/%	总偏差/%
1.0	4.29	-50.80	32.72	-12.16	62.96
1.5	5.37	-38.42	34.51	-7.35	45.77
2.0	6.42	-26.38	37.30	0.13	26.51
2.5	7.24	-16.97	38.35	2.94	19.91

为 5.47%、14.00%、17.21%。与直剪试验相比,随着剪切齿齿长的增加,测得 c 、 φ 的总偏差从 62.96% 降低到 19.91%。剪切齿长度在 2.5 mm 范围内,齿长的增加可以显著提高模拟钻孔剪切试验结果的准确性。

3.2.2 剪切板面积对剪切力学参数的影响

图 15(a) 给出了不同剪切板面积下试样的库仑-摩尔强度曲线及 c 、 φ 值。相关性系数 R^2 均大于 0.94, 表明不同剪切板面积下库仑-摩尔强度拟合曲线的拟合度较好。

图 15(b) 给出了剪切板面积与黏聚力 c 、内摩擦角 φ 的拟合曲线。图中将直剪试验测得的 c 、 φ 采用



(a) 库仑-摩尔强度强度拟合线

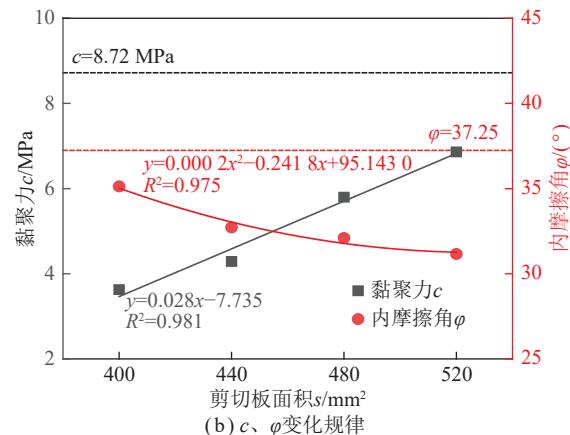


图 15 不同剪切板面积下试样剪切力学参数曲线

Fig.15 Curves of shear mechanical parameter under different shear plate areas

虚线标注,作为对照。由图 15(b) 可知,黏聚力随剪切板面积的增大线性增大。当剪切板面积为 587.7 mm² 时,钻孔剪切法测得的黏聚力与直剪试验测得的黏聚力相等。内摩擦角随剪切板面积的增大呈二次函数减小。当剪切板面积为 328.9 mm² 时,2 种方法测得的内摩擦角相等。

表 6 列出了不同剪切板面积下测得的 c 、 φ 的相对误差和总偏差。相较于面积为 400 mm² 的剪切板,面积每增加 40 mm²,测得的黏聚力分别增加 18.18%、59.78%、88.98%,内摩擦角测量值则分别降低 6.84%、8.63%、11.30%。与直剪试验相比,随着剪切板面积的

表 6 不同剪切板面积下试样剪切力学参数及误差

Table 6 Shear mechanical parameters and errors of samples with different shear plate areas

面积/mm ²	c/MPa	c的误差/%	φ/(°)	φ的误差/%	总偏差/%
400	3.63	-58.37	35.13	-5.70	64.07
440	4.29	-50.80	32.72	-12.16	62.96
480	5.80	-33.49	32.10	-13.84	47.33
520	6.86	-21.33	31.16	-16.36	37.69

增大, 测得 c 、 φ 的总偏差从 64.07% 降低到 37.69%。在剪切板面积 $400 \sim 520 \text{ mm}^2$ 内, 虽然内摩擦角测量值的误差随剪切面积的增大而增大, 但是由于内摩擦角变化范围小且黏聚力准确性大幅提高, 所以总偏差明显降低。可见, 剪切板面积的增加在一定范围内可提高钻孔剪切试验结果的准确性。

3.3 修正效果评价

3.3.1 剪切齿齿长的影响

如图 16 所示, 对面积修正前后的 c 、 φ 测量值进行对比, 分析不同剪切齿齿长下的修正效果。为了量化修正效果, 定义修正前后相对误差绝对值的差为修正提升值。

