

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201806093

软煤应变强度硬化冲击灾变

李 铁

(1. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室(北京科技大学),北京 100083;
2. 北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083)

摘 要: 煤与瓦斯突出软煤层不具冲击倾向性,但在深部开采中却发生了软煤层冲击灾变动力现象. 为探索软煤冲击灾变的成因,通过文献研究和工程案例实证分析,证明了软煤层冲击灾变现象的客观存在;通过煤样无侧限单轴压缩试验和冲击倾向性测定,得知试验煤样无冲击倾向性,极限载荷后单调应变强度软化;模拟工程背景现场与掘进工作面 and 采煤工作面中部相同的边界约束和加载条件,开展单自由度边界承压试验,考察灾变全程应力、应变、声发射特征,研究软煤冲击灾变机理. 结果表明:单自由度边界条件下加载,3 个煤样均出现应变强度软化-硬化-灾变过程,甚至反复软化-硬化;经应变强度硬化,灾变前煤样抗压强度均超过冲击倾向性的阈值条件;定义了应变强度软化、应变强度硬化系数,灾变前应变强度硬化系数分别为 1.26,1.53,2.25,应变强度硬化程度比较显著;软煤在单自由度约束条件下承压,应变硬化达到煤样冲击破坏强度条件时,可发生类似硬煤的冲击灾变,合理解释了现场软煤层冲击灾变的成因. 深部高应力条件下,煤与瓦斯突出软煤掘进和开采,要对应变强度硬化导致煤层冲击灾变引起重视;工程上,这种冲击灾变的强度一般不高,但其可诱导煤与瓦斯突出或瓦斯异常涌出,危害性很高.

关键词: 深部开采;煤与瓦斯突出;软煤;应变强度硬化;冲击灾变

中图分类号: TU452;TD713.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)02-0084-06

Rock burst disaster in soft coal seams from strain strength hardening

LI Tie

(1. Key Laboratory of High-Efficiency Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education (University of Science and Technology Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Soft coal seams with coal and gas outburst tendency do not have impulsion tendency, but rock burst disasters occur in soft coal seams under mining in the deep stope, and the existence of this dynamic disaster is confirmed by literature research and cases analysis. The unconfined unidirectional compression test and bursting liability identification indicated that coal samples were not prone to burst, and the monotonic strain strength softened after ultimate load. To study the mechanism of bursting disasters in soft coal seams, the boundary constraints and loading conditions of the excavating face and the mining face under the engineering background were simulated, and the pressure test under the single-degree-of-freedom border was carried out to investigate the stress, strain, and acoustic characteristics of the whole disaster process. The results showed that when coal samples loaded under the boundary condition of single-degree-of-freedom, the strain strength of all the three coal samples appeared as the process of softening-hardening-bursting, and the softening-hardening process even arose repeatedly. The strain strength hardening degree before bursting was remarkable, and the hardening coefficients of the three coal samples were 1.26, 1.53, and 2.25, respectively. After strain strength hardening, the compression strength of coal samples before bursting disaster exceeded the threshold value of bursting tendency. Under the pressure with the constraint of single-degree-of-freedom, the bursting disaster, similar to that happens in hard coal seams, occurred when the strain hardening met the strength requirement of bursting, which reasonably explains the cause of rock burst in soft coal seams. When excavating and mining in soft coal seams with coal and gas outburst tendency under the condition of high stress in the deep mines, it is necessary to pay attention to rock burst caused by strain strength hardening. The intensity of such impulsion is generally not high in engineering, but it can induce highly harmful coal and gas outburst or unusual gas emission.

Keywords: deep mining; coal and gas outburst; soft coal seam; strain strength hardening; rock burst disaster

收稿日期: 2018-06-14

基金项目: 国家自然科学基金(51674016,51534002)

作者简介: 李 铁(1961—),男,博士,教授,博士生导师

通信作者: 李 铁, litie@ustb.edu.cn

软质与硬质煤岩的力学行为存在差异. 煤与瓦斯突出煤层的煤质较软(以下简称软煤),坚固性系数 $f \leq 0.5$,按普氏坚固性系数早期流行的定义计算,

单轴抗压强度 ≤ 5 MPa,完整性遭到破坏,破坏类型Ⅲ~Ⅴ^[1].而有冲击倾向的煤质较硬(以下简称硬煤),通常单轴抗压强度 ≥ 7 MPa^[2],完整性较好.虽然上述抗压强度界限不一定精准,也还有其他灾变判别指标,但软、硬煤力学行为的差异性毋庸置疑.煤与瓦斯突出煤层不具备发生冲击地压的煤岩强度条件.在工程实践中,500 m以浅开采煤与瓦斯突出煤层时,确实鲜见发生冲击地压的报导.

