



推荐阅读:

[2025 年中国能源消费及煤炭需求预测](#)

[深部岩体力学与开采理论研究进展](#)

[煤炭开采与岩层运动](#)

[煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想](#)

煤炭开采:

[煤及共伴生资源精准开采科学问题与对策](#)

[煤矿厚煤层高强度开采技术特征及指标研究](#)

[深部煤炭资源采选充绿色化开采理论与技术](#)

[我国放顶煤开采的工程实践与理论进展](#)

[“采充并行”式保水采煤方法](#)

[特厚煤层综放开采地表沉陷预计模型算法改进](#)

[特厚煤层智能化综放开采理论与关键技术架构](#)

[煤矿“采选充+X”绿色化开采技术体系与工程实践](#)

煤岩动力灾害:

[煤矿冲击地压扰动响应失稳理论及应用](#)

[煤矿深部开采煤岩动力灾害多尺度分源防控理论与技术架构](#)

[冲击危险评价的相对应力集中系数叠加法](#)

[煤矿复合动力灾害危险性实时预警平台研究与展望](#)

[煤矿典型动力灾害风险精准判识及监控预警关键技术研究进展](#)

[基于冲击启动过程的近场围岩冲击危险性电磁波 CT 评估方法](#)

[煤矿冲击地压启动理论及其成套技术体系研究](#)

[基于变分模态分解及能量熵的微震信号降噪方法](#)

[煤矿深部开采冲击地压监测解危关键技术研究](#)



移动阅读

吴拥政,付玉凯,郑建伟. 锚杆杆体动态力学特性及应变率效应实验[J]. 煤炭学报,2020,45(11):3709-3716.

WU Yongzheng, FU Yukai, ZHENG Jianwei. Dynamic mechanical properties and strain rate effect of bolts[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3709-3716.

锚杆杆体动态力学特性及应变率效应实验

吴拥政^{1,2,3}, 付玉凯^{1,2,3}, 郑建伟^{1,2,3}

(1. 天地科技股份有限公司 开采设计事业部, 北京 100013; 2. 煤炭科学研究总院 开采研究分院, 北京 100013; 3. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013)

摘要:为了揭示在冲击载荷下锚杆支护材料动态力学特性及应变率效应,为不同震级冲击地压巷道支护设计提供参考与借鉴,达到冲击地压巷道分级防控的目的。采用实验室试验对不同冲击韧性锚杆的静态和动态力学特性进行了测试,从微-细观角度分析了不同韧性锚杆的抗冲击性能,分析了应变率大小对锚杆动态力学响应的影响规律。实验结果表明:CRM700 锚杆的冲击吸收功分别是 HRB500 和 CRM600 的 1.30 倍和 1.14 倍,峰值载荷分别是两种锚杆的 1.18 倍和 1.07 倍,瞬时变形量分别是两种锚杆的 1.33 倍和 0.91 倍;CRM700 锚杆和 HRB500 锚杆断口形态和金相组织显著不同,HRB500 锚杆断口源区为韧窝形态,中部扩展区为准解理+少量韧窝,终断区为韧窝形态,金相组织为铁素体+珠光体;而 CRM700 锚杆断口附近全部为韧窝形态,金相组织为回火索氏体+贝氏体+铁素体。同时,应变率对 HRB500 锚杆的屈服强度、抗拉强度和应变影响显著,而对 CRM600 锚杆的影响较小,对 CRM700 锚杆的影响最小。对比 3 种锚杆的动态力学特性,CRM700 锚杆的载荷曲线和冲击功曲线比较平滑,材料受到冲击载荷后呈现出缓慢断裂的特性,对冲击载荷具有良好的适应性。并且 CRM700 锚杆强度对应变率敏感性差,应变随应变率的提高显著增大,很好的适应了高应变率下的冲击载荷,在高应变率冲击载荷作用下,能通过增加瞬时变形提高吸能能力。两者晶粒度级别不同,HRB500 锚杆的晶粒度为 6 级,而 CRM700 锚杆的晶粒度为 10 级,晶粒度越高,晶粒越小,强化效果越好;同时晶粒减小后晶体界面增多,有效阻碍了裂纹的扩展,晶界面面积相应也增大,晶界上的夹杂物浓度降低,从而避免了沿晶断裂,极大提高了锚杆的抗冲击性能。晶粒尺寸越小,位错在第 2 相周围积聚的梯度越低,其锚杆力学特性应变率敏感性越弱。总之,无论从冲击载荷曲线和冲击功曲线特征,还是在应变率的敏感性方面,CRM700 锚杆均表现出对冲击载荷具有良好的适应性,其高应变率冲击载荷作用下能通过增加瞬时变形提高吸能能力。

关键词:锚杆;动态力学性能;应变率效应;冲击地压;巷道支护**中图分类号:**TD353**文献标志码:**A**文章编号:**0253-9993(2020)11-3709-08

Dynamic mechanical properties and strain rate effect of bolts

WU Yongzheng^{1,2,3}, FU Yukai^{1,2,3}, ZHENG Jianwei^{1,2,3}

(1. Coal Mining and Designing Department, Tiandi Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. Coal Mining and Designing Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to reveal the dynamic mechanical characteristics and strain rate effect of bolt support materials under impact load, so as to provide reference for the support design of different magnitude rock burst, and finally achieve

收稿日期:2019-09-29 修回日期:2019-11-25 责任编辑:常琛 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2019.1334

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974160,51804159);天地科技股份有限公司科技创新创业基金资助项目(2019-TD-MS003)