图 16(a) 中, 面积修正前测得的黏聚力的相对误差为 79.36%~85.21%, 修正后钻孔剪切法测得的黏聚力更加接近真实值, 相对误差降低到 16.97%~50.80%, 修正提升值达 34.41%~62.39%。图 16(b) 中, 面积修正前后测得内摩擦角的变化相对较小, 但面积修正后内摩擦角的变化范围更加集中。剪切齿齿长从 1.0 mm 增大到 2.5 mm, c 、 φ 的总修正提升值从 30.8% 提高到 74.1%。

综上, 该修正方法能够大幅提高试验结果的精度,

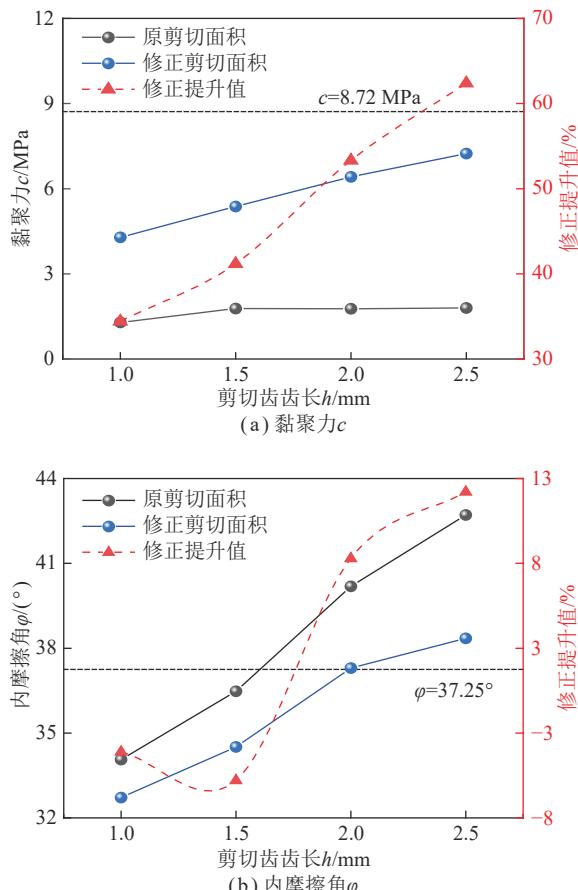


图 16 剪切齿齿长对修正结果的影响

Fig.16 Effect of cutting teeth lengths on correction results

且修正效果随剪切齿齿长的增加而提升。

3.3.2 剪切板面积的影响

如图 17 所示, 对面积修正前后不同剪切板面积下的 c 、 φ 进行对比。图 17(a) 中, 面积修正前测得黏聚力的相对误差为 76.49%~97.71%, 修正后测得的黏聚力更加接近真实值, 相对误差降低到 21.33%~58.37%, 修正提升值达 39.34%~65.83%。图 17(b) 中, 对于内摩擦角来说, 修正前略优于修正后。随着面积的增大, 修正效果降低, 最大降低 9.78%, 但是变化趋势相比于修正前更加稳定。随着剪切板面积的增加, c 、 φ 的总修正提升值从 39.56% 提高到 56.05%, 表明该修正方法能够大幅提高试验结果的准确度, 且修正效果随剪切板面积的增加而提升。

