

岩石三轴拉伸试验装置研制及其应用

马春德^{1,2}, 郭春志¹, 潘素平², 周亚楠¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 高等研究中心, 湖南 长沙 410083)

摘要: 为准确地测量岩石试样在不同围压作用下的拉伸强度与变形特性, 对用于岩石三轴压缩试验的 MTS815 材料试验机为主体设备进行了一系列技术改造, 一方面设计加工了一套试验机活塞与三轴室的随动连锁装置, 使原本只能提供压缩载荷的 MTS815 试验机也能精确提供轴向拉伸荷载; 另一方面设计开发一种多自由度岩石试样三轴拉伸夹具, 解决岩石等脆性材料在拉伸过程中难以始终保持对中的技术难题。提出一套完整的测试技术方法, 能实现 0~140 MPa 围压范围内各种岩石试件的复杂三轴直接拉伸测试研究, 利用研发的配套装置与测试方法对页岩试样进行了三轴拉伸试验。结果表明, 试验装置和试验方法完全能够进行不同围压条件下的岩石三轴拉伸试验, 得到相应的三轴拉伸试验曲线; 页岩在低围压和高围压下呈现不同的破坏特征和破坏形式, 低围压下依然呈现脆性特征, 高围压下则是由脆性向塑性转换。

关键词: MTS815 材料试验机; 岩石三轴拉伸; 随动连锁装置; 三轴拉伸夹具; 三轴拉伸试验曲线

中图分类号: Q337; TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2018) 增 1-0537-07

Development and application of rock triaxial tensile test device

MA Chun-de^{1,2}, GUO Chun-zhi¹, PAN Su-ping², ZHOU Ya-nan¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Center for Advanced Study, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: In order to accurately measure the tensile strength and deformation characteristics of rock specimens under different confining pressures, a series of technological modifications are carried out with material testing machine MTS815, which is mainly used for rock triaxial compression test, on the one hand, a set of test machine piston and three-axis chamber with the interlocking device, so that the original can only provide compression load testing machine MTS815 can also provide accurate axial tensile load; the other hand, the design and development of a multi The degree of freedom of rock specimen triaxial tension fixture, to solve the rock and other brittle materials in the stretching process is difficult to always maintain the technical problems. On this basis, a complete set of test techniques is proposed to realize the complex triaxial direct tensile test of various rock specimens in the range of 0-140 MPa confining pressures. The results show that the test apparatus and the test method can fully carry out the rock triaxial tensile test under different confining pressure conditions; and the corresponding test results are obtained. The results show that the test specimen and the test method can carry out the triaxial tensile test on the shale specimen with the supporting equipment and test method, also triaxial tensile test curve is obtained. The results show that the shale has different failure characteristics and failure modes under low confining pressure and high confining pressure. Under the low confining pressure, the shale is still characterized by brittleness.

Keywords: material testing machine MTS815; rock triaxial tension; follow chain device; three-axis tensile fixture; triaxial tensile test curve

1 引言

岩石的抗拉强度是岩石力学中的一个重要指标, 由于岩石内部有微裂隙、孔隙等, 使其强度远远低于抗拉强度, 试验中只需要很小的力就使岩石发生破坏^[1]。直接拉伸试验存在着各种各样的难题

