# 抗爆缓冲材料动态力学特性及微观破裂分析

吕祥锋[1, 2]，潘一山[2]，肖晓春[2, 3]

(1. 中国科学院 力学研究所，北京 100190；2. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院，辽宁 阜新 123000；
3. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室，江苏 徐州 221008)

**摘要**：采用准静态、落锤冲击和分离式霍普金森压杆(SHPB)试验研究方法，借助电镜扫描(SEM)手段，对泡沫 Al、Al-Si12 基、Al-Si6 基、泡沫 Mg 及 Al－纤维和 Al－稀土闭孔泡沫材料进行吸能特性试验研究，并讨论其微观破坏特征。准静态试验结果表明，基体材料不同，应力－应变曲线和吸能性能关系差异较大，抗压强度值最大为 5 MPa 左右。落锤冲击应力－应变和吸能特性试验结果说明，冲击载荷作用下材料抗压强度提高较大，最高可达 15 MPa，吸能值最大达 29 J。SHPB 试验结果得出缓冲吸能性能良好的泡沫材料参数以密度为 0.35～0.70 g/cm$^3$，孔隙度为 65%～87%，孔径为 1.0～4.0 mm 为宜。静态与冲击试验微观破坏结果均说明泡沫 Al 材料具有明显的撕裂痕迹，表现出韧性断裂特征。与准静态试验结果相比，冲击速度增大后，材料强度和吸能性能得到更好发挥，泡沫 Al 材料吸能值最大，变形空间较大，更适合用于防冲吸能支护材料。相似模拟试验结果表明，锚杆支护、U 型钢支护巷道都存在不同程度的冲击变形或破坏，防冲支护巷道发生冲击后整体性较好。

**关键词**：采矿工程；闭孔泡沫金属材料；动态力学特性；吸能性能；微观破裂形貌；防冲支护
**中图分类号**：TD 353 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－6915(2012)增 1－2821－08

# ANALYSIS OF DYNAMIC MECHANICAL PROPERTIES AND MICROCOSMIC RUPTURE OF ANTI-EXPLOSION BUFFER MATERIALS

LU Xiangfeng[1, 2]，PAN Yishan[2]，XIAO Xiaochun[2, 3]

(1. *Institute of Mechanics*，*Chinese Academy of Sciences*，*Beijing* 100190，*China*；2. *School of Mechanics and Engineering*，*Liaoning Technical University*，*Fuxin*，*Liaoning* 123000，*China*；3. *State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering*，*China University of Mining and Technology*，*Xuzhou*，*Jiangsu* 221008，*China*)

**Abstract**：The energy absorption property of closed-cell foam metals with matrix Al，matrix Al-Si12，matrix Al-Si6，matrix Mg，matrix Al-fiber and matrix RE-Al alloys are investigated by the compression，impact and split Hopkinson pressure bar(SHPB) test. And the micro-mechanics failure mechanism of closed-cell foam metals is discussed. Quasi-static experiment results show that the mechanical properties of different foam metals are different，and the maximum of compressive strength is about 5 MPa. Impact test results indicate that the maximum of compressive strength and absorbing energy value are about 15 MPa and 29 J，respectively. The closed-cell foam metals exhibit good energy-absorption ability on the optimal conditions that density is 0.35－0.70 g/cm$^3$，porosity is 65%－87% and pore diameter is 1.0－4.0 mm. The micro-morphology of closed-cell foam metal with matrix Al is obvious tear trace，indicating that it has toughness characteristics. Compared with quasi-static experiment results，closed-cell foam metals with matrix Al is good for energy absorption materials because of its high

**收稿日期**：2011－07－16；**修回日期**：2011－08－22
**基金项目**：国家重点基础研究发展计划(973)项目(2010CB226803)；国家自然科学基金面上项目(51174107)；中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGDUEK1010)
**作者简介**：吕祥锋(1982－)，男，2011 年于辽宁工程技术大学工程力学专业获博士学位，现为在站博士后，主要从事深部煤岩体变形破坏规律及抗爆材料防冲支护方面的研究工作。E-mail：lvxiangfeng2006@126.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

absorbing energy value and deformation. Similar experimental results show that bolt and U steel support roadway have impact deformation or damage，and the blunt support roadway is better in integrity.

**Key words**：mining engineering；closed-cell foam metal；dynamic mechanical properties；energy absorption ability；microcosmic rupture morphology；rockburst prevention support

## 1　引　言

随着深井采矿、深埋隧道和硐室等人类活动的不断深入地下[1]，“三高”地质环境更加突出，冲击型动力现象发生频次和破坏程度也愈加强烈[2]，造成支护整体失稳破坏[3]，给人民生命、财产和生产安全带来极大危害，亟待在抗爆缓冲支护[4]材料方面做出重大突破。

泡沫材料是一种新型结构和功能材料，具有良好的缓冲和吸能特性，近些年来引起了材料科学和力学科研工作者的极大关注，并得到了较快的发展。国内外学者在泡沫材料的制备工艺和力学行为方面开展了一些研究工作，如 L. J. Gibson 和 M. F. Ashby[5]对泡沫材料的结构和性能进行了初步的研究；J. Banhart[6]对泡沫材料结构、力学性能及应用方面进行了理论和试验研究；K. Y. G. McCullough 等[7]对 Al-Mg1-Si6 和 Al-Mg1-Si10 的准静态压缩性能进行了研究；Z. X. Lu 和 Y. Guo[8]对金属泡沫材料压缩力学行为进行了概述，讨论了材料的能量吸收特性；郭刘伟等[9-11]对泡沫材料的力学行为也开展了许多研究工作，取得了较好的研究成果。但国内外对不同基体成分泡沫金属材料[12-15]冲击作用下吸能性能研究较少，静态压缩和冲击吸能[16-18]机制还不完全清晰。