作者简介:吴拥政(1978—),男,河南修武人,研究员,博士。Tel:010-84263911, E-mail:tiandiwy@163.com

the purpose of classified prevention and control of rock burst. The static and dynamic mechanical properties of different impact toughness bolts are tested in laboratory, the impact resistance of different toughness bolts is analyzed through meso, micro-scale, and the effect of strain rate on the dynamic mechanical response of bolts is also analyzed. The results show that the impact absorbing energy of CRM700 bolt is 1.30 times and 1.14 times of HRB500 bolt and CRM600 bolt respectively, the peak load is 1.18 times and 1.07 times of the two bolts, and the instantaneous deformation is 1.33 times and 0.91 times of the two bolts. The fracture morphology and metallographic structure of CRM700 bolt and HRB500 bolt are significantly different. The fracture source area of HRB500 bolt is dimple shape, the middle expansion area is quasi cleavage+a small amount of dimple, the final fracture area is dimple shape, and the metallographic structure is ferrite+pearlite, while the fracture area of CRM700 bolt is dimple shape, and the metallographic structure is tempered sorbite+bainite+ferrite. At the same time, the strain rate has a significant effect on the yield strength, tensile strength and strain of HRB500 bolt, but has little effect on CRM600 bolt, and has the least effect on CRM700 bolt. Compared with the dynamic mechanical properties of the three kinds of bolts, the load curve and impact energy curve of CRM700 bolt are relatively smooth, and the material shows the characteristics of slow fracture after impact load, which has a good adaptability to impact load. The CRM700 bolt strength has a poor sensitivity to strain rate, while its strain increases significantly with the increase of strain rate, which is well adapted to the impact load at a high strain rate. Under the impact load at a high strain rate, the energy absorption capacity can be improved by increasing the instantaneous deformation. The grain size of HRB500 bolt is grade 6, while that of CRM700 bolt is grade 10. The higher the grain grade, the smaller the grain size and the better the strengthening effect. At the same time, the decrease of grain size results in the increase of crystal interface, which effectively hinders the crack growth, increases the crystal interface area and decreases the inclusion concentration on the grain boundary. Thus it avoids the intergranular fracture and greatly improves the impact resistance of bolt. The smaller the grain size is, the lower the gradient of dislocation accumulation around the second phase, and the weaker the sensitivity of strain rate to the mechanical properties of the bolt. In a word, no matter from the characteristics of impact load curve and impact energy curve, or in the sensitivity of strain rate, CRM700 anchor rod shows a good adaptability to impact load, which can improve energy absorption force by increasing instantaneous deformation under high strain rate impact load.

Key words: bolt; dynamic mechanical properties; strain-rate effect; rock burst; roadway support

冲击地压作为深部煤矿开采过程中常遇到的典型煤岩动力灾害,其发生的强度和频次逐步增加。冲击地压还有可能诱发诸多次生灾害,如煤与瓦斯突出、瓦斯爆炸以及突水等。冲击地压巷道围岩控制作为实现巷道防冲的重要手段之一,越来越受到国内外学者的关注^[1-3]。

与其他支护形式相比,锚杆支护对于防控巷道冲击地压具有独特的优势。冲击地压巷道对锚杆材质要求更高,既要求锚杆具有静载下的高强度,又要求具有动载荷下瞬时延伸吸能特性^[4]。在防控冲击地压巷道方面,国内外学者开展了大量的研究工作;康红普等^[1]研究了冲击地压巷道围岩变形破坏特征,提出冲击地压巷道锚杆支护原则,认为锚杆支护控制冲击地压巷道的本质在于形成支护应力场、降低应力集中程度和改善围岩受力状态;姜耀东等^[5]采用环形可收缩支架来控制巷道冲击地压;何满潮等^[6]采用横阻变形锚杆和锚索吸收冲击地压产生的能量,通过吸能减冲来减弱冲击载荷对巷道的破坏效应;潘一

山等^[7]提出了围岩-吸能材料-钢支架支护系统,通过转移围岩应力,均化围岩应力场和位移场,提高了冲击地压巷道的抗冲击能力;高明仕等^[8]提出冲击地压巷道的强弱强结构模型,分析了其防冲抗震机理;顾金才等^[9]进行了爆炸荷载条件下锚固洞室破坏形态对比试验研究;吴拥政等^[10-11]以实际发生冲击失稳的巷道为例,分析了冲击载荷作用下锚固围岩动载响应特征,对比分析了冲击载荷前后锚杆力学性能;单仁亮等^[12]采用相似模型研究了爆炸作用下锚杆的力学响应;王爱文等^[13-14]通过研究锚杆的静载-动载力学特性,揭示了防冲锚杆索的力学响应规律,认为非等强螺纹钢锚杆和防冲吸能锚索抵抗冲击破坏的能力要优于传统等强锚杆和锚索。近几年来,煤炭科学研究总院开采研究分院针对冲击地压巷道,开发了高强度、高冲击韧性热处理锚杆,研究了不同锚杆的动态力学特性和微观、宏观破断机理,提出冲击地压巷道应优先选用高强度、高冲击韧性、高延伸率的热处理材质锚杆^[15-19]。