但是,进入深部开采后,陆续可见突出危险软煤层发生冲击地压的报导.平煤集团十二矿己七三水平回风下山,埋深890~1 100 m,在软煤层巷道掘进施工期间发生两次软煤层冲击灾变诱导的煤与瓦斯突出^[3].平煤集团一矿,在实施了防突措施的软煤层中掘进己₁₅-17310运输巷,发生一起由冲击地压引起的煤与瓦斯动力现象;在埋深1 100 m的三水平回风下山巷道掘进施工,也发生过一次同类现象^[4].平煤集团十矿,在己₁₅₋₁₆-24110采煤工作面开采煤与瓦斯突出煤层,埋深800~1 039 m曾发生一起冲击地压诱导的煤与瓦斯突出^[5],此后的现场跟踪调查发现,突出煤层中不时发生伴有震感的强烈声响,属煤层中的弱冲击动力现象.义煤集团新义煤矿11011和12011工作面埋深620~722 m,掘进过程发生多次震动冲击诱导的瓦斯异常涌出,2009年8月10日发生一起冲击地压诱导的煤与瓦斯突出^[6].上述各矿煤与瓦斯突出煤层,煤质软,坚固性系数 $f=0.15\sim 0.5$,破坏类型Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ,甚至无法加工成可供物理力学试验的原煤试样,但煤岩均出现了以往未曾见过的冲击动力灾变.这种有违常规的工程现象使得我们想到是煤岩应变硬化的可能,成为这项研究的动机.

Hollomon(1944)研究金属塑性拉伸变形时提出,材料的应变硬化是指由于材料的塑性变形引起的硬度和强度增加的度量,并提出了金属塑性拉伸变形的经验指数方程^[7].此后推广到岩石、岩土力学领域应用.例如:A. BROTH(1997)认为,一些软弱岩石的破坏特征是大量的应变硬化,表现出与传统认识完全不同的特征,如果使用传统的峰值强度方法解释其结果会产生问题^[8].唐明明等(2010)试验得出,含夹层盐岩及纯盐岩在单轴及三轴条件下,表现出明显的塑性应变趋势,且其全应力-应变曲线表现出明显的应变硬化软化性质^[9].殷德顺等(2010)认为,其三轴试验提出的岩土应变硬化指数理论能够反映岩土的硬化能力^[10].王迎超等(2012)在降雨作用下浅埋隧道松散围岩塌方机制的研究中,考虑到了应变软化与硬化组合介质模型^[11].王俊颜等(2017)超高性能混凝土结构材料的拉伸试

验表现出应变硬化(强化)的特征^[12].

本文通过突出软煤层冲击动力现象工程案例分析,构建模拟煤巷掘进和回采工作面中部单自由度边界和加载条件的物理试验条件,研究软煤单自由度边界条件承压灾变的特征,发现软煤应变硬化是导致其呈现出具有硬煤特征冲击灾变的主要原因.

1 工程案例分析

河南省新安煤田某矿主采的二₁煤层为煤与瓦斯突出煤层.11011掘进工作面埋深670~722 m,轨道和皮带运输顺槽设计长度分别为790和754 m.煤的坚固性系数 $f=0.22\sim 0.30$,破坏类型Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ.煤质软,破坏严重,甚至取不出可加工成试样的块状原煤,不具有冲击倾向性.