利用静态压缩、落锤冲击和 SHPB 试验方法，借助电镜扫描技术，对不同基体成分的闭孔泡沫铝进行静态压缩和冲击吸能性能试验，研究不同闭孔泡沫铝材料的动态力学特性和微观破裂特征，分析不同材料参数对泡沫材料动态力学性能的影响，研究结果为抗爆缓冲支护[19-20]材料基体成分和参数的选择提供依据，具有重要的理论研究意义和应用价值。

## 2　试验装置和材料

### 2.1　试验装置

采用电子万能试验机(5567 型)和落锤冲击试验机(9250HV 型)分别进行准静态和落锤冲击试验。电子万能试验机最大试验力为 100 kN，压缩速率为 3 mm/min；落锤冲击试验机落锤高度为 1.25 m(除试验夹具和落锤之外)，落锤质量为 2～15 kg，冲击速度为 1.5～20.0 m/s，冲击能量为 2.6～826.0 J，满足试验要求。对闭孔泡沫铝材料进行准静态和冲击试验，分别测得材料应力－应变关系、吸能值和吸能能力关系。落锤冲击试验装置如图 1 所示。

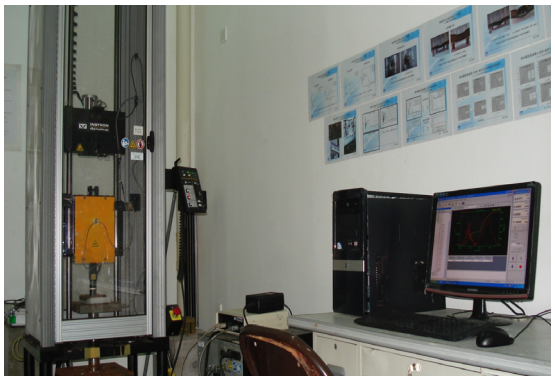


图 1　落锤冲击试验装置

Fig.1　Experimental device of concussion

### 2.2　试验材料

试验中，选择泡沫 Al、Al-Si12 基、Al-Si6 基、泡沫 Mg 及 Al-纤维和 Al-稀土闭孔泡沫材料。其中，泡沫 Al、Al-Si12 基、Al-Si6 基、泡沫 Mg 及 Al－纤维和 Al－稀土闭孔泡沫材料具有相同的尺寸($\phi$ 30 mm×40 mm)、密度(0.5 g/cm$^3$)和孔隙度(75%)。泡沫材料金属实物如图 2 所示。

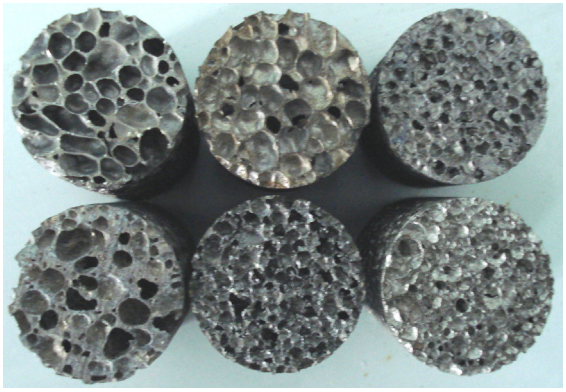


图 2　泡沫金属材料实物图

Fig.2　Foam metals materials

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

## 3 试验结果与分析

### 3.1 动态压缩试验分析

根据试验结果可以看出，不同的泡沫材料，其压缩应力－应变曲线特征有很大的差异。泡沫 Al 材料压缩应力－应变曲线 3 个阶段特征较明显，且曲线较光滑，说明在压缩变形过程中材料表现为较好的韧性，材料破坏属于典型的塑性断裂破坏特征。Al-Si12 基和 Al-Si6 基泡沫材料压缩应力－应变关系曲线表现为明显的波折，尤其对于 Al-Si12 基泡沫材料应力－应变曲线起伏很大，且压缩变形三阶段不明显，在出现突跳后应力急剧降低，也即没有出现平台变形阶段，说明材料在达到屈服强度后孔壁发生脆性破坏。泡沫 Mg 材料应力－应变曲线特征与 Al-Si6 基泡沫材料相似，在弹性变形后，材料经历了较长的跳落区，平台阶段较短，说明材料韧性也较差，压密后材料强度提高较小就进入了破坏阶段，孔壁受力集中，超过材料屈服强度而迅速破裂。Al－纤维和 Al－稀土泡沫材料压缩应力－应变曲线变现特征与 Al-Si6 基泡沫材料也相似，其平台阶段较长，说明合金材料韧性增强，孔壁压缩变形较大，但这 2 种材料均未出现明显的致密增强阶段，孔壁变形在弹性阶段，应力集中，孔壁破碎造成材料整体破坏。

图 3 给出了闭孔泡沫材料压缩应力－应变曲线，由对比结果分析可知，基体材料不同，应力－应变曲线存在很大差异，抗压强度最大在 5 MPa 左右。泡沫 Al 材料的曲线较光滑，3 个阶段较明显，应力呈显著上升趋势，说明泡沫 Al 材料具有良好的压缩变形吸能特性，其破坏表现为塑性泡沫材料特征。其他几类材料应力－应变曲线起伏较大，且 3 个阶段特征不太明显，破坏表现为孔壁破碎，材料突然断裂破坏，压缩变形性能相比泡沫 Al 材料要差。

