

文章编号:1001-4888(2022)03-0407-12

管状碳钢轴压变形吸能特征试验研究^{*}

吕祥锋^{1,2}, 王玉肖^{1,2}, 陈艳³, 杜泊潼¹, 马嵘萍¹, 李参天¹

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学 城市地下空间工程北京市重点实验室, 北京 100083;
3. 北京国电经纬工程技术有限公司, 北京 100192)

摘要: 地下煤炭资源开采过程中, 碳钢支护构件吸收围岩释放能量是降低动力灾害的重要途径, 然而, 碳钢支护构件变形吸能特征规律仍不清晰。本文采用轴压荷载、光学数字散斑和声发射同步监测相结合的研究方法, 探究了 3 种典型碳钢材质(Q235、Q460、Q690)管状轴压条件下渐进屈曲失效模式及变形吸能特征, 分析了压载全过程管状碳钢散斑变形场和声发射能谱演化规律, 以期揭示管状碳钢轴压变形与能量吸收之间的内在联系。研究结果表明: (1) 3 种管状碳钢轴压变形过程分为三阶段: 弹性阶段、塑性阶段和屈曲压密阶段。 (2) Q235 管状碳钢轴压变形呈横向压扩形态, 破坏模式为“圆环式”失稳模式, Q460、Q690 管状碳钢轴压变形呈纵向弯曲形态, 破坏模式为“钻石式”失稳模式。 (3) 对比分析 3 种管状碳钢的吸能效果, 可得 Q460 吸能效果最佳, 总吸能值达 668.32J, Q235 与 Q690 总吸能值分别为 Q460 的 82.5% 与 77.84%。上述研究结果可为围岩吸能防护钢质及结构选型提供理论参考。

关键词: 管状碳钢; 轴压变形; 吸能特征; 破坏模式; 试验研究

中图分类号: TD353 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-21-090

0 引言

随着煤炭资源开采强度及深度的增加, 地质条件与开采布局愈加复杂, 深部冲击动力灾害频发, 成为制约矿井安全高效生产的主要灾害之一^[1,2]。提高支护结构吸能效果是防治冲击地压灾害的重要手段^[3,4], 但现有支护设备防冲吸能效果有限, 亟需提升防冲吸能支护设备性能。

支护吸能构件作为液压支架的重要组成部分, 其压载特性研究已经得到众多学者专家的关注。构件吸能原理方面: 马箫等^[5]通过设计菱形吸能构件的单元组成和排布形式, 研究了菱形吸能构件的承载力、吸能方式及稳定性特征, 结合数值模拟分析了菱形构件吸能原理。潘一山等^[6]研制了巷道防冲吸能液压支架, 通过预折纹吸能构件的实验室试验, 得到了防冲吸能构件的阻力、位移、刚度频率变化特征。代连朋等^[7]研究了轴裂式吸能构件的变形特性、吸能效果, 得到了构件吸能作用全程阶段特性, 并采用能量法分析了轴裂式吸能构件吸能原理。吸能构件材质选择方面: 郝志勇等^[8]对比了钢板、钢管夹芯及泡沫材料的吸能构件力学特性, 通过吸能效果及荷载波动系数指标, 得到了 3 种填充材质吸能构件的抗冲击能力。张光成等^[9]通过准静态加载 410L 与 430L 泡沫钢材料, 得到了相同孔隙率条件下不同钢质材料的吸能特征。吸能构件结构优化方面: Chattopadhyay 等^[10]通过分析三角形管状吸能构件与方形、圆形管状吸能构件的屈曲特性, 得到了三角形吸能构件弹性屈曲的解析解。Elmarakbi 等^[11]通过有限

^{*} 收稿日期: 2021-04-14; 修回日期: 2021-05-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号: 51774048); 中央高校基本科研业务费资助项目(编号: FRF-TP-19-009B1)

通信作者: 吕祥锋(1982-), 男, 博士研究生, 教授, 博士生导师。主要从事深部岩体工程灾害力学与防护研究。

Email: lvxiangfeng2006@126.com

元数值软件对比了 S 形管状吸能构件内部不同构件组成设计参数,得到了不同加筋设计条件下构件吸能效果与应力响应的关系。唐治等^[12]提出了一种矿用六边形折痕吸能防冲构件,通过对比不同壁厚、不同内径等参数对构件吸能特征的影响,得到了构件压溃荷载峰值、总吸能效果与构件尺寸的关系。近年来,众多学者在吸能构件结构设计与吸能机理方面中取得了一定的成果^[13-16],但现阶段的研究对吸能构件材质选择仍鲜有报道,尤其对不同吸能构件材质的屈服破坏特征研究较少,因此本文针对以上问题,开展吸能构件不同钢质材质选择及屈服破坏特征研究。

本文通过对比 3 种不同材质薄壁管状碳钢准静态压载力学行为,采用声发射监测系统采集试验压载全程管状碳钢声发射信号数据,借助数字散斑相关方法捕获管状碳钢压载全程的变形场演化过程,研究不同钢质吸能构件的轴压破坏模式及吸能特征,分析轴压变形与吸能效果之间的内在联系。本文研究结果可为冲击地压巷道吸能防护材质优化及吸能理论提供参考。

1 管状碳钢压载-光-声同步试验方法

1.1 数据采集系统

采用北方工业大学土木工程学院建工实验中心的压载-光-声同步试验装置开展管状碳钢压载试验,试验装置主要包括:压载系统、光学散斑采集系统及声发射监测系统,如图 1 所示。



图 1 试验配置图

Fig. 1 Test configuration diagram

压载系统由 RLJW-2000 型液压伺服试验机组成,单轴压载试验采用相同速率下限定位移的方式进行。压载试验相关参数设置如下:最大的行程为 120mm,荷载极限为 2000kN,采样频率为 2Hz,压缩高度为 40mm,压载速率为 2mm/min。

光学散斑采集系统由 CCD(Charge Coupled Device Camera)相机、白光源及笔记本电脑组成,在试件前 2m 处放置 CCD 相机,采集试件压载全程的表面人工散斑图像,观测其表面变形规律。采样参数设置如下:图像分辨率为 1600pixel $\times$ 1200pixel,物面分辨率为 0.1136mm/pixel,速率为 5fps/s。