诸如岩石试件的加工、与试验机的连接以及对中控制偏心等问题, 关于直接拉伸试验只有较少的研究。

近些年来国内外学者针对拉伸试验的难题提出了一系列的试验方法, 国内最早进行拉伸试验的长江科学院岩基室^[2]曾设计出了原理类似于压力试

验机球形铰座的岩石拉伸夹具,进行了多种岩石的轴向拉伸试验,但不能避免偏心拉伸。陶纪南^[3]使用了一种结构简单、可以实现自动对中的试验装置,但试验成功率较低。Hawkes 等^[4]将岩石试样粘贴在金属夹头上进行拉伸试验,但金属套筒结构复杂,无法避免扭转效应。Stimpson 等^[5]将岩石加工成特殊的中空圆柱状进行轴向拉伸试验,但这种具有同心的中空圆柱状试样的加工十分困难,难于普遍使用。余贤斌等^[6]利用滚动轴承传递拉伸荷载,可以避免试样受到偏心拉伸,但连接件过多,一旦轴承转动受阻,即会引起显著地偏心受拉或扭转破坏。Okubo 等^[7-8]采用环氧树脂胶粘法在伺服控制试验机上进行不同岩石的拉伸试验,但粘接试样的固定板和加载装置也未能做到精确对中,也产生了偏心拉伸的问题,对试验结果产生了巨大的影响。吴永胜等^[9]、陈忠^[10]、张志雄^[11]对岩石劈裂,压缩及轴向拉伸进行试验研究,也未能彻底消除试验中的偏心问题。尤明庆等^[12]利用设计的试验装置在伺服试验机上进行围压下圆柱岩样的直接拉伸试验,试验的成功率较低,数据的离散型较大,利用的价值较低。Li 等^[13]较大幅度地改进试验夹具,使得岩石的直接拉伸试验成功率大大升高。Tufekci 等^[14]设计了一种新的爪式离合器机构测试岩石的直接拉伸强度,并比较了直接法与间接法的直接拉伸强度。

由于拉伸试验存在的一系列难题,目前测试岩石的抗拉强度的主流方法是采用巴西劈裂等间接方法^[15-18]。间接方法中岩石试样的受力状态过于复杂,测试结果的准确性无法保证,且这些方法只适用于单轴条件下^[4, 19-20]。在工程上地下工程中的围岩多处于三向应力状态,尤其在巷道开挖载荷后其围岩径向方向会受到两向受压和一向受拉的应力状态^[21],因此迫切需要研制一种三轴拉伸装置解决对中控制偏心问题,进行不同围压下的拉伸试验。针对以上问题,笔者等设计出一种能够对岩石进行三轴拉伸的装置和试验方法,可以有效地保证以上两点,选用页岩进行测试,测定后印证该装置设计合理,实现方便且效果很好,能有效地完成岩石三轴拉伸试验过程,准确分析岩石破坏的类型。

2 随动联锁装置的研制

2.1 原有仪器的优点与缺陷

美国 MTS815 力学实验系统最大载荷量程为 2 600 kN,载荷测量精度为 $\pm 0.5\%$ 。伺服液压系统具有很高的灵敏度,可很好地保证了测试的精度,是目前为止精度最高、性能最先进的岩石力学试验

装备。MTS815 材料试验机是一种用于岩石压缩的试验仪器,原仪器作动器活塞与加载平台分离只有当作动器活塞向上运动(施加压载荷),升高到一定程度时才能与加载平台接触并一起运动,并将压载荷传递到岩石试件上。当作动器活塞向下运动时压载荷逐渐减小,直至压载荷为 0,此时作动器活塞与加载平台重新分离,加载平台下降到导向轨道高度停止运动,无法把拉载荷作用到岩石试件上。

2.2 随动联锁装置的研制

图 1、2 分别为联锁装置的示意图和实物图。装置主要由轨道、带有螺孔的平面钢板和直角型钢块组成。

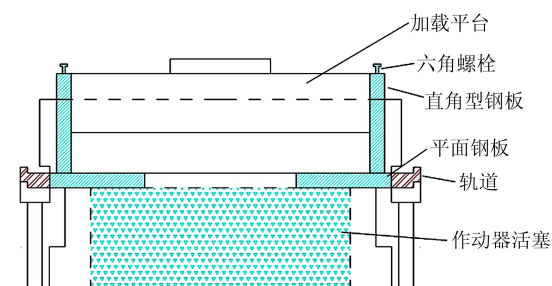


图 1 联锁装置示意图

Fig.1 Sketch of interlocking device



图 2 联锁装置实物

Fig.2 Interlocking device physical

平面钢板主要用于与试验仪器的作动器活塞相连,使用 4 个螺丝与作动器活塞连接,保证平面钢板能与作动器的活塞上下移动,由于加载平台只有在最底部的时候才能左右滑动,从而导致平面钢板无法放置在加载平台与作动器活塞之间。为了解决这一问题,在原有加载平台两端所用的轨道上放置了与平面钢板相同厚度的加工轨道。解决平面钢板与加载平台能同步移动的问题是使用 4 个带有螺栓的直角型钢块,每个钢块上带有 2 个螺栓,一个与加载平台进行固定连接,另外一个与平面钢板进行连接,4 个直角型钢块分别放在加载平台的 4 个角处,保证受力均匀,实现了加载平台与作动器活

