

# 煤系古风化砂土岩层接触面高压剪切试验研究

丁卿峰<sup>1</sup>, 李文平<sup>1,2</sup>, 白汉营<sup>1,2</sup>, 岳艳艳<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 为了研究煤系古风化砂土岩层接触面在开采扰动影响下土与岩石间的相互作用, 进行了砂土-风化岩接触面在6~10 MPa高应力下剪切试验, 得到了高应力下砂土-风化岩接触面的应力-应变( $\tau$ - $\gamma$ )曲线。结果表明: 高应力作用下剪切过程具有明显的阶段性, 分为土岩相互咬合阶段和相互作用阶段; 2阶段的转换涉及土颗粒材料和岩石材料的破碎, 颗粒启动及材料破碎的 $\tau$ - $\gamma$ 曲线斜率减小具有一致对应关系, 而材料破碎效应与 $\tau$ - $\gamma$ 曲线的硬化或软化特征相关。据 $\tau$ - $\gamma$ 曲线分段特征, 以初始抗剪强度和最终抗剪强度更能表征砂土-风化岩接触面剪切特征。接触面起伏特征以分形维数表示, 并分析了材料破碎效应与砂土-风化岩接触面起伏特征的相关性及其响应规律。

**关键词:** 深部土-风化岩接触带; 相互作用; 高压剪切试验; 分形维数; 材料破碎

**中图分类号:** TD351 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2015)12-0040-06

## Study on high pressure shearing test on contact surfaces of coal based paleo-weathered sand-soil rock strata

Ding Qingfeng<sup>1</sup>, Li Wenping<sup>1,2</sup>, Bai Hanying<sup>1,2</sup>, Yue Yanyan<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. State Key Lab of Deep Geomechanics and Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** In order to study the interaction between the soil and rock of the coal based paleo-weathered sand-soil rock strata contract surfaces under the influence of the mining interference, a high pressure (6~10MPa) shearing test was conducted on the interaction of the sandy soil-weathered rock contact surfaces. A  $\tau$ - $\gamma$  curve of the sandy soil-weathered rock contact surfaces under the high stress was obtained from the test. The test showed that the shearing process under the high stress level would have obvious stages and they would be an inter-occlusion stage of the soil-rock and an interaction stage individually. The conversion of the two stages would relate to the crushing of the soil particle material and the rock material, the particle startup-material crushing  $\tau$ - $\gamma$  curve inclined rate reduced would have a consistency corresponding relationship and the material crushing effect would have a closed related to the strain hardening or softening features of the  $\tau$ - $\gamma$  curve. According to the sectional features of the  $\tau$ - $\gamma$  curve, the initial shearing strength  $\tau_{ini}$  and the final shearing strength  $\tau_{ult}$  would be more favorable to explain the shearing features of the sandy soil-weathered rock contact surfaces. The fluctuation features of the contact surfaces were explained with the fractal dimension. The paper analyzed the material crushing effect and the relativity and response law on the fluctuation features of the sandy soil-weathered rock contact surface.

**Key words:** contract zone of deep soil-weathered rock; interaction; high pressure shearing test; fractal dimension; material crushing

## 0 引 言

我国东部煤矿所开采的石炭-二叠系煤层, 其露头带经历了从三叠纪到古近纪的长期古风化剥

蚀, 普遍发育10~40 m厚的古风化壳, 其间不整合覆盖了新近纪及第四纪沉积的巨厚松散土层, 厚度为300~500 m。深部土与煤系古风化岩接触带(简称深部土-岩接触带)是指厚表土底部约20 m土

收稿日期: 2015-06-18; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.12.009

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41172290)

作者简介: 丁卿峰(1989—), 男, 浙江台州人, 硕士。通信作者: 李文平, 教授, 博士, 博士生导师。Tel: 13989898110, E-mail: wpli@cumt.edu.cn

引用格式: 丁卿峰, 李文平, 白汉营, 等. 煤系古风化砂土岩层接触面高压剪切试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 40-45.

Ding Qingfeng, Li Wenping, Bai Hanying, et al. Study on high pressure shearing test on contact surfaces of coal based paleo-weathered sand-soil rock strata[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 40-45.

