

董春丽,王卓君,张娜,等,2020. 代县和繁峙2次塌陷地震的机理成因浅析. 中国地震,36(1):80~90.

代县和繁峙2次塌陷地震的机理成因浅析

董春丽^{1,2)} 王卓君^{1,2)} 张娜^{1,2)} 丁学文^{1,2)} 郭丽琴³⁾

1) 太原大陆裂谷动力学国家野外科学观测研究站, 太原 030025

2) 山西省地震局, 太原 030021

3) 山西省朔州市防震减灾中心地震监测站, 山西朔州 036000

摘要 金属矿山的深部开采易引发冒落型矿震。本文对繁峙和代县两相邻铁矿区相继发生的2次塌陷地震,从其发展到发生的过程特点、形态特征和成因机理等方面进行了分析和总结,认为这两次塌陷的孕育发生与区域构造应力、降雨和人为开采等因素密切相关。2次塌陷前兆特征现象明显,据此可充分利用测震台网记录到的塌陷数据,通过甄别,收集更多的震例,研究总结其规律,并将研究成果应用于日常监测中,以便能对较大矿震事件做到尽早预报预警,更好地服务社会,服务应急等相关部门。

关键词: 采空区 矿震监测 塌陷机理 前兆特征 预测预报

[文章编号] 1001-4683(2020)01-0080-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

代县、繁峙位于山西省东北部,两县地界相连,金属矿产资源品种多、储量大、分布广,代县以铁矿居多,繁峙以金、铁矿为主。随着露天资源枯竭,采矿活动转入地下开采,如今采深超过2km。金属矿山的深度回采,形成了多地多处成片的采空区。随着开采深度加大,地质条件逐渐恶化,深部地压活动将更加剧烈,因而引起采空区顶板冒落诱发矿震的可能性也会随之增加(周辉,2000)。

矿震是指由于采矿活动所诱发的地震,是矿区内在区域应力场和采矿活动作用影响下,使采区及周围应力处于失调不稳的异常状态,在局部地区积累了一定能量后以冲击或重力等作用方式释放出来而产生的岩层震动。矿震主要发生在地质构造比较复杂,地应力相对较大,断裂活动比较显著的矿区(刘大勇等,2007)。从现有资料来看,已知的国内采矿诱发的地震最高震级(本文均指 M_L 震级)为4.2级(董星宏等,2005)。虽然这类地震震级不是很高,但由于震源浅,震中烈度偏高,故破坏性较大(谷新建,2000)。

据山西省地震局测震台网监测数据显示,近年来山西矿震数量明显增加,可监测到的微震数量平均每日十余起,有感塌陷地震时有发生。仅2017~2018年该区就发生2次3.0级以上矿震,即繁峙矿区2017年4月10日19时44分 M_L 3.3地震和代县矿区2018年7月21日02时46分 M_L 3.0地震,2次塌陷都位于忻定盆地的代县、繁峙交界附近,微观震中相距约

[收稿日期] 2019-06-24; [修定日期] 2020-02-02

[作者简介] 董春丽,女,1974年生,高级工程师,主要从事地震监测和分析研究工作。E-mail: nzy2001@126.com

14km。当地村民反映塌陷发生时听到闷响声,房屋晃动,地面摇动,一度引起恐慌。

本文通过分析山西繁峙和代县矿震地震波动力学特征和频谱特征,并综合代县一带的地质结构与矿业开采情况,对代县矿震性质、发震机理做了探讨研究,并对相关问题进行了分析。

1 基本情况简介

山西数字测震台网包括本省 57 个数字地震台,共享河北等相邻 4 省的 17 个子台数据,台站分布相对均匀。信号实时传送到山西省地震局测震台网部,实现数据汇集、实时监控与监测。可监控到引起地面震动的各类事件,并能对达到一定能量的事件进行测控定位(定位精度参照天然地震)。

2018 年 7 月 21 日代县塌陷发生时,恰好某科研单位在震中附近区域临时架设了 6 套流动子台,故震中周围 2° 范围内有 30~40 个台站,最大空隙角小于 45° 。其中,DAX 地震台距离 2 次塌陷震中最近,震中距分别为 23km 和 12km,详见图 1。台网子台完整地记录了这 2 次塌陷孕育的起始、发展和发生的整个过程。图 1 为塌陷周围地震子台分布和 2 次塌陷及