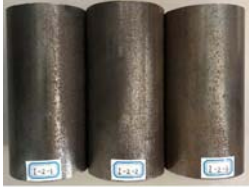
声发射监测系统由笔记本电脑及全息声发射信号分析仪组成,采用三角形布设方式在试件后表面设置 5 个传感器,在传感器和试件监测面间填充耦合剂,排除空气,增强耦合效果。设置前置放大器增益为 40dB,门槛值为 10mV,信号采集频率为 3MHz。

1.2 试件及测点布置

随着冲击地压事故频次增加,巷道支架吸能防护设计面临更加严峻的问题,对防冲吸能材质提出了更高要求。经调研,Q235 钢具有良好的塑性、韧性、焊接性能和冷弯性能,在巷道支护材料中应用广泛;

Q460 钢具有较高的强度、韧性等性能,是液压支架常用的钢材之一;Q690 钢是目前支架主体结构中强度等级较高的钢材。选取 Q235、Q460、Q690 管状碳钢作为准静态压缩试件,试件的外径为 60mm、高为 120mm、壁厚为 3mm。每种材质的试件数量为 3 个,共计 9 个试件,见表 1。

表 1 准静态压缩试验试件
Tab. 1 Quasi-static compression test specimen

材质	Q235	Q460	Q690
压载速率 2mm/min			

人工散斑场布设方式为:以试件自然色为底色,均匀喷涂白漆颗粒,如图 2 所示。声发射监测的操作步骤如下:首先按照定位点布置,将声发射探头依次黏在试件表面,然后放置试件,检验声发射装备工作状态,随后开始加载试验,并同步打开声发射监测装置,最后收集试验数据,分析试件受载破坏规律。本文试验使用 5 组传感器,采用三角形方式进行布设,声发射传感器布设形式如图 3 所示。

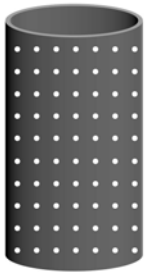


图 2 散斑场
Fig. 2 Speckle field

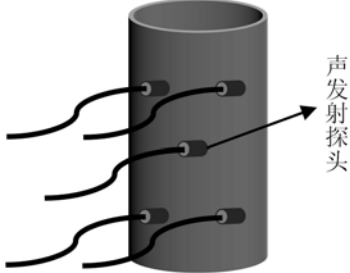


图 3 声发射传感器布设形式
Fig. 3 Layout form of acoustic emission sensor

1.3 试验过程

试验准备阶段:(1)根据试件规格标记试件型号;(2)在压头的中心部位及试件 2 个端面上涂抹润滑油,减少试验过程中试件与试验机的摩擦作用;(3)通过强力胶固定声发射探头位置,采用断铅试验,确保声发射试验装置工作状态正常;(4)调整 CCD 相机的方位、焦距和亮度,启动并调试试验装置,确保系统中的所有仪器设备始终在正常运行;(5)对压载系统、光学散斑采集系统及声发射监测系统进行时间校准,统一在试验过程中采集数据的时间。

试验实施阶段:(1)进行断铅校准,通过模拟源校准检测灵敏度;(2)同步开启压载试验装置、光学散斑采集装置和声发射监测装置;(3)通过 CCD 相机采集压载全程试件表面的散斑变形图像数据^[17],声发射监测系统开始对压载全程中的试验数据进行声发射信号采集^[18];(4)当试件达到极限强度,试验结束,收集试验数据。

2 管状碳钢失效变形规律研究

2.1 管状碳钢失效模式分析

研究表明^[19],轴向压载作用下管状碳钢塑性变形模式分为圆环模式(也被称为轴对称形式)和钻石模式(也被称为非轴对称形式)。当圆管的径厚比大于 80 时,圆管壁厚相对较薄,钻石模式更易发生;当圆管的径厚比小于 50 时,圆管的管长相对较短,壁厚较厚,圆环模式更容易发生。3 种典型碳钢(Q235、Q460、Q690)径厚比均为 20,依据径厚比不能对失效模式进行划分,同时 3 种典型碳钢的管径、厚度、长度等几何参数一致,轴向压载速率均相同,故变形模式主要受管状碳钢材质影响,3 种典型管状碳钢轴

压失稳过程如图 4 所示。

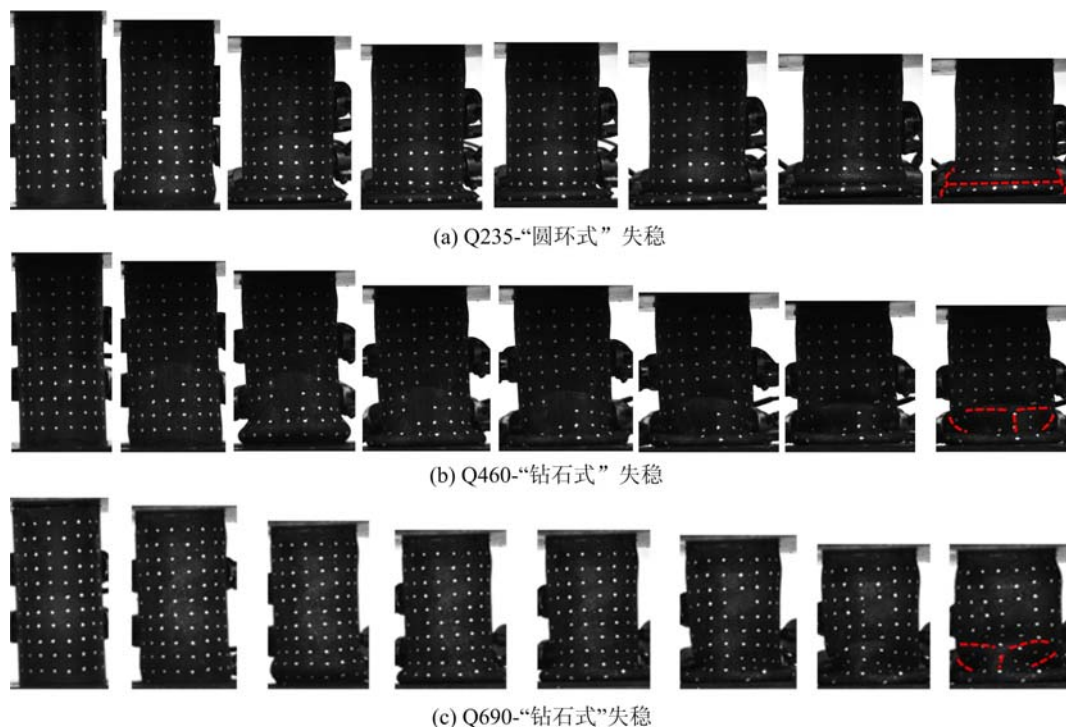


图 4 管状碳钢轴压失稳示意图

Fig. 4 Schematic diagram of axial compression instability of tubular carbon steel