层及下覆煤系古风化岩(主要为煤层顶底板岩层,风化厚度约 10~40 m)组成的土-岩层组合体,是一处于高土压、高水压地质环境,软弱破碎、具有整体不良工程地质性质的地质体。我国东部煤矿早期开采时,该接触带下一般留有垂高 60~80 m 的安全煤岩柱。近年来,我国东部经济快速发展对煤炭需求量的增大及可采资源量的减少,越来越多的矿井开始实施缩小安全煤岩柱开采。与此同时,随着开采工作面接近深部土-岩接触带,生产实践中也不断出现突水溃砂、矿压异常大(支架压死)等问题,给煤矿安全生产造成巨大威胁。因此,研究深部土-岩接触带相互作用力学特性,对于近接触带缩小煤岩柱安全开采意义重大<sup>[1-3]</sup>。

土和岩石 2 种介质刚度大小相差悬殊,在工程外力作用下,土和岩石之间产生不连续的应变传递。土和岩石交界面附近通常出现一定厚度的界面层<sup>[16]</sup>以协调应变的不连续。土岩接触面室内试验研究主要借鉴水利水电行业关于土-构筑物/织物的一些经验。国内外众多学者关于土-钢、土-混凝土和土-土工织物相互作用进行过大量的试验研究: Uesugi 和 Kishida<sup>[4]</sup>测试了干砂和软钢在剪应力作用下间的屈服应力;胡黎明等<sup>[5]</sup>以有机玻璃制作剪切盒实现了土和钢板剪切过程中的动态观察;张嘎等<sup>[6]</sup>进行了大型循环剪切试验,对粗粒土与钢板接触面在单调荷载作用下的力学性质进行了系统研究; Clough 等<sup>[7]</sup>就挡土墙进行了土与混凝土的力学试验,提出了相对剪切位移与剪应力间的双曲线关系; Brandt<sup>[8]</sup>认为土与混凝土接触面的破坏为刚塑性破坏过程; Desai 等<sup>[9]</sup>以土与混凝土循环剪切试验为基础提出了扰动状态下土与混凝土的本构模型;朱俊高<sup>[10]</sup>等就土与混凝土接触面的单剪和环剪试验进行了比较;在土工织物护坡方面,文献[11-13]就土与土工织物接触面的力学性质也进行了类似研究。相对于深部岩土体所面临的高应力环境,上述研究所涉及的工程外力总体上在一个较低应力水平。文献[14-17]进行了应力高达 10 MPa 的土与混凝土、土与钢板的剪切试验,研究了深部土与结构相互作用的力学性质以及影响因素,并取得了一系列的成果。钢材、混凝土和土工织物在剪切过程中的一般很少磨损,而岩石材料(特别是高应力下的风化岩)则要严重得多。笔者以深部土与煤系古风化岩接触带为研究对象,重点介绍了模拟砂土与砂岩、砂土与泥岩接触带相互作用高压剪切试验的方法与试

验成果。

## 1 试验仪器与试验参数

高压剪切试验在 DRS-1 型高压土力学直剪试验机上进行。岩样为风化砂岩和风化泥岩,试验土样以粗中砂为主,均取自淮南潘集、谢桥矿区煤系地层隐伏露头风氧化带附近,埋深 300~500 m。用于试验的砂土为烘干土样,岩石和砂土的基本物理力学参数见表 1、表 2。试验法向应力分别取 6、8、10 MPa(接近上覆土层自重应力水平);岩石底座接触面粗糙度为人工处理,分为平面、一般起伏和较起伏 3 类,并借助 XJTUOM 三维光学密集点云测量系统获取岩石表面三维离散坐标数据<sup>[18]</sup>,采用立方体覆盖法计算其三维分形维数  $D$ <sup>[19]</sup>。平面的分形维数  $D=2$ , $D$  值越大表示岩石表面的起伏程度越大,见表 3。

表 1 岩石物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock

岩石	采样深度/m	抗压强度/MPa	普氏系数
细砂岩	353.40~356.40	22.02	3
泥岩	360.30~368.30	9.36	1

表 2 砂土的基本物理参数

Table 2 Basic physical parameters of sand

采样深度/m	限制粒径 $d_{60}/\text{mm}$	有效粒径 $d_{10}/\text{mm}$	不均匀系数 $d_{60}/d_{10}$	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
328.70~330.25	0.43	0.14	3.1	2.66