### 3.2 冲击吸能特性分析

从冲击应力－应变曲线和冲击吸能曲线结果可知，在冲击载荷[13, 15, 17]作用下，闭孔泡沫材料应力－应变关系曲线均表现出明显的弹性阶段，也即该材料在一定的压力范围内存在可恢复变形，对于实际工程中材料的可重复使用具有实际意义。同时，在应力－应变关系曲线上强度达到峰值后会出现明显的下降，是由于材料孔壁受力断裂或破碎所致，Al-Si12 基泡沫材料强度值最大，下降幅度也最大，说明此材料在冲击作用下极易发生孔壁破碎和材料整体塌落失效。Al-Si6 基泡沫材料和泡沫 Mg 材料的应力－应变关系曲线特征相似，材料强度降低幅值较小，曲线也较平缓，但吸能值较小，不适合用于吸能材料。Al－纤维和 Al－稀土泡沫材料强度较低，吸能量也较小，同样不适合用作吸能材料。通过闭孔泡沫材料的冲击应力－应变关系曲线和冲击吸能特性曲线可知，闭孔泡沫材料应变值较大，能提供较大的变形量，吸能性能较好，更适合用于吸能材料。

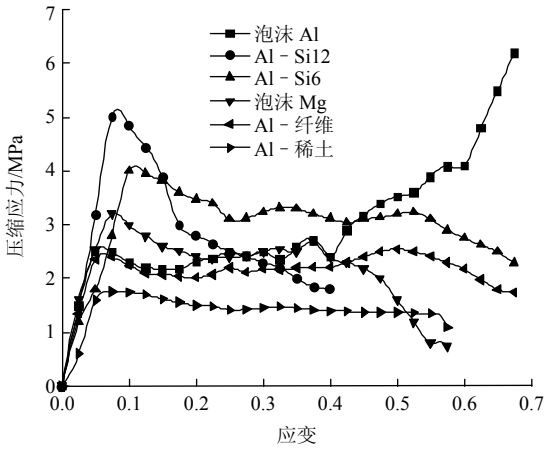



图 3　闭孔泡沫材料压缩应力－应变曲线

Fig.3　Compression stress-strain curves of closed-cell foams

图 4 给出了闭孔泡沫材料应力－应变曲线，对比曲线可知，Al-Si12 基泡沫材料强度值最大，下降幅度也最大；Al－纤维和 Al－稀土泡沫材料曲线平台较大，但材料强度低；Al-Si6 基泡沫材料和泡沫 Mg 材料强度适中，但冲击曲线短，吸能值小，极易发生冲击破坏；泡沫 Al 材料强度值较大，曲线平台段也较长，且峰值后降低幅度不大，更适合于作为吸能材料。

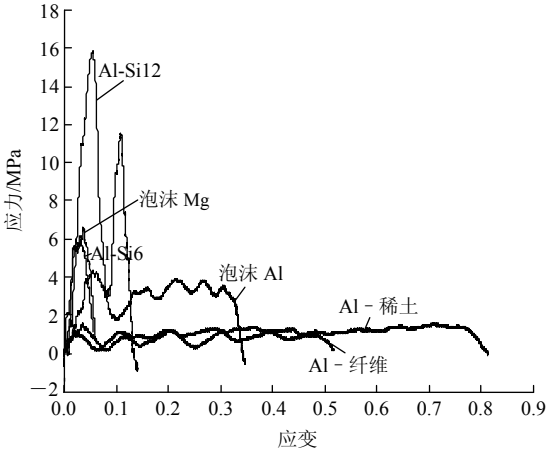



图 4　闭孔泡沫材料应力－应变曲线(冲击试验)

Fig.4　Stress-strain curves of closed-cell foams(impact test)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 5 为闭孔泡沫铝材料吸能特性对比曲线，由图可知，泡沫 Al 材料吸能值最大，应变值也较大，适合用于提供大变形和吸收冲击能的材料；Al-Si12 基泡沫材料吸能值也较大，原因是冲击作用下 Al-Si12 基泡沫材料抗压强度大幅度提高，但应变值较小，不适合用于缓冲材料；其他各材料吸能值较小，应变值也较小，相比较也不满足大变形和高吸能作用的材料。

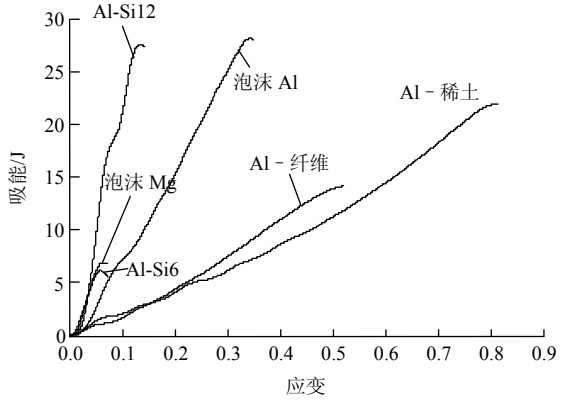



图 5　闭孔泡沫材料吸能特性曲线

Fig.5　Absorbing characteristic curves of closed-cell foams

与准静态条件下试验结果相比，冲击载荷作用下，材料抗压强度提高较大，最高可达 15 MPa，吸能性能增强，试验得最大吸能量达 29 J，说明随着冲击速度的提高，材料的强度和吸能性能得到更好的发挥，但要应用到现场中还需要做材料的二次结构[19]，以提高其抗压强度。