在轴向压载速率 $2\text{mm}/\text{min}$ 情况下, Q235 管状碳钢发生轴对称失稳, 其破坏模式为“圆环式”失稳, 如图 4(a) 所示, 管状碳钢最大压缩量为 40mm , 共形成 2 处褶皱, 其中褶皱形态分别为向内折叠和向外折叠; Q460 管状碳钢发生非轴对称失稳, 其破坏模式为“钻石式”失稳, 如图 4(b) 所示; Q690 管状碳钢发生非轴对称失稳, 其破坏模式为“钻石式”失稳, 如图 4(c) 所示。

2.2 变形场演化分析

为探究 3 种不同管状碳钢变形场演化规律, 每种管状碳钢选取 3 个试件开展试验, 限于文章篇幅, 每种管状碳钢均选取典型试件开展分析, 得到如图 5 所示的不同管状碳钢变形场云图。其中图 5(a) 所示为 3 种不同管状碳钢应力-时间曲线, 选定原点作为散斑图像参考点, 借助数字散斑相关法, 分别获取各标识点的变形场演化云图, 具体分析如下。

Q235 管状碳钢变形场演化云图如图 5(b)~(e) 所示, 分别对应图 5(a) 中标识点 1~4。如图 5(a) 所示, 标识点 1 处于压载初期, 其应力值为 106.47MPa ; 标识点 2 处于峰值区域, 其应力值为 377.30MPa ; 标识点 3 处于荷载峰后初降阶段, 其应力值为 288.45MPa ; 标识点 4 处于管状碳钢褶皱生成阶段, 其应力值为 322.50MPa 。图 5(b) 所示为标识点 1 对应时刻的变形场演化云图, 整体呈现横向均匀分布; 图 5(c) 为标识点 2 对应时刻的变形场演化云图, 管状碳钢的变形场上下两端存在应变局部化, 为整体结构变形最大区域; 图 5(d) 为标识点 3 对应时刻的变形场云图, 试件变形集中区域的范围逐渐向上下两侧移动, 主要集中在变形场底部, 出现明显的横向变形局部化带分界线, 底部位移突增, 第一个褶皱逐渐形成; 图 5(e) 所示为标识点 4 对应时刻的变形场云图, 试件处于第二个褶皱形成过程中, 变形局部化范围进一步增大, 随试件受载演化, 管状碳钢最终发生“圆环式”失稳。由图 5(b)~(e) 可见, Q235 管状碳钢变形场压载过程中, 应变局部化范围由试件两端逐步向试件中部演化, 且试件应变局部化分界线具有明显的连续性, 其原因是“圆环式”失稳造成试件变形具有一定的区域连续性。

Q460 管状碳钢变形场演化云图如图 5(f)~(i) 所示, 分别对应图 5(a) 中标识点 5~8。如图 5(a) 所示, 标识点 5 处于压载初期, 其应力值为 168.64MPa ; 标识点 6 处于峰值区域, 其应力值为 453.11MPa ;