目前,国内外学者在冲击地压巷道支护的研究集中在锚杆支护材料、防冲支架等方面,但现场应用中发现,有些支护材料适合在低冲击能量或者低应变率效应下的冲击地压巷道使用,有些材料则相反。现有研究中对锚杆支护材料动态力学特性及应变率效应的内容较少。笔者通过研究不同冲击韧性锚杆的静态和动态力学特性,从微-细观分析锚杆的抗冲击性能,研究应变率大小对锚杆动态力学响应的影响规律,以期对不同震级冲击地压巷道支护设计提供参考与借鉴,最终达到冲击地压巷道分级防控的目的。

1 锚杆静态和动态力学特性

1.1 静载荷作用下锚杆杆体力学性能

目前煤矿巷道锚杆支护用材料分为热轧和热处理两种,热轧螺纹钢锚杆钢号为 HRB400, HRB500 和 HRB600,热处理锚杆钢号为 CRM600 和 CRM700。本次试验选取冲击地压巷道支护较常用的 HRB500,CRM600 和 CRM700 三种类型,采用 JAW-1500 型试验机对 3 种锚杆的力学性能进行了测试,杆体力学性能测试结果见表 1,锚杆杆体强度-位移曲线如图 1 所示。

表 1 锚杆杆体力学性能测试结果
Table 1 Test results of bolt materials

序号	锚杆类型	强度/MPa		弹性模量/GPa	断后伸长率/%	断面收缩率/%
		屈服强度	破断强度			
1	HRB500	559	724	200	25.5	63.0
2	CRM600	650	775	203	23.5	69.5
3	CRM700	821	902	225	19.5	67.0

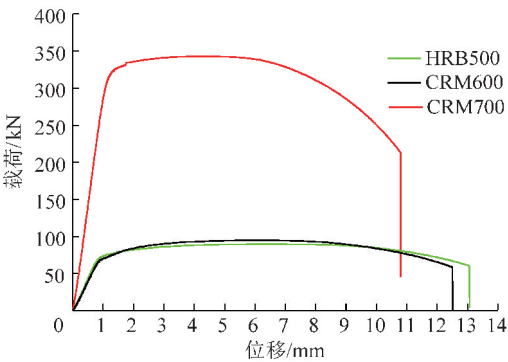


图 1 锚杆杆体载荷-位移曲线

Fig. 1 Load-displacement curves of bolt

从测试结果可以看出,3 种锚杆材料强度和断后伸长率等均满足现有国家标准的要求。随着钢号的提高,钢材的屈服强度和破断强度显著提高,而延伸

率随之降低,CRM600 锚杆的断面收缩率最大,其次是 CRM700,HRB500 最小,从断面收缩率指标来看,CRM600 锚杆和 CRM700 锚杆的韧性较好。

从锚杆强度-位移曲线来看,3 种锚杆的强度-位移曲线形态基本相同,锚杆钢号越高,峰值强度越大,破断位移越小。

1.2 冲击载荷作用下锚杆杆体力学性能分析

采用 ASME 示波冲击试验机对杆体制作的标准试样进行示波冲击,试验依据 GB2106《金属夏比(U 型缺口)冲击试验方法》测定。试样尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm,缺口深度 2 mm。通过示波冲击可以获取金属材料的最大破断力、冲击吸收功及冲击载荷曲线,3 种锚杆材料的示波冲击曲线如图 2 所示。

示波冲击结果显示,HRB500,CRM600 和 CRM700 的冲击吸收功分别为 128,145 和 166 J,CRM700 的冲击吸收功分别是 HRB500 和 CRM600 的 1.30 倍和 1.14 倍,与 HRB500 和 CRM600 相比,CRM700 锚杆钢材在冲击载荷作用下能吸收更多的能量。

从锚杆载荷实测曲线来看,3 种锚杆形态基本相同,CRM700 锚杆载荷曲线的峰值载荷最大,为 23.5 kN,HRB500 和 CRM600 的峰值载荷分别为 20 和 22 kN。CRM700 的峰值载荷是 HRB500 和 CRM600 的 1.18 倍和 1.07 倍,与其他 2 种锚杆相比,CRM700 号锚杆在冲击载荷作用下承载能力更强。

从示波冲击曲线来看,CRM700 锚杆冲击载荷下的瞬时变形量(瞬时变形量是指试样受到冲击载荷作用开始至试样完全断裂所产生的总变形)达到 20 mm,HRB500 和 CRM600 的瞬时变形量分别为 15 和 22 mm,与其他两种锚杆相比,CRM700 锚杆钢材的瞬时变形量是 HRB500 锚杆的 1.33 倍,而略小于 CRM600 锚杆。

总体来看,CRM700 锚杆的载荷实测曲线和冲击功曲线比较平滑,CRM600 次之,HRB500 最差。这主要由锚杆材质的断裂方式决定,CRM700 锚杆韧性较好,裂纹缓慢扩展后断裂,载荷曲线表现出平滑特征;HRB500 锚杆钢材产生裂纹后,出现突然断裂,载荷曲线表现为急剧跌落特征。主裂纹的扩展致使载荷曲线急剧跌落,HRB500 和 CRM600 两种锚杆材料受到冲击载荷作用后,材料断裂主要由主裂纹的扩展引起的,急剧跌落后的曲线是由次生裂纹引起的,次生裂纹扩展也能吸收少部分的能量。与前面 2 种锚杆相比,CRM700 的载荷曲线比较平滑,这说明其主裂纹和次生裂纹差别不大,裂纹扩展较均匀,吸能特性更优。