### 3.3　材料参数对泡沫材料动态力学性能的影响分析

材料尺寸均为$\phi$30 mm×15 mm，选择材料密度(0.35，0.55 和 0.70 g/cm$^3$)、孔隙度(65%，75%和 87%)及孔径(1.0，2.5 和 4.0 mm)的 Al-Si6 基闭孔泡沫材料，在相同应变率(1.0×10$^2$ s$^{-1}$)条件下进行 SHPB 试验。

图 6 给出了不同密度泡沫材料应力－应变曲线。当密度为 0.35 g/cm$^3$ 时，材料抗压强度较小，且应力峰值后下降幅值较大，说明在冲击作用下材料孔壁易发生破裂，导致材料整体破坏，抵抗冲击载荷能力较差。当密度为 0.55 g/cm$^3$ 时，材料抗压强度大幅度提高，抗冲击性能较好。当密度为 0.70 g/cm$^3$ 时，材料抗压强度降低，其数值介于前 2 种材料之间，但材料应变值较小，不宜用于让位缓冲材料。对比试验结果可知，当材料密度为 0.55 g/cm$^3$ 时，应力－应变曲线上应力值较大，应变值也较大，此密度材料提供变形空间较大，抗冲击[20]能力较高，吸能材料密度为 0.35～0.70 g/cm$^3$ 较好。

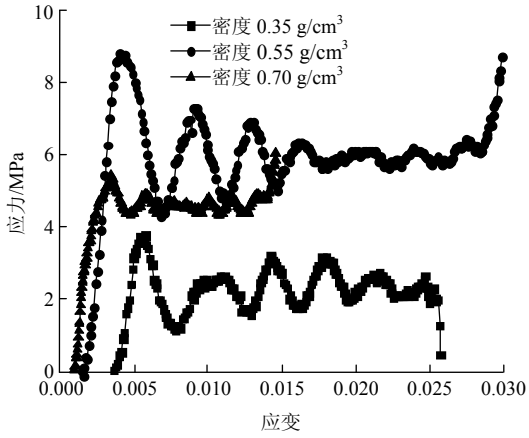



图 6　不同密度 Al-Si6 基泡沫材料应力－应变曲线

Fig.6　Stress-strain curves of matrix Al-Si6 foam metals under different densities

图 7 不同孔隙度泡沫材料应力－应变曲线。当孔隙度为 65%时，材料抗压强度较低，但应力峰值后下降幅值较小，材料整体强度较低，而孔壁稳定性较好。当孔隙度为 75%时，材料抗压强度可达 30 MPa 左右，材料应变值也较大，可用作缓冲吸能材料。当孔隙度为 87%时，材料抗压强度值降低，应力峰值后降低幅值更大，材料抗冲击作用减弱。对于不同孔隙度的泡沫材料，当材料孔隙度为 75%时，应力－应变曲线上应力值较大，应变值也较大，抗冲击能力较高，大幅增大或减小孔隙度都会影响材料的缓冲性能，选择孔隙度为 65%～87%为宜。

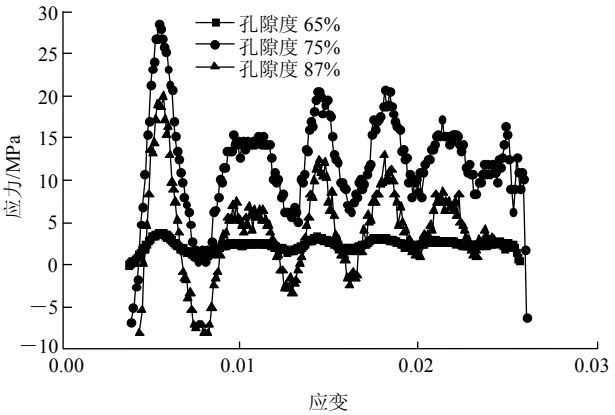



图 7　不同孔隙度 Al-Si6 基泡沫材料应力－应变曲线

Fig.7　Stress-strain curves of matrix Al-Si6 foam metals under different porosity foams

图 8 给出了不同孔径材料应力－应变曲线。当孔径为 1.0 mm 时，材料抗压强度值较大，达到 22 MPa 左右，但峰值后降低幅度较大，极易在孔壁发生破裂或材料表面破坏，材料抗冲击作用较差。当孔径为 2.5 mm 时，材料抗压强度值提高至 30 MPa

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

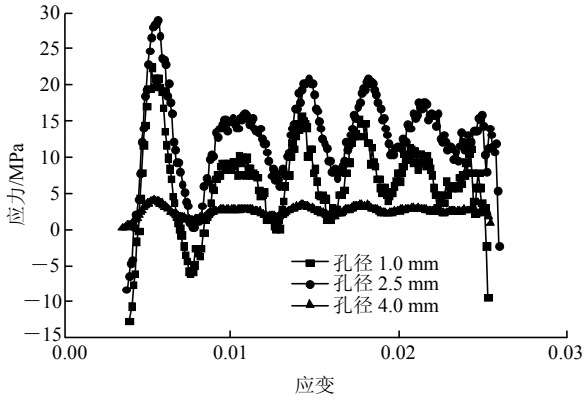



图 8　不同孔径 Al-Si6 基泡沫材料应力－应变曲线

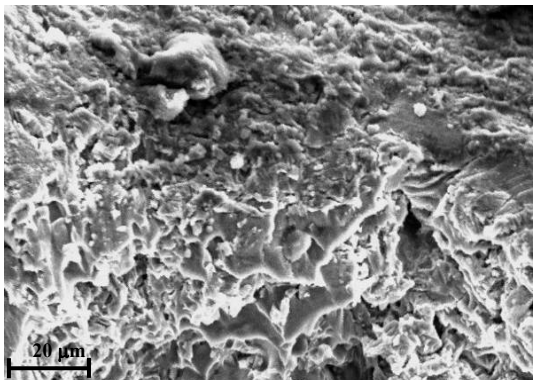
Fig.8　Stress-strain curves of matrix Al-Si6 foam metals under different pore diameters