两顺槽掘进至约40%巷道设计长度之前,在正常消突-效果检验-掘进作业循环,未发生过伴有震动和声响的煤岩动力现象.2008年7月中旬,皮带和轨道运输顺槽分别掘进到280和340 m处,开始偶发有声煤岩动力现象,并逐渐增强,直至产生巨响震动并伴有瓦斯异常涌出,遂引起高度重视.9月23日起,安排专人跟班现场观察和记录掘进过程发生的煤与瓦斯动力现象,时间精度到分钟级.将记录到的动力现象进行量化,便于图形显示.图1、2中的纵坐标数字代表动力现象的强度和类型,1—无震感、无破坏、有可辨声响的煤爆;2—无震感、无破坏、有较大响声的煤爆;3—有震感、掉渣落尘、煤壁有轻度破坏、很大响声的轻度冲击地压;4—伴随瓦斯超过0.8%监控阈值的煤爆,通常有震感、有掉渣落尘、煤壁有轻度破坏、很大响声的轻度冲击地压.

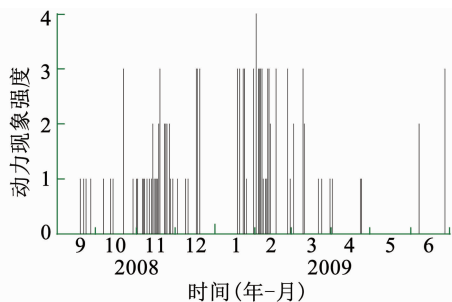


图1 轨道运输顺槽动力现象分布

Fig. 1 Distribution of dynamic phenomena in track head entry

2008年9月23日—2009年6月30日间,共记录到显著的煤与瓦斯动力现象327批次,其中:量化为3.0级别的轻度冲击地压74批次,占比22.6%;4.0级别发生轻度冲击地压诱导的瓦斯异常涌出超限4次,其中皮带和轨道运输顺槽分别为3次和1次.根据多人对声响、震感和破坏情况辨识,震源发生在掘进头前方.2009年4月份实施了我们提出的

以煤层钻孔卸压和注水为主的防治冲击地压措施后,动力现象显著减少,到7月份之后,在掘进和回采期间动力现象基本杜绝(见图1,2).

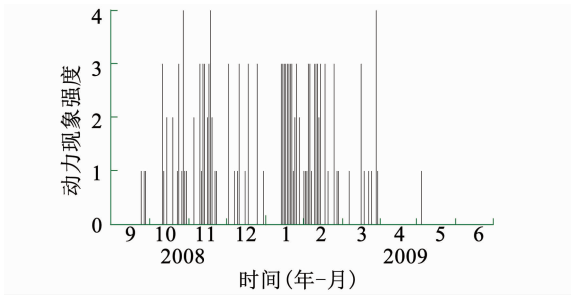


图2 皮带运输顺槽动力现象分布

Fig.2 Distribution of dynamic phenomena in belt head entry

上述情况表明该矿软煤层在深部高应力环境下掘进施工,煤层承压响应发生了反常的冲击灾变.结

表 1 煤的冲击倾向性测定结果

Tab.1 Identification result of rock burst tendency of coal seam

试样	平均测定指标				测定结果	
	动态破坏时间/ms	弹性能指数	冲击能指数	单轴抗压强度/MPa	冲击类别	冲击倾向性
A-1	551	1.68	2.51	6.30	I类	无
A-2	720	1.37	2.12	5.21	I类	无
平均	636	1.53	2.32	5.76	I类	无

无侧限单轴压缩全应力-应变曲线显示,极限载荷峰后,抗压强度单调下降(见图3),强度单调软化至残余强度,未出现软化后的硬化现象.

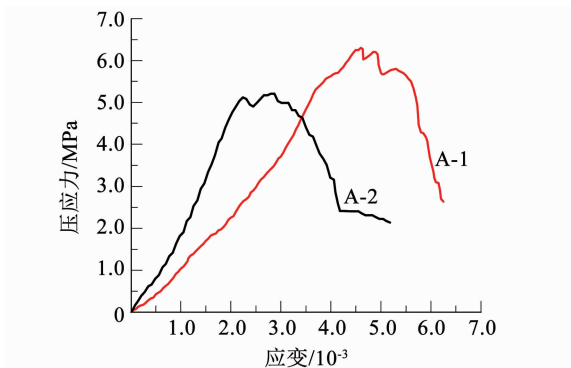


图3 无侧限单轴压缩全应力-应变

Fig. 3 Diagram of complete stress-strain curve under unconfined uniaxial compression

3 单自由度抗压试验与分析

3.1 试验条件

试验装置由岩石力学伺服试验机,单自由度边界应力、气体双向加载试验装置,声发射系统,气体质量流量计,高精度压力传感器,静态电阻应变仪等构成.