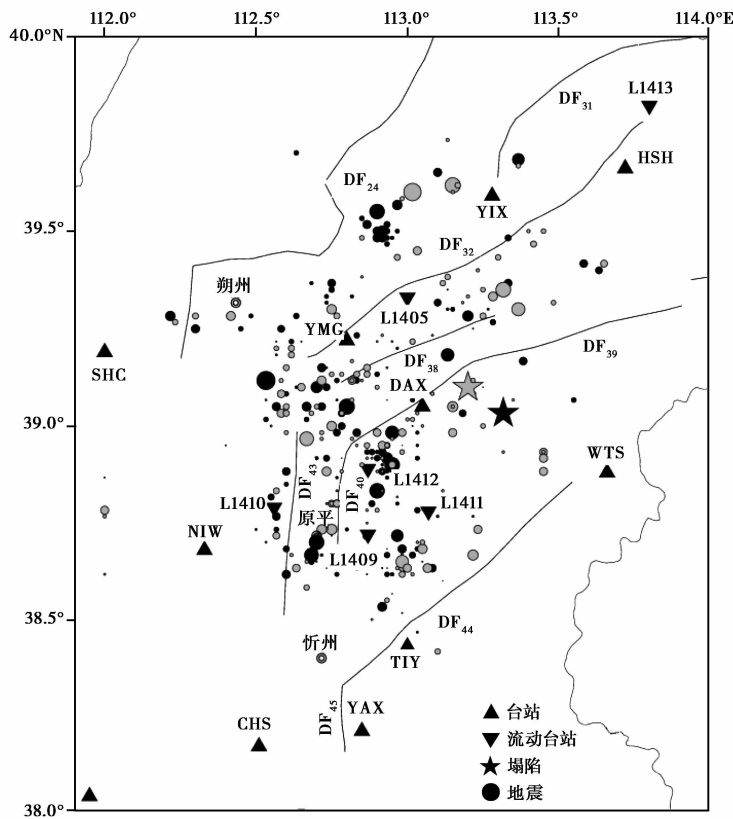


图 1 繁峙和代县 2 次塌陷及其周围部分台站、地震分布

DF₂₄: 口泉断裂; DF₃₁: 六棱山西麓断裂; DF₃₂: 恒山北麓断裂; DF₃₈: 恒山南麓断裂; DF₄₀: 五台山西麓断裂; DF₄₃: 云中南山前断裂; DF₃₉: 五台山西麓断裂; DF₄₅: 系丹山北麓断裂; DF₄₄: 系丹山山前断裂; 黑色表示 2017 年地震和塌陷; 灰色表示 2018 年地震和塌陷

塌陷前后时段(2016 年 12 月~2017 年 5 月与 2018 年 3~9 月)发生在 $38.3^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 、 $112^{\circ}\sim 114^{\circ}\text{E}$ 的天然地震震中分布情况。

2 代县、繁峙 2 次塌陷的特点

2.1 塌陷前兆特征

2017 年 4 月 10 日繁峙塌陷前 40 天,出现上下幅度不对称的正弦波组,幅度很小,大致是地脉动的 3~5 倍,周期约 0.6s,形态单一,为起始的微弱前兆,见图 2(a)。之后 10~15 天内频次和幅度基本没有大的起伏,多日偶发或日发 1~3 次。该前兆只在最近的 DAX 台有记录。随后日频次逐渐增加到 5~8 次。3 月 21 日日频次开始明显增多,为 10~16 次,图 2(b)为一组连发的前兆破裂波形记录,幅度间或增大到原来的数倍至数十倍。波形显示出持续震动的调整过程,这个过程为 3~100s,见图 2(c)。列举的初始前兆和调整波形记录特点,与邢台石膏矿发生矿震时赞皇地震台记录的以张力为主的微破裂形态相似(闻军等,2007)。其间脉动中清晰记录到似近距离爆破的高频事件次数明显增加,垂直向初动多数尖脉冲式向下,形态有别于爆破,有些连发多次的高频事件 N-S 分向清晰,E-W 分向次之,U-D 分向微