左右，且应力峰值后降低幅值减小，应变值也较大，抗冲击能力提高。当材料孔径增加至 4.0 mm 时，抗压强度值大幅度降低，孔壁易发生破裂，不适合用作缓冲吸能材料。对比试验结果可知，当材料孔径为 2.5 mm 时，应力值最大，且峰值后下降幅值较小，应变值较大，此材料具备较大变形空间，抗冲击能力强，增大或减小孔径都会对其缓冲吸能性能产生影响，吸能材料孔径为 1.0～4.0 mm 较好。

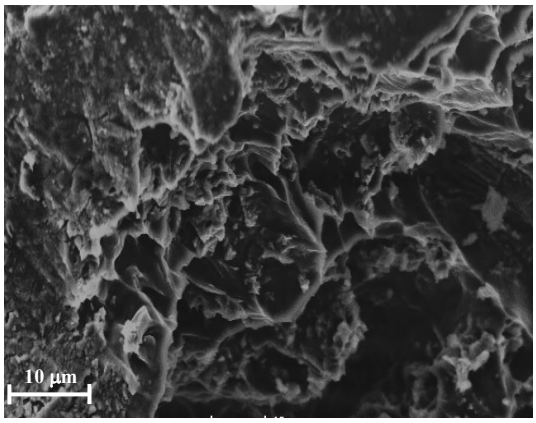
### 3.4　微观形貌分析

由准静态试验结果电镜扫描(SEM)断口微观形貌可知，泡沫 Al 材料表现出被撕裂破坏的痕迹(见图 9(a))，说明泡沫 Al 材料具有良好的韧性，压缩易产生足够的变形，破坏过程也是在强外力作用下发生的撕裂破坏。对于 Al-Si6 基和 Al-Si12 基泡沫材料，其破坏表现为明显的脆性破坏特征，出现较多尖端，且棱角突出(见图 10(a)和 11(a))，说明 Al-Si6 基和 Al-Si12 基泡沫材料脆性特征明显。泡沫 Mg 材料的微观扫描结果说明，泡沫 Mg 材料的断裂面也表现出一定的脆性破坏特征，出现较多尖端和破碎片(见图 12(a))。Al－纤维和 Al－稀土泡沫材料的电镜扫描微观破裂面(见图 13(a)和 14(a))表明，在孔壁上表现为明显的脆性断裂特征，同样出现较齐的尖端和节理断裂。

由图 9(b)可知，在断口微观扫描形貌上也可看出，破裂处形成很多的“尖牙”状，说明泡沫 Al 材料破裂是在拉应力作用下被撕裂破坏。图 10(b)和 11(b)分别表示 Al-Si12 基和 Al-Si6 基泡沫材料断口电镜扫描结果，断口微观形貌上出现较多的块状断面，且棱角突出，并伴有很多的破碎颗粒，这说明 Al-Si12 基和 Al-Si6 基泡沫材料冲击破坏脆性特