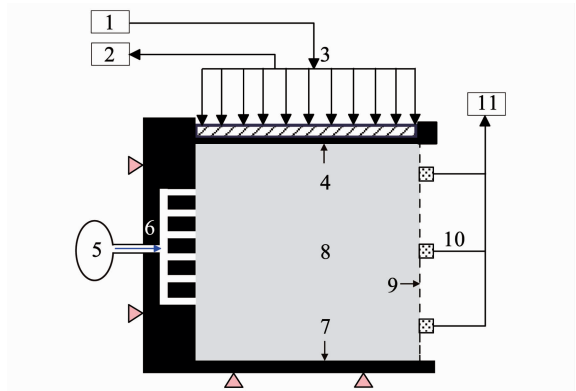
构建与煤巷掘进头前方相似的边界与加载条件(见图4).在煤样顶部不渗透边界施加竖向压载

合前述文献综述中软煤冲击灾变的工程案例,表明软岩在一定条件下可以强度硬化,表现出硬岩某些灾变的特征.

2 煤的冲击倾向性测定

为说明试验煤样的冲击属性,开展冲击倾向性测定.试样取自平顶山煤田己₁₅₋₁₆突出软煤层中的偏硬分层,现场煤层的硬度普遍小于所取试样.此层煤开采过程曾发生弱冲击动力现象,有震感和强烈声响.原煤加工成精度满足岩石力学试验要求的 $\Phi 50\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 规格圆柱体试样,在岩石力学伺服试验机上,按GB/T 25217.2—2010标准测定冲击倾向性指标^[2].根据测定结果判定两组试样均为I类无冲击倾向性(见表1).

(图中1~4部分).法向一侧面密封刚性被动约束,经透气板施加低压氮气(图中5,6部分),起到煤样内部破裂示踪指示作用,同轴另一侧面为可渗透自由边界(图中9部分).法向正交另两侧面(略)和底面(图中7部分)密封刚性被动约束.



1—加压控制系统;2—采集控制系统;3—载荷;4—不渗透承压板;5—供气、控制及采集系统;6—不渗透支架侧板及供气透气板;7—不渗透支架底座;8—煤试样;9—可渗透自由边界;10—声发射传感器;11—声发射放大与数据采集系统

图4 物理试验加载和边界条件

Fig. 4 Loading and boundary conditions of physical experiments

为保持煤的原始结构和孔隙、裂隙状态,选用原煤试样,从冲击倾向性测定的同一煤层中取出3组,加工成精度满足岩石力学试验要求的 $150\text{ mm}\times$

150 mm × 150 mm 规格立方体试样。

试验 N_2 气压分别选用 0.15、0.2、0.4 MPa 3 个方案,对煤样内部破裂灾变示踪指示。煤样自由表面产生较多宏观裂缝,有煤岩碎粒弹出,作为发生冲击灾变的直接判据。声发射计数或能量达到显著峰值和气体流量显著加快作为辅助判据。

3.2 试验结果分析

3 个煤样的试验结果均呈现出初始非线性、线弹性、应变软化-硬化和破裂灾变 4 个特征阶段。煤样在单自由度边界条件下承压,可分辨出应变强度软化-硬化特征。

根据试验结果,本文将单自由度边界条件下,煤样达到相当于无侧限单轴抗压强度的首次峰值抗压强度后的强度下降现象表述为应变强度软化,峰后软化最低强度与峰值强度的比值定义为应变软化系数;将应变强度软化后,强度再次上升表述为应变强度硬化,峰后硬化强度峰值与首次峰值强度的比值定义为应变硬化系数。

3.2.1 B-1 煤样

1) 初始非线性阶段,图 5 标注为 1 的阶段。加载 0 ~ 1.6 MPa,应变 0 ~ 3.0%,应力曲线呈上凹形状,为初始非线性阶段,有少量低能声发射,出现一次声发射能量高峰后,标志着煤样卸载裂隙发生一次质变压密,转入线弹性阶段。