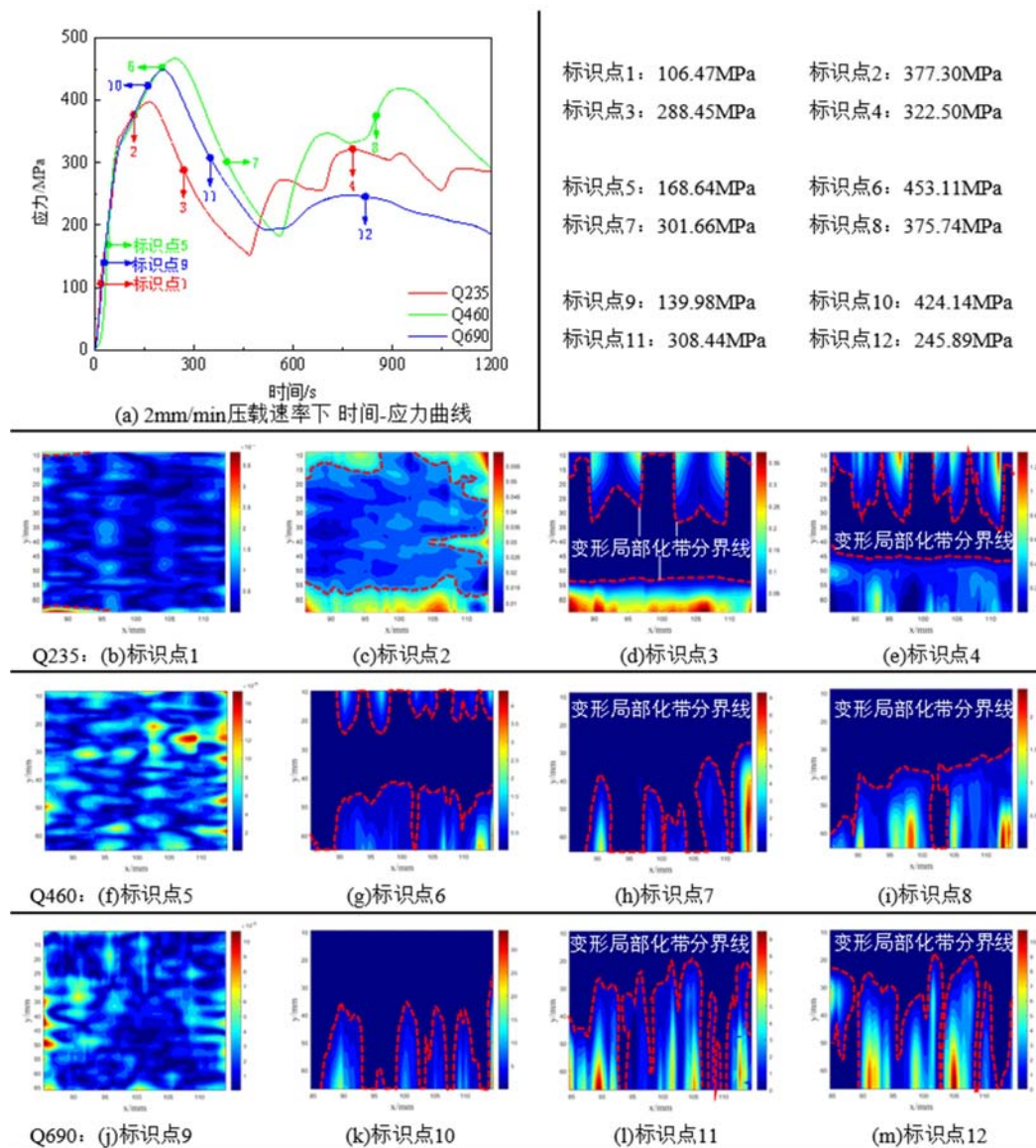


图5 2mm/min压载速率下变形场演化云图

Fig. 5 Deformation field evolution cloud map at 2mm/min ballast rate

标识点7处于荷载峰后初降阶段,其应力值为301.66MPa;标识点8处于管状碳钢褶皱生成阶段,其应力值为375.74MPa。图5(f)所示为标识点5对应时刻的变形场演化云图,与Q235管状碳钢相比,标识点5时刻试件变形局部化特征明显,试件整体呈现均匀横向变形;图5(g)为标识点6对应时刻的变形场演化云图,管状碳钢的变形局部化向上下两侧边缘移动,为整体结构变形最大区域;图5(h)为标识点7对应时刻的变形场云图,试件顶部变形场逐渐减小,变形区域的范围向底部转移;图5(i)为标识点8对应时刻的变形场云图,试件处于第二个褶皱形成过程中,变形局部化范围进一步增大,随试件受载演化,管状碳钢最终发生“钻石式”破坏。由图5(f)~(i)可见,Q460管状碳钢受载变形场区别于Q235的变形演化特征,上端局部化带逐渐消失,下端局部化带逐渐上移,且变形局部化边界连续性较小,其原因为试件受载发生“钻石式”形变,同一高度的碳钢结构发非连续变形。

Q690管状碳钢变形场演化云图如图5(j)~(m)所示,分别对应图5(a)中标识点9~12。其中图5(j)为Q690管状碳钢标识点9对应的位移变形场,试件两侧表现出局部集中变形,但范围比较小,变形场演化整体表现为均匀横向变形,其应力值为139.98MPa;图5(k)为试件标识点10对应位移变形场云图,底部表现出较大区域的纵向非均匀变形特征,其应力值为424.14MPa;图5(l)为试件标识点11对

应位移变形场云图,变形集中区域逐渐沿纵向扩展,其应力值为 308.44MPa;图 5(m)为试件标识点 12 位移云图,试件受载表现为变形局部化的进一步扩展,且变形区域主要发生在试件底部,随着试件受载演化,最终发生“钻石式”失稳。由图 5(j)~(m)可见,Q690 与 Q460 管状碳钢变形相似,均存在非连续局部化带上移现象。

综上所述,管状碳钢压载前期变形场整体处于均匀变形状态,随荷载增大,Q235 管状碳钢发生横向变形,即当应力达到构件极限强度时,管状碳钢首先底部产生横向变形,应变局部化范围由试件两端逐步向试件中部演化,最终表现为“圆环式”失稳;Q460、Q690 管状碳钢受载破坏形态为沿试件竖向轴中心线纵向弯曲,即当应力达到构件极限强度时,管状碳钢发生径向挠曲变形,纵向倾斜折线弯曲,并沿试件周向出现挤压现象,试件上端局部化带逐渐消失,下端局部化带逐渐上移,最终呈现“钻石式”失稳。

2.3 管状碳钢声发射表征参数分析

本文基于声发射振铃计数及声发射能量 2 个应用广泛的特征参数,研究 3 种管状碳钢压载过程声发射事件响应规律,其中声发射振铃计数是指振铃脉冲信号超过设定值的次数,用以衡量声发射信号的大小与频次,并能评价声发射事件的活跃度;声发射能量是指信号检波包络线下的面积,该值与声发射事件所在波形的幅度值的平方成正比,能够表征声发射事件的强度。

2.3.1 管状碳钢振铃计数变化规律

图 6-1 是压载速率为 2mm/min 时,Q235 管状碳钢压载曲线与振铃计数对应关系图。图 6-1 表明,压载初期振铃计数值增幅较大,振铃计数激增点分别位于时刻 36.89s、38.05s、43.83s、78.46s,同时荷载在时刻 166s 达到峰值,荷载峰值相较于振铃计数最大值滞后 85.45s;根据图 6-1 中放大图,荷载峰值时期振铃计数突降,在 166s~225s 出现间断性空白期;随后振铃计活跃度降低,整体分布较稳定,但荷载相对较高,说明试件处于应力集中状态。

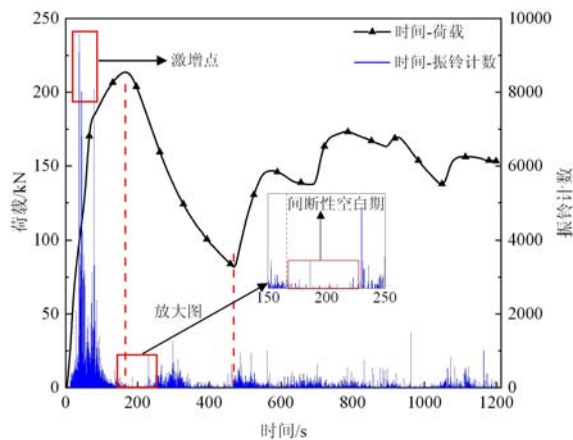


图 6-1 2mm/min 压载曲线与振铃计数对应关系(Q235 管状碳钢)

Fig. 6-1 Correspondence between 2mm/min ballast curve and ringing count (Q235 tubular carbon steel)

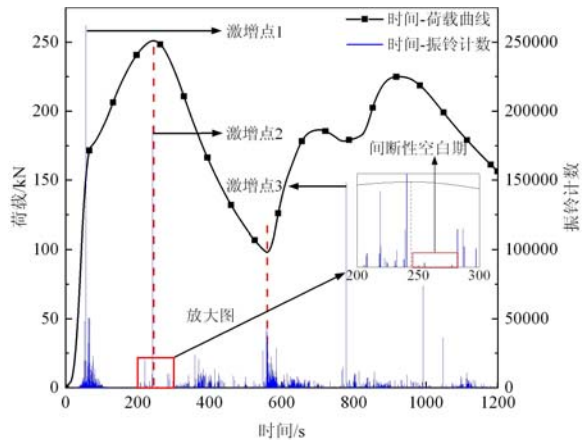


图 6-2 2mm/min 压载曲线与振铃计数对应关系(Q460 管状碳钢)