表 3 岩层接触面的分形维数

Table 3 Fractal dimension of rock surface

岩层接触面 起伏程度	泥岩分形维数 $D$			砂岩分形维数 $D$		
	6 MPa	8 MPa	10 MPa	6 MPa	8 MPa	10 MPa
平	2	2	2	2	2	2
一般起伏	2.05	2.04	2.04	2.05	2.04	2.06
较起伏	2.08	2.09	2.08	2.09	2.08	2.09

## 2 砂土-风化岩接触面剪切试验曲线分析

图 1 为  $D=2.08\sim 2.09$  时在各应力条件下砂土-风化岩接触面的一般应力-应变( $\tau-\gamma$ )曲线。法向应力对砂土-风化岩接触面的剪切力学性质影响显著,法向应力越大,初始剪切模量越高,最终的剪切强度也越大;曲线整体上呈现出剪切应变硬化特征,且未有峰值应力出现,随法向应力增大,剪切

应变硬化程度增高; 曲线的形状表现出较明显直线-双曲线型。对于起伏特征不同的砂土-泥岩和砂土-砂岩的  $\tau-\gamma$  曲线, 各法向应力下的曲线在剪切过程中均表现出由分化到聚合的过程, 其局部放大如图 2 所示。随着  $D$  值的增大, 砂土-泥岩和砂土-砂岩接触面的抗剪能力向着不同的方向发展。

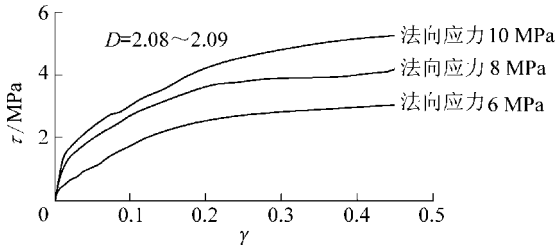
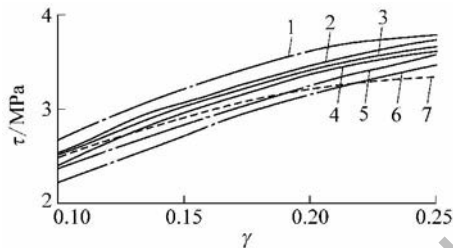


图 1 各法向应力下接触面的  $\tau-\gamma$  曲线

Fig. 1  $\tau-\gamma$  curves of interface under different normal stress



1—砂土-砂岩  $D=2.08 \sim 2.09$ ; 2—砂土-砂岩  $D=2.04 \sim 2.00$ ;  
3—砂土-泥岩  $D=2.00$ ; 4—砂土-砂岩  $D=2.00$ ; 5—砂土-泥岩,  
 $D=2.04 \sim 2.05$ ; 6—砂土-泥岩  $D=2.08 \sim 2.09$ ; 7—砂土

图 2 不同  $D$  值的接触面  $\tau-\gamma$  曲线

Fig. 2  $\tau-\gamma$  curves of interface with different  $D$

砂土-风化岩  $\tau-\gamma$  曲线的直线-双曲线形状与一般的土-结构接触面  $\tau-\gamma$  曲线不同。Clough 等用剪切试验研究土和混凝土接触面的力学特性, 认为接触面剪应力和相对剪切位移为双曲线关系等<sup>[8]</sup>。Clough-Duncan 双曲线模型能够较好地拟合低应力水平下接触面的  $\tau-\gamma$  曲线, 仍是目前最为常用的接触面应力-位移模型, 但其不能够很好地拟合高应力水平下砂土-风化岩接触面的  $\tau-\gamma$  曲线。图 3 为高应力水平下砂土-风化岩接触面  $\tau-\gamma$  曲线与 Clough-Duncan 双曲线模型比较, 可以看到: 控制初始剪切模量与试验值一致时, 曲线之间的不一致表示砂土-风化岩接触面在初始阶段后有较大幅度的抗剪能力损失; 控制最终抗剪强度与试验结果一致时, 曲线之间的不一致则表示砂土-风化岩接触面在剪切初始阶段有明显的能量蓄积; 不论是控制初始剪切模量还是最终抗剪强度, Clough-Duncan 双曲线模型与砂土-风化岩  $\tau-\gamma$  曲线都