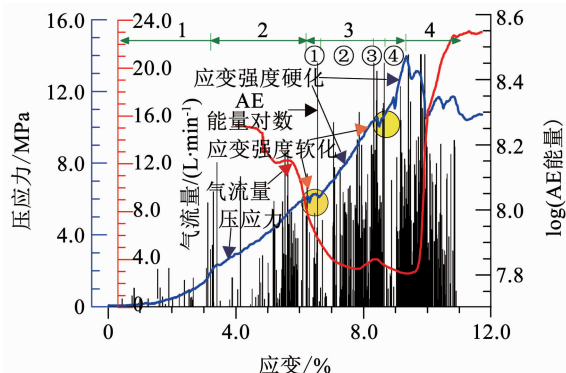


图 5 B-1 煤样受载物理场演化

Fig. 5 Diagram of physical field evolution under load of B-1 coal sample

2) 线弹性阶段,图 5 标注为 2 的阶段。加载 1.6 ~ 6.2 MPa,应变 3.0% ~ 6.2%,应力曲线呈直线单调增加,处于线弹性阶段。加载到 3.0 MPa 开始通过透气板加 0.15 MPa 气压 N_2 。前半程,声发射数较少、能量较低,气流量基本保持在 14 L/min 相对较高水平的稳速状态,在原生裂隙中稳速渗流。后半程,声发射数增多、能量增高,气流量开始持续减速渗流,表明原生裂隙开始压密趋于闭合。加载到 5.3 MPa,声发能量出现一次峰值,但气流量仍继续

下降,表明仍属煤样内部原生残余裂隙被压密,还未产生新的导气裂隙,煤样自由侧未见显著变化。

3) 反复软化-硬化阶段,图 5 标注为 3 的阶段。加载到 6.2 MPa,相当于无侧限单轴抗压强度,应力曲线出现显著非线性,强度升降躁动,煤样表现出应变强度软化(3-①段),声发能量出现相对高峰,但气流量仍继续下降,表明煤样虽然发生了塑性屈服,但内部裂隙仍在压密,导气裂隙没有生成。此后不久,应力曲线再度回归线弹性升势,抗压强度持续上升,表现为应变硬化强度上升(3-②段),气流量显著降低至 3 L/min 左右相对稳速渗流;加载到 10.35 MPa,再次发生应变软化(3-③段)和随后的应变硬化(3-④段),极限荷载达到 13.95 MPa。经两阶段应变软化-硬化作用,抗压强度增高,应变硬化系数达到 2.25。气流量在 3 L/min 左右低值区相对稳速渗流,煤样声发射反映出的煤内破裂并未产生导气通道,表明持续处于反复软化-硬化的压密过程。

4) 破裂灾变阶段,图 5 标注为 4 的阶段。加载到 13.95 MPa,达到煤样单自由度轴向压缩极限荷载,应力迅速降低;煤样自由表面产生大量宏观裂缝,有碎块弹落,气体伴有少量煤粒喷出;声发射能量达到全程最高峰,气流量急剧增高到 23 L/min 后趋于稳态,表明煤样内部产生新生裂隙并贯通;判断冲击灾变发生,停止试验。

3.2.2 B-2 煤样

试验结果也呈现出 4 个特征阶段,但与 B-1 煤样存在一定的差异。

1) 初始非线性阶段,图 6 标注为 1 的阶段。加载 0 ~ 1.3 MPa,应变 0 ~ 2.3%,应力曲线呈上凹形状,为初始非线性阶段,煤样卸载裂隙压密,有少量低能声发射。

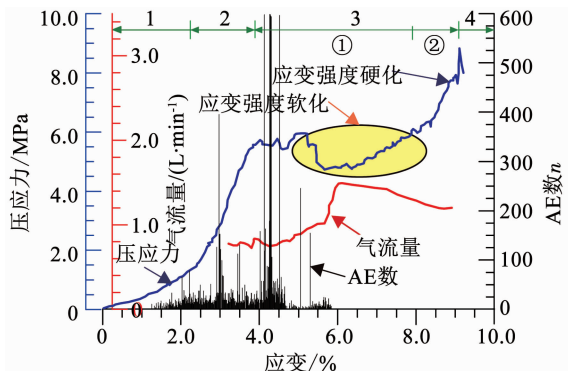


图 6 B-2 煤样受载物理场演化

Fig. 6 Diagram of physical field evolution under load of B-2 coal sample

2) 线弹性阶段,图 6 标注为 2 的阶段。加载 1.3 ~ 5.75 MPa,应变 2.3% ~ 3.9%,应力曲线基本呈直线单调增加,处于线弹性阶段。加载到 2.6 MPa