Fig. 6-2 Correspondence between 2mm/min ballast curve and ringing count (Q460 tubular carbon steel)

图 6-2 是压载速率为 2mm/min 时,Q460 管状碳钢压载曲线与振铃计数对应关系图。图 6-2 表明,压载初期声发射振铃计数活跃度持续增加;压载时刻为 56.54s 时,振铃计数出现激增点 1,为振铃计数最大值,随后荷载-时间曲线的斜率减小,说明振铃计数激增点对荷载增幅存在较大影响;压载时刻为 240.6s 时,荷载达到局部峰值 250.98kN,且振铃计数出现激增点 2,压载时刻为 785s 时,荷载为局部极小值,振铃计数出现激增点 3;结合图中放大图分析,在出现激增点时刻前后均存在间断性空白期,除激增点时刻外振铃计数活跃度相对较低,但在荷载峰值与峰谷区域出现振铃计数活跃度增加的现象。

图 6-3 是压载速率为 2mm/min 时,Q690 管状碳钢压载曲线-振铃计数对应关系图。图 6-3 表明,压载初期声发射振铃计数增幅较大,振铃计数激增点位于时刻 53.90s,该点也是振铃计数最大值,随着

时间增加,荷载-时间曲线的斜率减小,说明出现激增点后荷载增幅降低;在 150s~1200s,振铃计数活跃度较小,处于相对平稳状态;根据图 6-3 中放大图像,出现激增点后振铃计数存在间断性空白期,荷载呈波动变化。

综上所述,在压载初期至接近峰值阶段,振铃计数波动较为明显,出现峰前“活跃期”,这与碳钢管轴压初期内部晶体之间产生相对滑移、错位有关。2mm/min 压载速率下振铃计数出现明显的峰后间断性空白期,其原因为试件滑移、错位速度较慢,造成部分晶体间堵塞,可以作为判定试件屈曲的前兆。峰后振铃计数活跃度降低,维持在一个相对稳定的范围,对应荷载曲线峰值点、峰谷点出现较低值激增点,其原因为晶粒间位错孪生运动引起信号突发,试件内部微裂纹发生聚合、贯通,导致宏观褶皱形成。进一步,经对比分析,Q460 管状碳钢具有多个相对较高的荷载峰值,说明其承载能力最强,同时 Q460、Q690 管状碳钢振铃计数的整体活跃度明显小于 Q235,说明 Q460、Q690 管状碳钢内部损伤相对较小,因此根据声发射振铃计数与荷载变化规律,Q460 管状碳钢的吸能效果最佳。

2.3.2 管状碳钢能量演化分析

图 7-1 所示为 Q235 管状碳钢压载曲线与能量关系图。由图可知,声发射能量激增点 1 位于时刻 39.59s,该时刻声发射能量突然大幅度增加,管状碳钢两端发生小幅度变形,说明试件两端出现局部区域屈服现象,结合试件应变场分布结果可知,试件两端应变局部化已经形成,且具有进一步向试件中心转移的趋势;荷载在时刻 180s 时到达峰值,随后逐渐降低至极小值;在 469s~962.57s,声发射能量活跃度整体较低,出现图 7-1 所示的“平静期”,结合试件变形情况分析,该阶段管状碳钢共形成两个褶皱,随后声发射能量突增至激增点 2,表明试件底部屈服阶段,随褶皱形成试件发生较大局部变形,荷载增加,但内部未出现大量裂纹,整体能量释放低,吸能效果良好。

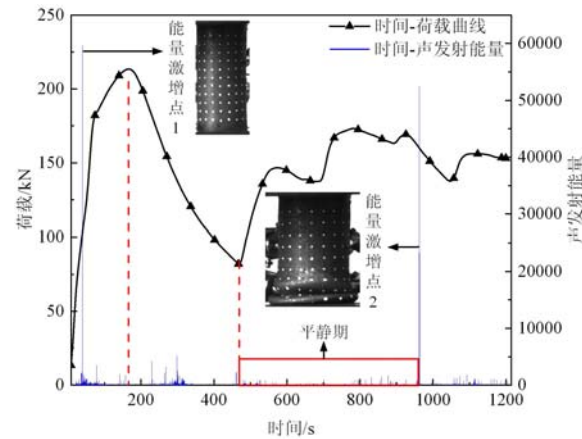


图 7-1 2mm/min 压载曲线与能量对应关系(Q235 管状碳钢)
Fig. 7-1 Correspondence between 2mm/min ballast curve and energy (Q235 tubular carbon steel)

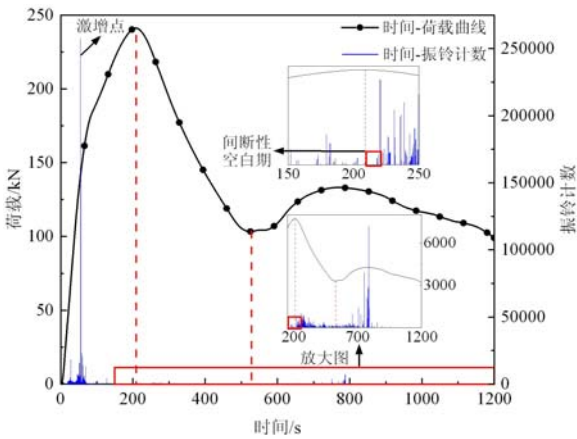


图 6-3 2mm/min 压载曲线与振铃计数对应关系(Q690 管状碳钢)
Fig. 6-3 Correspondence between 2mm/min ballast curve and ringing count (Q690 tubular carbon steel)