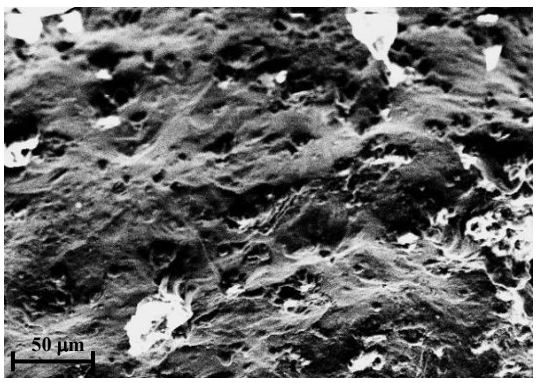

(a) 准静态试验微观形貌



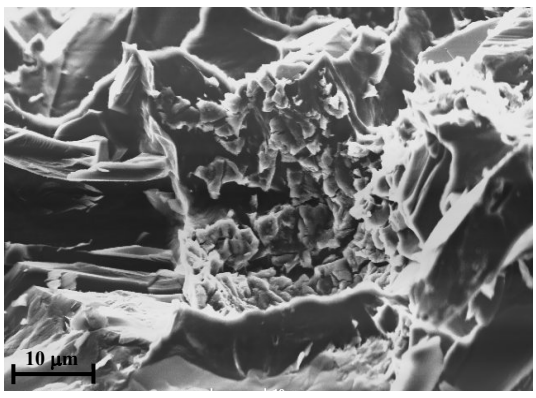

(b) 冲击试验微观形貌

图 9　闭孔泡沫铝破裂微观形貌

Fig.9　Microcosmic morphology of closed-cell matrix Al foam metal




(a) 准静态试验微观形貌

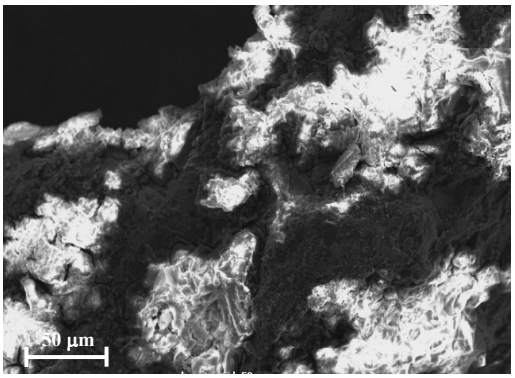



(b) 冲击试验微观形貌

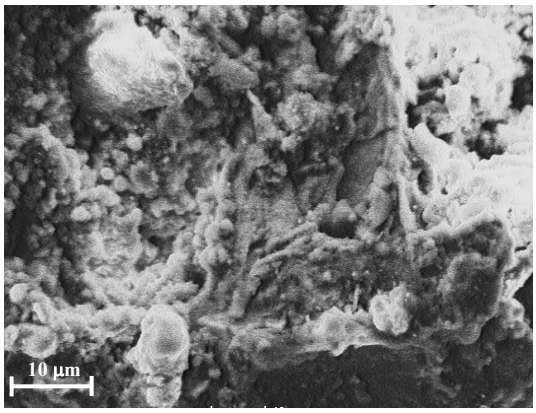
图 10　闭孔 Al-Si12 基泡沫材料破裂微观形貌

Fig.10　Microcosmic morphology of closed-cell Al-Si12 foam metal

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



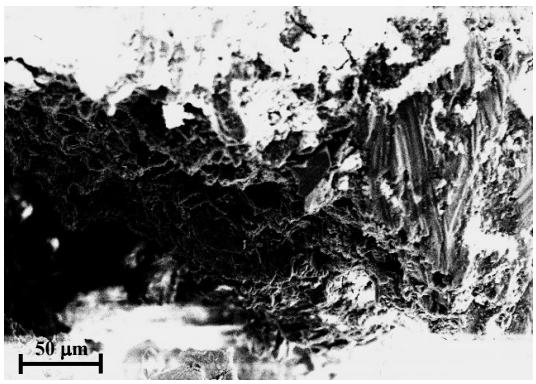

(a) 准静态试验微观形貌



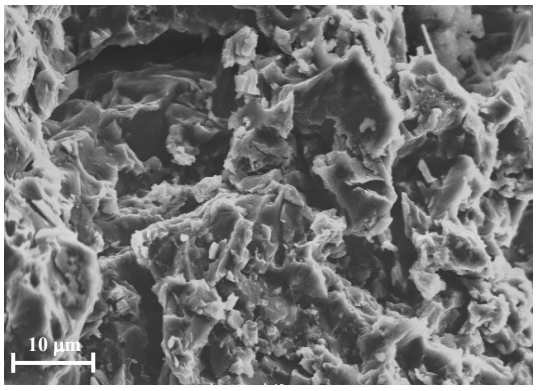

(b) 冲击试验微观形貌

图 11　闭孔 Al-Si6 基泡沫材料破裂微观形貌

Fig.11　Microcosmic morphology of closed-cell Al-Si6 foam metal



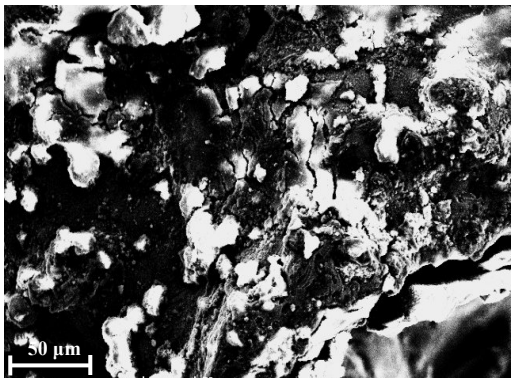

(a) 准静态试验微观形貌



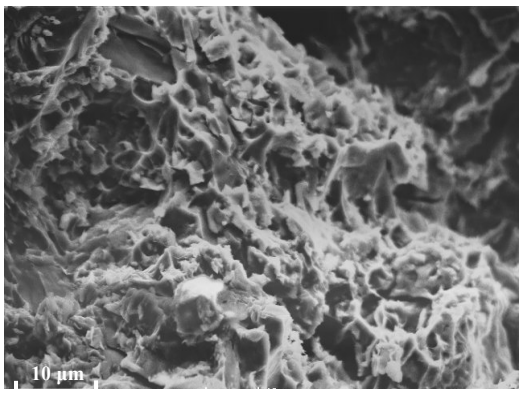

(b) 冲击试验微观形貌

图 12　闭孔泡沫 Mg 材料破裂微观形貌

Fig.12　Microcosmic morphology of closed-cell matrix Mg foam metal



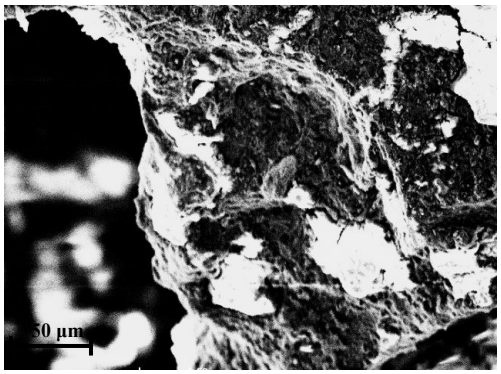

(a) 准静态试验微观形貌



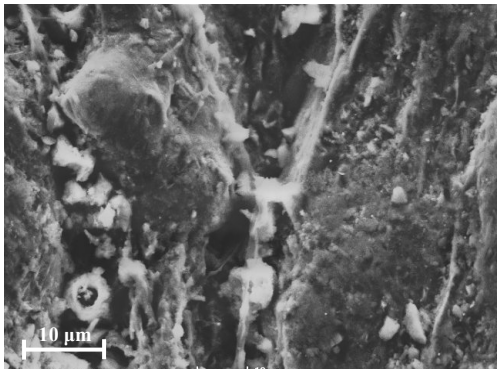

(b) 冲击试验微观形貌

图 13　闭孔 Al－纤维泡沫材料破裂微观形貌

Fig.13　Microcosmic morphology of closed-cell Al-fiber foam metal




(a) 准静态试验微观形貌




(b) 冲击试验微观形貌

图 14　闭孔 Al－稀土泡沫材料破裂微观形貌

Fig.14　Microcosmic morphology of closed-cell RE-Al foam metal

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

征明显。根据泡沫 Mg 材料电镜扫描结果(见图 12(b))可知，断口微观形貌中可以看出，泡沫 Mg 材料断裂面处出现明显的尖端，且棱角突出，均说明泡沫 Mg 材料脆性破坏特征更明显。Al－纤维和 Al－稀土泡沫材料电镜扫描结果(见图 13(b))表明，从断口微观形貌中可以看出，在断裂面上有微弱的拉断撕裂痕迹，说明 Al－纤维泡沫材料在冲击作用下表现出一定的韧性断裂特征，但材料强度较低，发生突然整体破坏。图 14(b)为 Al－稀土泡沫材料电镜扫描结果，断口微观形貌中出现齐整的尖端和节理断裂，说明 Al－稀土泡沫材料在冲击作用下突然发生断裂破坏。