出现一次声发射计数(频次 n) 高峰,但应力曲线形态走势未见改变,分析为煤样残余裂隙闭合所致. 加载到 3.0 MPa 左右开始通过透气板施加 0.2 MPa 气压 N_2 ,处于 0.8 L/min 左右低值稳速渗流状态,未出现 A-2 煤样由高值转低值过程,分析为加气时已进入弹性后半程,原生裂隙已压实趋于闭合所致. 加载到 5.75 MPa,声发射计数出现全程最高峰,之后进入非线性阶段,但气流量此时未见加速,表明煤样内部尚未产生导气裂隙,煤样自由侧未见显著变化.

3) 应变软化-硬化阶段,图 6 标注为 3 的阶段. 加载到 5.75 MPa 后,先期经过一段屈服,强度出现高低躁动. 之后强度下降到 4.8 MPa,出现较长一段应变软化过程(3-①阶段),应变软化系数 0.84,气流量快速增大到 1.5 L/min 左右,遗憾的是此后再未接收到声发射信号,疑似传感器接触失灵. 之后开始出现应变强度硬化,直至 8.8 MPa(3-②阶段),应变硬化系数 1.53.

4) 破裂灾变阶段,图 6 标注为 4 的阶段. 加载到 8.8 MPa,达到煤样单自由度轴向压缩极限荷载,应力迅速降低;煤样自由表面产生宏观裂缝,有碎块弹落,气体伴有少量煤粒喷出;气流量处于相对高速,但未见急速增高;判断冲击灾变发生,停止试验.

3.2.3 B-3 煤样

与上述两个试验其他条件均相同,施加 0.4 MPa 的氮气. 图 7 所示,初始非线性阶段和弹性阶段与前两个煤样相似. 加载到 6.9 MPa 首次峰值抗压强度后,出现 1.4 MPa 应力降,强度软化系数为 0.8,声发射计数和能量均出现峰值. 继续加载,抗压强度逐渐回升表现为应变强度硬化,直至 8.7 MPa 的硬化峰值后,声发射计数和能量达本试验最高值,自由面有煤粒弹射,气体喷出,发生冲击灾变,应变强度硬化系数 1.26.

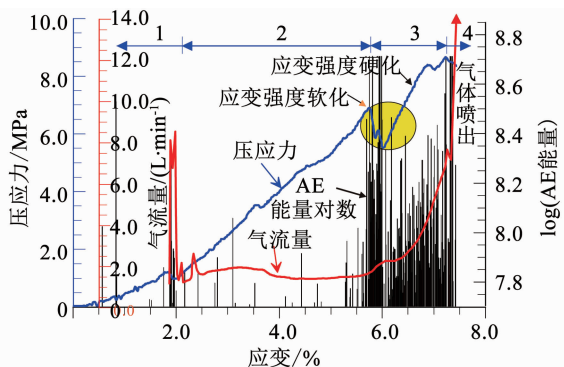


图 7 B-3 煤样受载物理场演化

Fig. 7 Diagram of physical field evolution under load of B-3 coal sample

现阶段所做的 3 个试验均呈现出应变软化-硬化现象,尽管应变强度软化方式和程度存在差异,但应变强度硬化程度均比较显著.

4 机理探讨

1) 无侧限边界和单自由度边界条件压缩试验对比,3 个试验的单自由度边界条件压缩均出现了应变软化-硬化,甚至反复软化-硬化现象. Yang 等(2017)大理岩试验也得出,在单轴压缩条件下,大理岩呈脆性破坏特征与多个轴向劈裂裂缝;三轴循环加载条件下,随着围压增加,大理岩的峰值变形逐渐由应变软化变为应变硬化^[13]. 但由于三轴试验没有自由表面边界条件,不能产生向自由端位移的运动条件,从而不能发生冲击灾变.