塞同步上下移动。

3 三轴拉伸夹具的研制

研制的岩石三轴拉伸夹具的示意图和实物图如图 3、4 所示。

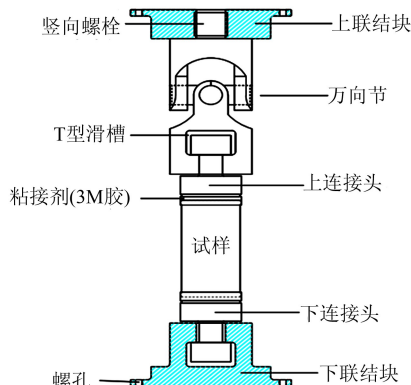


图 3 三轴拉伸夹具装置示意图

Fig.3 Sketch of triaxial stretching clamp device

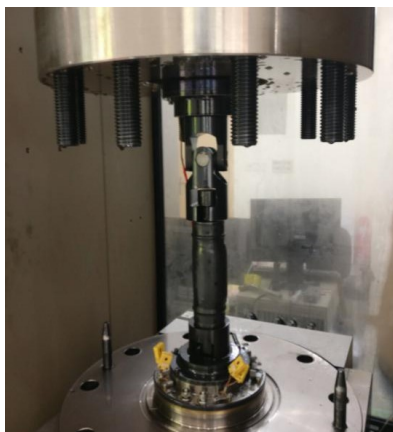


图 4 三轴拉伸夹具装置实物图

Fig.4 Triaxial stretching fixture device physical map

装置主要由以下几部分构成:

(1) 连接头

连接头用于与试样两端进行粘接, 有上下 2 个相同的连接头, 连接头与试样连接的一端直径要大于或者等于试样的尺寸, 上连接头另一端能与万向节的 T 型滑槽进行挂接, 下连接头的另一端与下联结块的 T 型滑槽进行连接。万向节与下联结块的 T 型滑槽可以进行旋转, 用以调节连接头与其挂接的方位, 保证连接头与试样不会产生移动。连接头与试样的粘接使用的是美国 3M 胶, 是由粘接剂和固定剂组成, 粘接剂和固定剂混合使用比例为 3:2, 混合均匀并且粘接时不能有较大的滑动, 3M 胶完全凝固后的强度会大于岩样的拉伸强度 (包括单轴和三轴), 通过测试, 24 h 后 3M 胶的拉伸强度为

42~45 MPa, 随着粘接时间的延长, 拉伸强度会逐渐变大, 最大能达到 54~55 MPa。

(2) 万向节

所研制的万向节有多自由度, 在不同的方位可以进行左右或者前后的移动, 与连接头连接的一端设置有 T 型滑槽, 能与连接头进行有效的连接, 另一端设置有竖向螺纹, 用于与上联结块设置的螺孔进行旋转连接。万向节所独有的多自由度的功能可以有效地防止由于试样不平造成的拉伸载荷方向与试样轴线不重合造成的附加弯曲载荷对试验结果的影响。由于这一功能的产生使得岩石等脆性材料在拉伸过程中难以始终保持对中的技术难题得到解决。

(3) 联结块

所设计的联结块包括上联结块和下联结块, 装置有所不同, 上联结块中部设置有螺孔, 用于与万向节连接, 周围分布有 6 个等直径的螺孔, 与 MTS815 材料试验机的力传感器进行连接, 将拉力能有效地传递到力传感器中进行监测记录。下联结块一端与连接头进行连接, 另一端的周围同样设置有 6 个等直径的螺孔, 用于与 MTS815 的加载平台进行固定连接。

本装置与国内外同类型的试验装置相比有如下技术优势: (1) 随动联锁试验装置的研制使得加载平台与作动器活塞可以上下同步移动, 实现了 MTS815 试验仪器可以进行主动压缩和主动拉伸的功能。(2) 三轴拉伸试验夹具的研制使得当加载平台向下移动时载荷传感器能够接收到拉伸的信号, 夹具中的特有的万向节可以提供一个多自由度的调整, 在粘接试样时保证试样两端与连接头粘接牢固, 使试样与连接头位于同一轴线处。试验前利用万向节特有的自由度进行小范围的调整, 再给予一定的初始应力, 保证在注油的过程中拉伸夹具不发生扰动, 一系列的措施可以解决由于试样不平造成的拉伸载荷方向与试样轴线不重合造成的附加弯曲载荷对试验结果的影响, 也相应的解决了试样对中的问题。(3) 岩石三轴拉伸试验装置不仅适用于软岩的直接拉伸也适用于硬岩的直接拉伸, 应用范围广。

