提高露天矿边坡稳定性的爆破减震缓冲垫①

成 旭[1,5,6]，孟祥栋[1,2]，韩根生[3]，李海港[1,4]，汪旭光[5]，陶铁军[6]，
杨德强[1,5,6]，王 阳[1]，雷 振[7]，王金辉[8]

(1.北京科技大学、金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室，土木环境学院，北京 100083；
2.重庆城建控股(集团)有限责任公司，重庆 400013；3.新疆石河子气象局，新疆 石河子 832000；
4.江西省安全生产科学技术研究中心，江西 南昌 330046；5.北京矿冶研究总院，北京 100070；
6.贵州新联爆破工程集团有限公司，贵州 贵阳 550002；7.中国矿业大学(北京)，北京 100083；
8.北京中科力爆炸技术工程有限公司，北京 100035)

摘要：在对岩体高边坡爆破减震分析的基础上提出了一种简便、有效及成本低的降低岩体开挖及边坡爆破震动的缓冲垫装置，不仅可以避免对炮孔半周边岩石产生大量裂缝而且可以避免由于多次爆破震动对边坡岩体产生的累积损伤，使边坡岩体及围岩受到的爆炸冲击荷载低于岩体破坏的门槛值，大幅度增加岩体边坡稳定性，并提高边坡稳定角度。用爆破实际测震数据说明、工程爆破效果验证，首次用在攀枝花露天铁矿边坡开挖工程中，半孔率可达到 95%以上。

关键词：缓冲垫减震；边坡稳定角；累积损伤；半孔率

中图分类号：TD824 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－0844(2014)04－0838－05

DOI：10.3969/j.issn.1000－0844.2014.04.0838

Blasting Shock Absorbing Cushion for Improving Slope Stability of Open Pit

CHENG Xu[1,5,6], MENG Xiang-dong[1,2], HAN Gen-sheng[3], LI Hai-gang[1,4], WANG Xu-guang[5], TAO Tie-jun[6], YANG De-qiang[1,5,6], WANG Yang[1], LEI Zhen[7], WANG Jin-hui[8]

(1.*State Key Laboratory of Ministry of Education of China for High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines*, *School of Civil and Environmental Engineering*, *University of Science & Technology Beijing*, *Beijing* 100083, *China*;
2.*Chongqing Urban Construction Holding (Group) Co. Ltd.*, *Chongqing* 400013, *China*;
3.*Xinjiang Shihezi Meteorological Bureau*, *Shihezi*, *Xinjiang* 832000, *China*;
4.*Jiangxi Science & Technology Research Center for Work Safety*, *Nanchang*, *Jiangxi* 330046, *China*;
5.*Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy*, *Beijing* 100044, *China*;
6.*Guizhou Xinlian Blasting Engineering Limited Corp.*, *Guiyang*, *Guizhou* 550002, *China*;
7.*China University of Mining and Technology (Beijing)*, *Beijing* 100083, *China*;
8.*Beijing Zhongkeli Blasting Technique and Engineering Co. Ltd.*, *Beijing* 100080, *China*)

Abstract: This paper introduces a type of blast control device that has a simple structure and is easily used in open pits. The stability of a high rock slope is an important technical problem in engineering infrastructure. Excavation by blasting produces a shock effect that directly affects the stability of high rock slope projects. By using the proposed method, large amounts of cracking on the rock slope and progressive damage to surrounding rock masses can be avoided. In addition, it provides a cushion and absorbs a large amount of heavy detonation shock from blasting to prevent instability in the rock slope. This method was first used in the Xujiagou iron open pit in Panzhi-

① **收稿日期**：2014-08-20
作者简介：成 旭(1965－)，博士，工程师，从事工程爆破、土木、矿山岩土工程方面的研究.E-mail：cx0790@sina.com

hua, Sichuan, where it was shown to effectively cushion the heavy detonation shock from explosions, thus avoiding damage to the step surface slope of the rock and its accumulated damages. Moreover, the rock slope stability was improved, the stability of the rock step slope was increased at least 2° after deep hole blasting, and the half-hole ratio was 95%. Furthermore, this method can be used in tunnel and underground engineering. When this blasting technique is used in rock slope excavation with blasting, less material is needed and less damage is produced, which leads to better contour quality, larger profits, and a greater benefit for the blasting perimeter.

