

地下工程岩爆研究现状综述

李 果^{1,2},周承京^{1,2},张 勇^{1,2},徐 航^{1,2},高云瑞^{1,2},张 茹^{1,2}

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川 成都 610065;
2. 四川大学水利水电学院,四川 成都 610065)

摘要:基于地下工程岩爆研究成果,系统总结了岩爆的定义、类型、烈度分级、影响因素、破坏机理、预测与防治方法。指出目前岩爆研究中存在的主要问题,即岩爆发生的机理不够明确,判据不够充分,工程适用性欠佳,预测手段单一等。提出岩爆综合预测的研究思路,建议将岩爆的预测划分为岩爆倾向性预测、岩爆趋势预测和岩爆现场监测 3 个阶段。

关键词:地下工程;岩爆;破坏机理;经验判据;预测方法

中图分类号:TU452 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)03-0077-07

Review of rockburst in underground engineering//LI Guo^{1,2}, ZHOU Chengjing^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2}, XU hang^{1,2}, GAO yunrui^{1,2}, ZHANG Ru^{1,2}(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. College of Hydraulic and Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Based on the research achievements of the rockburst in underground engineering, the definition, types, intensity grades, influencing factors, failure mechanisms, and on-site forecasting and control methods of the rockburst are summarized systematically. The current main problems in the rockburst research including the indeterminacy of the rockburst mechanism, the insufficiency of the criterions, the bad engineering applicability, and the prediction mean singleness are analyzed. A novel thought is given for the rockburst comprehensive prediction. It is suggested that the rockburst prediction should be distributed into three stages: tendentiousness prediction, trend prediction, and field prediction and forecasting.

Key words: underground engineering; rockburst; failure mechanisms; empirical criterion; prediction means

岩爆是高地应力区地下工程开挖时岩体中积聚的弹性应变能突然释放而发生的动力地质灾害现象^[1]。低强度的岩爆表现为围岩剥离,有声响,有气浪,危险性较小;高强度的岩爆表现为围岩崩落、弹射,产生较大的粉尘和空气冲击波,常常还会使岩体和地表产生震动,和小地震相似。从世界范围来看,岩爆在水电、交通、矿山及核废料地下处置围岩工程中均有发生。世界上最早的一次岩爆于 1738 年发生在英国的锡矿^[2]。我国最早有记录的矿山岩爆于 1933 年发生在抚顺胜利煤矿^[3]。据 32 个重点煤矿的不完全统计,1949—1985 年,我国至少曾经发生过 1 842 起岩爆和煤爆^[4]。岩爆地质灾害现象直接威胁着施工人员、设备的安全,影响工程进度,增加工程投资,已成为世界性的地下工程难题之一^[5]。例如,锦屏二级电站施工排水洞 2009 年 11 月突发极强岩爆灾害,导致整个支护系统被摧毁并

引发大规模岩体坍塌,造成多人遇难。又如,岷江上的太平驿水电站引水隧道某标段,长度仅为 5km 左右,但施工期间曾发生大小 400 次岩爆,并造成损机伤人的严重事故^[6]。近年来随着我国经济的发展和地面空间的限制,人类活动向地下空间深部领域开拓,我国岩土工程建设呈现出规模大、难度高的特点,岩爆发生的强度和频率也呈上升趋势。因此岩爆的机理、预测与防治研究对于地下工程的安全和施工进度的保障显得尤为重要。

世界上对岩爆进行有组织的系统研究始于 20 世纪 50 年代,南非、波兰、加拿大和前苏联等国在岩爆机理研究、预测预报和防治手段等方面取得了较大进展。1977 年,国际岩石力学局成立了专门的岩爆研究组,在收集整理各国有关岩爆事件的详细资料和数据的基础上,编写了《1900—1977 年岩爆注释资料》一书。近年来,几乎所有的大型岩石力学

学术会议都有岩爆研究专题。国际岩爆与微震活动性学术研讨会自 1982 年第 1 次在南非发起,先后召开了 7 次会议并出版了会议论文集。2011 年 7 月 8—9 日,中国科协学术沙龙“岩爆机理探索”在北京成功举行,钱七虎院士在会上指出,岩爆机理的研究多停留在定性解释阶段,虽然对岩爆的预测预警进行了大量的探索和研究,但是尚未上升到系统的理论高度。因此岩爆的机理及其预测预警已经成为我国岩石力学领域必须解决的关键科学问题和技术难题^[7]。

笔者在查阅大量国内外文献的基础上,系统阐述了目前学术界和工程界关心的岩爆定义、烈度分级、影响因素、破坏机理、理论与经验判据及现场预测与支护手段等,指出了目前岩爆研究中存在的突出问题,并建议根据地下工程设计、施工阶段的不同,对岩爆预测进行阶段性划分并采用规范性的预测步骤和方法,为将来岩爆理论研究成果纳入部门和国家标准或规范奠定基础。