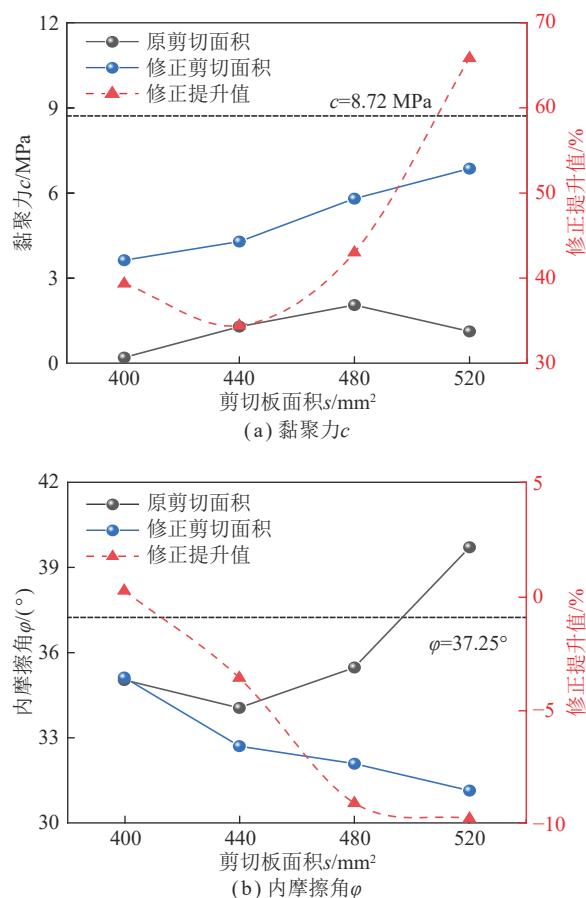


图 17 剪切板面积对修正结果的影响

Fig.17 Effect of shear plate areas on correction results

3.4 修正方法的应用

根据图 9 中的模拟钻孔剪切试验结果, 获得标准剪切板修正受压面积、修正剪切面积与法向力的关系式:

$$\begin{cases} S_n = 3.98P + 162.71 \\ S_t = 3.96P + 163.87 \end{cases} \quad (7)$$

式中, S_n 为修正受压面积, mm^2 ; S_t 为修正剪切面积, mm^2 。

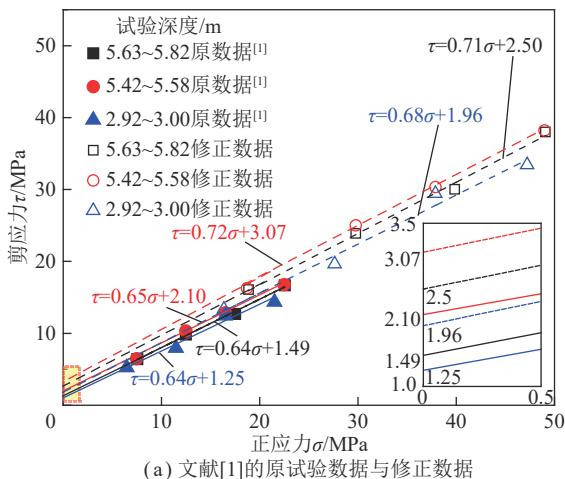
为了探究面积修正方法和公式的适用性,在已有文献试验数据中进行验证。因其他文献中缺少修正所需的必要参数,仅采用文献[1,18]中泥质砂岩的钻孔剪切试验数据进行验证。首先,将试验数据中的正应力和剪应力转化为法向力与剪切力。其次,把法向力代入式(7)求出修正受压面积和修正剪切面积,并采用修正后的面积重新计算正应力和剪应力。最后,拟合得到修正后的黏聚力和内摩擦角,并与原试验数据对比,见表7。

表 7 文献原数据与修正数据对比

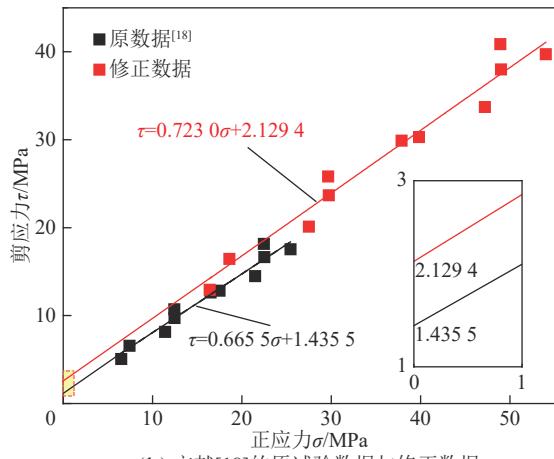
Table 7 Comparison of original data and revised data