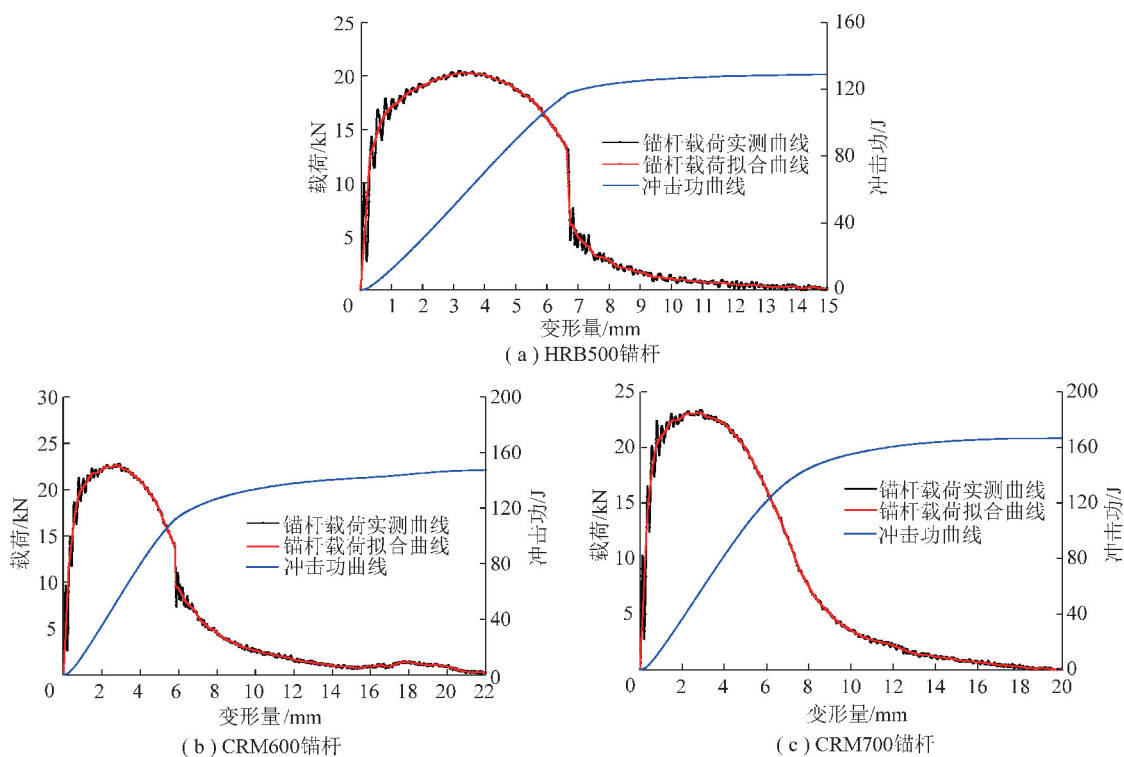


图2 锚杆示波冲击曲线

Fig. 2 Impact test curves of bolts

对比 3 种锚杆的静态和动态力学特性,CRM700 锚杆不仅能满足静载条件下巷道支护的材料要求,且强度更高,同时也能满足冲击地压巷道支护材料所要求的瞬时变形和吸能特性,CRM700 锚杆对冲击地压巷道具有较好的适应性。

1.3 锚杆断口形态和金相组织分析

委托国家钢铁材料测试中心对不同冲击韧性

锚杆材料的断口组织和金相组织进行了测试与分析,鉴于 CRM600 锚杆和 CRM700 锚杆均为热处理加工工艺制作,其断口形态和金相组织基本相同,因此,仅对 HRB500 和 CRM700 的断口组织和金相组织进行对比分析,HRB500 锚杆和 CRM700 锚杆断口形貌如图 3,4 所示,锚杆断口金相组织如图 5 所示。