1 岩爆的定义、类型及烈度分级

1.1 岩爆的定义

地下工程中出现的岩爆现象,由于行业背景的差异有不同的名称,如岩爆和冲击地压,二者既有共同点又有区别。首先,二者的差异主要体现在行业上,水电、交通、隧道等行业称为岩爆,而煤矿和冶金等行业称之为冲击地压。其次,二者在外部表现和内在机理亦有较大的区别:岩爆是岩体的一种破坏形式,是处于高地应力条件下的稳定岩体在工程开挖或爆破过程中稳定状态被破坏,进而通过岩体的崩塌、岩石的弹射等一系列活动来释放岩体中积聚的应变能从而达到新的稳定状态的一种工程现象;而冲击地压则是在一定的高地应力作用下,煤矿井巷或回采工作面周围的煤岩体由于弹性应变能的瞬时释放而产生破坏的矿井动力现象,常伴随有巨大的声响、煤岩体被抛向采掘空间和气浪等现象。岩爆只是开掘应力诱发,而冲击地压可以是开掘应力诱发,也可以是开掘好一段时间后由采动应力诱发^[7]。但目前全国科学技术名词审定委员会审定公布的岩爆定义中,只强调“地下工程开挖中”和“在地应力高的岩体中开挖洞室”所发生的“岩爆”,而没有考虑到已经开掘好的巷道在一段时间后(一个月甚至一年)由采动应力或矿震引起的冲击地压问题^[1]。

1.2 岩爆的类型

对于岩爆类型的划分,目前学术界尚未达成共识。根据岩爆发生机理可分为应变型岩爆、构造型岩爆、应变和构造混合型岩爆^[8];若根据岩体类别可分为均匀岩体岩爆和非均匀岩体岩爆。下面列举

众多学者提出的其他分类方式:张悼元等^[9]按岩爆发生部位及所释放的能量大小,将岩爆分为三大类型:一是洞室围岩表部岩石突然破裂引起的岩爆,二是矿柱或大范围围岩突然破坏引起的岩爆,三是断层错动引起的岩爆;左文智等^[10]从岩爆形成的内在因素出发,将岩爆类型划分为水平构造应力型、垂直压力型和综合型三大类;武警水电指挥部天生桥二级水电站岩爆课题组对岩爆有两种分类标准:一是按破裂程度将岩爆分为破裂松弛型和爆脱型二大类,二是按规模将岩爆分为零星岩爆(长度 0.5 ~ 10 m)、成片岩爆(长度 10 ~ 20 m)和连续岩爆(长度大于 20m)三大类;郭志^[11]根据岩爆岩体破坏方式,将岩爆划分为爆裂弹射型、片状剥落型和洞壁垮塌型三大类。迄今为止,在国内谭以安^[12]的岩爆类型划分方案影响最大,他首先根据岩爆岩体高地应力成因和最大主应力方向,将岩爆类型划分为水平应力型、垂直应力型和混合应力型三大类,然后依据具体应力条件和岩爆特点,再将岩爆划分为六个亚类。

1.3 岩爆的烈度分级

岩爆烈度是指岩爆破坏程度,岩爆破坏主要是指地下洞室、矿山坑道遭受岩爆时岩体或矿体本身产生的直接破坏,以及因此而诱发的工程区或矿区、地面建筑物等的间接破坏。

对于岩爆烈度分级问题,目前国内外尚有不同的见解,主要依据与岩爆有关的单项或少数几项指标来划分。实际上,岩爆的烈度分级所要考虑的因素远不止一种,而现阶段的分级方式往往不能从多方面进行考虑,这也是造成烈度分级不能达成共识的原因。不过,现在的趋势是更加侧重于实际的表现现象,也就是根据岩爆发生时岩体的破坏表现程度来分级^[8,12],这样更方便现场施工人员对岩爆进行直观的判断。如德国布霍依诺根据岩爆对工程的危害程度,将岩爆烈度划分为轻微损害、中等损害、严重损害三级;挪威拉森斯根根据岩爆发生时的声响特征、围岩爆裂特征等将岩爆烈度划分为 0、1、2、3 共四级;谭以安依据岩爆危害程度及其发生时的力学和声学特征、破坏方式将岩爆烈度划分为弱、中、强、极强四级;张镜剑^[13]根据锦屏一级和锦屏二级两座水电站的实际数据,提出了岩爆五因素综合判据;刘章军等^[14]以模糊概率理论为基础,将岩爆烈度划分为无岩爆、弱岩爆、中等岩爆和强岩爆四级;王吉亮等^[15]基于距离判别分析方法对岩爆等级进行判定,将岩爆等级也分为无岩爆、弱岩爆、中等岩爆和强岩爆四级。

2 岩爆的影响因素

岩爆的影响因素包括内因和外因两种:内因主

要有高地应力、岩体结构及性能、地质构造等;外因主要有水文地质条件、开挖施工因素、应力波浅表生改造等。其中高地应力条件是岩爆发生的能量源泉,岩体结构及性能、地质构造、水文地质条件等决定了发生岩爆的能量聚集和释放能力。总体而言,岩爆是多种因素导致的结果,各影响因素之间既独立又相互联系,并且对岩爆的影响方式和影响程度也不同。笔者认为高储能、高地应力和开挖扰动是岩爆发生的3个必要条件。

2.1 岩爆的内因

a. 高地应力。岩爆的发生与地应力的集聚有着密切的关系。通常具有较高地应力的岩石其弹性模量也较高,因此在地应力区,岩石具有较大的弹性应变能,易发生岩爆。另外,高应力区的岩石具有一种明显的脆碎特征,而岩爆恰恰是岩石的脆性破坏过程^[16]。高地应力区隧道等地下工程洞室开挖后,其周边围岩二次应力场中产生的切向应力 σ_θ 和径向应力 σ_r 的分异作用则是导致岩爆发生的重要原因^[17]。

b. 岩体结构及性能。岩体结构及其性能条件是岩爆发生与否的物质基础。完整或比较完整的岩体积聚了很大的弹性应变能量,是发生岩爆的必要条件之一^[18]。发生岩爆的岩石通常为高弹性储能的硬脆性岩浆岩、灰岩、白云岩、砂岩等沉积岩以及混合花岗岩、花岗片麻岩、石英岩、大理岩等变质岩。通过对深埋隧道岩爆的研究发现,发生岩爆的围岩通常硬度高,节理裂隙少,完整性好,这些都有利于岩石弹性应变能的积蓄^[19]。