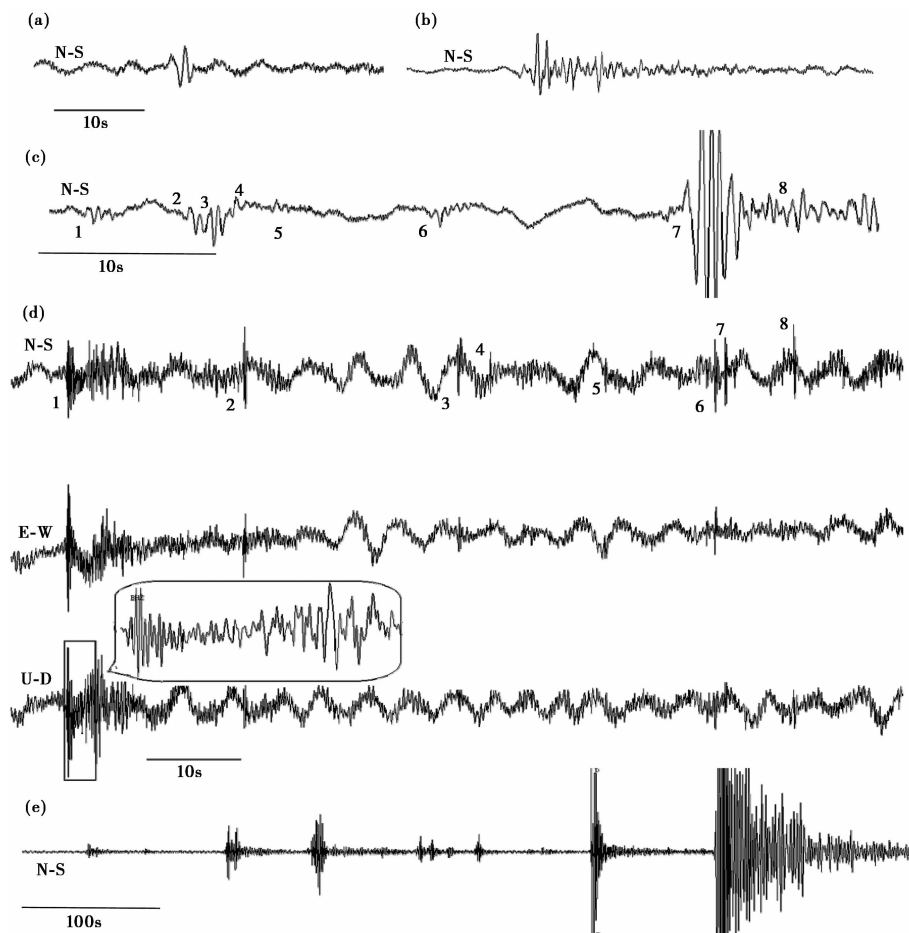


图 2 塌陷前 DAX 台的前兆记录特征

(a) 初始微弱破裂;(b) 连续的多次破裂;(c) 微弱的持续调整记录;(d) 高频事件;(e) 短临频发的前兆破裂

弱,如图 2(d)所示;图 2(d)圆角矩形放大框中是 DAX 台 U-D 向矩形框部分的放大图,清晰看到初动向下。4 月 10 日 19 时 18 分繁峙塌陷前,前兆破裂次数暴增,增至每分钟 3~4 次,幅度骤升到原来的数倍至数十倍。这些密集的短临事件,预示着冒顶即将到来。19 时 43 分在距离塌陷点 7.1km 左右,前后相差 3s 发生 0.8 级和 1.5 级 2 次爆破,紧随爆破之后,引起持续振荡,加剧局部破裂,于 19 时 44 分发生繁峙 3.3 级塌陷。

2018 年 7 月 21 日代县塌陷与繁峙塌陷有相似之处,也有不同之处。相似之处为,在前期初始阶段,前兆特征记录基本相同,最后加速发展阶段情形相似。不同之处为,代县塌陷的发展形成过程中,高频事件相对较少,调整现象较少,且调整持续时间短;最终塌陷发生前爆发 2 次短期的密集前兆破裂,即 20 日 17 时 24~50 分突然破裂幅度陡增数倍至数十倍,频次每分钟 4~6 次,之后相对平静数小时,于 21 日 02 时 36 分又一波破裂袭来,一次接着一波,持续 10min,之后发生 3.0 级塌陷,见图 2(e)。

2.2 塌陷的特征

2 次塌陷地震具体波形显示的特点为最近的 DAX 台记录初始较弱,三分向周期均约 1.0s,纵横波段界限不明,难以区分,3~5 个周期后断崖式衰减,繁峙塌陷尾波衰减快,见图 3(a),代县塌陷衔接 4~6 组明显小于前面周期的横波,见图 3(b)矩形框部分。震中距在 1° 左右时纵横波段相对容易区分,尾波震动持续时间超过 200s,且衰减形态不一,有的逐渐减弱,有的在渐弱后再次增强,面波均非常发育,图 3(c)为部分台站的 N-S 向记录,面波周期在 3~10s;台网距离震中最远处 5° 的台站面波记录也很清楚。总结来看,2 次塌陷均是在