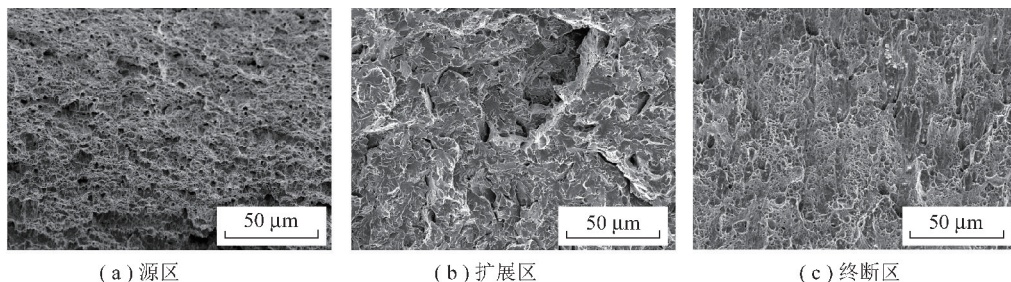


图3 HRB500 锚杆断口形貌

Fig. 3 Microscopic image of HRB500 bolt

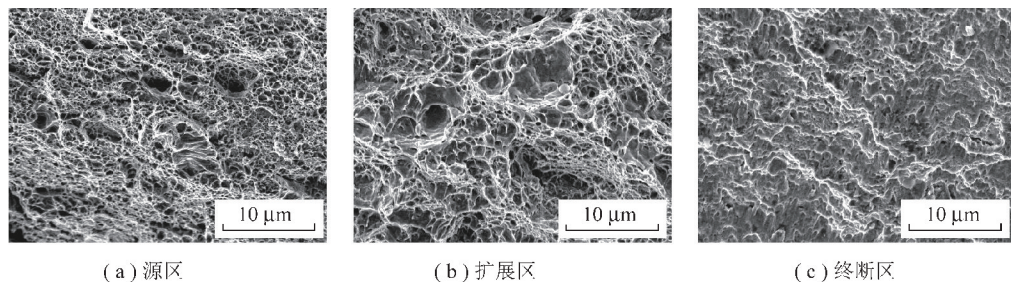
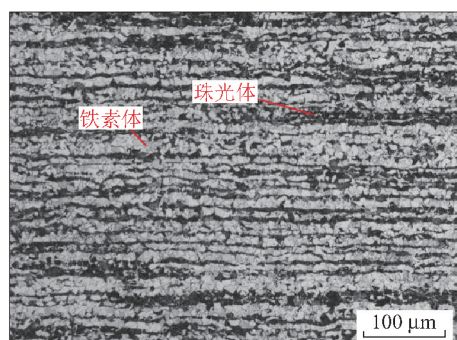
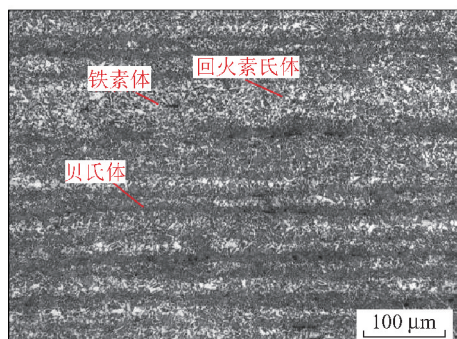


图4 CRM700 锚杆断口形貌

Fig. 4 Microscopic image of CRM700 bolt



(a) HRB500 锚杆(常温)金相组织



(b) CRM700 锚杆(常温)金相组织

图 5 锚杆断口金相组织

Fig. 5 Metallographic structure of bolt fracture

由图 3 和 4 断口形貌可以看出:HRB500 锚杆断口源区为韧窝形态,中部扩展区为准解理+少量韧窝,终断区为韧窝形态;而 CRM700 锚杆断口附近全部为韧窝形态;由图 5 可以看出,HRB500 锚杆金相组织为铁素体+珠光体,而 CRM700 锚杆金相组织为回火索氏体+贝氏体+铁素体,金相组织的差异导致两者吸收冲击能量不同。HRB500 锚杆的晶粒度为 6 级,而 CRM700 锚杆的晶粒度为 10 级。晶粒度越高,晶粒越小,强化效果越好;晶粒减小后晶体界面增多,有效阻碍了裂纹的扩展,晶界面面积相应也增大,晶界上的夹杂物浓度降低,从而避免了沿晶断裂,大大提高了锚杆的抗冲击性能。

2 应变率对锚杆力学性能的影响

煤矿井下现场监测发现,冲击地压发生后,巷道表面围岩的震动速度通常为 $0 \sim 10 \text{ m/s}$ 内,冲击速度不同,在支护材料锚杆上表现出冲击应变率不同,部分锚杆在低应变率下抗冲击能量强,反之则较弱。因此,仅采用拉伸测试和示波冲击对于分析锚杆材料的抗冲击性能有一定的局限性。开展应变率对锚杆动态力学特性和抗冲击性能的影响研究很有必要。

2.1 实验装置

3 种锚杆的室温准静态力学性能测试在 InstronF5581 万能实验机上进行,试样尺寸采用商业标

准 JIS-13B 型号尺寸,每种锚杆进行 3 次准静态拉伸试验,以确保试验结果的可重复性。

高速动态拉伸实验在拉伸装置 ZwickFHT-MF5020 上进行,试验装置如图 6 所示。在实验过程中,获取试样载荷-位移曲线(或强度-应变曲线)。

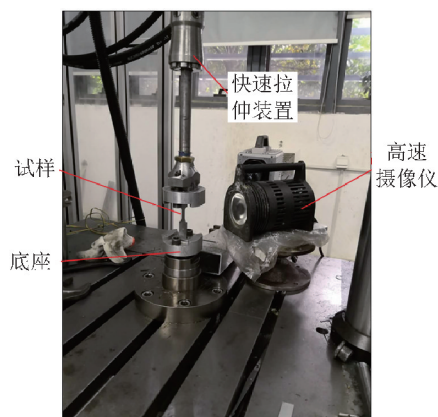
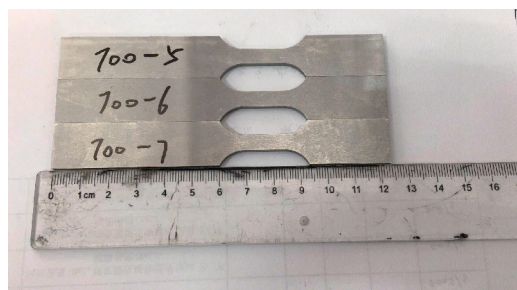


图 6 快速拉伸试验装置

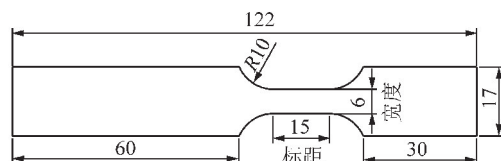
Fig. 6 High-speed tensile impact tester

2.2 试样制作及试验方案

本次实验试样采用国家标准制作,试样应保持均匀光滑以确保材料的单向应力状态,均匀部分的有效工作长度称为标距,试样的过渡部分应有适当的圆角以降低应力集中,两端的夹持部分用以传递载荷。尺寸如图 7 所示,试样工作部分长度为 15 mm ,宽度为 6 mm ,厚度为 3 mm ,标距为 15 mm ,圆角半径为 10 mm 。