c. 地质构造。有些岩爆的发生与地质条件密切相关,这些岩爆总体上可以划分为以下三种类型:第一种主要发生在最大主应力接近水平方向的高地应力区和地壳中构造应力较为集中的部位(如褶皱翼部等)。因为在水平构造应力的长期作用下,岩体内储存了足以致岩爆的弹性应变能。第二种是由于断层错动所引起,当开挖靠近断层,特别是从断层底下通过时,工程开挖使作用于断层面上的正应力减小,从而使断层面的摩擦阻力降低,引起断层局部突然重新活动,进而形成岩爆。这类岩爆一般多发生在构造活动区埋深较大的地下工程中,破坏性很大。第三类岩爆主要发生在距离断层构造(带)一定距离范围的局部构造应力增高区洞段。它是由于断层构造活动导致局部岩体发生松弛现象,从而造成局部应力向断裂构造(带)两侧一定范围的围岩中转移,从而造成了引发该类岩爆活动的局部构造应力增高区^[20]。

2.2 岩爆的外因

a. 水文地质条件。在易发生岩爆的洞段,岩体

一般比较完整,岩体嵌合较为紧密,围岩表面较干燥,地下水不发育。通常在有地下水活动的湿润地段,围岩中的地应力可以更好地释放或者向围岩深部转移,故不易发生岩爆^[19]。

b. 开挖施工因素。洞室开挖造成围岩应力重分布,使得径向应力减小,洞壁切向应力增大。围岩二次应力集中是围岩储能能量增加的直接原因。开挖的深度,断面的大小、形状等都会对岩爆的发生几率和强度产生较大的影响。随着埋深的不断增加,岩爆的数量、频度及强度也逐渐增加;地下工程横断面形状一般为圆形和直墙圆拱形,在相同环境下直墙圆拱形洞室的应力集中现象较圆形洞室更加明显,故相比于直墙圆拱形洞室,圆形洞室发生岩爆的几率和烈度都较小。

c. 应力波。应力波到达洞室附近时可能产生拉应力,使岩体出现平行于洞室表面的裂纹,左宇军等^[21]通过动态版 RFPA2D 数值模拟软件再现了此种层裂过程;动态应力波在遇到断层时多次反射并发生半波损失,反射的应力波相互叠加,使围压、摩擦阻力减小,使原有裂纹串通、介质松动、接触面变平,容易发生岩爆^[22]。

d. 浅表生改造。浅表生改造可以改变岩体的初始应力,从而影响岩爆的烈度。岩体在地质作用和物理化学风化侵蚀作用下,垂直应力和水平应力不断发生变化,造成岩体垂直应力降低,而水平应力不断增大,并最终导致水平应力远大于垂直应力。洞室开挖后,在岩体发生卸荷回弹的变形过程中,如果岩体的强度和完整程度都很高,则其储存的弹性应变能是相当大的,在这种地区进行地下工程施工,如果发生岩爆,则岩爆的烈度将明显高于浅表生改造前的岩爆烈度^[18]。

3 岩爆(冲击地压)的破坏机理

3.1 岩爆

世界上众多科研机构对岩爆机理进行了深入研究,并提出了诸多岩爆形成的力学机制,主要有劈裂破坏、剪切破坏、弯曲内鼓。不同的破裂机制不仅与围岩应力状态有关,而且与岩体性能、结构构造、开挖条件等诸多因素有关^[17]。①劈裂破坏型。劈裂破坏属脆性断裂,常发生在厚层状地层分布地区。岩爆发生前没有明显的裂纹,但是在高地应力条件下,岩石内部存在的微裂隙将在应力集中效应下失稳、扩展、相互贯通,并最终发展为与最大主应力呈小角度相交的宏观劈裂面,且破裂面常与洞口边界平行。这种类型的岩爆一般发生在最小主应力与最大主应力比值较小的情况。②弯曲内鼓型。区域最

大主应力与岩层层面或解理面垂直时易发生此类岩爆破坏形式。当区域最大主应力与地下工程拱顶垂直时,弯曲内鼓型岩爆主要出现在两帮,表现为两帮岩石向掘进静空的弯曲鼓折;当区域最大主应力与地下工程拱顶平行时,在地下工程的顶部出现类似的弯曲内鼓型岩爆。③剪切破坏型。当岩石应力达到峰值强度时,将出现与洞口边界斜交、呈对数螺旋形的破裂面。

3.2 冲击地压

煤炭开采过程中的冲击地压形成机理可分为三大类:①开挖过程中的井巷或工作面周围岩体,由于弹性应变能的瞬时释放而产生剧烈破坏的动力现象,此类型与地下工程中的岩爆机理相同。②已开挖的处于稳定状态的井巷或工作面周围岩体,由采动应力或顶板大面积破断或矿震诱发而突然产生剧烈破坏的动力现象,经常是煤柱或巷道围岩大面积的冲击突出。③井巷或工作面周围岩体,由于周围断层、构造或结构面的黏滑错动诱发产生突然剧烈破坏的动力现象^[1]。无论是何种类型的冲击地压,均可由齐庆新等^[23-25]提出的“三因素”机理解释:第1个因素是冲击倾向性,即煤或岩石固有的冲击破坏的性质和能力,是其内在性质;第2个因素是结构因素,即煤岩体的结构性质,如煤层中的“软层”结构或“三硬”结构,或煤层变薄带、断层、褶皱等地质构造,此因素不可量化;第3个因素是应力因素,是冲击地压发生的核心必要条件,是外在因素,可量化可实测,具体而言就是原岩应力和采动应力之和,与采动行为密切相关。