(4) 能够在不同围压条件使用, 能在低围压和高围压下进行准确地测试。

4 试 验

使用上述基于 MTS815 材料试验机的岩石三轴拉伸装置, 对页岩进行了不同围压下的三轴拉伸试验。三轴拉伸试验是指试样首先在三轴腔中固定,

然后向三轴腔中注油, 施加围压, 采用位移或者力控制使轴向拉力逐渐增大直至试样破坏的过程。

4.1 试验方案

试样为页岩, 将试样事先做好“狗骨头”的形状, 为使岩样均匀受压, 在页岩周围涂上软胶泥, 做成圆柱形状, 见图 5。试验中采用位移控制, 加载速率为 0.12 mm/min, 对页岩分别进行围压为 0、10、15、20、40、60、80 MPa 的三轴拉伸试验。



图 5 试样实物图
Fig.5 Sample plan

4.2 试验方法

(1) 试样粘接

用 3M 胶将页岩试样粘接于上连接头与下连接头之间, 使岩样与连接头保持在同一轴线处, 静置 48 h 后 3M 胶完全凝固, 在连接头的端口处安装具有一定耐油性和弹性的橡胶圈, 再在连接头与岩样一体的装置上套上热缩管, 热缩管的长度要覆盖上连接头与下连接头的橡胶圈处, 用热风从中间向两边吹热缩管, 保证热缩管能够很好地固定在被测试岩样与上下连接头处。

(2) 仪器安装

将轨道、带有螺孔的平面钢板和直角型钢块分别安装在加载平台与作动器活塞处, 组成随动连锁装置。夹具处将上联结块安装在 MTS815 的载荷传感器处, 用螺丝与上联结块周围的螺孔进行旋转连接, 再将万向节上方的竖向螺纹与上联结块的竖向螺孔进行旋转连接, 同样利用螺丝将下联结块周围的螺孔与 MTS815 的下方加载平台进行旋转连接, 再将与岩样粘接的连接头挂接于下联结块与万向节处, 调整万向节, 保证万向节、连接头、被测试岩样和下联结块的中心位于同一轴线处。

(3) 拉伸试验

试样安装完毕后拔下三轴室插销, 将三轴室平

稳落到加载平台上, 将其周围的粗螺钉紧固, 形成内部密闭空间。向三轴室腔体内注油, 完毕后对被测试岩样施加一定的围压值 (按试验方案要求, 施加不同的围压状态)。最后, 采用轴向位移控制模式, 以 0.1 mm/min 的速率对被测试岩样施加拉载荷, 直到岩样断裂破坏, 加载过程中由控制电脑实时记录载荷、位移等原始数据。岩样断裂破坏后应尽快结束试验, 防止由于过度拉伸造成的热缩管外套损伤而引起的试样进油。试验完毕后进行回油操作, 打开三轴室, 取下岩样, 观察试样的断裂面, 拍照和记录。

(4) 数据处理

试验结束后试验数据会自动以标准 excel (或 dat) 格式保存在指定文件夹内, 数据主要包括时间、位移、载荷、围压等参数。研究者可利用这些参数根据研究目的进行计算分析, 得出不同围压条件下岩石试件的三轴直接拉伸力学特性及规律。

5 试验结果分析

5.1 偏应力计算及其拉伸位移曲线

利用上述的试验装置及其试验方法进行了不同围压下的拉伸试验, 用 σ_t 表示拉伸偏应力, 计算公式为

$$\sigma_t = P_t / A \quad (1)$$

式中: σ_t 为拉伸偏应力; P_t 为拉伸载荷; A 为试样横截面积。

利用研制的新型装置对页岩进行了不同围压下的三轴拉伸试验, 由于三轴拉伸试验的影响因素过多, 在众多的试验样品中选取了结果相对较完整的数据, 绘制了拉伸偏应力与位移之间的关系曲线, 并给出了直接拉伸偏应力的计算公式, 如图 6 所示 (为便于绘制, 偏应力和位移分别取的绝对值, 标注了峰值应力)。