项目	原数据	修正数据	提升百分比/%
c 均值/MPa ^[1]	1.61	2.51	55.90
φ 均值/(°) ^[1]	33.25	35.20	5.86
c /MPa ^[18]	1.43	2.13	48.95
φ (°) ^[18]	33.84	35.89	6.06

如表7和图18所示,相对于文献[1]的试验结果,修正后的黏聚力提升了55.90%,内摩擦角提升了



(a) 文献[1]的原试验数据与修正数据



(b) 文献[18]的原试验数据与修正数据

Fig.18 Comparison chart of original data and revised data

5.86%。文献[18]的测试结果修正后黏聚力提高了48.95%,内摩擦角提高了6.06%。由文献[1,18]结论可知,钻孔剪切试验结果中 c 值较传统三轴和直剪试验低25%~50%, φ 值略低于传统三轴和直剪试验结果。本文提出的修正方法可使钻孔剪切试验的黏聚力提高约50%,内摩擦角提高约6%,更加接近传统三轴和直剪试验值。通过本文提出的修正方法,大大提高了文献[1,18]中泥质砂岩试验结果的准确度。

4 结 论

(1) 岩石钻孔剪切试验误差大的根本原因是受压面积和剪切面积选取失真且不相等,实际剪切破坏面积小于剪切齿齿间面积,且不同剪切齿长度情况下修正受压面积和剪切面积均随法向力的增大线性增大。基于剪切齿参数、受压面积和剪切面积的关系式,提出了钻孔剪切法修正方法。

(2) 随剪切齿齿长的增加,黏聚力线性增大,内摩擦角呈二次函数增大, c 、 φ 测量值的总偏差从62.96%降低到19.91%。随剪切板面积的增加,黏聚力线性增大,内摩擦角呈二次函数减小, c 、 φ 测量值的总偏差从64.07%降低到37.69%。修正后 c 、 φ 测量值的准确度得到显著提升。剪切齿齿长从1 mm增大到2.5 mm, c 、 φ 的总修正提升值从30.8%提高到74.1%。剪切板面积从400 mm²增大到520 mm², c 、 φ 值的总修正提升值从39.56%提高到56.05%。

(3) 本修正方法可使文献黏聚力测量准确度提高约50%,内摩擦角测量准确度提高约6%。本修正方法在其他条件下的适应性良好,对常见岩石的剪切力学参数测试有较强的应用价值和参考意义。不同岩性、法向力与实际剪切面积的关系研究有助于解决现场实际剪切面积测量困难的问题,是下一步的研究方向。

参考文献(References):

- [1] 王玉杰,赵宇飞,曾祥喜,等.岩体抗剪强度参数现场测试新方法及工程应用[J].岩土力学,2011,32(S1): 779~786.
WANG Yujie, ZHAO Yufei, ZENG Xiangxi, et al. An in-situ method for determining shear strength parameters of rock masses and its applications[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 779~786.
- [2] HANDY R, FOX N. A soil bore-hole direct-shear test device [J]. Highway Research News, 1967: 27.
- [3] LUTENEGGER A J, REMMES B D, HANDY R L. Borehole shear test for stiff soil[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1978, 104(11): 1403~1407.
- [4] LUTENEGGER A J, DA T. Reproducibility of borehole shear test results in marine clay[J]. Geotechnical Testing Journal, 1987, 10(1): 13~18.
- [5] LUTENEGGER A, ADAMS M. Tension tests on bored piles in re-