4 岩爆的预测方法

国内外学者根据多种岩爆理论和学说对岩爆的发生进行预测,从强度、刚度、能量、稳定、断裂、损伤等方面对岩爆现象进行分析,提出各种假设和判据,如 Russenes 判据、陶振宇判据、 R_b/σ_1 判据等,并采用各种理论和科学方法对岩爆烈度等级进行预测,如数值分析方法^[26]、模糊数学理论^[27]、灰色理论^[28]、人工神经网络^[29-30]、支持向量机^[31]、可拓学^[32]、集对分析法^[33]、距离判别法^[34]、数据挖掘方法 AdaBoost^[35]、AE 时间序列^[36]、属性数学理论^[37]以及模型试验法等。由于诸多文献对上述理论都有较详细的阐述,故笔者仅对近年来国内的最新预测方法进行简单介绍。

a. 基于分形插值模型的岩爆预测。该方法选取影响岩爆评价的3个主要因素,根据分类标准和随机内插方法得到若干个标准样本,采用最大似然分类原则确定每个岩爆预测指标的评价分维数,利

用加权求和法计算样本的综合评价值,并基于样本综合评价值与经验等级的关系建立分形插值评价模型,该模型可以把多维指标综合成一维指标,解决了单项评估指标结果不相容的问题^[38]。

b. 基于灰色关联分析的岩爆预测。该方法采用灰色系统的灰色关联分析理论,选取影响岩爆的一些主要因素(最大主应力、单轴抗压强度、点荷载强度、完整性系数和弹性能指数)进行岩爆预测分析。应用该方法对锦屏二级水电站辅助洞进行岩爆预测,所得结果与实际工程情况基本一致,说明了基于灰色关联分析的岩爆预测方法的合理性^[39]。

c. 基于遗传算法和 BP 神经网络的岩爆预测。该方法通过对岩爆实例的深入研究,从网络算法的特点出发,提出通过遗传算法来优化神经网络的权重,优化后的网络算法解决了 BP 算法学习效率低、容易陷入局部极小点等问题,同时也提高了网络算法的预测精度,是一种非常有效的神经网络权重优化方法^[40]。

d. 基于人工鱼群投影寻踪算法的岩爆预测。该方法针对传统岩爆预测分析方法存在的问题,建立相应的岩爆预测分析模型,选取15个工程实例作为训练样本,选取3个工程实例作为预测样本,以 σ_θ/σ_c 、 σ_c/σ_t 及 W_{et} 这3个指标作为影响岩爆发生的主要参数(σ_θ 为岩石最大切向应力、 σ_c 为岩石抗压强度、 σ_t 为岩石抗拉强度、 W_{et} 为弹性能量指数),进行地下洞室的岩爆预测实例检验^[38,41]。

e. 基于蚁群聚类算法的岩爆预测。由于岩爆影响因素众多且关系复杂,而岩爆预测的聚类问题是一个复杂的模糊随机优化问题,为了更好地解决这类问题,把最近提出的蚁群聚类算法等仿生聚类算法引入岩爆研究领域,提出一种岩爆预测的新方法。该方法在分析岩爆实例资料的基础上,采用蚁群聚类算法,以工程类比的思想判断岩爆的发生状态^[42]。

f. 基于 Bayes 判别分析方法的岩爆预测。在岩爆距离判别分析模型的基础上,结合地下工程岩爆的特点和 Bayes 判别分析理论,提出了地下工程岩爆发生及烈度分级预测的 Bayes 判别分析方法。综合分析影响岩爆的主要因素,选取 σ_θ 、 σ_c 、 σ_t 和 W_{et} 作为判别因子建立岩爆预测的 Bayes 判别分析模型,并利用回代估计法对误判概率进行估计。利用国内外一些重大深部地下工程实例作为学习样本进行训练建模,经过训练后的模型回判估计的误判率为零^[43]。

g. 基于地震波的岩爆预测。该方法的基本原理为岩爆释放的地震能的均方根与地震发生前岩体的应变状态成比例^[44]。若准岩体抗压强度 $\sigma_m > 80 \text{ MPa}$,有可能发生岩爆^[45]。采用式(1)计算准岩体

抗压强度 σ_m :

$$\sigma_m = \sigma_c \left(\frac{v_{pm}}{v_{pd}} \right)^2 \quad (1)$$

式中: σ_c 为岩石抗压强度; v_{pm} 为现场岩体纵波速度; v_{pd} 为岩体试件纵波速度。

5 岩爆的现场预测手段与防治措施

5.1 现场预测手段

现场预测手段主要包括: ①微震法, 又称为亚声频探测法或声发射法。根据试验和现场研究, 岩体(石)变形破坏之前声发射信号会急剧增大, 因此可以将声发射技术用于岩爆的现场预测。②钻屑法, 在岩体中钻取孔洞, 通过观测单位深度孔洞的碎屑排屑量及钻孔中的各种动力现象了解岩体的应力状态, 从而达到岩爆预测的目的^[46]。根据经验, 如果钻屑量达到正常值的 2 倍以上, 就有岩爆发生的危险。③微重力法。在岩爆发生之前, 微重力会出现负值, 并持续增大到一个负极值, 此时可能发生岩爆; 反之, 若微重力值长时间保持一个正常值就表明不会发生岩爆^[46]。④水分法。水分法主要用于煤矿冲击地压的监测, 钻孔取样测定岩体中含水量的变化, 当煤层中的含水量大于 3% 时, 认为无岩爆危险^[47]。⑤开挖诱发隧道围岩变形的红外热像试验法。该方法采用相似材料模拟试验方法, 借助红外热像仪等红外设备, 对开挖过程中深埋隧道围岩变形破坏情况进行红外热像分析, 将围岩表面热辐射温度的快速升高引起的红外异常作为岩爆发生的前期征兆。除此之外还有多种预测方法, 如地震波预测法、光弹法、流变法、以电磁原理为基础的地球物理预报方法等^[47]。