Key words: shock absorbing cushion; slope stability; progressive damage; half-hole ratio

0　引言

在露天矿生产中出现了许多岩石边坡工程、岩质高边坡的稳定问题[1]。边坡爆破开挖所产生的地震效应,作为影响边坡稳定的重要外部因素之一越来越受到人们的关注。提高岩石边坡稳定性的方法一直是岩土工程的重要研究内容,爆破地震对边坡的稳定能否构成威胁往往与边坡本身的稳定程度密切相关。同时也与我国经济建设的利益息息相关,假若我国正在建设和生产的露天铁矿边坡角提高1°,就可减少总剥岩量数亿吨,节约资金数亿元。

本文在对岩体高边坡爆破减震分析的基础上,提出了一种简便、有效及降低岩体开挖及边坡爆破震动的缓冲垫装置,半孔率可达到 90%以上 ,大幅度增加岩体边坡稳定性,并提高边坡稳定角度。用动光弹爆破实验说明、工程爆破生产实践加以检验,首次用在攀枝花徐家沟露天铁矿边坡爆破开挖工程中,并获得国家专利局授予专利 :ZL 201220016697. 8., ZL 201220107888. 5, ZL 201220230579.7。

1　工程介绍

徐家沟铁矿位于四川省攀枝花市银江镇境内,南紧邻金沙江,距金江火车站 25 km,北距兰尖铁矿约 5 km。攀枝花市渡—雅公路从矿区南部外侧通过,矿山现有两条简易公路与渡—雅公路相通,并贯穿整个矿区,交通较为方便(图 1)。

徐家沟铁矿矿区为中小型山坡—深凹露天采矿,长约 770 m,宽 420 m。最高开采水平 1 256 m,封闭圈标高1 064 m,露天底标高 956 m。

矿区水文地质条件简单。矿体为含矿辉长岩,围岩主要为辉长岩类,其次为正长岩类,矿体和围岩中有贯入辉绿岩脉、闪长岩脉和角闪石英正长岩脉。矿体、围岩、岩脉致密坚硬,裂隙不甚发育,硬度系数为 f:10 左右。地表风化裂隙含水带厚度 10～40 m,由于风化程度不高,硬度系数变化在 1～7 之间。矿

图 1　徐家沟铁矿俯视图

Fig.1　Topview of Xujiagou iron ore

区内断层大都贯入致密坚硬的岩脉,富水性弱,连通性差。矿体顶底围岩为相对隔水层,渗透系数小。

徐家沟铁矿是一座中小型开采规模的露天铁矿。根据 2012 年 1 月重新对矿区进行矿量统计,标高 956 m 以上 TaiFe15%以上的矿石量约为6 604.2 万吨。其中矿石大部分被现有的渡—雅公路、格里坪支线铁路及各种管线所压覆,可露天开采的矿量在 1 600 万吨左右。从总体情况看,该矿床开发的限制条件多,地形条件较差,是一座开采难度较大的矿山。由于前些年的无序开采,造成矿区剥离大量滞后,现已形成几处高边坡。为满足扩大生产规模的需要,基建期势必要增加剥离量,以形成足够的采矿空间。

矿山现有建(构)筑物设施分布复杂,矿区松散工程地质岩组、半坚硬工程地质岩组及断层裂隙破碎面均可能引发崩塌、滑坡,矿山开采中应采取保护措施:一是必须严格避免飞石对矿山外围的居民造成危害;二是要避免矿山爆破开采对铁路及隧道带来的震动影响,必须根据爆破点位置严格控制最大段爆破药量,确保安全。