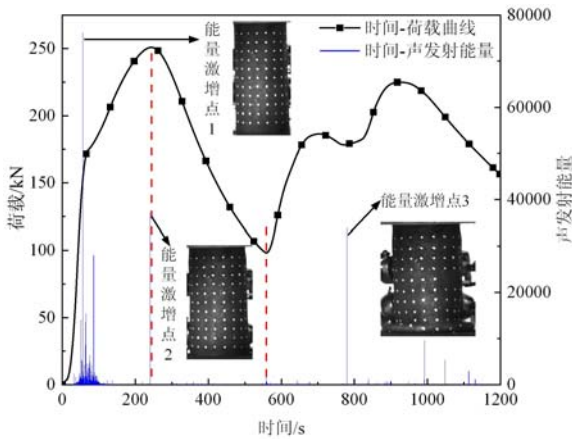


图 7-2 2mm/min 压载曲线与能量对应关系(Q460 管状碳钢)
Fig. 7-2 Correspondence between 2mm/min ballast curve and energy (Q460 tubular carbon steel)

图 7-2 所示为 Q460 管状碳钢压载曲线与能量关系图。由图可知,当试件压载至 56.54s 时刻,声发

射能量突然大幅度增加,管状碳钢两端出现小幅度的宏观变形,到达激增点 1;激增点 1 时刻至 98.8s,声发射能量起伏变化明显,但整体量值处于较低水平;当试件压载至 240.62s 时刻,声发射能量突然大幅度增加,管状碳钢两端出现明显向内变形,声发射能量到达激增点 2,同时此刻到达荷载峰值点;试件压载的声发射能量激增点 3,出现在压载时间 779.41s 时刻,该时刻试件荷载处于谷底位置,管状碳钢的第一个褶皱已经形成,并具有形成第二个褶皱的趋势。

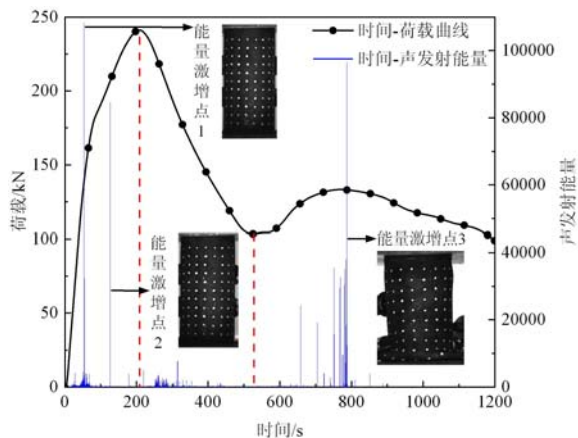


图 7-3 2mm/min 压载曲线与能量
对应关系(Q690 管状碳钢)

Fig. 7-3 Correspondence between 2mm/min ballast
curve and energy (Q690 tubular carbon steel)

试件压载初期至峰值点阶段,由于试件发生塑性变形和裂纹扩展,导致试件具有良好的吸能效果,称为试件的吸能效应阶段,因此吸能效应主要表现在压载初至峰值阶段和第二个褶皱形成阶段。第二个褶皱形成阶段,声发射能量与振铃计数整体活跃度降低,表明能量吸收和耗散程度减弱,内部裂纹的扩展及塑性屈曲变形减小。

3 轴压管状碳钢变形吸能特征分析

3.1 应力-应变曲线

图 8 为 2mm/min 压载速率下应力-应变曲线。图中选取 3 种管状碳钢材料的典型应力-应变曲线作为分析对象。引入变形率指标表征试件压载过程中的变形特征,其含义为试件变形前后高度之差与试件变形前高度的比值,结合管状碳钢压载变形数据可知,3 种管状碳钢变形前后最大高度之差为 40mm,因此最大变形率为 66.6%。由图 8 可知,试件单轴压缩过程可以分为 3 个阶段:弹性阶段、塑性阶段及屈曲压密阶段。对不同类型碳钢压载过程中的 3 个阶段变形特征分析如下:

1-弹性阶段:管状碳钢发生弹性变形,应力快速增加至屈服应力,3 种管状碳钢的屈服应力大小关系为 $Q460 > Q690 > Q235$;弹性阶段 3 种管状碳钢的变形率相对较小,为 15%~20%。

2-塑性阶段:管状碳钢发生失稳、折叠,开始形成褶皱,导致应力急速下降;塑性阶段 3 种管状碳钢的变形率相对较小,为 15%~20%。

3-屈曲压密阶段:塑性阶段形成的初始褶皱受压后趋于密实,第二个褶皱在初始褶皱基础上沿轴向

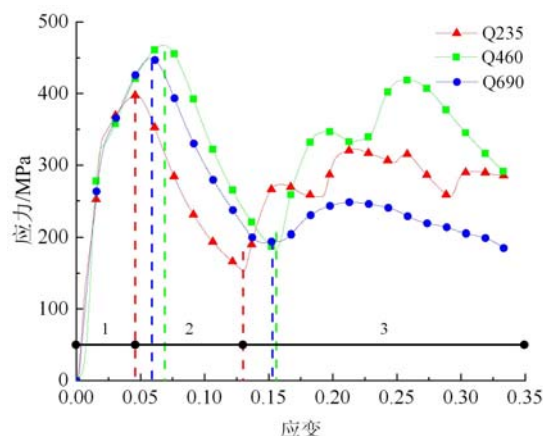


图 8 2mm/min 压载速率下应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve at 2mm/min ballast rate

递进式形成,该阶段应力峰值分别表示第二个褶皱形成时管状碳钢纵向弯曲、向内或向外屈曲的极值,稳定屈服应力的大小关系为 $Q460 > Q235 > Q690$;初始褶皱对于管状碳钢没有发生变形的部分而言相当于添加了初始缺陷,致使该阶段的屈曲极值比弹性阶段最终达到的峰值小,表现为上下波动;屈曲压密阶段的变形率较大,为 $55\% \sim 65\%$ 。

综上所述,Q235、Q460、Q690 管状碳钢轴压变形过程均表现为三阶段特征:弹性阶段、塑性阶段和屈曲压密阶段。由图 8 可知,3 种碳钢应力-应变曲线均出现一较高的应力峰值,此峰值近似等于弹性极限荷载,峰值关系为 $Q460 > Q690 > Q235$;进入屈曲压密阶段,Q690 碳钢与 Q235、Q460 碳钢表现出一定差异:Q235、Q460 碳钢应力随着褶皱形成出现明显周期性波动,Q690 碳钢的应力周期性波动幅度较小,波动区的稳定屈服应力关系为 $Q460 > Q235 > Q690$,因此可得 Q460 管状碳钢的吸能效果最好。