5.2 现场防治措施

可通过以下措施防治岩爆并减小围岩的过度变形: ①超前钻孔解除应力。它可有效减轻围岩的应力集中程度并使应力集中向围岩深部进行转移, 同时使围岩积聚的弹性应变能提前耗散, 有效地降低了围岩发生岩爆的风险性^[48]。②采取合理开挖方式。地下洞室分步开挖可以根据先前开挖发生岩爆的情况对下一步的开挖提供参考, 以便采取相应的加固措施, 预防岩爆发生^[49]。③钻孔注水。爆破之后, 应及时对施工隧道的岩爆易发地段喷水或者钻孔注水, 以降低爆破裂纹的尖端能量并减缓裂纹的传播速度, 从而避免强烈的岩爆^[50]。④加固与支护。一旦发生岩爆, 应立即停止施工并开展监测工作, 并在岩爆发生地点采取有效的支护措施。对周边围岩进行加固可改善 1~2 倍洞径岩体的应力状态^[50], 具体可采用混凝土或钢纤维喷混凝土、钢筋网喷混凝土、

周边锚杆、格栅钢架、中空预应力注浆锚杆、水涨式锚杆、纳米仿钢纤维混凝土等方法进行加固。

6 结语及展望

根据地下工程岩爆研究成果, 系统总结了岩爆的定义、类型、烈度分级、影响因素、破坏机理、预测与防治方法。由于岩体特征的复杂性和岩爆影响因素的多样性, 准确地预测岩爆的时空分布难度较大。目前岩爆研究中仍然存在许多问题, 如岩爆机理不甚清楚, 各种岩爆判据对工程的适用性有待探讨, 岩爆现场监测手段单一等。建议将岩爆的预测划分为以下 3 个阶段: ①岩爆倾向性预测。在该阶段开展宏观地质调查并辅以地应力测量和岩石力学性质研究, 此研究在工程可行性研究、初步设计阶段完成。具体实现手段为: 工程现场从钻孔饼芯现象、初始地应力巴顿经验判据判断岩爆倾向性, 室内试验通过岩样脆性度指标、弹性应变能指标、能量冲击性能指标等判断岩爆倾向性。②岩爆趋势预测。通过岩体地质力学状态分析, 对较大区域未来一段时间内岩爆的发生趋势和强烈程度做近似判断和趋势分析。具体实现手段为: 通过三维数值建模, 进行初始地应力场反演, 模拟现场地质条件和开挖步骤, 根据围岩二次应力、应变和能量等计算结果, 应用各种岩爆理论和经验判据大致确定岩爆高发区域和范围, 进行岩爆趋势预测。此研究在工程初设、前期施工阶段完成。③岩爆现场监测。利用各种检测仪器进行工作面日常预报, 必要时建立地下工程整体开挖区域的微震监测系统, 预测岩爆发生时间和地点等信息, 及时采取适当防护措施, 保证地下结构、施工设备和人员的安全。此研究在工程施工期完成, 具体监测手段为声发射法、电磁辐射法、气体测定法、微重力法、钻屑法等, 并结合围岩应力和变形等常规监测数据对监测断面附近区域的岩爆进行综合分析和预报。

参考文献:

- [1] 姜耀东. 关于煤矿冲击地压机理、预报与防治的思考 [C]//中国科协学会学术部. 岩爆机理探索: 新观点新学说学术沙龙文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2010: 23-31.
- [2] 杨惠莲. 冲击地压的特征、发生原因与影响因素[J]. 煤炭工程师, 1989(2): 37-42. (YANG Huilian. Rock burst characteristics, causes and influencing factors [J]. Coal Engineer, 1989(2): 37-42. (in Chinese))
- [3] 李玉生. 国内外矿山冲击的研究及评述[J]. 煤炭科研参考资料, 1982(4): 1-10. (LI Yusheng. Research and comment about the mine impact at home and abroad [J]. Coal Research and Reference Materials, 1982(4): 1-10. (in Chinese))