采场最终边坡角为 48°～53°,阶段高度 12 m,

局部实行两个阶段并段，阶段坡面角为 65°～70°，预留安全、清扫平台，宽度为 5～10 m。露天采场底宽≥30 m。

爆破在白天班末进行，一天一次，以减少爆破次数。为减少爆破飞石可能带来的影响，取消二次爆破破碎，改用碎石机进行二次破碎。

采用 KQG－150 潜孔钻机穿孔，中深孔爆破采用乳化炸药、非电起爆系统、微差爆破。炮孔直径 150 mm，底盘抵抗线 3～4 m，孔距：6～7 m，排距：3～4 m，炮孔倾角 70°～90°，孔深 13.0～13.5 m。浅眼采用硝铵炸药爆破，导爆索起爆。

2 岩体爆破累积损伤破坏分析

对岩质高边坡开挖爆破振动荷载及其边坡稳定性影响研究的动力特性和爆破震动响应分布规律有如下认识：

随着爆心距的增大，岩坡的爆破振动响应加速度逐渐衰减，在距爆源 40 m 的范围内振动加速度急剧衰减[2]，称为急剧衰减段。在此范围外振动加速度的衰减显著变缓。

爆破振动荷载及对边坡稳定性的影响需视爆源的情况而定，在爆源附近实际上是一个复杂的冲击波与应力波作用区域，爆破能量大部分消耗在该区域[3]。

通常认为粉碎区的半径仅为 2～7 倍的炮孔半径，虽然此范围很小却消耗了冲击波的大部分能量，使得在粉碎区界面上冲击波衰减成应力波。裂隙区的半径通常为炮孔半径的 120～150 倍。炸药产生的能量在裂隙区已经基本消耗殆尽[4]。

爆破产生的弱化效应、爆破动荷载产生的振动作用一方面产生了惯性力，增加了岩体下滑力；另一方面由于频繁的振动影响，使软弱结构面产生不可逆的累积损伤变形[5]。

通过小龙潭布沼坝露天煤矿爆破震动监测和动力计算分析，对生产爆破振动对边坡破坏的累积效应进行了研究[6]，在单段爆破药量控制的情况下，爆破震动短时间内对边坡的影响并不显著。但在长期重复持续的爆破振动作用下，边坡岩体原有的节理裂隙、破裂面、滑移面、高台阶、破碎区都会产生累积性疲劳性损伤，主要表现为使节理裂隙产生持续性扩张破裂面、滑移面持续性发展，高台阶、破碎区岩体强度弱化，增加高台阶和破碎区垮塌的危险。

3 缓冲垫爆破减震

切缝药包是将炸药装在一个沿直径开有切槽的管子里，目的是在岩体爆破时沿切槽方向定向炸开岩体。图 2 是切缝药包动光弹爆破试验应力波条纹图。

图 2 炸药外装有切缝套管的动光弹爆破试验应力波条纹图

Fig.2 The typical stress fringe patterns after blasting with kerf cosing pipe outside explosive

炮孔间距为 130 mm，曝光时间是在爆轰后 67 μs 。从图 2[7]可以看出：同时起爆后应力波发展从两个炮孔开始，但呈现非对称椭圆形分布。在切缝连线方向 P 波前沿有一个尖角，P 波与 S 波过渡区也有一个尖角，而在其他方向没有这些特征。这说明切缝方向受力大于其他方向，将最先在切缝连线方向汇集和叠加。

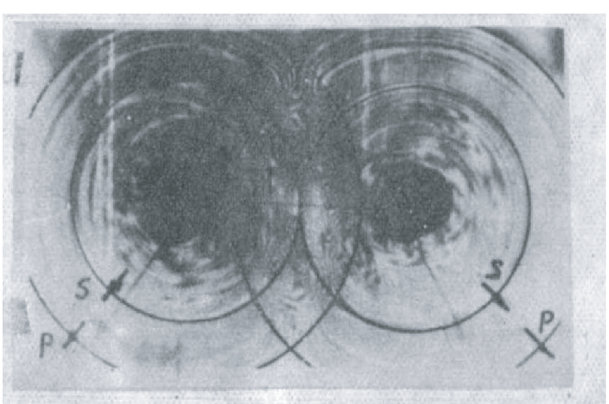


图 3 炸药外没有装切缝套管的动光弹爆破应力波条纹相片

Fig.3 The typical stress fringe patterns after blasting without kerf casing pipe outside explosive