2) 无侧限单轴压缩条件下(见图 8(a)),在弹性范围内,岩样的纵向应变 ε_{y1} 可表达为横向应变 ε_{x1} 与泊松比 μ 的比值关系,即

$$\varepsilon_{y1} = \varepsilon_{x1} / \mu. \quad (1)$$

超过弹性极限后将产生不可恢复的永久应变,继续加载到极限荷载,试样将产生破坏,应力应变呈图 3 所示的单调增加与下降形态. 由于侧向没有约束,侧向应变向两侧位移, ε_{x1} 与 ε_{y1} 均呈弹性常速稳态形变-塑性加速形变-失稳过程.

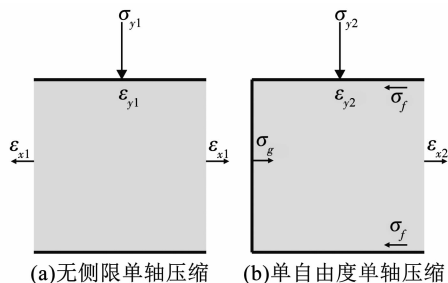


图 8 不同边界条件应变分析

Fig. 8 Strain analysis with different boundary conditions

单自由度边界单轴加载条件下(见图 8(b)),由于 2 个面加载主动约束和 3 个面刚性被动约束,侧向应变被迫只能向自由端一侧位移. 泊松效应产生侧向膨胀,对岩样产生夹持摩阻力 σ_f . 1939 年 Bowden 和 Leben 所做的著名黏滑试验表明,在此情况下存在蠕滑-黏滑现象. 在泊松效应作用下,当岩样侧向位移作用力小于夹持摩阻力时,岩样侧向产生蠕滑,与无侧限相比,为弹性减速稳态形变;当岩样侧向位移作用力克服夹持摩阻力时,岩样侧向产生快速滑移,呈弹性加速非稳态形变-黏滑. 之后产生应力降,岩样侧向位移作用力降低,开始进入下一循环. 这一过程重复出现,将表现出黏滑特征和强度应变硬化,纵向应变 ε_{y2} 可表达为式(2)累积形式,直至破坏失稳.

$$\sum_{i=1}^n \varepsilon_{y2i} = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{x2i} / \mu). \quad (2)$$

3) 试验结果显示,煤样应变软化的表现形式存在差异性. B-1 试样表现为在较窄的应变范围小幅

度躁动式强度软化,且经多次反复软化-硬化;B-2试样表现为较宽应变范围大幅度持续强度软化;B-3试样表现为较窄的应变范围大幅度跌落强度软化.是因为原煤试样为富含空隙裂隙的非均质体,试样间空隙、裂隙和均质度的差异,造成了不同的应变强度软化表象.但无论强度软化形式如何,最终都呈现出应变强度硬化的结果.与无侧限单轴压缩试验比较,单自由度边界条件下的应变量提高了一个数量级,煤样空隙、裂隙被压密的程度更高,从而表现出应变强度硬化程度比较显著,灾变前极限荷载分别增加了26%、53%和125%(见表2),均超过了煤样具有冲击倾向性的强度指标.

表2 煤样应变强度硬化结果

Tab.2 Strain strength hardening results of coal samples

试样	首次峰值抗压 强度/MPa	硬化峰值抗压 强度/MPa	强度硬化 系数
B-1	6.20	13.95	2.25
B-2	5.75	8.80	1.53
B-3	6.90	8.70	1.26

4)无侧限单轴压缩,极限荷载后均出现单调下降的应变强度软化,不具备应变强度硬化的边界约束条件;三轴条件下虽然有应变强度软化-硬化,但因没有自由面,岩样没有向外位移的空间,不具备冲击灾变的运动条件;而单自由度边界条件下,由于有5个约束面的存在,出现了与三轴条件相似的应变强度软化-硬化现象,有1个自由面的存在,提供了煤样侧向膨胀后位移的路径和空间,当软煤硬化后达到冲击破坏强度条件时,具备发生类似硬煤冲击灾变的条件.

5 结 论

1)软煤在单自由度边界条件下承压,可产生应变强度软化-硬化,当强度硬化达到冲击破坏强度条件时,可发生类似硬煤的冲击灾变.

2)本文构建的单自由度边界承压条件,较好模拟了掘进工作面前方和采煤工作面中部的边界和应力条件,对煤与瓦斯突出软煤发生冲击灾变给出了合理的应变强度硬化解释.