3.2 吸能评价指标

当发生冲击地压时,煤岩体快速释放能量,致使预先布设的支护结构体发生物理变形。而以优化钢质为主体的吸能设备作为巷道支架中吸收能量的重要部件,通过自身的塑性变形来承担整体结构受到的冲击荷载作用,吸能设备内部完成剧烈的冲击能向不可恢复的塑性变形能转化,可以减少冲击力对支架整体的破坏,确保整个支护系统的稳定。

为深入对比分析不同材质的管状碳钢吸能差异性,本文采用总吸能 EA、比吸能 SEA、初始峰值荷载 $P_{\max}$ 、平均荷载 P_m 、压缩力效率 CFE 指标,开展不同类型管状碳钢压载变形与能量吸收性能分析。

3.3 不同材质管状碳钢吸能性能对比分析

以管状碳钢在轴向压缩行程为原始管件长度 $1/3$ 时的评价指标为分析对象,得到如表 2 所示的 3 种典型管状碳钢各项吸能指标。由表 2 可知,同一压载速率下不同材质管状碳钢的吸能评价指标与屈服强度非线性变化关系。

表 2 2mm/min 压载速率下应力-应变曲线
Tab. 2 Stress-strain curve at 2mm/min ballast rate

试件		质量 m/g	总吸能 EA/J	比吸能 $\text{SEA}/(\text{J}/\text{g})$	初始峰值荷载 $P_{\max}/\text{kN}$	平均荷载 P_m/kN	压缩力效率 $\text{CFE}/\%$	
2mm/min	压载	Q235	490.5	551.4	1.12	213.94	137.85	64.43
	速率	Q460	524.7	668.32	1.27	251.98	167.08	66.31
		Q690	521.9	520.22	1.00	244.92	130.06	53.10

3 种典型碳钢比吸能的大小关系为 $Q460 > Q235 > Q690$,压缩力效率的大小关系为 $Q460 > Q235 > Q690$,而且 Q460 碳钢的平均荷载比 Q235 碳钢高 21.2%,比 Q690 碳钢高 28.46%,即 Q460 单位质量的吸能性能更优,且压缩变形相对平稳,缓冲吸能效果更好;但 Q460 材质试件的初始峰值荷载较高,在吸能构件设计中,需开展结构优化降低初始峰值荷载,达到增加屈服平台阶段吸能效果的目的。

管状碳钢在轴向压载下的吸能-位移曲线如图 9 所示,数据结果表明,Q460 管状碳钢总吸能最大,其中 Q460 碳钢塑性吸能为总吸能的主要部分,属于试件结构大变形消耗能量,发生变形之后不可恢复。另外在屈曲压密阶段 Q460 碳钢的屈曲反力最高,塑性吸能最大,因此表明 Q460 的整体吸能效果最好。

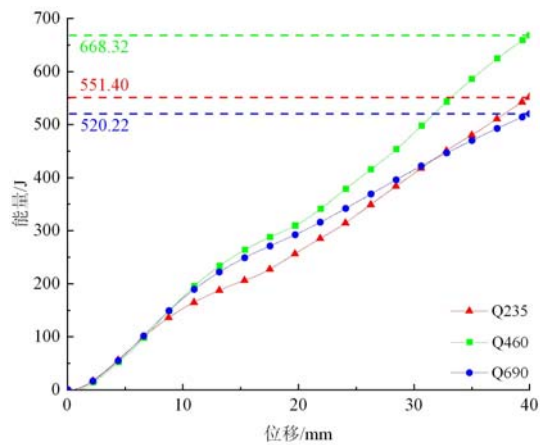


图 9 2mm/min 压载速率下吸能-位移曲线
Fig. 9 Energy absorption-displacement curve
at 2mm/min ballast rate

综上所述,基于总吸能 EA、比吸能 SEA、初始峰值荷载 P_{mx} 、平均荷载 P_m 、压缩力效率 CFE 指标的对比分析,可知同一压载速率条件下,3 种典型碳钢吸能性能各不相同,其中 Q460 管状碳钢轴压吸能性能最优。

4 结 论

通过对管状碳钢轴压变形吸能特征的试验研究,获得压载全过程管状碳钢变形场演化和声发射能谱变化规律,得到以下结论:

(1) 3 种管状碳钢轴压变形过程分为三阶段:弹性阶段、塑性阶段和屈曲压密阶段。

(2) Q235 管状碳钢轴压变形呈横向压扩形态,破坏模式为“圆环式”失稳模式,Q460、Q690 管状碳钢轴压变形呈纵向弯曲形态,破坏模式为“钻石式”失稳模式。

(3) 对比分析 3 种管状碳钢吸能效果可知,Q460 吸能效果最佳,总吸能值达 668.32J, Q235 与 Q690 总吸能值分别为 Q460 的 82.5% 与 77.84%。

参考文献:

- [1] 潘一山,肖永惠,李忠华,等. 冲击地压矿井巷道支护理论研究及应用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(2):222—228 (PAN Yishan, XIAO Yonghui, LI Zhonghua, et al. Study of tunnel support theory of rock burst in coal mine and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2):222—228 (in Chinese))
- [2] 潘俊锋,毛德兵,蓝航,等. 我国煤矿冲击地压防治技术研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(6):21—25 (PAN Junfeng, MAO Debing, LAN Hang, et al. Study status and prospects of mine pressure bumping control technology in China [J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(6):21—25 (in Chinese))
- [3] 姜耀东,赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状:机制、预警与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11):2188—2204 (JIANG Yaodong, ZHAO Yixin. State of the art: investigation on mechanism, forecast and control of coal bumps in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11):2188—2204 (in Chinese))
- [4] 姜福兴,史先锋,王存文,等. 高应力区分层开采冲击地压事故发生机理研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(6):1123—1131 (JIANG Fuxing, SHI Xianfeng, WANG Cunwen, et al. Mechanical mechanism of rock burst accidents in slice mining face under high pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(6):1123—1131 (in Chinese))
- [5] 马箫,潘一山,张建卓,等. 防冲支架的核心吸能构件设计与吸能性能研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4):1171—1178 (MA Xiao, PAN Yishan, ZHANG Jianzhuo, et al. Design and performance research on core energy absorption component of anti-impact support[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(4):1171—1178 (in Chinese))
- [6] 潘一山,肖永惠,李国臻. 巷道防冲液压支架研究及应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1):90—99 (PAN Yishan, XIAO Yonghui, LI Guozhen. Roadway hydraulic support for rockburst prevention in coal mine and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1):90—99 (in Chinese))
- [7] 代连朋,潘一山,王爱文. 金属圆管抗卷曲劈裂变形吸能特性研究[J]. 实验力学, 2017, 32(6):839—847 (DAI Lianpeng, PAN Yishan, WANG Aiwen. Study on energy absorption characteristics of a metal circular tube subjected to curling splitting deformation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(6):839—847 (in Chinese))
- [8] 郝志勇,刘亚强,潘一山. 矿用缓冲吸能装置及其填充材料试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3):620—628 (HAO Zhiyong, LIU Yaqiang, PAN Yishan. Experimental study on filling material of mining buffer energy absorption device[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(3):620—628 (in Chinese))
- [9] 张光成,袁天祥,马德林,等. 410L 和 430L 泡沫钢性能的比较[J]. 材料研究学报, 2021, 35(8):597—605