(a) 700 号锚杆试样



(b) 标准拉伸试样尺寸

图 7 试样照片及其尺寸

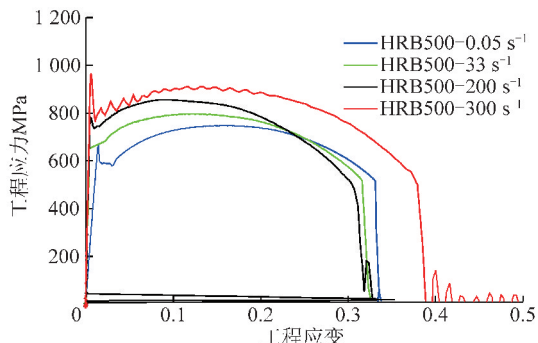
Fig. 7 Photographs and dimensions of samples

井下冲击地压所造成巷道围岩震动速度通常为 $0 \sim 10 \text{ m/s}$,所对应的应变率为 $0 \sim 600 \text{ s}^{-1}$,考虑快速拉伸试验机的应变率测试范围,本次实验所采用的试验机的拉伸应变率选为 4 种,分别为 $0.05, 33, 200,$

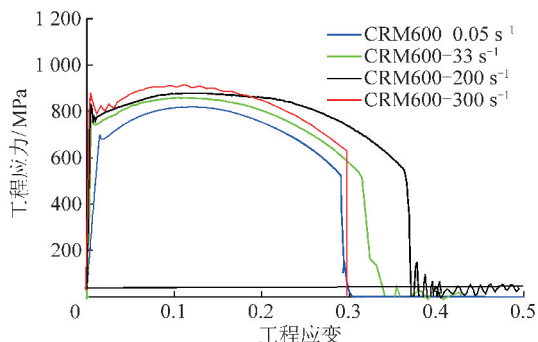
300 s⁻¹。为研究锚杆材料拉伸试样断裂模式的应变率效应,对 3 种锚杆材料各进行了 4 种应变率效应下的快速拉伸试验,每个加载速度做 3 组重复性实验。

2.3 不同应变率下锚杆力学性能分析

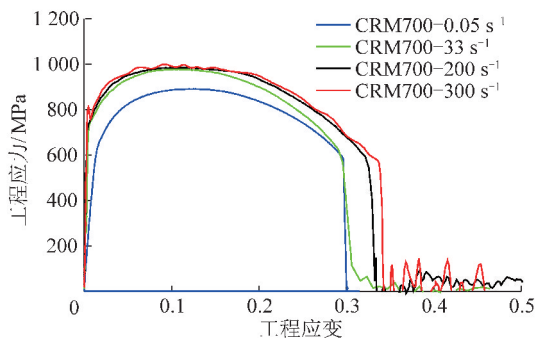
获取了 3 种锚杆在 4 种不同应变率下的拉伸工程应力-工程应变曲线,3 种锚杆的工程应力-工程应变曲线如图 8 所示。



(a) HRB500 锚杆



(b) CRM600 锚杆



(c) CRM700 锚杆

图 8 不同应变率下 3 种锚杆应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curves of three kinds bolts under different strain rates

由图 8(a)中可以看出,HRB500 锚杆在不同应变率下的应力-应变曲线形态基本相同,随着应变率的提高,HRB500 锚杆的屈服强度和抗拉强度显著提高,应变率为 0.05 s⁻¹ 时,锚杆的屈服强度和抗拉强度分别为 590 和 748 MPa,应变率为 300 s⁻¹ 时,锚杆的屈服强度和抗拉强度分别为 797 和 916 MPa,HRB500 锚杆应变率敏感性较强,应变率对其屈服强

度和抗拉强度影响较大;随着应变率的增大,锚杆的应变并不呈线性增加,而是先减小后增大的趋势,应变率为 300 s⁻¹ 时,锚杆的应变最大,达到 0.38。

由图 8(b)中可以看出,CRM600 锚杆的应力-应变曲线形态与 HRB500 锚杆的基本相同,随着应变率的提高,CRM600 锚杆的屈服强度和抗拉强度有一定提高,应变率为 0.05 s⁻¹ 时,锚杆的屈服强度和抗拉强度分别为 680 和 821 MPa,应变率为 300 s⁻¹ 时,锚杆的屈服强度和抗拉强度分别为 812 和 916 MPa,CRM600 锚杆应变率敏感性相对 HRB500 锚杆较弱,应变率对其屈服强度和抗拉强度有一定影响,但影响不大;随着应变率的增大,锚杆的应变呈现先增大后减小的趋势,应变率为 300 s⁻¹ 时,锚杆的应变最小,达到 0.29。

由图 8(c)中可以看出,CRM700 锚杆的应力-应变曲线形态与前两种锚杆基本相同,随着应变率的提高,CRM700 锚杆的屈服强度和抗拉强度比准静态下的有一定提高,但当应变率超过 33 s⁻¹ 时,其屈服强度和抗拉强度基本保持不变;随着应变率的增大,锚杆的应变呈现增大的趋势,应变率为 300 s⁻¹ 时,锚杆的应变最大,达到 0.34;应变率对 CRM700 锚杆的应力影响不大,而对其应变影响较为显著。

总体来看,3 种锚杆对应变率均有一定程度的应变率敏感性,但敏感程度不同。热处理锚杆对应变率敏感性较低,即使在高应变率下也保持了良好的延伸吸能特性,而热轧锚杆则与之相反。