3)深部高应力条件下,煤与瓦斯突出软煤掘进和开采,要对应变强度硬化可以导致的煤层冲击灾变引起重视.工程实践上,这种冲击灾变的强度虽然不高,但其可以诱导煤与瓦斯突出或瓦斯异常涌出,危害性很高.

致谢:本研究物理试验承蒙河南理工大学苏承东教授和高保彬博士的帮助,谨致衷心感谢!

参考文献

[1]国家安全生产监督管理总局,国家煤矿安全监察局.防治煤与瓦斯突出规定[S].北京:煤炭工业出版社,2013
State Administration of Work Safety, National Coal Mine Safety

Administration. Provisions on prevention and control of coal and gas outbursts[S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2013

[2]煤的冲击倾向性分类及指数的测定方法:GBT 25217.2—2010[S].北京:煤炭工业出版社,2011
Classification and laboratory method on bursting liability of coal: GBT 25217.2 - 2010 [S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2010

[3]孟贤正,汪长明,唐兵,等.具有突出和冲击地压双重危险煤层工作面的动力灾害预测理论与实践[J].矿业安全与环保,2007,34(3):1
MENG Xianzheng, WANG Changming, TANG Bing, et al. Prediction theory and practice of dynamic disaster occurred in coal face with outburst and rock burst[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2007, 34(3): 1. DOI:10.3969/j.issn.1008-4495.2007.03.001

[4]林士良,马春笑,王广杰.深井煤巷掘进冲击地压与瓦斯突出综合防治技术[J].中州煤炭,2009(7):83
LIN Shiliang, MA Chunxiao, WANG Guangjie. Com-prehensive prevention technology on rock burst and gas outburst in deep well driving[J]. Zhongzhou Coal, 2009(7): 83. DOI:10.3969/j.issn.1003-0506.2009.07.038

[5]张福旺,李铁.深部开采复合型煤与瓦斯动力灾害的认识[J].中州煤炭,2009,106(4):73
ZHANG Fuwang, LI Tie. Cognizance on compound dynamic disaster of coal and gas in deep mining[J]. Zhongzhou Coal, 2009, 106(4): 73. DOI:10.3969/j.issn.1003-0506.2009.04.037

[6]李铁,梅婷婷,李国旗,等.“三软”煤层冲击地压诱导煤与瓦斯突出的研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6):1283
LI Tie, MEI Tingting, LI Guoqi, et al. Mechanism study of coal and gas outburst induced by rockburst in “three-soft” coal seam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1283

[7]HOLLOMON J H. The effect heat treatment and carbon content the work hardening characteristics of several steel[J]. Transactions of ASM, 1944(32):123

[8]BRO A. Analysis of multistage triaxial test results for a strain-hardening rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(1):143. DOI:10.1016/S0148-9062(96)00043-5

[9]唐明明,王芝银,丁国生.淮安盐岩及含泥质夹层盐岩应变全过程试验研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(A01):2712
TANG Mingming, WANG Zhiyin, DING Guosheng. Experimental study of full process of strain of rock salt and salt-mudstone interlayer in Huai'an salt mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(A01): 2712

[10]殷德顺,和成亮,陈文.岩土应变硬化指数理论及其分数阶微积分理论基础[J].岩土工程学报,2010(5):762
YIN Deshun, HE Chengliang, CHEN Wen. Theory of geotechnical strain hardening index and its rationale from fractional order calculus [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010(5): 762

[11]王迎超,尚岳全,严细水,等.降雨作用下浅埋隧道松散围岩塌方机制[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(2):142
WANG Yingchao, SHANG Yuequan, YAN Xishui, et al. Study on collapse mechanism in loose wall rock of shallow tunnel under rainfall[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(2): 142. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2012.02.031

[12]王俊颜,耿莉萍,郭君渊,等.UHPC的轴拉性能与裂缝宽度控制能力研究[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):165
WANG Junyan, GENG Liping, GUO Junyuan, et al. Experimental study on crack width control ability of ultra-high performance concrete[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(12): 165. DOI:10.11918/j.issn.036706234.201705148

[13]YANG Shengqi, TIAN Wenling, RANJITH P G. Experimental investigation on deformation failure characteristics of crystalline marble under triaxial cyclic loading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(11): 2871. DOI:10.1007/s00603-017-1262-7