静态压缩与冲击试验电镜扫描结果对比可知，在冲击载荷作用下泡沫铝材料韧性破坏特征明显，Al-Si12 基和 Al-Si6 基泡沫材料脆性破坏也较突出，泡沫 Mg 材料强度较高但脆性破坏明显，Al－纤维泡沫材料表现出一定的韧性断裂特征，但强度较低，Al－稀土泡沫材料容易发生脆性破坏。

## 4　防冲支护试验初探

冲击地压发生时会释放大量的冲击能，是否能研制出一种防冲支护结构，可把冲击地压释放的冲击能吸收至最小，同时把冲击力缓冲至最低，这样就有望最大程度的降低冲击地压等动力灾害。

目前，冲击地压巷道主要采取强力支护手段，尽量的延缓冲击地压的发生，但是，一旦冲击发生后却不能降低其破坏程度，可能导致更大的灾害发生。因此，在降低和减缓冲击地压等动力灾害的支护方面，可以考虑使用强力支护与吸能材料组成的刚－柔耦合支护结构。在煤矿开采中，巷道支护首先要提供较高的支架支撑力，满足现场工作的要求，同时在支架[20]上设置吸能材料，一旦冲击型动力灾害发生，吸能材料可吸收冲击能，强力支架也会消耗一部分能量，冲击地压灾害就可以得到降低。

为了对比不同支护的效果，在实验室制备了相似材料模型，在其中挖出一个矩形巷道，在模型的上端进行应力加载，模拟冲击破坏的发生，分别模拟了锚杆支护、U 型钢支护和防冲支护(巷道衬砌吸能材料加强力支护)的支护手段，从图 15 可以发现，锚杆支护、U 型钢支护巷道发生冲击破坏后，都存在不同程度的变形或破坏，而防冲支护巷道发生冲击后整体性较好。

(a) 锚杆支护

(b) U 型钢支护

(c) 防冲支护

图 15　不同支护巷道冲击破坏结果

Fig.15　Impact failure results of different supports

## 5　结　论

对泡沫 Al、Al-Si12 基、Al-Si6 基、泡沫 Mg 及 Al－纤维和 Al－稀土泡沫材料进行了动态力学和吸能特性试验研究，并开展了不同支护巷道冲击破坏试验初探，得到主要结论如下：

(1) 不同的闭孔泡沫材料，应力－应变曲线和吸能能力关系差异较大，抗压强度值为 5 MPa 左右；冲击载荷作用下材料抗压强度值最高可达 15 MPa 左右，吸能值最大达 29 J；SHPB 试验中材料抗压强度值可增加至 30 MPa 左右。

(2) SHPB 试验结果表明，缓冲吸能性能良好的泡沫材料参数以密度为 0.35～0.70 g/cm$^3$，孔隙度为 65%～87%，孔径为 1.0～4.0 mm 为宜。

(3) 静态与冲击试验电镜扫描结果均说明了泡

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

沫 Al 材料破坏具有明显的撕裂痕迹，表现出韧性断裂特征。

(4) 随着冲击速度的增大，材料强度和吸能性能得到更好发挥，泡沫 Al 材料吸能值和变形较大，更适合用于防冲吸能支护材料。对比不同支护巷道冲击结果可知，锚杆、U 型钢支护巷道都存在不同程度的变形或破坏，防冲支护巷道发生冲击后整体性较好。

## 参考文献(References)：


[1] 何满潮，谢和平，彭苏萍，等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(16)：2 803－2 813.(HE Manchao，XIE Heping，PENG Suping，et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2005，24(16)：2 803－2 813.(in Chinese))