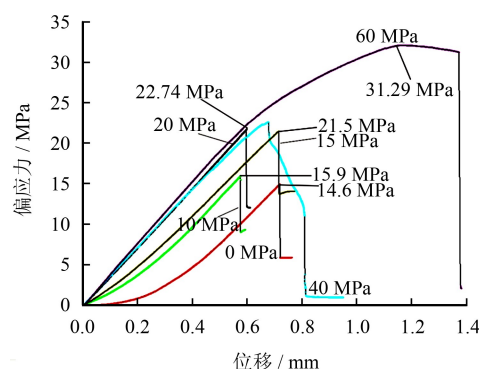


图 6 拉伸位移曲线

Fig.6 Stretch displacement curves

从图 6 中可以看出, 总体上拉伸应力随着围压的增大而增大, 在 0~20 MPa 低围压的条件下拉伸应力位移曲线呈“上凹”状态, 呈现斜率逐渐增大的趋势, 明显由非线性向线性阶段转变; 在 20 MPa 以上高围压的条件下峰值前曲线的斜率呈现逐渐减小的变化, 明显由线性阶段向非线性阶段转变, 到达峰值后不会立即发生断裂, 而是呈现一定的平缓阶段, 与高围压下三轴压缩的状态相似, 峰值前后的塑性特征很明显, 表明峰值前围压的增大使岩石由脆性向塑性发展。

5.2 破坏模式

由图 6 可知, 页岩主要有拉伸破坏和剪切破坏两种破坏方式, 拉伸破坏时断裂面与拉力方向几乎垂直, 断面不平整, 断裂面上的拉应力为主应力, 剪切破坏时破坏面与最大主平面呈现一定的夹角, 主应力是处于压应力的状态。

(1) 拉伸破坏

图 7 为页岩处于 10 MPa 低围压下破坏的断面形状。断裂面呈水平状, 整个断面粗糙不平。破坏的特点与单轴拉伸相似, 拉伸的位移相对不大。



图 7 拉伸破坏 (围压 10 MPa)

Fig.7 Tensile damage (confining pressure 10 MPa)

(2) 剪切破坏或者拉伸-剪切复合破坏

剪切破坏或者拉伸-剪切复合破坏发生在 40 MPa 较高围压的条件下, 见图 8。



图 8 剪切或者拉伸-剪切复合破坏

Fig.8 Shear or tensile - shear composite destruction

页岩断面处存在一定的夹角, 虽然夹角不是很大, 还是呈现出了明显的倾斜特征。由于施加的侧向压力较大, 随着拉伸应变的增加, 试样发生类似剪切的破坏。由于断面处夹角不是很大, 没有太明显的剪切带, 试样呈现剪切破坏或者拉伸-剪切复合破坏。

5.3 破坏现象分析

结合上述的断面图形 (见图 7、8) 和位移曲线 (见图 6) 可知, 在 0 MPa 即无围压的条件下页岩的拉伸位移曲线呈现出了 3 个阶段, 分别为上凹阶段、直线阶段和破坏阶段。上凹阶段即为裂隙扩展阶段, 曲线斜率在不断增加, 主要是拉应力的作用使得裂隙不断发生扩展; 直线阶段即为稳定阶段, 表明页岩在拉应力的作用下, 裂隙在稳定扩展; 破坏阶段页岩到达峰值强度以后突然发生破坏, 表现出明显的脆性破坏。

具有围压的条件下分为低围压和高围压, 低围压下曲线起始处仍然呈现上凹阶段, 但没有单轴条件下明显, 随着围压的增大, “上凹”现象逐渐消失。导致这一现象的主要原因是裂隙扩展阶段侧向压力的存在时抵消了一部分拉应力对裂隙扩展所产生的作用, 仍是拉应力在起主导作用, 围压越大, 抵消作用越明显, 直到高围压条件下侧向压应力的作用起到完全的主导作用。在低围压的直线稳定阶段, 拉应力依然为主导作用, 直到页岩发生破坏, 而高围压下侧向压应力已经抵消拉应力产生的作用, 起到主导作用, 高围压下峰前呈现明显的塑性阶段, 破坏阶段依然为脆性破坏。