- (ZHANG Guangcheng, YUAN Tianxiang, MA Delin, et al. Comparision of structure and performance for foamed stainless steels 410L and 430[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2021, 35(8):597—605 (in Chinese))
- [10] Chattopadhyay A P, Frink E, Xin X J, et al. Elastic buckling characteristics of triangular tubes under uniaxial loading[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 52:29—41.
- [11] Elmarakbi A, Long Y X, Macintyre J. Crash analysis and energy absorption characteristics of S-shaped longitudinal members[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 68:65—74.
- [12] 唐治, 李建民, 朱小景. 圆形薄壁构件准静态径向压缩下的吸能特性分析[J]. 材料科学与工程学报, 2016, 34(4):590—595 (TANG Zhi, LI Jianmin, ZHU Xiaojing. Analysis on energy absorption characteristics of circular thin-walled component under quasi-static radial compression [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2016, 34(4):590—595 (in Chinese))
- [13] 杨巨文, 唐治, 何峰, 等. 矿用扩径式吸能构件吸能防冲特性研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(8):134—138, 143 (YANG Juwen, TANG Zhi, HE Feng, et al. Energy absorption and anti-impact properties of mine diameter-expanding energy absorption components[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(8):134—138, 143 (in Chinese))
- [14] 唐治, 潘一山, 朱小景, 等. 六边薄壁构件径向压缩下的吸能防冲特性分析[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(11):56—61 (TANG Zhi, PAN Yishan, ZHU Xiaojing, et al. Analysis on energy absorption and impact prevention features of hexagonal thin-wall component under radial compression [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(11):56—61 (in Chinese))
- [15] 马箫, 潘一山, 肖永惠, 等. 诱导式防冲支护装置的屈曲吸能特性研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(6):42—47 (MA Xiao, PAN Yishan, XIAO Yonghui, et al. Study on buckling energy-absorption properties of induced supporting device for rock burst prevention [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(6):42—47 (in Chinese))
- [16] 郝志勇, 王率领, 潘一山. 矿用防冲折纹筒屈曲吸能特性影响研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(13):141—148, 170 (HAO Zhiyong, WANG Shuailing, PAN Yishan. Anti-impact folding barrels' buckling energy absorbing characteristics[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(13):141—148, 170 (in Chinese))
- [17] 房亮, 唐兆琛, 杨福俊, 等. 数字图像相关方法在闭孔泡沫铝压缩试验中的应用[J]. 实验力学, 2008, 23(2):162—168 (FANG Liang, TANG Zhaochen, YANG Fujun, et al. Application of digital image correlation method in compression test of closed cell aluminum foam[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(2):162—168 (in Chinese))
- [18] 张颖, 李越, 周俊鹏, 等. Q235 钢细观损伤声发射源动态观测实验研究[J]. 实验力学, 2020, 35(2):259—266 (ZHANG Ying, LI Yue, ZHOU Junpeng, et al. Experimental study on dynamic observation of acoustic emission source for mesoscopic damage of Q235 steel[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(2):259—266 (in Chinese))
- [19] 邱信明, 潘明乐, 虞晓欢, 等. 不同失效模式下轴压管状结构的吸能特性比较[J]. 力学与实践, 2016, 38(5):477—492 (QIU Xinming, PAN Mingyue, YU Xiaohuan, et al. Analysis of the energy absorption properties for tubular structure under axial compression of different failure models [J]. Mechanics in Engineering, 2016, 38(5):477—492 (in Chinese))

Experimental research on energy absorption characteristics of tubular carbon steel axial compression deformation

LÜ Xiangfeng^{1,2}, WANG Yuxiao^{1,2}, CHEN Yan³, DU Botong¹, MA Rongping¹, LI Cantian¹

(1. School of Civil and Resource Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Underground Space Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. Beijing Guodian Jingwei Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: In the process of underground coal mining, carbon steel support members absorb the energy released by surrounding rocks, which is an important way to reduce dynamic disasters. However, the law of deformation energy absorption characteristics of carbon steel support members is still unclear. In this paper, the research method combining axial compressive load, optical digital speckle and acoustic emission synchronous monitoring is used to explore the progressive buckling failure mode and deformation energy absorption characteristics of three typical carbon steel materials (Q235, Q460, Q690) under tubular axial compression. The speckle deformation field and acoustic emission energy spectrum evolution law of tubular carbon steel in the whole process of ballasting were studied, in order to reveal the intrinsic relationship between the axial compression deformation and energy absorption of tubular carbon steel. Research indicates: (1) The uranium compression deformation process of the three tubular carbon steels is divided into three stages: elastic stage, plastic stage and buckling compaction stage. (2) The deformation of Q235 tubular carbon steel under uranium compression is in the form of lateral compression and expansion, and the failure mode is “ring-type” instability mode. The axial compression of Q460 and Q690 tubular carbon steel is in the form of longitudinal bending, and the failure mode is “diamond” stable mode. (3) Comparing and analyzing the energy absorption effect of three kinds of tubular carbon steel, it can be concluded that Q460 has the best energy absorption effect. The total energy absorption value of Q235 and Q690 are 82.5% and 77.84% of that of Q460, respectively. The above research results can provide a theoretical reference for the selection of surrounding rock energy-absorbing protection steel and structure.

Keywords: tubular carbon steel; axial compression deformation; energy absorption characteristics; failure mode; experimental study