2.4 应变率对锚杆延伸率和断口收缩率的影响

为了分析应变率对不同锚杆的瞬时延伸率和断口收缩率的影响,对试验后试样的延伸率和断口收缩率进行了测量,测量结果如图 9、10 所示。

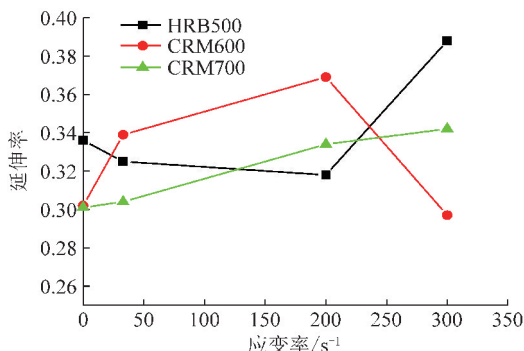


图 9 不同应变率下锚杆试样延伸率

Fig. 9 Elongation of bolt specimen at different strain rates

由图 9 中可以看出,应变率对 3 种锚杆的延伸率影响较大,HRB500 锚杆延伸率对高应变率比较敏感,而对低应变率敏感性差;CRM600 锚杆在低应变率下延伸率较大,表现出了良好的吸能特性,但在高

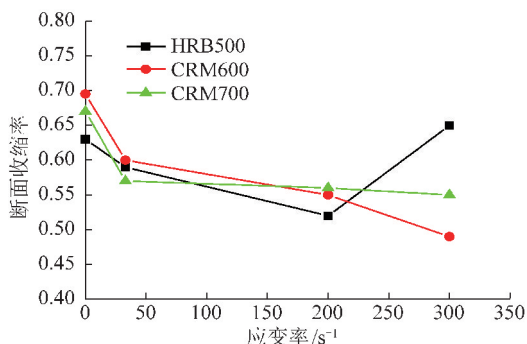


图 10 不同应变率下锚杆试样的断面收缩率

Fig. 10 Section shrinkage of bolt specimens at different strain rates

应变率下(300 s^{-1})延伸率急剧减小,影响了其吸能特性;CRM700 锚杆随着应变率的增加,其延伸率逐渐增大,对不同应变率下的冲击载荷均有良好的吸能特性。

由图 10 可以看出,应变率对 3 种锚杆试样的断面收缩率也有一定影响。HRB500 锚杆的断面收缩率随着应变率的增加先减少后增大,CRM600 锚杆和 CRM700 锚杆的断面收缩率随着应变率的增大而减小,而 CRM600 号锚杆衰减程度更快,表明其高应变率冲击下不易变形吸能,CRM700 号锚杆断面收缩率衰减程度较小,对不同应变率下的冲击载荷均有良好的适应性。

2.5 应变率对锚杆动态力学性能影响的微观作用机制

对于金属材料来说,在受到高应变率冲击载荷作用下,金相组织中大量的位错积聚在第 2 相周围,晶粒间的位错会受到抑制作用,导致金属材料屈服强度和抗拉强度随应变率的增加而提高。比如 HRB500 锚杆材料,其铁素体晶粒尺寸大,晶粒级别为 6 级,在不同的应变率冲击载荷作用下,金相组织中的铁素体内部位错在第 2 相周围积聚的梯度不同,其在力学特性上表现为屈服强度和抗拉强度对应变率敏感性较强;而对 CRM700 锚杆来说,其金相组织中的铁素体晶粒尺寸为 10 级,晶粒尺寸小,且铁素体较均匀的环境在第 2 相晶粒周围,其受到不同应变率冲击载荷作用后,金相组织中的位错积聚程度降低,力学特性表现为屈服强度和抗拉强度对应变率敏感性较弱。

3 种材料试样的断面收缩率随应变率的提高而减小,而 CRM700 锚杆的延伸率反随着应变率的提高而增加,这主要是由于在高应变率作用下,金相组织中位错在极短时间内受到极高的切应力作用,极高的切应力超过了晶粒滑移系的临界分切应力,所以晶粒会产生更大的位错滑移,大幅度提高了

材料的延伸率。

3 结 论

(1)CRM700 锚杆的冲击吸收功分别是 HRB500 和 CRM600 的 1.30 倍和 1.14 倍;峰值载荷分别是两种锚杆的 1.18 倍和 1.07 倍;瞬时变形量分别是两种锚杆的 1.33 倍和 0.91 倍。CRM700 锚杆的载荷曲线和冲击功曲线比较平滑,材料受到冲击载荷后呈现出缓慢断裂的特性,对冲击载荷具有良好的适应性。

(2)应变率对 3 种锚杆的力学特性影响规律差异较大,应变率对 HRB500 锚杆的屈服强度、抗拉强度和应变影响显著,对 CRM600 锚杆的影响较小,对 CRM700 锚杆的影响最小。CRM700 锚杆应变随应变率的提高显著增大,很好的适应了高应变率下的冲击载荷,在高应变率冲击载荷作用下,能通过增加瞬时变形提高吸能能力。

(3)锚杆动态力学特性的差异本质在于金相组织的不同,金相组织中的铁素体晶粒尺寸越大,位错在第 2 相周围积聚的梯度就越高,在力学特性表现为屈服强度和抗拉强度对应变率敏感性越强;反之,铁素体晶粒尺寸小,那么其位错积聚规律与之相反。高应变率使铁素体中位错在极短时间内受到极高的切应力作用,致使晶粒会产生更大的位错滑移,大幅度提高了材料的延伸率,从而使材料能够吸收更多的能量。

