

文章编号: 1674—8247(2019)02—0038—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.02.009

层理效应对黑色页岩抗拉强度影响及其能量分析

曾健新¹ 刘俊新² 张永泽²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 西南科技大学, 四川 绵阳 621010)

摘要:层理效应是影响页岩力学性能的主要因素之一,文章以龙马溪组黑色页岩为研究对象,进行了不同层理面角度页岩的巴西圆盘劈裂试验,研究了层理效应对黑色页岩抗拉强度和破坏模式的影响,并且分析了其破坏过程中能量的吸收规律,结果如下:(1)当加载方向与层理面平行时黑色页岩抗拉强度最小;(2)层理角度为 0° 时,黑色页岩的破坏模式为沿着层理面方向的开裂;当层理角度为 22.5° 、 45° 、 67.5° 时,页岩的破坏模式为非中心破裂;当层理角度为 90° 时,页岩的破坏模式为中心开裂;(3)加载初期,能量吸收较慢,加载后期,能量吸收较快,能量吸收多少与层理面角度呈线性关系;(4)能量吸收和抗拉强度之间呈非线性关系,且与抗拉强度和层理面角度之间关系相似。

关键词:页岩;巴西劈裂;抗拉强度;破坏模式;能量;特征

中图分类号:TU443 **文献标志码:**A

Influence of Bedding Effect on Tensile Strength of Black Shale and Its Energy Analysis

ZENG Jianxin¹ LIU Junxin² ZHANG Yongze²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Bedding effect is one of the main factors influencing the mechanical properties of shale. Taking the Longmaxizu black shale as research object, Brazilian splitting test of shale is carried out from the different bedding plane angles, the influence of bedding effect on tensile strength and failure mode of the black shale is studied and the energy absorption law during the failure process is analyzed in the paper. The study results show that: (1) When loading direction is parallel to bedding plane, the black shale has the minimum tensile strength; (2) When the bedding angle is 0° , black shale cracks along the bedding plane direction, When the bedding angle is 22.5° , 45° , and 67.5° , non-central failure occurs in the shale, when the bedding angle is 90° , the central cracking occurs in the shale; (3) at the initial stage of loading, the energy absorption is slow, and at the late stage of loading, the energy absorption is fast, the energy absorption has a linear relation with the angle of bedding plane; (4) the relationship between energy absorption and tensile strength is non-linear, and similar that between tensile strength and angle of bedding plane.

Key words: shale; Brazilian splitting; tensile strength; failure mode; energy; characteristics

由于在沉积过程中矿物颗粒的择优取向,使得页岩具有明显的层理结构特征,致使页岩的抗拉强度受

层理面的影响较大。目前,对于测量材料的抗拉强度方法有2种,分别为直接拉伸法和间接拉伸法。对于

收稿日期:2018-03-21

作者简介:曾健新(1977-),男,高级工程师。

基金项目:四川省科技支撑计划项目(2016GZ0157)

引文格式:曾健新,刘俊新,张永泽. 层理效应对黑色页岩抗拉强度影响及其能量分析[J]. 高速铁路技术,2019,10(2):38-43.

ZENG Jianxin, LIU Junxin, ZHANG Yongze. Influence of Bedding Effect on Tensile Strength of Black Shale and Its Energy Analysis[J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(2): 38-43.

岩石材料,若采用直接拉伸法,在实验过程中,很难保证拉应力通过中心轴,从而导致拉应力出现偏心情况。因此,对于岩石材料,国内外多采用间接拉伸法(即巴西圆盘劈裂试验)来测量岩石材料的抗拉强度^[1-4]。

目前,国内外学者关于岩石的抗拉强度及其影响因素方面进行了大量的试验和理论研究。C. S. Chen 等人^[5]研究了砂岩;B. Debecke 等人^[6]研究了板岩;刘运思等人^[7-8]基于不同理论准则研究了板岩;谭鑫等人^[9]研究了非均值片麻岩。以上研究均表明抗拉强度与层理面有较强的相关性。