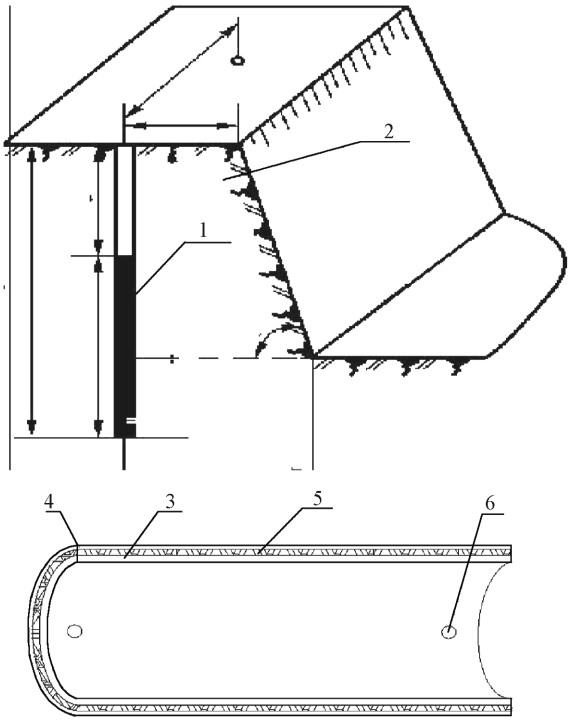
图 3[8]为炸药外没有装切缝套管的动光弹爆破试验图，两个炮孔的应力波条纹图是大小相等的同心圆，表明炮孔周围的作用力相等。

切缝药包[9]爆炸后，冲击波直接作用于切缝对应的孔壁部位上。由于初始爆轰压远远超过岩石介质的屈服强度,因此在切缝对应的孔壁部位将产生微小的径向裂缝。而在其他方向冲击波首先作用于套管外壳,此时除产生透射波外还有向爆炸中心反射的压缩波。透射波经环形空间衰减后能量大大降低。同时套管本身也产生变形与位移吸收部分能量,这样就大大降低了未切缝区域产生径向裂缝的可能性。在切缝药包爆破中,由于外壳的阻挡作用使炸药爆炸后保持较高的爆轰压力,对爆生气体的径向膨胀又起着限制作用,延长了爆生气体在装药空间的滞留时间。套管吸收部分爆炸能量,产生变形与位移,再将压力传递给孔壁;另一方面,由于套管的存在,阻止了爆生气体侵入孔壁,又较有效地“保护”了这部分孔壁。套管的材质及其力学特性、套管的特征尺寸等对产生压力突变有较大的影响。而在切缝方向,由于没有套管外壳阻挡,聚集了较多的爆生气体,必然有较多的爆生气体由此涌出,向此方向汇集,能流速度加大,能量相对集中的爆生气体驱动预裂纹优先扩展,直至最终形成较为理想的断裂面。

切缝药包爆破时切缝方向产生较强的应力集中,根据试验结果,切缝方向的应力强度因子为其他方向的 3.75～5.4 倍[10]。

根据上述粉碎区、裂隙区理论及切缝药包定向断裂爆破机理研究的启示,爆源附近是一个复杂的冲击波与应力波作用区域,爆破能量大部分消耗在该区域。按爆破地震波向最小抵抗线的方向传播作用原理[2],爆破能量向最小抵抗线的方向释放。因此在预留边坡的炮孔内加上一种缓冲垫[11],该缓冲垫采用两根弧形套筒,套筒之间夹上一种缓冲材料,套筒两端用螺栓固定,做成缓冲垫,然后将缓冲垫放入与边坡岩体相邻的炮孔内(图 4)。爆破后缓冲垫可以大幅度阻挡和缓冲炸药爆破对岩体产生的巨大冲击(图 5)。把消耗在粉碎区、裂隙区区域的大部分爆破能量缓冲、阻挡隔离掉,极大降低爆炸对预留边坡岩体的震动,半孔率可达到 90%以上。缓冲垫后的岩体还有可能受到爆破震动波的影响，那是应力波从缓冲垫后面及底部衍(绕)射过去的结果,衍射点相当于一个新的震源，但其强度却大大衰减。