- sidual soil[J]. *Geotechnical Special Publication*, 1999(92): 43–53.
- [6] LV X, ZHOU H. Soil–rock mixture shear strength measurement based on in situ borehole pressure-shear tests[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2018, 15(5): 2221–2234.
- [7] 李晶晶, 孔令伟, 穆坤. 膨胀土原位孔内剪切试验与强度响应特征[J]. *岩土力学*, 2017, 38(2): 453–461.
LI Jingjing, KONG Lingwei, MU Kun. In-situ borehole shear test on expansive soil and its strength characteristics[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(2): 453–461.
- [8] 安然, 孔令伟, 张先伟. 残积土孔内剪切试验的强度特性及广义邓肯–张模型研究[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(9): 1723–1732.
AN Ran, KONG Lingwei, ZHANG Xianwei. Mechanical properties and generalized Duncan-Chang model for granite residual soils using borehole shear tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(9): 1723–1732.
- [9] 于永堂, 郑建国, 刘争宏, 等. 钻孔剪切试验及其在黄土中的应用[J]. *岩土力学*, 2016, 37(12): 3635–3641, 3649.
YU Yongtang, ZHENG Jianguo, LIU Zhenghong, et al. Borehole shear test and its application to loess[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(12): 3635–3641, 3649.
- [10] 于永堂, 张龙, 郑建国, 等. 重塑黄土的钻孔剪切变形与强度特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(S2): 3367–3378.
YU Yongtang, ZHANG Long, ZHENG Jianguo, et al. Study on deformation and strength characteristics of remolded loess by borehole shear test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(S2): 3367–3378.
- [11] 靖洪文, 苏海健, 史新帅, 等. 基于井下钻孔剪切的煤矿巷道围岩强度演化规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(12): 2428–2437.
JING Hongwen, SU Haijian, SHI Xinshuai, et al. Study on the strength evolution rule of surrounding rock mass in roadways based on the in situ borehole shear method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(12): 2428–2437.
- [12] TAN X, REN Y K, LI T L, et al. In-situ direct shear test and numerical simulation of slate structural planes with thick muddy interlayer along bedding slope[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 143: 104791.
- [13] HU J, XIANG R, WEN G, et al. Study on the influence of shear indenter parameters on the in situ shear strength test[J]. *Minerals*, 2022, 12(5): 618.
- [14] HANDY R L, FOX N S. Borehole shear test and slope stability[C]//Use of in Situ Tests in Geotechnical Engineering. 1986: 161–175.
- [15] HANDY R L, SCHMERTMANN J H, LUTENEGGER A J. Borehole shear tests in a shallow marine environment[J]. *Geotechnical Engineering*, 1985.
- [16] 丁瑜, 杨奇, 夏振尧, 等. 生态护坡基材土–岩接触面原位剪切试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(S2): 383–388.
DING Yu, YANG Qi, XIA Zhenyao, et al. Experimental study on *in situ* shear of soil-rock interface of ecological slope protection substrate[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(S2): 383–388.
- [17] HAN G, MENG B, JING H, et al. Field experimental study on the broken rock zone of surrounding rock and the rock borehole shear tests of the large deformation tunnel[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 2019: 1753518.
- [18] 贾志欣, 汪小刚, 赵宇飞, 等. 岩石钻孔原位测试技术的应用与改进[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(6): 1264–1269.
JIA Zhixin, WANG Xiaogang, ZHAO Yufei, et al. Application and improvement of rock borehole *in situ* test technology[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(6): 1264–1269.
- [19] 冯文凯, 易小宇, 葛华, 等. 大光包滑坡滑带碎裂岩体原位钻孔剪切试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(9): 1718–1723.
FENG Wenkai, YI Xiaoyu, GE Hua, et al. *In-situ* borehole shear tests on cataclastic rock mass of Daguangbao landslide[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(9): 1718–1723.
- [20] 张幼振, 刘焱杰, 钟自成. 预钻式原位岩体剪切测量系统研制与试验分析[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(2): 156–162.
ZHANG Youzhen, LIU Yanjie, ZHONG Zicheng. Development and test analysis of borehole *in situ* rock mass shear measurement system[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(2): 156–162.
- [21] 徐小荷, 余静. 岩石破碎学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 54–79.
- [22] 孙杰豪, 郭保华, 田世轩, 等. 峰前循环剪切作用下岩石节理剪切力学特性[J]. *岩土力学*, 2022, 43(S2): 52–62, 73.
SUN Jiehao, GUO Baohua, TIAN Shixuan, et al. Mechanical properties of rock joint shear under prepeak cyclic shear[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(S2): 52–62, 73.