有较大的偏离。这是因为高应力水平下砂土-风化岩接触面力学性质有其特殊性, 例如材料破碎效应。

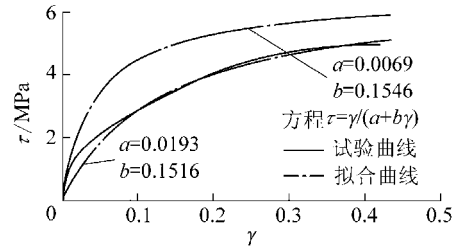


图 3 Clough-Duncan 双曲线模型拟合

Fig. 3 Fitting with Clough-Duncan model

### 3 材料破碎与砂土-风化岩接触面相互作用的阶段特征

#### 3.1 $\tau-\gamma$ 曲线形状与材料破碎的对应关系

剪切过程中, 竖向位移  $w$  随着剪切行程的变化情况能够间接地反映出材料破碎的情况。图 4 为具有代表性的砂土-风化岩接触面的  $\tau-\gamma$  曲线和竖向位移变化曲线。竖向位移变化曲线的开始段斜率很小的直线段, 在  $\gamma > 0.025$  后, 竖向位移变化曲线经历一段陡升然后趋于平缓;  $\tau-\gamma$  曲线的起始段为斜率较大直线段, 在  $\gamma > 0.025$  后, 曲线斜率大幅降低最后趋于平缓。

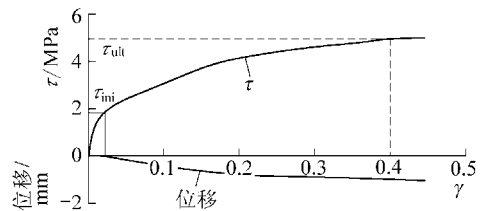


图 4  $\tau-\gamma$  曲线和竖向位移  $w$  变化曲线

Fig. 4  $\tau-\gamma$  curve and  $\tau-w$  curve

竖向位移变化曲线与  $\tau-\gamma$  曲线形状的相互对应说明: 高应力水平下砂土-岩石接触面的力学性质与材料破碎密切相关, 特别是当砂土-岩石接触面相互作用进入到滑动摩擦阶段后, 材料破碎的影响更为显著。材料破碎会剧烈地改变试样内在结构, 从而影响其抗剪强度<sup>[20]</sup>。文献[21]有关颗粒破碎效应的结论表明, 颗粒破碎主要发生在剪切过程中, 并非围压施加的过程中。所提及的材料破碎效应主要是指剪切过程中发生的颗粒破碎和岩石的磨损, 忽略法向应力施加过程中材料的微量破碎。

#### 3.2 砂土-风化岩接触面力学指标

文献[22]在研究粉质黏土-混凝土接触面的

特性时,按 Mohr - Coulomb 强度理论拟合其强度包络线,给出了粉质黏土 - 混凝土接触面类似于土体黏聚力和内摩擦角的力学指标。考虑到高应力水平下材料破碎对砂土 - 风化岩接触面力学性质的影响,选取不同剪应变对应的剪切应力按 Mohr - Coulomb 强度理论拟合其强度包络线,探求其力学性质的变化规律。高应力作用下砂土 - 风化岩接触面的  $\tau - \gamma$  曲线符合典型的弹塑性应力应变模式,对于这种情况通常以剪应变达到一定限度来定义破坏或是屈服。当取  $\gamma = 0.4$  处的剪切应力  $\tau_{ult}$  (表 4) 作为砂土 - 风化岩接触面的峰值抗剪强度,另外,取  $\gamma = 0.025$  处的剪切应力  $\tau_{ini}$  (表 5) 用于对比分析,这里取  $\gamma = 0.025$  有其特殊性,该点大致是砂土 - 风化岩接触面相互作用由静态向动态转变的转折点,标志着材料破碎的开始(即忽略静态时颗粒的压碎)。 $\tau_{ini}$  相当于将砂土 - 风化岩作为整体考虑时的屈服强度,该点以后,砂土 - 风化岩接触面进入加工硬化阶段。 $\gamma = 0.025$  和  $\gamma = 0.4$  处的 Mohr - Coulomb 强度包络线如图 5 和图 6 所示。