缓冲垫不仅可以避免对炮孔半周边预留边坡岩石产生大量裂缝,而且可以避免由于多次爆破震动对岩体产生的累积损伤,使得岩体受到的应力低于岩石疲劳破坏的应力门槛(阀)值,从而大幅度增加岩体边坡爆破开挖的稳定性并可以提高边坡稳定角度 2°以上,同时避免对周围建筑物设施产生损坏。



1:炮孔;2:岩体边坡;3、4:弧形套管;
5:缓冲垫;6:螺栓

图 4　岩体边坡炮孔布置及缓冲垫示意图

Fig.4　Blast hole on rock slope and the cushion

图 5　炸药爆破后的半边炮孔

Fig.5　The semi-holes after blasting with cushion pad on the rock slope

距爆源 20 m 处实际测振的最大振速 5.92 cm/s(图 6)。

夏祥[12]分析了在单孔爆破和多孔爆破情况下,岩体损伤范围与岩体振动速度的关系,得到了在岩体损伤深度限定的情况下距爆源一定距离处岩体振动速度的安全阈值。研究结果认为,在岭澳核电

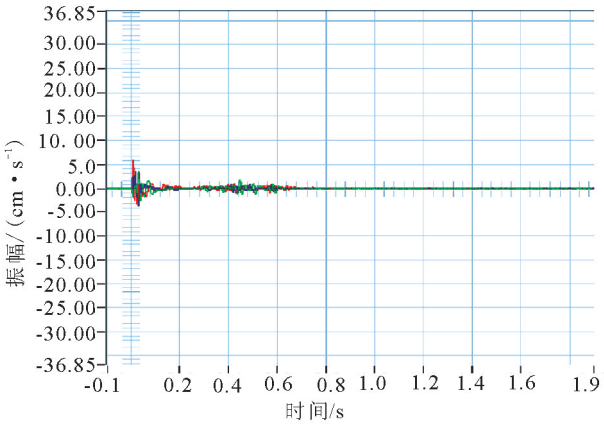
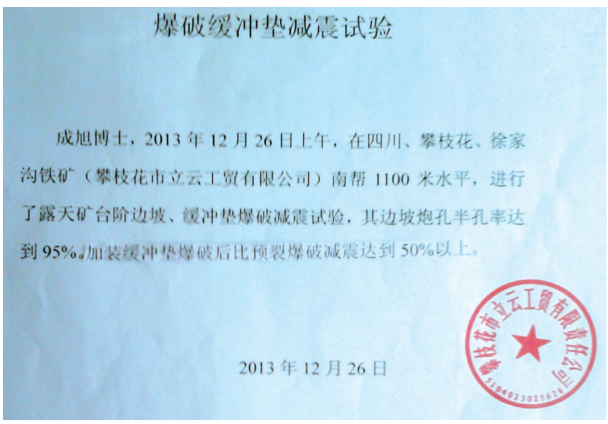


图 6 缓冲垫装药爆破后距爆源 20 m 处实际测振图

Fig.6 Vibration measurement with cushion charge after blasting in 20 m from the explosion source



爆破缓冲垫减震试验

成旭博士，2013 年 12 月 26 日上午，在四川、攀枝花、徐家沟铁矿（攀枝花市立云工贸有限公司）南帮 1100 米水平，进行了露天矿台阶边坡、缓冲垫爆破减震试验，其边坡炮孔半孔率达到 95%，加装缓冲垫爆破后比预裂爆破减震达到 50%以上。