黄耀光等人^[10]基于平台巴西劈裂试验,对岩石的抗拉强度进行了理论分析,并且根据 Griffith 强度破坏准则,推出了岩石抗拉强度的计算公式。Jung-Woo^[11]对页岩进行了巴西劈裂试验,分析了抗拉强度最大值的出现范围。宫凤强等人^[12]结合圆盘对心受力的理论弹性解和实际实验过程中便于测量的物理参数,对试样中心垂直加载方向上每一点拉应变通过微积分原理进行积分,得出了该方向上总的变形量,进而推导出岩石拉伸模量和总位移变形量之间的定量关系式。谢和平等人^[13]对岩石破坏过程中的能量进行了初步探讨,揭示了这一过程中能量耗散与能量释放过程。尤明庆等人^[14]通过三轴压缩试验对岩石破坏过程中的能量释放规律进行了研究。

通过国内外文献调研发现,对岩石抗拉强度的研究多集中在试验方法、计算理论和破坏模式等方面,关于抗拉强度、破坏模式与能量特征之间的关系研究较少。本文通过对不同层理面角度的页岩进行了巴西劈裂试验,分析了破坏过程中层理面与其抗拉强度、破坏模式和能量特征等方面之间的关系,得出了相应的结论,可为我国页岩气的开采提供了一定的理论支撑。

1 试验材料以及试验方案

1.1 试验材料

本次试验所采用的页岩试样取自重庆石柱县,地理坐标为:东经 108°17′11.97″北纬 29°52′43.83″。该地区位于湖北以西,重庆以东,构造上位于四川盆地东缘一带,属于下志留统龙马溪组。作为页岩气源岩,该地区页岩在四川盆地内分布较广,页岩厚度较大,页岩中的有机质含量高,演化程度好,具有很好的页岩气成藏以及勘探开发条件^[15]。而且该地区页岩出露情况较好,除去外表风化较高的岩层外,内部岩层完整度较高,为野外取样工作提供了有利条件。本次取出的样品为黑色页岩,单层厚度 60 ~ 80 cm,部分带有上、下薄层,薄层中页岩笔石化石丰富,单层页岩中笔石化石少见,但见发育切层裂缝(垂直层面),见大量生烃超

压裂缝,裂缝尺寸 0.1 ~ 5 mm,裂缝上面见黄色沉淀物。单层页岩中沿层面有黄铁矿分布。

取样前,借用机械对表层风化严重的岩层进行清理,取自下层风化相对较弱的新鲜岩层。取样方法如下:采用直径为 50 mm 钻头,分别与层理面成 0°、22.5°、45°、67.5°和 90°进行取样,取出的新鲜试样立即使用保鲜膜、牛皮纸对其进行包装,并对包装好的试样进行蜡封,以保证它的新鲜度。为了符合实验要求(巴西劈裂试验标准试样厚径比为 1:2)对取回来的新鲜试样进行切割和打磨,使得试样表面光滑,上下表面平整,平行度控制在 0.1 mm 内。在试验前,首先对取得的样品进行 X 射线衍射分析,发现龙马溪组页岩主要以石英等脆性矿物和粘土类矿物为主,其中石英含量最高,可达 51%,加上钾长石、钠长石等脆性矿物后含量可达 61.4%,属于可压性较高储层,较适合水力压裂^[16]。粘土类矿物含量为 32.4%,其余矿物含量为 6.2%。具体结果如图 1、表 1 所示。

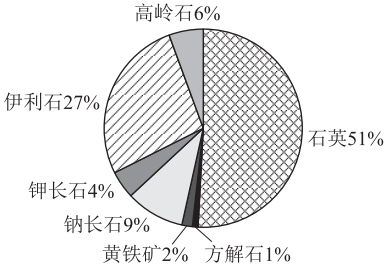


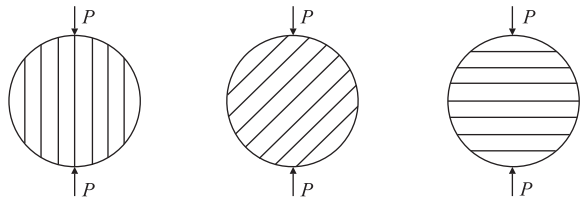
图 1 X 射线衍射分析图

表 1 矿物含量分析

种类	粘土类矿物		石英等脆性矿物			其余矿物	
	伊利石 /%	绿泥石 /%	石英 /%	钾长石 /%	钠长石 /%	方解石 /%	黄铁矿 /%
含量	26.83	5.59	50.84	0.92	9.59	4.52	1.71