表 4 砂土-风化岩接触面抗剪强度试验 ( $\gamma = 0.4$ )Table 4 Shear strength test values of sand-weathered rock interface ( $\gamma = 0.4$ )

法向应力 /MPa	砂土-泥岩 $\tau_{ult}$ /MPa			砂土-砂岩 $\tau_{ult}$ /MPa		
	$D=2$			$D=2$		
	$D=2.04$	$D=2.08$	$D=2.08$	$D=2.04$	$D=2.08$	$D=2.08$
6	2.69	2.58	2.58	2.35	2.46	2.52
8	3.41	3.23	3.12	3.42	3.42	3.62
10	4.25	4.13	4.08	3.85	4.0	4.1

表 5 砂土-风化岩接触面抗剪强度试验 ( $\gamma = 0.025$ )Table 5 Shear strength test values of sand-weathered rock interface ( $\gamma = 0.025$ )

法向应力 /MPa	砂土-泥岩 $\tau_{ult}$ /MPa			砂土-砂岩 $\tau_{ult}$ /MPa		
	$D=2$			$D=2$		
	$D=2.04$	$D=2.08$	$D=2.08$	$D=2.04$	$D=2.08$	$D=2.08$
6	1.42	1.31	1.25	1.14	1.28	1.41
8	1.88	1.77	1.71	1.65	1.78	1.98
10	2.4	2.18	2.11	1.98	2.15	2.31

从 Mohr - Coulomb 强度曲线拟合的情况来看,高应力水平下砂土 - 风化岩接触面的抗剪强度可以表示为与土的 Mohr - Coulomb 剪切强度相似的形式:  $\tau = A + B\sigma$ 。 $\gamma = 0.025$  和  $\gamma = 0.4$  处砂土 - 风化岩接触面的  $A$ 、 $B$  值见表 6。式中  $A$  相当于土的黏聚

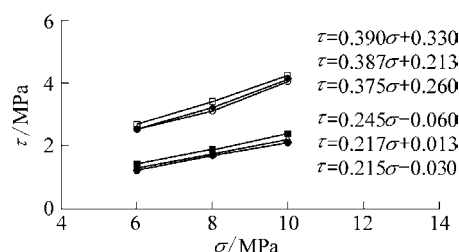


图 5 砂土 - 泥岩接触面 Mohr - Coulomb 强度曲线

Fig. 5 Mohr - Coulomb strength curves of sand - mudstone interfaces

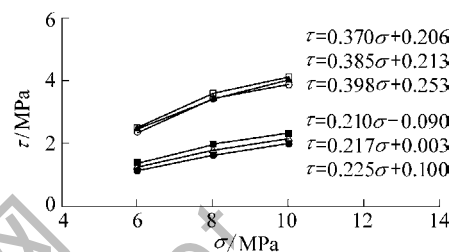


图 6 砂土 - 砂岩接触面 Mohr - Coulomb 强度曲线

Fig. 6 Mohr - Coulomb strength curves of sand - sandstone interfaces

力  $B$  相当于土的内摩擦角的正切值。

表 6 砂土-风化岩接触面拟合参数

Table 6 Parameters of sand-weathered rock interface

拟合参数	砂土-泥岩 $\tau_{ult}$ /MPa			砂土-砂岩 $\tau_{ult}$ /MPa		
	$D=2$			$D=2$		
	$D=2.04$	$D=2.08$	$D=2.08$	$D=2.04$	$D=2.08$	$D=2.08$
$\gamma = 0.025$	$A$ /MPa	-0.06	0.013	-0.03	-0.09	-0.003
	$B$	0.245	0.217	0.215	0.21	0.217
$\gamma = 0.4$	$A$ /MPa	0.33	0.213	0.26	0.206	0.213
	$B$	0.39	0.387	0.375	0.374	0.385