[2] 窦林名，陆菜平，牟宗龙，等. 冲击矿压的强度弱化减冲理论及其应用[J]. 煤炭学报，2005，30(6)：690－694.(DOU Linming，LU Caiping，MU Zonglong，et al. Intensity weakening theory for rockburst and its application[J]. Journal of China Coal Society，2005，30(6)：690－694.(in Chinese))

[3] 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.(in Chinese))

[4] 孙晓明，何满潮. 深部开采软岩巷道耦合支护数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报，2005，34(2)：166－169.(SUN Xiaoming，HE Manchao. Numerical simulation research on coupling support theory of roadway within soft rock at depth[J]. Journal of China University of Mining and Technology，2005，34(2)：166－169.(in Chinese))

[5] GIBSON L J，ASHBY M F. Cellular solids：structure and properties[M]. Cambridge：Cambridge University Press，1997：113.

[6] BANHART J. Manufacture，characterization and application of cellular metals and metal foams[J]. Progress in Material Science，2001，46(6)：559－632.

[7] MCCULLOUGH K Y G，FLECK N A，ASHBY M A. Uniaxial stress-strain behaviour of aluminum alloy foams[J]. Acta Materialia，1999，47(8)：2 323－2 330.

[8] LU Z X，GUO Y. Brief review of studies on the mechanical behavior of metallic foams[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2003，29(11)：978－983.

[9] 郭刘伟，虞吉林. 泡沫铝夹芯双方管结构准静态轴压性能的试验研究[J]. 实验力学，2010，25(3)：271－278.(GUO Liuwei，YU Jilin. Experimental investigations on the quasi-static axial crushing of foam-filled double square columns[J]. Journal of Experimental Mechanics，2010，25(3)：271－278.(in Chinese))

[10] 刘耀东，虞吉林，郑志军. 惯性对多孔金属材料动态力学行为的影响[J]. 高压物理学报，2008，22(2)：118－124.(LIU Yaodong，YU Jilin，ZHENG Zhijun. Effect of inertia on the dynamic behavior of cellular metal[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics，2008，22(2)：118－124.(in Chinese))

[11] 寇东鹏，虞吉林，郑志军. 随机缺陷对蜂窝结构动态行为影响的有限元分析[J]. 力学学报，2009，41(6)：859－868.(KOU Dongpeng，YU Jilin，ZHENG Zhijun. Effect of randomly removing cell walls on the dynamic crushing behavior of honeycomb structures[J]. Acta Mechanica Sinaca，2009，41(6)：859－868.(in Chinese))

[12] 张　健，赵桂平，卢天健. 闭孔泡沫铝应变率效应的试验和有限元分析[J]. 西安交通大学学报，2010，44(5)：97－101.(ZHANG Jian，ZHAO Guiping，LU Tianjian. Experimental and numerical study on strain rate effects of close-celled aluminum foams[J]. Journal of Xi′an Jiaotong University，2010，44(5)：97－101.(in Chinese))

[13] TAN P J，REID S R，HARRIGAN J J，et al. Dynamic compressive strength properties of aluminum foams：part Ⅱ——“shock” theory and comparison with experimental data and numerical model[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids，2005，53(10)：2 206－2 230.

[14] JEON I，ASAHINA T. The effect of structural defects on the compressive behavior of closed-cell A1 foam[J]. Acta Materialia，2005，53(12)：3 415－3 423.

[15] MUKAI T，KANAHASHI H，YAMADA Y，et al. Dynamic compressive behavior of an ultra-lightweight magnesium foam[J]. Scripta Materialia，1999，41(4)：365－371.

[16] 陈　利，刘春雷，张庆明，等. 闭孔泡沫镁材料静动态压缩力学性能与吸能特性[J]. 兵工学报，2009，30(增 2)：197－202.(CHEN Li，LIU Chunlei，ZHANG Qingming，et al. Mechanical properties and energy absorption characteristic of magnesium foam under static and dynamic compression[J]. Acta Armamentarii，2009，30(Supp.2)：197－202.(in Chinese))

[17] WANG Z H，MA H W，ZHAO L M，et al. Studies on the dynamic compressive properties of open-cell aluminum alloy foams[J]. Scripta Materialia，2006，54(1)：83－87.

[18] 索　涛，邓　琼，苗应刚，等. 基于 Hopkinson 压杆试验技术的含能材料动态力学性能测试方法研究进展[J]. 火炸药学报，2010，33(2)：5－8.(SUO Tao，DENG Qiong，MIAO Yinggang，et al. Progress in experimental determination of dynamic mechanical behaviors of energetic materials based on split Hopkinson pressure bar[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants，2010，33(2)：5－8.(in Chinese))

[19] 杨　益，李晓军，郭彦朋. 夹芯材料发展及防护结构应用综述[J]. 兵器材料科学与工程，2010，33(4)：91－96.(YANG Yi，LI Xiaojun，GUO Yanpeng. Development of sandwich materials and their application overview in protective structure[J]. Ordnance Material Science and Engineering，2010，33(4)：91－96.(in Chinese))

[20] 王礼立，杨黎明，周风华. 强动载荷下结构的柔性防护和刚性防护[J]. 爆炸与冲击，2009，29(4)：337－344.(WANG Lili，YANG Liming，ZHOU Fenghua. On flexible protection and stiff protection for structure safety under explosive/impact loading[J]. Explosion and Shock Waves，2009，29(4)：337－344.(in Chinese))


© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net