2013 年 12 月 26 日

图 7 现场实践证明

Fig.7 Certification of site practice

站基岩爆破现场，距爆源 30 m 处岩体质点峰值振动速度的安全阀值小于 5 cm/s 是可行的图 7。

4 结论

陕北的窑洞都是建在黄土里，其抗压强度为 0.2 MPa，但很多可以使用百年不坏，就是因为在开挖窑洞时，人工开挖没有对周围土体产生爆破震动，即没有对周围土体产生累积损伤。新疆的一些小煤窑不支护，很少用爆破，西北的地窝子不砌墙。

采用缓冲垫爆破可以极大降低爆破震动对边坡及周围岩体的冲击，低于岩体质点峰值振动速度的安全阀值，从而大幅度增加岩体边坡稳定性并提高边坡稳定角度。同样可以用于其他露天矿山、岩体边坡爆破开挖及地下工程爆破开挖，大幅度增加地下工程爆破开挖后围岩岩体的稳定性，减少支护成本和冲击地压，必将产生巨大的经济效益。

参考文献(References)

[1] 宋锦泉，汪旭光.中国工程爆破发展现状与展望[J].铜业工程，2002(3)：6-8.
SONG Jin-quan，WANG Xu-guang.Current Status and Future Prospect of Engineering Blasting in China[J].Copper Engineering，2002(3)：6-8.(in Chinese)

[2] 舒大强，何蕴龙，董振华.岩质高边坡开挖爆破震动荷载及其对边坡稳定性影响的研究[J]. 工程爆破，1996(12)：39-43.
SHU Da-qiang，HE Yun-long，DONG Zhen-hua. Research on Vibration Load from Excavation Blasting and its Influence on Stability of Rock High-slope[J]. Engineering Blasting，1996(12)：39-43.(in Chinese)

[3] 陈先锋，王玉杰.不同装药结构对孔壁压力影响的分析[J].工程爆破，2003，9(2)：16-18.
CHEN Xian-feng，WANG Yu-jie.Study on Influence of Different Charge Structures Detonation Pressure on Hole Wall[J]. Engineering Blasting，2003，9(2)：16-18.(in Chinese)

[4] 翁春林，张义平. 爆破振动及其控制技术的研究[J].有色金属设计，2009(2)：36.
WENG Chun-lin，ZHANG Yi-ping.Study on Blasting Vibration and Its Control Technology[J]. Nonferrous Metals Design，2009(2)：36.(in Chinese)

[5] 曾勇.论爆破减震技术在露天矿的应用[J].矿业快报，2003(6)：40-45.
ZENG Yong. Application of Blasting Shock Absorption Technology to Open Pit[J].Express Information of Mining Industry，2003(6)：40-45.(in Chinese)

[6] 杨溢，王国华，张智宇.生产爆破振动对边坡破坏的累积效应研究[C]//中国爆破新技术Ⅱ.北京：冶金工业出版社，2008：738-742.
YANG Yi，WANG Guo-hua，ZHANG Zhi-yu.Study on Cumulative Break Effect on Alope Due to Blasting Vibration[C]//New Technology of Blasting in China. Beijing：Metallurgical Industry Press，2008：738-742.(in Chinese)

[7] 成旭，杨永琦，李彦涛.岩石定向断裂爆破模型试验研究[A]//矿山建设理论与实践.徐州：中国矿业大学出版社，1994，237-243.
CHENG Xu，YANG Yong-qi，LI Yan-tao.Test Study on Model of Directional Fracture Controlled Blasting in Rock[A]//Theory and Practice of Mining Construction.Xuzhou：China University of Mining and Technology Press，1994：237-243.(in Chinese)

[8] 朱振海，杨永琦.多火花式动态光弹性仪在爆炸力学实验中的初步应用[J].爆炸与冲击，1984，5(3)：67-76.
ZHU Zhen-hai，YANG Yong-qi. Preliminary Applications of Multiple Spark Dynamic Photoelastic Apparatus in the Tests of Explosion Mechanics[J].Explosion and Shock Waves，1984，5(3)：67-76.(in Chinese)

（下转 849 页）