从表 6 中  $A$ 、 $B$  的值可以看到:  $\gamma = 0.025$  的  $B$  值几乎为 0,说明此时的剪切应力  $\tau_{ini} = B\sigma_n$  仅与法向应力  $\sigma_n$  有关;在  $\gamma = 0.4$  处时  $A$ 、 $B$  值均不为 0,即随着剪切位移的推进,砂土 - 风化岩接触面的抗剪能力发生了改变,黏聚力有明显的提高,抗剪强度由摩擦部分和粘聚部分组成。

### 3.3 砂土 - 风化岩接触面剪切过程分析

综合以上分析,将  $\tau - \gamma$  曲线的形状与高应力水作用砂土 - 风化岩接触面的剪切过程对应起来,表述如下。

第一阶段 静态咬合阶段。砂土在充分固结以后,颗粒与岩石面处于静态咬合状态。剪切开始的初始阶段,颗粒和岩石面在静摩擦力下仍然处于静态咬合状态,颗粒未发生滚动或平动。 $\tau - \gamma$  曲线近

似为直线段。从  $\tau_{ini}$  的 Mohr - Coulomb 强度表达式来看,接触面的抗剪强度主要是摩擦强度。 $\tau_{ini}$  相当于将砂土 - 风化岩作为整体考虑时的屈服强度。

第二阶段 相互作用阶段。随着剪切进程的推进,剪切应力超过了颗粒和岩石面间的静摩擦力,颗粒和岩石面的静态咬合状态被打破,颗粒在切向力的作用下滚动或平动。颗粒与岩石相互作用,颗粒破碎,岩石被磨损,  $\tau - \gamma$  曲线出现斜率的快速下降。细颗粒充填空隙,黏聚强度增强。从  $\tau_{ult}$  的 Mohr - Coulomb 强度表达式来看,接触面的抗剪强度包括摩擦强度部分和黏聚强度部分。 $\tau - \gamma$  曲线整体上为双曲线形状,呈现出应变硬化特征,直到剪切结束。

#### 4 $D$ 值对砂土 - 风化岩接触面力学特征影响

材料破碎效应对砂土 - 风化岩接触面力学特征的影响表现在改变了其抗剪能力的构成。另一方面,在高应力作用下,材料破碎效应削弱了接触面起伏特征对砂土 - 风化岩接触面力学特征的影响。表现在不同  $D$  值的砂土 - 风化岩接触面  $\tau - \gamma$  曲线(图2)呈现出规律性分化和汇聚,曲线中部(取A点代表)体现了砂土 - 风化岩接触面对接触面起伏特征的响应。这种规律由  $D$  值与  $\tau_A$  值呈现如图7所示,即随着  $D$  值的增大,砂土 - 泥岩和砂土 - 砂岩接触面的抗剪能力向着不同的方向发展。

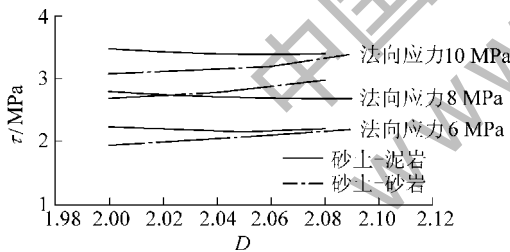


图7 各法向应力下  $\tau$  与  $D$  的关系曲线

Fig. 7  $\tau - D$  curves under different normal stresses

对于  $D = 2$  的平面岩石底座接触面,砂土 - 泥岩接触面较砂土 - 砂岩接触面有更高的  $\tau$  值,微观上颗粒和岩石面的接触方式如图8a和图8b所示。砂岩表面对颗粒的约束仅是摩擦,而要使得嵌入泥岩的颗粒移动就得切削颗粒间的泥岩凸起,即颗粒嵌入泥岩表面使得土 - 岩交接面的连结更为牢固。

对于  $D > 2$  的岩石底座,土颗粒和岩石间的连结如图8c所示,为颗粒组与岩齿间的相互咬合形式。需要说明的是:因为剪切试验中剪切面设置的特殊性,剪切时并没有对岩齿进行直接的剪切,所以