1.2 试验方案

为了研究不同层理角度的页岩抗拉强度的力学特性,本次试验共进行平行试样 3 组,每组试样与层理面角度所成角度为 0°、22.5°、45°、67.5°和 90°,共计 15 个,加载方向与页岩层理面所成角度,如图 2 所示。RMT 试验机上进行的,岩石与混凝土力学试验系统是一种计算机控制的多功能电液伺服试验机,专为岩石和混凝土一类材料的力学性能试验而设计的,符合相应的国家标准。它具有操作方便、控制性能好、自动化程度高、测控精度高、刚度高、长期稳定性好等诸多优点,可以进行岩石单轴、三轴、剪切和混凝土的各项力学试验,试验完成后,系统自动计算各种试验数据,绘制各种试验参数曲线,并提供试验原始数据,能够满足工程应用和基础理论研究方面的需要,巴西劈裂试验加载,如图 3 所示。



(a) 与层理面平行加载 (b) 与层理面成角度加载 (c) 与层理面垂直加载

图 2 巴西劈裂试验加载角度示意图

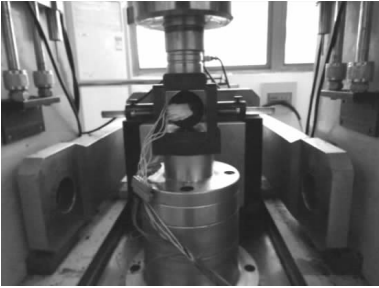


图 3 巴西劈裂试验加载示意图

2 页岩巴西劈裂试验

2.1 试验理论分析

在以往岩体工程中计算抗拉强度通常采用式(1),在早期这对于认识岩体的抗拉强度起到了积极作用,但是随着对岩体认识的逐渐加深,发现对于沉积岩等各向异性岩体,由于其层理面的存在,单纯用式(1)计算抗拉强度并不合理。

σ_t = - q_{xx} P / (πDH) (1)

式中:P——竖直方向的加载;
D——试样直径。

对于页岩一类横观各向同性体,由于层理面的存在,在巴西圆盘劈裂试验加载时产生了不同于各向同性体的应力分布,圆盘应力集中因子不再等于 2,而是与弹性参数 E₁、E₂、μ₁、μ₂ 和 G₂ 以及层理面倾角有关的复杂的非线性函数。在大量的试验及理论分析基础上,Claesson^[16] 等人在应用 Amadei^[17]、Chen^[18] 等对各向异性材料解析的研究方向下,考虑到弹性参数以及层理面倾角的影响,提出了一个应力集中因子的近似解,具体计算公式如式(2):

σ_t = 2P / (πDH) [(E / E₂)^{(1/4)cos(2θ)} - cos(4θ) / 4 (b - 1)]
b = √(EE₂) / 2 (1 / G₂ - 2u₂ / E₂) (2)

式中:H——试样厚度;
θ——加载方向与层理面之间的夹角;
E——横贯各向同性面方向上的弹性模量 (GPa);

E₂、G₂——垂直于横贯各向同性面方向上的弹性模量和剪切模量;

u₂——垂直于横贯各向同性面方向上泊松比。

2.2 5 个弹性参数的确定

对于 5 个弹性力学参数可以根据单轴压缩试验来求取,试验时在试样两侧粘贴应变花,测得每个方向上的应变,根据弹性理论推算每个方向上的弹性参数。

垂直于各向同性面(即层理面与加载方向之间的夹角 β = 90°)进行单轴压缩实验。由于在试样两侧粘贴了应变花,可以测得试样在轴向和侧向的应变,根据弹性力学理论,即可得到 E₂ 与 μ₂ 为:

E₂ = σ_y / ε_y, μ₂ = - ε_x / ε_y (3)

同理,平行于各向同行面(即层理面与加载方向之间的夹角 β = 90°)进行单轴压缩实验,测得应变 ε_y 和 ε_x,即可得到 E₁ 和 μ₁ 为:

E₁ = σ_y / ε_y, μ₁ = - ε_z / ε_y (4)

在独立弹性常数 E₁、E₂、μ₁ 和 μ₂ 后,剪切模量 G₂ 也可以根据 Saint-Venant 经验公式确定:

1 / G₂ = 1 / E₁ + 1 / E₂ + 2 μ₂ / E₂ (5)

页岩的弹性参数推算结果,如表 2 所示。

表 2 页岩的弹性参数

名称	E ₁ /GPa	u ₁	E ₂ /GPa	u ₂	G ₂
页岩	22.9	0.36	14.21	0.28	6.51

2.3 试验结果分析

巴西劈裂试验结果,如表 3 所示。

表 3 巴西劈裂试验结果汇总表

巴西劈裂	破坏荷载 /kN	抗拉强度各向同性体 /MPa	抗拉强度横观各向同性体 /MPa
0-1	4.780	2.14	2.40
0-2	4.058	1.75	1.95
0-3	5.386	2.25	2.52
平均	4.740	2.05	2.29
22.5-1	7.300	3.43	3.73
22.5-2	6.634	2.96	3.22
22.5-3	6.614	2.93	3.18
平均	6.850	3.11	3.38
45-1	7.108	3.18	3.18
45-2	7.498	3.42	3.42
45-3	8.232	3.67	3.67
平均	7.613	3.42	3.42
67.5-1	7.823	3.58	3.29
67.5-2	7.240	3.27	3.00
67.5-3	8.016	3.69	3.39
平均	7.693	3.51	3.16
90-1	7.958	3.59	3.16
90-2	8.468	3.78	3.32
90-3	7.966	3.60	3.17
平均	8.130	3.66	3.22

对巴西劈裂试验进行分析,可知页岩的抗拉强度随不同层理面倾角的变化特征明显,如图 4 所示。无论是根据各向同性体公式还是根据横观各向同性体公式计算,其抗拉强度值均表现出明显的各向异性。其中,当倾角为 0° 和 22.5° 时,根据各向同性体计算出的抗拉强度值小于根据横观各向同性体计算出的抗拉强度值;而当倾角为 67.5° 和 90° 时,根据各向同性体计算出的抗拉强度值大于根据横观各向同性体计算出的抗拉强度值。说明了页岩作为一种层状岩体,在对其抗拉强度值进行分析时,一定要考虑层理面倾角效应的影响。

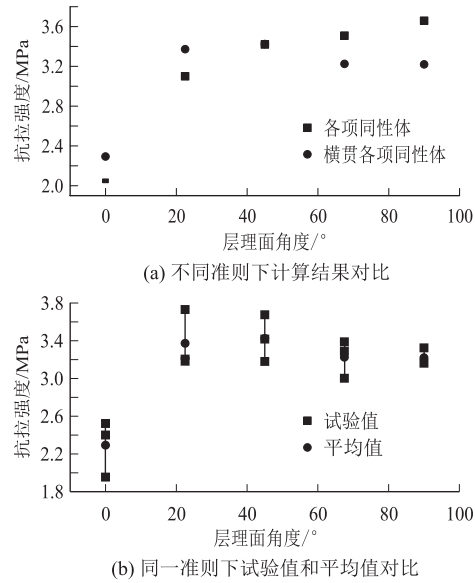


图 4 抗拉强度随倾角的变化规律

当层理面倾角为 0° 时,竖向荷载与试样层理面平行,试样在受到竖向荷载后,平行于加载方向受到压缩,垂直于加载方向扩张,由于层理面为弱面,胶结程度较弱,会先于岩体本身开裂,因此其抗拉强度最小,仅为 2.29 MPa。其余 4 组层理面倾角抗拉强度平均值较为接近,约为 3.30 MPa,平均值差值相对较小,仅为 0.2 MPa。此外,本次试验所采取的 3 组平行样试验值均表现出一定的离散性,离散性随着层理面角度逐渐减小。

这说明页岩的层理面为页岩气储层的薄弱面,沿层理面方向加载时其抗拉强度最小,而当加载方向与页岩层理面有一定夹角时,其抗拉强度均有明显增强。但是页岩的抗拉强度并未出现随着层理面角度的增大,单调递增或“U”型变化规律,这与横观各向同性体层理面与加载方向不同时圆盘的应力分布较为复杂,破坏时,试样并非沿着加载方向起裂,而是形成了较为复杂的破坏模式有关。