- [4] 陈宗基. 岩爆的工程实录、理论与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(1): 1-18. (CHEN Zongji. The rock burst engineering record, theory and control[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1987, 6(1): 1-18. (in Chinese))
- [5] 徐林生, 王兰生. 二郎山公路隧道岩爆发生规律与岩爆预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998(5): 9-16. (XU Linsheng, WANG Lansheng. The regularities of rock burst occurrence and study on prediction of rock burst in Erlang Mountain Highway Tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998(5): 9-16. (in Chinese))
- [6] 万姜林, 洪开荣. 太平驿水电站引水隧道的岩爆及其防治[J]. 西部探矿工程, 1995, 7(1): 87-89. (WAN Jianglin, HONG Kairong. The Taipingyi Hydropower Station diversion tunnel rock burst and its prevention[J]. West-China Exploration Engineering, 1995, 7(1): 87-89. (in Chinese))
- [7] 齐庆新, 毛德兵. 冲击地压、岩爆、矿震的关系及其数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1852-1858. (QI Qingxin, MAO Debing. The relationship of impact ground pressure, rock burst and its numerical simulation research [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1852-1858. (in Chinese))
- [8] 徐林生, 王兰生, 李天斌, 等. 国内外岩爆研究现状综述[J]. 长江科学院院报, 1999, 16(4): 24-27. (XU Linsheng, WANG Lansheng, LI Tianbin, et al. The domestic and foreign present situation of rock burst research[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1999, 16(4): 24-27. (in Chinese))
- [9] 张悼元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 397-398.
- [10] 左文智, 张齐桂. 地应力与地质灾害关系探讨[C]//第五届全国工程地质大会文集. 北京: 地质出版社, 1996: 31-36.
- [11] 郭志. 实用岩体力学[M]. 北京: 地质出版社, 1996: 190-200.
- [12] 谭以安. 岩爆形成机理研究[J]. 水文地质与工程地质, 1989(1): 34-38. (TAN Yi'an. The research of rockburst mechanism[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1989(1): 34-38. (in Chinese))
- [13] 张镜剑. 岩爆五因素综合判据和岩爆分级[C]//中国科协学会学术部. 岩爆机理探索: 新观点新学说学术沙龙文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2010: 61-64.
- [14] 刘章军, 袁秋平, 李建林. 模糊概率模型在岩爆烈度分级预测中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊1): 3095-3103. (LIU Zhangjun, YUAN Qiuping, LI Jianlin. Application of fuzzy probability model to prediction of classification of rockburst intensity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(Sup1): 3095-3103. (in Chinese))
- [15] 王吉亮, 陈剑平, 杨静, 等. 岩爆等级判定的距离判别分析方法及应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2203-2208. (WANG Jiliang, CHEN Jianping, YANG Jing, et al. Method of distance discriminant analysis for determination of classification of rockburst [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2203-2208. (in Chinese))
- [16] 唐宝庆, 曹平. 岩爆研究现状的分析[J]. 湖南有色金属, 1996, 12(1): 7-10. (TANG Baoqing, CAO Ping. The current study of rock burst analysis[J]. Hunan Nonferrous Metals, 1996, 12(1): 7-10. (in Chinese))
- [17] 徐林生, 王兰生. 岩爆形成机理研究[J]. 重庆大学学报, 2001, 24(2): 115-117. (XU Linsheng, WANG Lansheng. Study on the mechanism of rock burst[J]. Journal of Chongqing University, 2001, 24(2): 115-117. (in Chinese))
- [18] 贾愚如, 范正绮. 水工洞室中岩爆机制与判据[J]. 水力发电, 1990(6): 30-34. (JIA Yuru, FAN Zhengqi. Mechanism and criterion of rock burst in water cavern [J]. Water Power, 1990(6): 30-34. (in Chinese))
- [19] 徐林生, 唐伯明, 慕长春, 等. 岩爆发生条件研究[J]. 公路交通技术, 2003(4): 73-75. (XU Linsheng, TANG Boming, MU Changchun, et al. Research on conditions of rock burst [J]. Technology of Highway and Transport, 2003(4): 73-75. (in Chinese))
- [20] 张斌, 符文熹. 影响深埋长隧道岩爆的主要因素分析[J]. 山地学报, 2000, 18(2): 94-97. (ZHANG Bin, FU Wenxi. The main factors of deep-buried long tunnel rock burst influence analysis[J]. Journal of Mountain Science, 2000, 18(2): 94-97. (in Chinese))
- [21] 左宇军, 唐春安, 宫凤强. 应力波反射诱发层裂过程的数字模拟[J]. 吉林大学学报: 自然科学版, 2006, 27(6): 80-83. (ZUO Yujun, TANG Chun'an, GONG Fengqiang. The digital simulation of spallation process induced by reflection of stress wave[J]. Journal of Jilin University: Science Edition, 2006, 27(6): 80-83. (in Chinese))
- [22] 秦剑峰, 卓家寿. 岩爆问题研究现状[J]. 水电能源科学, 2009, 27(4): 130-133. (QIN Jianfeng, ZHOU Jiashou. Present research situation of rockburst problems [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(4): 130-133. (in Chinese))
- [23] 齐庆新, 李宏艳. 冲击地压发生机理的再认识[C]//中国科协学会学术部. 岩爆机理探索: 新观点新学说学术沙龙文集. 北京: 中国科学技术出版社, 2010: 96-97.
- [24] 姜彤, 李华晔, 刘汉东, 等. 岩爆理论研究现状[J]. 华北水利水电学院学报, 1998, 19(1): 45-47. (JIANG Tong, LI Huaye, LIU Handong, et al. The theory research status of rock burst [J]. North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 1998, 19(1): 45-47. (in Chinese))
- [25] 徐林生, 王兰生, 李永林, 等. 岩爆形成机制与判据研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 300-303. (XU Linsheng, WANG Lansheng, LI Yonglin, et al. Rockburst formation mechanism and criterion research [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(3): 300-303. (in Chinese))
- [26] 邱道宏, 陈剑平, 肖云华, 等. 分离式隧道非同步开挖岩