6 结 论

(1) 基于新型 MTS815 材料试验机研制的一种新型的三轴拉伸试验装置, 分为随动联锁装置和三轴拉伸夹具, 使原本只能提供压缩载荷的 MTS815 试验机也能精确提供轴向拉伸荷载, 解决了岩石等脆性材料在拉伸过程中难以始终保持对中的技术难题。针对三轴拉伸试验装置及试验设计了一套完整的三轴拉伸试验方法, 可有效地进行三轴拉伸试验。

(2) 利用新装置对页岩进行了不同围压下的拉伸试验, 绘制出了拉伸位移曲线, 总体上拉伸应力随着围压的增大而增大, 在无围压或者低围压下曲线呈“上凹-直线-破坏”状态, 高围压条件下曲线呈“直线-平缓-破坏”状态。

(3) 页岩的低围压和高围压的破坏形式分别为拉伸破坏和剪切破坏。压应力和拉应力在高围压

和低围压下不同时期所起的主导作用,低围压下拉应力依然起到主导作用,高围压下侧向压应力起到了主导的作用,使高围压下页岩由脆性向塑性发展。

参 考 文 献

- [1] 颜玉定, 廖远群, 吴景浓, 等. 围压条件下岩石的抗拉强度[J]. 华南地震, 1991, 11(2): 1—11.
YANG Yu-ding, LIAO Yuan-qun, WU Jing-nong, et al. Tensile strength of rock under confining pressure[J]. **South China Earthquake**, 1991, 11(2): 1—11.
- [2] 长江水利水电科学研究院岩基室. 岩石抗拉强度的轴向拉伸试验研究[J]. 岩石力学, 1978, 12(1): 62—70.
Yangtze River Water Resources and Hydropower Research Institute Rock Base. Tensile strength of rock under axial tensile test[J]. **Rock Mechanics**, 1978, 12(1): 62—70.
- [3] 陶纪南. 岩石轴向拉伸与劈裂法试验结果的比较分析[J]. 金属矿山, 1995, 17(3): 28—31.
TAO Ji-nan. Comparative analysis of test results of rock axial stretching and splitting method[J]. **Metal Mine**, 1995, 17(3): 28—31.
- [4] HAWKES I, MELLOR M, GAFIEPY S. Deformation of rocks under uniaxial tension[J]. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr**, 1973, 23(10): 493—507.
- [5] STIMPSON B, CHEN Rui. Measurement of rock elastic modulus intension and incompression and itspractical significance[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1993, 30(12): 338—347.
- [6] 余贤斌, 王青蓉, 李心一, 等. 岩石轴向拉伸与压缩变形的试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 18—22.
YU Xian-bin, WANG Qing-song, LI Xin-yi, et al. Experimental Study on axial tensile and compressive deformation of rocks[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 18—22.
- [7] OKUBO S, FUKKUI K, QI Qing. Uniaxial compression and tension tests of anthracite and loading rate dependence of peak strength[J]. **International Journal of Coal Geology**, 2006, 68: 196—204.
- [8] OKUBO S, FUKUI K. Complete stress-strain curves for various rock types in uniaxial tension[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1996, 33(6): 549—556.
- [9] 吴永胜. 岩石劈裂试验、单轴压缩与轴向拉伸变形特性的实验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
WU Yong-sheng. Experimental study on deformation characteristics of rock splitting, uniaxial compression and axial tensile[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2009.
- [10] 陈忠. 岩石轴向拉伸与压缩循环加载试验与变形特性的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
CHENG Zhong. Experimental research on rock axial tensile and compressive cyclic loading and deformation experimental research on rock axial tensile and compressive cyclic loading and deformation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
- [11] 张志雄. 岩石轴向拉伸与压缩变形特性的试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
ZHANG Zhi-xiong. Experimental study on axial tensile and compressive deformation of rocks[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008.
- [12] 尤明庆, 周少统, 苏承东. 岩石试样围压下直接拉伸试验[J]. 河南理工大学学报, 2006, 25(4): 255—260.
YOU Ming-qing, ZHOU Shao-tong, SU Cheng-dong. Rock samples were tested under direct confining pressure[J]. **Journal of Henan Polytechnic University**, 2006, 25(4): 255—260.
- [13] LI H, LI J, LIU B, et al. Direct tension test for rock material under different strain rates at quasi-static loads[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2013, 46: 1247—1254.
- [14] TUFEKCI K, DEMIRDAG S, SENGUN N, et al. A new design test apparatus for determining direct tensile strength of rocks[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2016, 49(1): 295—300.