3 破坏模式分析

不同层理面角度页岩的破坏模式,即巴西劈裂试验破坏模式,如图 5 所示。

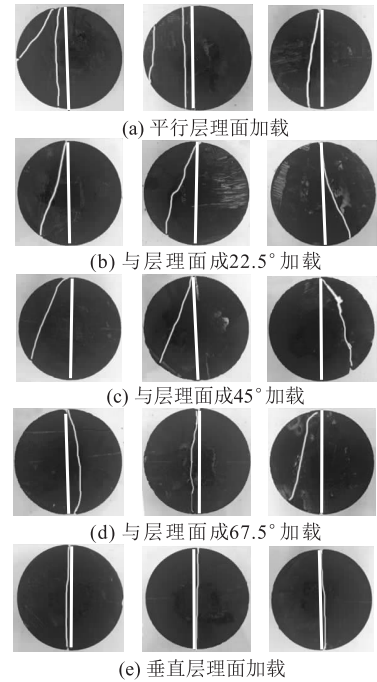


图 5 巴西劈裂试验破坏模式

通过对页岩不同层理面角度页岩的巴西劈裂试验破坏时裂缝与层理面之间的相对关系进行分析,可以观察到页岩的层理面与破坏形态之间有着密切的联系,不同的层理面角度之间破坏形态有较大差异。

当加载方向与层理面角度为 0° 时,页岩试样的破坏模式为平行于层理面的张拉破坏,而且破坏时的张拉裂缝并不一定穿过圆盘中心,这可能是因为页岩非均质性较高,平行于加载方向可能存在着多个层理面,而且加载方向并不一定与圆盘的层理面在同一平面,因此试样在受到竖向加载后会沿着最薄弱的层理面开裂。此时测得的“抗拉强度”为页岩层理面的抗拉强度。

当加载方向与层理面角度为 90° 时,页岩试样的破坏模式为穿过圆盘中心的张拉破坏,试样破坏时的主裂缝穿过圆盘中心并沿着垂直于层理面的方向发展,圆盘中部横向裂缝为圆盘中央主裂缝在扩展时产生布局拉应力,在这些局部拉应力作用下产生了部分次级张拉裂缝,但总的来说,此时测得的“抗拉强度”可以等效认为页岩基质体的抗拉强度。

当加载方向与层理面成 22.5° 、 45° 以及 67.5° 时,在宏观上,页岩试样的破坏模式表现出了相似的破坏形态,主要呈现为主裂缝均未通过圆盘的中央,而是由

上端加载鄂应力集中位置开始启裂,但是裂缝在扩展过程中并未沿着加载方向竖直向下延伸,而是受到了页岩层理面和非均质条状矿物带的影响^[19],裂缝会沿着层理面发展或者在不同层理面之间发展并贯通,最后形成弧形裂缝。此时的破坏模式属于拉-剪复合破坏,即包括层理面之间的剪切破坏、张拉破坏,又包括岩石矿物基质间的剪切破坏,以及裂缝在发展过程中产生的局部拉应力作用下的次级张拉破坏,这是页岩各向异性和非均质性共同作用的结果。

通过对页岩巴西劈裂试验破坏模式进行分析,不难发现,破坏模式整体上可以分为以下3类,如图6所示。

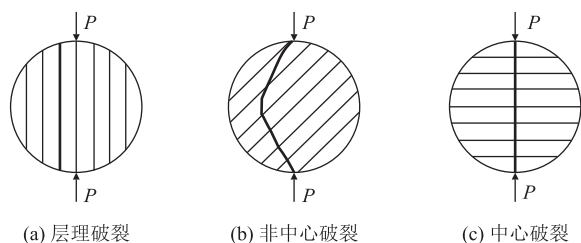


图6 巴西劈裂试验破坏模式归类

由图6可以看出,当加载方向与层理面平行时,页岩的破坏模式为沿着层理面方向的开裂;当加载方向与层理面成一定角度,但是又不垂直时,即层理面角度为22.5°、45°、67.5°时,页岩的破裂模式为非中心破裂,即上文提到的弧形破坏模式;当加载方向与层理面垂直时,页岩的破坏模式为中心开裂。