- 爆预测研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(2): 515-520. (QIU Daohong, CHEN Jianping, XIAO Yunhua, et al. Study of rockburst prediction of separated tunnel excavated asynchronously[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(2): 515-520. (in Chinese))
- [27] 王元汉, 李卧东, 李启光, 等. 岩爆预测的模糊数学综合评判方法[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 493-501. (WANG Yuanhan, LI Wodong, LI Qiguang, et al. Method of fuzzy comprehensive evaluations for rockburst prediction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5): 493-501. (in Chinese))
- [28] 刘春, 易俊, 姜德义, 等. 基于灰色关联分析理论的岩爆烈度预测研究[J]. 中国矿业, 2007, 16(12): 100-103. (LIU Chun, YI Jun, JIANG Deyi, et al. Study on rockburst intensity prediction method based on gray relational analysis theory[J]. China Mining Magazine, 2007, 16(12): 100-103. (in Chinese))
- [29] FENG X T, WANG L N. Rock-burst prediction based on neural networks[J]. Trans Non-ferrous Met Soc China, 1994, 4(1): 7-14. (in Chinese))
- [30] 陈海军, 酆能惠, 聂德新, 等. 岩爆预测的人工神经网络模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 229-232. (CHEN Haijun, LI Nenghui, NIE Dexin, et al. A model for prediction of rockburst by artificial neural network[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 229-232. (in Chinese))
- [31] 赵洪波. 岩爆分类的支持向量机方法[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 642-644. (ZHAO Hongbo. Classification of rockburst using support vector machine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 642-644. (in Chinese))
- [32] 陈祥, 祁小博, 蔡新滨, 等. 可拓综合评价方法在岩爆判别中的应用[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(1): 99-108. (CHEN Xiang, QI Xiaobo, CAI Xinbin, et al. Extensional evaluation method and its application to the judgments of rockburst[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(1): 99-108. (in Chinese))
- [33] 陈红红, 李夕兵, 张毅. 基于集对分析法的岩爆烈度分级预测研究[J]. 南华大学学报: 自然科学版, 2008, 22(4): 10-14. (CHEN Honghong, LI Xibing, ZHANG Yi. Study on application of set pair analysis method to prediction of rockburst[J]. Journal of University of South China: Science and Technology, 2008, 22(4): 10-14. (in Chinese))
- [34] 宫凤强, 李夕兵. 岩爆发生和烈度分级预测的距离判别方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1012-1018. (GONG Fengqiang, LI Xibing. A distance discriminant analysis method for prediction of possibility and classification of rockburst and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1012-1018. (in Chinese))
- [35] 葛启发, 冯夏庭. 基于 AdaBoost 组合学习方法的岩爆分类预测研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 943-948. (GE Qifa, FENG Xiating. Classification and prediction of rockburst using AdaBoost combination learning method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(4): 943-948. (in Chinese))
- [36] 彭琦, 张茹, 谢和平, 等. 基于 AE 时间序列的岩爆预测模型[J]. 岩土力学, 2009, 30(5): 1436-1440. (PENG Qi, ZHANG Ru, XIE Heping, et al. Prediction model for rockburst based on acoustic emission time series[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1436-1440. (in Chinese))
- [37] 文畅平. 岩爆预测和烈度分级的属性数学模型及其应用[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(4): 114-120. (WEN Changping. An attribute mathematical model and its application in predicting and classifying rockburst[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(4): 114-120. (in Chinese))
- [38] 田杰, 王威, 郭小东, 等. 基于分形插值模型的岩爆预测研究[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(4): 481-485. (TIAN Jie, WANG Wei, GUO Xiaodong, et al. Prediction of rock burst based on the fractal interpolation model[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(4): 481-485. (in Chinese))
- [39] 胡炜, 杨兴国, 周宏伟, 等. 基于灰色关联分析的岩爆预测方法研究[J]. 人民长江, 2011, 42(9): 38-42. (HU Wei, YANG Xingguo, ZHOU Hongwei, et al. Study on rock burst prediction method based on gray relational analysis theory[J]. Yangtze River, 2011, 42(9): 38-42. (in Chinese))
- [40] 胡敏, 陈建宏, 陆玉根, 等. 基于遗传算法和 BP 神经网络岩爆预测[J]. 矿业研究与开发, 2011, 31(5): 90-94. (HU Min, CHEN Jianhong, LU Yugen, et al. Research on rock burst prediction based on BP neural network and GA[J]. Mining Research and Development, 2011, 31(5): 90-94. (in Chinese))
- [41] 方崇, 代志宏, 张信贵. 人工鱼群投影寻踪回归在洞室岩爆预测中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(5): 932-937. (FANG Chong, DAI Zhihong, ZHANG Xingui. A prediction method of rock burst in cavern based on projection pursuit in artificial fish-swarm algorithm[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(5): 932-937. (in Chinese))
- [42] 高玮. 基于蚁群聚类算法的岩爆预测研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 874-879. (GAO Wei. Prediction of rock burst based on ant colony clustering algorithm[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(6): 874-879. (in Chinese))
- [43] 宫凤强, 李夕兵, 张伟. 基于 Bayes 判别分析方法的地下工程岩爆发生及烈度分级预测[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊1): 370-377. (GONG Fengqiang, LI Xibing, ZHANG Wei. Rockburst prediction of underground engineering based on Bayes discriminant analysis method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup1): 370-377. (in Chinese))

(下转第 94 页)