岩齿与剪切面持平,对土 - 岩接触面抗剪能力的影响是间接的。

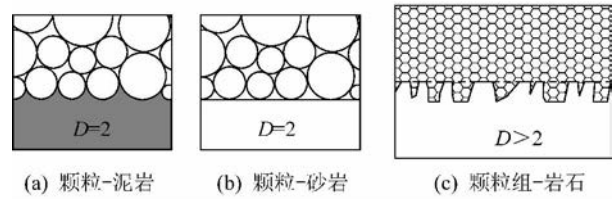


图8 砂土 - 风化岩接触示意

Fig. 8 Diagrams of sand - weathered rock interface

土颗粒和岩石的连结除了颗粒与岩石面的嵌固或受摩擦约束部分,还包括颗粒组与岩齿间的咬合部分。颗粒组与岩齿间的咬合与岩齿的力学性质密切相关。对于泥岩岩齿,其强度低且易于磨损,颗粒组与岩齿间的相互咬合对土 - 岩接触面抗剪能力的提升并没有明显的影响,这也体现了泥岩这类低强度材料的接触面特征在高应力相互作用下更易于趋同的特点。对于砂岩岩齿,其强度较高且不易于磨损,颗粒组与岩齿间的相互咬合能够较明显的提升土 - 岩接触面抗剪能力。在保证砂岩岩齿完整性的前提下,接触面起伏特征越明显即  $D$  值越大,土 - 岩接触面抗剪能力越强。 $D$  值存在一临界值,超过临界值以后砂岩岩齿将变得过于脆弱,不利于土 - 岩间的连结。

#### 5 结 语

高应力作用下砂土和风化岩在剪切试验过程中涉及土颗粒的破碎和岩石面磨损,有其特殊性。砂土风化岩接触面剪切试验的特征如下。

1) 高应力作用下砂土 - 风化岩接触面的  $\tau - \gamma$  曲线呈现为直线 - 双曲线型,具有明显的阶段特征,可分为土岩相互咬合阶段和相互作用阶段。

2) 高应力水平下,材料破碎效应对砂土 - 风化岩接触面的力学性质起着控制作用,颗粒启动 - 材料破碎 -  $\tau - \gamma$  曲线斜率下降有着一致对应的关系,材料破碎效应与  $\tau - \gamma$  曲线的应变软化或硬化密切相关。