4 能量分析

脆性岩石在破裂过程中往往伴随着能量的释放,甚至伴有爆裂声,研究岩石在破裂过程中的能量规律,分析页岩的破裂过程中能量的释放规律与层理面、抗拉强度之间的规律,可以进一步揭示页岩的力学性能。

试验机加载过程中试样之所以发生破坏是因为试验机对试样的连续做功,并且该功在试样内不断的累积,直至试样发生破坏,试样破坏时所释放的能量即为试验机对试样做的功,在应力-应变曲线上表示为曲线下的面积^[19],即:

$$W_i = \int_0^u p_i du_i \quad (6)$$

式中: p_i ——加载过程中任意时段的加载荷载;

du_i ——该时段的竖向位移。

根据定积分的概念可知,从开始时段直至试样发生破坏(此时的竖向位移为 u),试样所吸收的能量即为曲线与横坐标之间的面积。由于页岩属于脆性岩

石,在弹性阶段应力应变曲线在接近于直线,因此,其能量公式可近似表示为:

$$W = \frac{1}{2} pu \quad (7)$$

式中: p 、 u ——试样发生破坏时的最大加压荷载和竖向位移。

通过对试验数据进行整理,得到了不同轴向荷载比下不同层理面角度页岩的吸收能量变化规律。如图7所示。

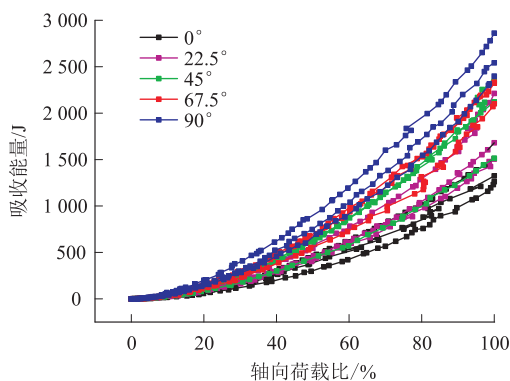


图7 吸收能量与轴向荷载比之间关系

由图7可以看出,页岩试样在破坏过程中,所吸收的能量与轴向荷载比呈非线性关系,在加载初期,曲线的斜率较小,试样吸收能量的速率较慢;当轴向荷载比接近50%时,曲线的斜率增速变快,试样吸收能量的速率加快。之所以会出现这种现象是由于本次试验过程中试验机采取位移匀速加载,试验机对试样匀速做功,而在加载初期试样吸收能量较少、速率较慢;在加载后期吸收能量较多、速率较快,表明加载初期能量耗散较多,加载后期能量耗散较少,分析原因可能是因为页岩为非均质岩体,层理、微裂隙发育,加载初期能量多耗散在页岩层理、微裂隙被压密阶段,而在加载后期层理、微裂隙被压密后能量多被试样吸收。

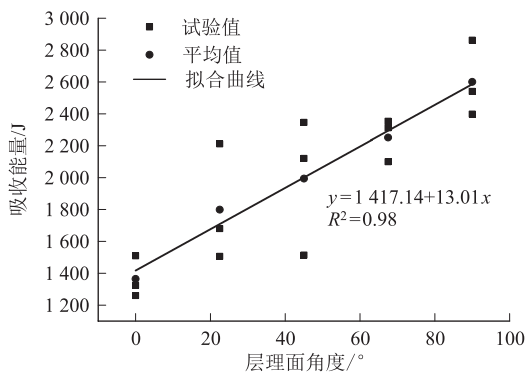


图8 吸收能量与层理面角度之间关系

随着层理面角度的增加,试样吸收的能量在逐渐增大,结合破坏模式进行分析,层理面角度 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 转换过程中,除了基质体需要吸收能量外,层理、微裂隙被压密,层理面之间的内摩擦均需要消耗能量,因此其吸收的能量更多,破坏时也更为强烈。由图8看出,每一种层理面角度吸收能量的平均值与层理面角度之间相关性较好,拟合公式为: $y = 1\,459.12 + 11.85x$,其中 $R^2 = 0.95$ 。