- 58-61. (HAN Yuwen, ZHOU Jianxu, XU Jinchao. Discussion on analysis methods for hydraulic oscillation characteristics of stepped low-pressure water conveyance system [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42 (10) : 58-61. (in Chinese))
- [14] 赵海, 吴换营, 蔡付林, 等. 分段低压自流输水系统中无压连接段水力特性三维数值模拟[J]. 水电能源科学, 2010, 28 (9) : 73-75. (ZHAO Hai, WU Huanying, CAI Fulin, et al. 3D numerical simulation of hydraulic characteristics of non-pressure connection part in stepped low-pressure artesian water supply system [J]. Water Resources and Power, 2010, 28 (9) : 73-75. (in Chinese))
- [15] 成立, 刘超. 大型泵站水力稳定性探讨[J]. 南水北调与水利科技, 2009, 7 (2) : 75-77. (CHENG Li, LIU Chao. Discussion on hydraulic stability of large scale pumping station [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2009, 7 (2) : 75-77. (in Chinese))
- [16] PEJOVIC S, BOLDY A P. Guidelines to hydraulic transient analysis of pumping systems [M]. Belgrade, Coventry: P&B Press, 1992.
- [17] MISRA A, BEHDINANB K, CLEGHORN W L. Self-excited vibration of a control valve fluid-structure interaction[J]. Journal of Fluids and Structures, 2002, 16 (5) : 649-665.
- [18] KARNEY B W, GAJIC A, PEJOVIC S. Case studies; our experience in hydraulic transients and vibrations[C]//IAHR Proceedings of the International Conference on Case Studies in Hydraulic Systems. Belgrade, Serbia; [s. n.], 2003.
- [19] GUO S J, MARUTA Y, OKAMOTO H, et al. Complex pressure fluctuations and vibrations in a pump-water tunnel system [C]//Proceedings of ASME 2003: Joint Fluids Engineering Conference. Honolulu, Hawaii: ASME, 2003.
- [20] PARRONDO J, ANTUNA J, GONZALEZ J, et al. A study on the unstable coupling between pumps and hydraulic circuits with entrapped gas pockets [C]//Proceeding of ASME 2002: Fluids Engineering Division Summer Meeting. Honolulu, Hawaii: ASME, 2002.
- [21] PARRONDO J, ANTUNA J, PRIETO J I. Computation of the unstable behavior of a hydraulic circuit with a centrifugal pump coupled to an air pocket [C]//Proceeding of ASME 2002: Fluids Engineering Division Summer Meeting. Honolulu, Hawaii: ASME, 2005.
- [22] GARDNER P E J, GUMMER J H. The use of air chambers to suppress hydraulic resonance [J]. Water Power, 1973 (3) : 102-105.
- [23] SHINICHI Y, HISASHI S, HIROTUGU Y. Study on an active accumulator (active control of high-frequency pulsation of flow rate in hydraulic systems) [J]. JSME International Journal; Series B, 1996, 39 (1) : 119-124.
- [24] 周建旭, 张健. 有压输水系统减振措施分析[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24 (6) : 10-12. (ZHOU Jianxu, ZHANG Jian. Analysis of damping measures for pressurized conveyance system [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2004, 24 (6) : 10-12. (in Chinese))
- [25] 高松竹, 许萍, 蒲家宁. 吸收振动抑或引发共振: 空气罐在水力扰动系统中作用的模拟研究[J]. 天然气与石油, 2007, 25 (3) : 1-3. (GAO Songzhu, XU Ping, PU Jianing. Absorption oscillation or cause resonance: simulation research on effect of air tank to hydraulic disturbance system [J]. Natural Gas and Oil, 2007, 25 (3) : 1-3. (in Chinese))

(收稿日期: 2012 - 08 - 02 编辑: 骆超)

(上接第 83 页)

- [44] 王兰生, 李天斌, 徐进, 等. 二郎山公路隧道岩爆及岩爆烈度分级 [J]. 西南公路, 1998 (4) : 22-26. (WANG Lansheng, LI Tianbin, XU Jin. In Erlang mountain highway tunnel rock burst and rockburst intensity [J]. Southwest Highway, 1998 (4) : 22-26. (in Chinese))
- [45] 任守广. 地下厂房系统岩爆预测及其对支护结构稳定性的影响 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2006.
- [46] 唐检军, 夏松林. 岩爆预测方法研究 [J]. 中国水运, 2010, 10 (2) : 128-129. (TANG Jianjun, XIA Songlin. Prediction method of rock burst [J]. Chinese Water Transport, 2010, 10 (2) : 128-129. (in Chinese))
- [47] 潘长良, 谢学斌, 曹平, 等. 岩爆预测预报方法 [J]. 有色矿冶, 1997 (6) : 3-5. (PAN Changliang, XIE Xuebin, CAO Ping, et al. Prediction and forecasting method of rock burst [J]. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 1997 (6) : 3-5. (in Chinese))
- [48] 汪洋, 王继敏, 尹健民, 等. 基于快速应力释放的深埋隧洞岩爆防治对策研究 [J]. 岩土力学, 2012, 33 (2) : 547-553. (WANG Yang, WANG Jimin, YIN Jianmin, et al. Research on prevention measures of rock burst based on rapid stress release in deep tunnel [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33 (2) : 547-553. (in Chinese))
- [49] 邱道宏, 张乐文, 薛翊国, 等. 地下洞室分步开挖围岩应力变化特征及岩爆预测 [J]. 岩土力学, 2011, 32 : 430-436. (QIU Daohong, ZHANG Lewen, XUE Yiguo, et al. Studies of surrounding rock stress change character and rockburst prediction of underground cavern during stepped excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32 : 430-436. (in Chinese))
- [50] 杨宝忠. 浅谈隧道施工中岩爆发生的机理及预防措施 [J]. 铁道工程学报, 1999 (4) : 62-65. (YANG Baozhong. Rock burst mechanism and prevention measures under tunneling [J]. Journal of Railway Engineering Society, 1999 (4) : 62-65. (in Chinese))

(收稿日期: 2012 - 06 - 28 编辑: 骆超)