3) 接触面起伏特征受材料破碎效应影响,随着剪切行程的推进接触面特征逐渐趋同,砂土 - 风化岩接触面仅在局部表现出对其响应。

4) 砂土 - 风化岩间的连结包括颗粒与岩石面的嵌固和颗粒组与岩齿间的咬合,岩齿的岩性在相当大的程度上决定了砂土 - 风化岩接触面起伏特征对其力学性质的影响。

## 参考文献:

- [1] 刘天泉. 厚松散含水层下近松散层的安全开采[J]. 煤炭科学技术, 1986, 14(2): 14-18.  
Liu Tianquan. Safety mining under thick loose aquifer[J]. Coal Science and Technology, 1986, 14(2): 14-18.
- [2] 刘学增. 新生代松散层下缩小防水岩柱留设防砂煤柱开采实践[J]. 煤炭技术, 2002, 21(9): 27-28.  
Liu Xuezeng. Mining practice of shrinking water prevention rock pillar and leaving sand prevention pillar under the loose layer of Cenozoic Era(K<sub>2</sub>) [J]. Coal Technology, 2002, 21(9): 27-28.
- [3] 桂和荣, 孙家斌, 李明好, 等. 厚松散层及超薄覆岩条件下放顶煤开采防砂煤柱[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 32(2): 36-39.  
Gui Herong, Sun Jiabin, Li Minghao *et al.* The thick loose layer and ultrathin overlying strata caving mining under the condition of sand proof pillar[J]. Coal Geology and Exploration, 2002, 32(2): 36-39.
- [4] Uesugi M, Kishida H. Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel[J]. Soils and Foundations, 1986, 26(4): 139-149.
- [5] 胡黎明, 濮家骥. 土与结构接触面物理力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 431-435.  
Hu Liming, Pu Jialiu. Experimental study on surface physical and mechanical characteristics of the interface between soil and structural[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 431-435.
- [6] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面单调力学特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 21-25.  
Zhang Ga, Zhang Jianmin. Experimental study on surface contact mechanics characteristic of monotonic structure and coarse grained soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 21-25.
- [7] Clough G W, Duncan J M. Finite element analysis of retaining wall behavior[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1971, 97(12): 1657-1672.
- [8] Brandt J R T. Behavior of soil-concrete interfaces [D]. Edmonton: University of Alberta, 1985.
- [9] Desai C S, Pradhan S K, Cohen D. Cyclic testing and constitutive modeling of saturated sand-concrete interfaces using the disturbed state concept[J]. International Journal of Geomechanics, 2005, 5(4): 286-294.
- [10] 朱俊高, R. R. Shakir, 杨有莲, 等. 土-混凝土接触面特性环剪单剪试验比较研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 692-696.  
Zhu Jungao, R R Shakir, Yang Youlian *et al.* Soil concrete interface characteristics of ring shear simple shear test comparison[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 692-696.
- [11] Indraratna B, Karimullah Hussaini S K, Vinod J S. On the shear behavior of ballast-geosynthetic interfaces[J]. ASTM Geotechnical Testing Journal, 2012, 35(2): 305-312.
- [12] 杨广庆, 李广信, 张保俭. 土工格栅界面摩擦特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(8): 948-952.  
Yang Guangqing, Li Guangxin, Zhang Baojian. Experimental study on interface friction characteristics of geogrids test[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(8): 948-952.
- [13] 徐超, 石志龙. 循环荷载作用下筋土界面抗剪特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(3): 655-660.  
Xu Chao, Shi Zhilong. Experimental study on shear characteristics of the interface of reinforced soil under cyclic loading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(3): 655-660.
- [14] Li Wenping, Li Xiaoqin, Sun Ruhua. Study on the Mechanism of the Ruptures of the Shaft Lining in the Coal Mine Areas Buried by Thickover Soils in East China[J]. Geotechnique, 2005, 55(3): 237-244.
- [15] 李文平. 充滕一、两淮矿区井壁重复破裂粘滑机制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(5): 459-462.  
Li Wenping. Yan Teng—two Huai mine shaft wall repeated rupture stick slip mechanism[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2000, 29(5): 459-462.
- [16] 周国庆, 夏红春, 赵光思, 部士-结构接触面与界面层力学特性的直接剪切试验[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1157-1162.  
Zhou Guoqing, Xia Hongchun, Zhao Guangsi. The direct shear test of soil structure interface and interface layer mechanical properties[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(10): 1157-1162.
- [17] 刘希亮, 于广云, 赵光思, 等. 高压下界面抗剪强度的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(1): 34-37.  
Liu Xiliang, Yu Guangyun, Zhao Guangsi *et al.* Test study on interface under high pressure test on shear strength[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2003, 32(1): 34-37.
- [18] 谢艾伶. 基于工业测量的相似材料模型数据处理系统研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.  
Xie Ailing. Study on the data processing system of similar material model based on the industrial measurement [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2010.
- [19] 张亚衡, 周宏伟, 谢和平. 粗糙表面分形维数估算的改进立方体覆盖法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3193-3196.  
Zhang Yaheng, Zhou Hongwei, Xie Heping. Improving the cube rough surface fractal dimension[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(17): 3193-3196.
- [20] Bolton M D, Nakata Y, Cheng Y P. Micro- and macro-mechanical behavior of DEM crushable materials [J]. Geotechnique, 2008, 58(6): 471-480.
- [21] 杨光, 张丙印, 于玉贞, 等. 不同应力路径下粗颗粒的颗粒破碎试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(3): 338-342.  
Yang Guang, Zhang Bingyin, Yu Yuzhen *et al.* An experimental study on particle breakage of coarse-grained materials under various stress paths[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(3): 338-342.
- [22] 刘方成. 粉质黏土-混凝土接触面特性单剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1720-1728.  
Liu Fangcheng. Study on silty clay and concrete contact surface characteristics of single shear test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1720-1728.