- [15] 喻良, 徐跃良. 采用平台巴西圆盘式样测试岩石抗拉强度的方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(7): 1457—1462.
- YU Liang, XU Yue-liang. The method of testing the tensile strength of rock by the platform Brazilian disc is adopted[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2006, 25(7):1457—1462.
- [16] 宫凤强, 李夕兵, 董陇军. 圆盘冲击劈裂试验中岩石拉伸弹性模量的求解算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 705—713.
- GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, DONG Long-jun. Solution algorithm for tensile elastic modulus of rock in disc impact fracturing test[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2013, 32(4): 705—713.
- [17] 张盛, 何江达, 王启智. 用圆孔平台巴西圆盘确定岩石拉伸强度的非局部应力方法[J]. 应有力学学报. 2008, 25(3): 503—507.
- ZHANG Sheng, HE Jiang-da, WANG Qi-zhi. A nonlocal stress method for determining tensile strength of rocks using a disc disc brazilian platform[J]. **Journal of Stress Mechanics**. 2008, 25(3): 503—507.
- [18] JAPARIDZE L. Stress-deformed state of cylindrical specimens during indirect tensile strength testing[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2015, 7(5): 509—518.
- [19] 窦庆峰, 岳顺, 代高飞. 岩石直接拉伸试验与劈裂法的对比研究[J]. 地下空间, 2004, 24(2): 178—181, 203.
- DOU Qing-feng, YUE Shun, DAI Gao-fei. Comparative study of rock direct tensile test and splitting method[J]. **Underground Space**, 2004, 24(2): 178—181, 203.
- [20] 余贤斌, 谢强, 李心一, 等. 岩石直接拉伸与压缩变形的循环加载实验与双模量本构模型[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(9): 988—993.
- YU Xian-bin, XIE Qiang, LI Xin-yi, et al. Cyclic loading experiment and bimodal constitutive model for direct tensile and compressive deformation of rocks[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(9): 988—993.
- [21] 苏承东, 尤明庆. 围压下岩样直接拉伸试验装置[P]. 中国, 200720128467.X. 2007-09-26.
- SU Cheng-dong, YOU Ming-qing. Tensile rock sample pressure test device: China[P]. China: 200720128467.X, 2007-09-26.

赤泥沥青与沥青混合料路用性能及黏弹特性

著译者：姚立阳 出版日期：2017-09 开本：16 装帧：平装

出版社：中国建材工业出版社 ISBN：9787516019528

【内容简介】针对赤泥在路用沥青及沥青混合料中的应用做了较为全面的试验研究和阐述，内容包括赤泥沥青胶浆三大指标、黏度、黏弹性能，以及赤泥沥青混合料的温度稳定性、水稳定性、黏弹特性等方面内容。

【读者对象】本书可供从事沥青道路设计、施工、科研人员学习参考，亦可供大专院校相关专业师生及建筑材料领域有关专业人员参考。

【目 录】第 1 章 绪论 1.1 前言 1.2 赤泥的由来 1.3 赤泥的组成 1.4 国内外赤泥综合利用现状 本章参考文献 第 2 章 赤泥沥青胶浆的性能 2.1 概述 2.2 原材料 2.3 试验方法 2.4 试验结果与分析 2.5 综合应用与分析 2.6 本章小结 第 3 章 赤泥沥青胶浆的黏滞性与温度稳定性 3.1 概述 3.2 赤泥对沥青胶浆旋转黏度的影响 3.3 赤泥沥青胶浆的温度稳定性 3.4 本章小结 第 4 章 赤泥沥青胶浆的黏弹特性 4.1 概述 4.2 试验方法 4.3 试验结果与分析 4.4 本章小结 第 5 章 赤泥沥青混合料的路用性能及黏弹特性 5.1 沥青混合料配合比设计 5.2 赤泥对沥青混合料高温稳定性的影响 5.3 赤泥对沥青混合料低温稳定性的影响 5.4 赤泥对沥青混合料水稳定性的影响 5.5 赤泥沥青混合料蠕变回复性能 5.6 本章小结 本章参考文献