参考文献 (References):

- [1] 康红普,吴拥政,何杰,等.深部冲击地压巷道锚杆支护作用研究与实践[J].煤炭学报,2015,40(10):2225-2233.
KANG Hongpu, WU Yongzheng, HE Jie, et al. Rock bolting performance and field practice in deep roadway with rock burst[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(10): 2225-2233.
- [2] 潘一山,肖永惠,李忠华,等.冲击地压矿井巷道支护理论及应用[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.
- [3] TURNER M H, PLAYER J R. Seismicity at big bell mine[J]. Proceedings, 2000:791-797.
- [4] 付玉凯.高冲击韧性锚杆吸能减冲原理及应用[D].北京:煤炭科学研究总院,2015.
FU Yukai. Energy absorption and rockburst weakening theory for high impact toughness rock bolt and its applications[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2015.
- [5] 姜耀东,赵毅鑫,刘文岗,等.煤岩冲击失稳的机理和实验研究[M].北京:科学出版社,2009.
- [6] 何满潮,王炯,孙晓明,等.松比效应锚索的力学特性及其在冲击地压防治中的应用研究[J].煤炭学报,2014,39(2):214-

- 221.
- HE Manchao, WANG Jiong, SUN Xiaoming, et al. Mechanics characteristics and applications of prevention and control rock bursts of the negative poisson's ratio effect anchor[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(2): 214-221.
- [7] 潘一山, 吕祥锋, 李忠华. 吸能耦合支护模型在冲击地压巷道中应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 6-10.
- PAN Yishan, LÜ Xiangfeng, LI Zhonghua. The model of energy-absorbing coupling support and its application in rock burst roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(1): 6-10.
- [8] 高明仕, 窦林名, 张农, 等. 冲击矿压巷道围岩控制的强弱强力学模型及其应用分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 359-364.
- GAO Mingshi, DOU Linming, ZHANG Nong, et al. Strong-soft-strong mechanical model for controlling roadway surrounding rock subjected to rock burst and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 359-364.
- [9] 顾金才, 陈安敏, 徐景茂, 等. 在爆炸荷载条件下锚固洞室破坏形态对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1315-1320.
- GU Jincai, CHEN Anmin, XU Jingmao, et al. Model test study of failure patterns of anchored tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(7): 1315-1320.
- [10] WU Yongzheng, GAO Fuqiang, CHEN Jinyu, et al. Experimental study on the performance of rock bolts in coal burst-prone mines[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(10): 3959-3970.
- [11] 吴拥政, 陈金宇, 焦建康, 等. 冲击载荷作用下锚固围岩损伤破坏机制[J]. 煤炭学报, 2018, 43(9): 2389-2397.
- WU Yongzheng, CHEN Jinyu, JIAO Jiankang, et al. Damage and failure mechanism of anchored surrounding rock with impact loading[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(9): 2389-2397.
- [12] 单仁亮, 周纪军, 夏宇, 等. 爆炸荷载下锚杆动态响应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1540-1546.
- SHAN Renliang, ZHOU Jijun, XIA Yu, et al. Experimental investigation on dynamic response of rock bolt under blasting load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1540-1546.
- [13] 王爱文, 潘一山, 赵宝友, 等. 吸能防冲锚杆索-围岩耦合振动特征与防冲机理[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2734-2742.
- WANG Aiwen, PAN Yishan, ZHAO Baoyou, et al. Coupling vibration characteristics of rock mass and energy-absorption bolt and its anti-impact mechanism[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2734-2742.
- [14] 王爱文, 高乾书, 代连朋, 等. 锚杆静-动力学特性及其冲击适用性[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 2999-3006.
- WANG Aiwen, GAO Qianshu, DAI Lianpeng, et al. Static and dynamic performance of rebar bolts and its adaptability under impact loading[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 2999-3006.
- [15] 吴拥政, 康红普, 丁吉, 等. 超高强热处理锚杆开发与实践[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 308-313.
- WU Yongzheng, KANG Hongpu, DING Ji, et al. Development and application of ultrahigh-heat processed rock bolts[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(2): 308-313.
- [16] 林健, 吴拥政, 丁吉, 等. 冲击矿压巷道支护锚杆杆体材料优选[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 552-556.
- LIN Jian, WU Yongzheng, DING Ji, et al. Optimization of bolt rod material used in rock burst roadway bolting[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 552-556.
- [17] 付玉凯, 吴拥政, 鞠文君, 等. 锚杆侧向冲击载荷下动力响应及抗冲击机理[J]. 煤炭学报, 2016, 41(7): 1651-1658.
- FU Yukai, WU Yongzheng, JU Wenjun, et al. Response and impact mechanism of rock bolt under lateral dynamic impact load[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(7): 1651-1658.
- [18] 吴拥政, 康红普. 强力锚杆杆体尾部破断机理研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1537-1541.
- WU Yongzheng, KANG Hongpu. Failure mechanism study on tail of high strength bolt[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(9): 1537-1541.
- [19] 陈金宇, 吴拥政, 吴同性, 等. 冲击能量下锚固围岩的损伤及控制研究[J]. 中国煤炭, 2019, 45(3): 37-42.
- CHEN Jinyu, WU Yongzheng, WU Tongxing, et al. Research on damage and control of rock anchorage system under impact energy[J]. China Coal, 2019, 45(3): 37-42.