如图9所示,吸收能量和抗拉强度之间关系与层理面和抗拉强度之间关系相似,这与层理面和吸收能量之间呈线性关系契合,对抗拉强度和吸收能量之间关系进行拟合,发现其呈指数关系,关系公式为:

$$y = -1.611\,88E9 \times e^{\left(\frac{-x}{64.43}\right)} + 3.312 \quad (8)$$

其中 $R^2 = 0.93$ 。说明了在实际工程中进行水力压裂时应该选取与层理面最优角进行压裂,小于该角时层理面会先于基质体开裂,导致采气效率低下,而大于该角时,势必浪费资源,难以实现良好的经济效益。因此这一方面值得进一步进行研究。

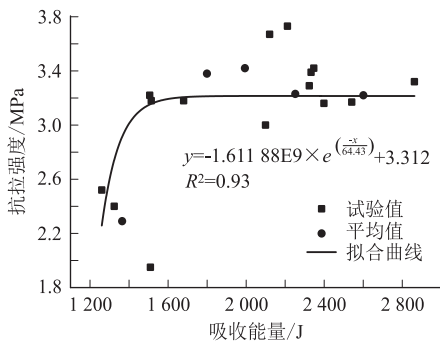


图9 吸收能量与抗拉强度之间关系

5 结论

(1) 黑色页岩的抗拉强度受层理面效应影响较大,当加载方向与层理面平行时黑色页岩抗拉强度最小,为2.29 MPa。当加载方向与层理面方向成一定夹角时,其抗拉强度均有明显增强,约为3.30 MPa。

(2) 当加载方向与层理面平行时,黑色页岩的破坏模式为沿着层理面方向的层理开裂,当加载方向与层理面成 22.5° 、 45° 、 67.5° 时,页岩的破裂模式为非中心破裂(或者又称弧形破坏模式),当加载方向与层理面垂直时,页岩的破坏模式为中心开裂。

(3) 加载初期,能量吸收较慢,主要是因为加载初期部分能量被消耗在压密层理面、微裂隙阶段,加载后期,能量吸收较快,能量吸收多少与层理面角度呈线性关系。能量吸收和抗拉强度之间呈非线性关系,且与抗拉强度和层理面角度之间关系相似,这与能量吸收

和层理面角度呈线性关系契合。

参考文献:

- [1] DAI F, CHEN R, IQBAL M J, et al. Dynamic Cracked Chevron Notched Brazilian Disc Method for Measuring Rock Fracture Parameters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(4): 606–613.
- [2] WANG Q Z, LI W, XIE H P. Dynamic Split Tensile Test of Flattened Brazilian Disc of Rock with SHPB Setup [J]. Mechanics of Materials, 2009, 41(3): 252–260.
- [3] CHO S H, OGATA Y, KANEKO K, et al. Strain-rate Dependency the Dynamic Tensile Strength of Rock [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(5): 763–777.
- [4] 尤明庆,陈向雷,苏承东. 干燥及饱水岩石圆盘和圆环的巴西劈裂强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 464–472.
YOU Mingqing, CHEN Xianglei, SU Chengdong. Brazilian Splitting Strengths of Discs And Rings of Rocks in Dry and Saturated Conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 464–472.
- [5] CHEN C S, PAN E, AMADEI B. Determination of Deformability and Tensile Strength of Anisotropic Rock Using Brazilian Tests [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(1): 43–61.
- [6] DEBECKER B, VERVOORT A. Observation of Fracture Patterns in Layered Slate [J]. International Journal of Fracture, 2009, 159(1): 51–62.
- [7] 刘运思,傅鹤林,饶军应,等. 不同层理方位影响下板岩各向异性巴西圆盘劈裂试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 785–791.
LIU Yungsi, FU Helin, RAO Junying, et al. Research on Brazilian Disc Splitting Tests for Anisotropy of Slate under Influence of Different Bedding Orientations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 785–791.
- [8] 刘运思,傅鹤林,伍毅敏,等. 基于单弱面理论对板岩巴西劈裂试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(10): 1775–1780.
LIU Yungsi, FU Helin, WU Yimin, et al. Study on Brazilian Splitting Test for Slate Based on Single Weak Plane Theory [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(10): 1775–1780.
- [9] 谭鑫, HEINZ Konietzky(德国). 含层理构造的非均质片麻岩巴西劈裂试验及离散单元法数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 938–946.
TAN Xin, HEINZ Konietzky (Germany). Brazilian Split Tests and Numerical Simulation by Discrete Element Method for Heterogeneous Gneiss with Bedding Structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics Engineering, 2014, 33(5): 938–946.
- [10] 黄耀光,王连国,陈家瑞,等. 平台巴西劈裂试验确定岩石抗拉强度的理论分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 739–748.
HUANG Yaoguang, WANG Lianguo, CHEN Jiarui, et al. Theoretical Analysis of Flattened Brazilian Splitting Test for Determining Tensile Strength of Rocks [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(3): 739–748.

(下转第59页)

- LI Guanwen. Exploration and Application of Long Wave Height and Long Wave Track [J]. Railway Technical Supervision, 2014, 42(1): 12-16.
- [4] 谭社会. 高速铁路无砟轨道精调质量控制技术研究[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(12): 18-22.
- TAN Shehui. Quality Control Technologies in Fine Adjustment of High-speed Railway Ballastless Track [J]. Railway Standard Design, 2015, 59(12): 18-22.
- [5] 唐恩奎. 运营期高速铁路轨道平顺性测量与计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- TANG Enkui. Study on Measurement and Calculation Method of Track Smoothness of High-speed Railway During Operation Period [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [6] 李阳腾龙. 高速铁路轨道精调精调及其平顺性优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- LI Yangtenglong. Research on Precision Adjustment and Smoothness Optimization of High Speed Railway Track [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [7] 田国英. 高速铁路轨道不平顺功率谱及其与行车品质关系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- TIAN Guoying. Study on Relationship Between Track Irregularity Power Spectrum and Driving Quality of High Speed Railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [8] 殷昊, 江溪, 孙逢坤. 高速铁路轨道养护维修模式初探[J]. 河南科技, 2014, 30(4): 148.
- YIN Hao, JIANG Xi, SUN Fengkun. A Preliminary Study on the Track Maintenance and Maintenance Mode of High Speed Railway [J]. Henan University of Science and Technology, 2014, 30(4): 148.
- [9] ZHOU Yu, XU Yude, LI Haifeng, et al. Application of On-Line Rail Milling in Rail Maintenance of High-speed Railways [J]. Journal of Southwest Jiaotong University (English Edition), 2010, 18(2): 140-144.
- (编辑: 苏玲梅)

~~~~~

(上接第43页)

- [11] Jung-Woo c, Hnana k, Seokwon J, et al. Deformation and Strength Anisotropy of Asan Gneiss, Boryeong Shale, and Yeoncheon Schist [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 50(1): 158-169.
- [12] 宫凤强, 李夕兵, ZHAO J(瑞士). 巴西圆盘劈裂试验中拉伸模量的解析算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 881-891.
- GONG Fengqiang, LI Xibing, ZHAO J (Switzerland). Analytical Algorithm to Estimate Tensile Modulus in Brazilian Disk Splitting Tests, [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 881-891.
- [13] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2603-2608.
- XIE Heping, PENG Ruidong, JU Yang, et al. On Energy Analysis of Rock Failure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(15): 2603-2608.
- [14] 尤明庆, 华安增. 岩石试样破坏过程的能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 778-781.
- YOU Mingqing, HUA Anzeng. Energy Analysis on Failure process of Rock Specimens [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(6): 778-781.
- [15] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156.
- ZHANG Jinchuan, NIE Haikuan, XU Bo, et al. Geological Condition of Shale Gas Accumulation in Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156.
- [16] 赵建华, 金之钧, 金振奎, 等. 四川盆地五峰组——龙马溪组含气页岩中石英成因研究[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(2): 377-386.
- ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, JIN Zhenkui, et al. The Genesis Of Quartz in Wufeng-Longmaxi Gas Shales, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(2): 377-386.
- [17] Claesson J, Bohloli B. Brazilian Test: Stress Field and Tensile Strength of Anisotropic Rocks Using An Analytical Solution [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(8): 991-1004.
- [18] Amadei B, Rogers J D, Goodman R E. Elastic Constants and Tensile Strength of Anisotropic Rocks [C]//5th IRSM Congress. International Society for Rock Mechanics, 1983.
- [19] Chen C S, Pan E, Amadei B. Determination of Deformability and Tensile Strength of Anisotropic Rock Using Brazilian Tests [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(1): 43-61.
- (编辑: 车晓娟 张红英)