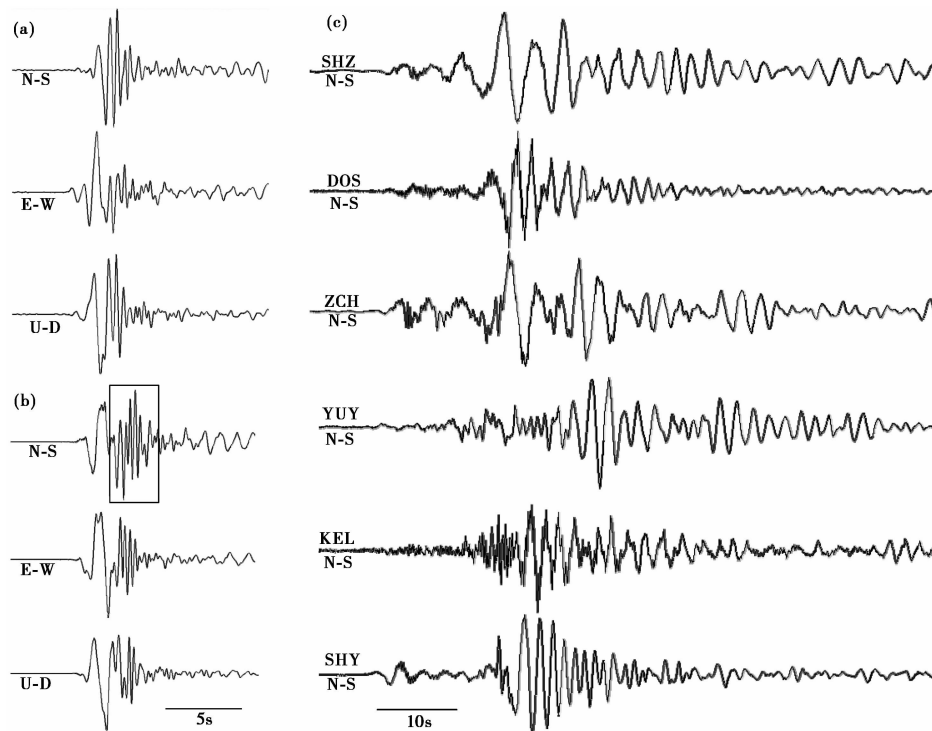


图 3 代县和繁峙 2 次塌陷特征

(a) 繁峙塌陷 DAX 台三分向记录特征;(b) 代县塌陷 DAX 台三分向记录特征;
(c) 繁峙塌陷部分台站的 SN 向面波记录特征

数小时内小能量前兆破裂加剧之后相继发生的。这类事件主要特征是震中分布范围小,无明显迁移现象;震源浅、震级小、烈度高;地震波形简单、周期较大(国家地震局研究所,1984);近台衰减极快,远台面波清晰,尾波长衰减慢;引起地面震动辐射范围广,传播距离远;震时一般伴随响声和空气冲击波等。

3 矿区地质构造和地震地质背景

采空区顶板冒落是多种因素综合作用的结果,并受很多条件制约,一是矿区地形地质条件,即矿体形态、矿层厚度、埋藏深度、水文及工程地质条件、矿体产状、地质构造、矿石和围岩物理力学性质和化学性质等自然因素;二是矿区的开采技术条件,即开采深度、开采方法、采空区体积及其形态、采空区处理方法等人为因素(谷新建,2002)。

3.1 矿区地质构造和开采特点

代县和繁峙两矿区面积总和超过 10km^2 。资源保有量约 3400 万吨,地面加地下开采 20 余年。资料显示,矿区开采批准标高 2150~1050m,厚度小于 5m 的矿体采用浅孔留矿采矿法,厚度大于 5m 的倾斜中厚和缓倾斜厚矿体采用有底柱分段崩落采矿法,存在厚度大于 6m 的倾斜-急倾斜矿体。开拓方式为平硐,下盘竖井有轨运输。平硐标高 2140~1700m。显然,根据矿区矿体复杂的赋存构造特点,多处矿体叠加甚至是高倾角叠加,开采难度大,回采率高,开采技术要求随之增高,风险也逐步逐级增高。李占金等(2018)模拟分析了在马城铁矿深部开采中,应力和位移在一步回采和二步回采顶板和底板的变化,研究表明应力在二步回采后比一步回采后明显加大,集中分布于顶板和底板处且达最大,部分围岩处于失稳状态;位移在一步回采后出现沉降和底鼓现象,顶板处位移大于底部且有厘米级位移量,二步回采侧帮有其 10 倍量级的位移量。因此,在开采过程中,围岩一直处于动态的应力应变调整中。

3.2 矿区地震地质特点

2017 年繁峙塌陷和 2018 年代县塌陷均发生在忻定盆地的北部。忻定盆地是山西地震带中北部一个易积累起高应变能的重要盆地,北侧以恒山隆起区、南侧以石岭关次级隆起区分别与大同盆地、太原盆地分开(黄福明等,1992),总体走向 NE,由 3 个凹陷(代县凹陷、原平凹陷和定襄凹陷)及凹陷间 2 个凸起(大营凸起和金山凸起)共 5 个次级构造单元组成。盆地内活动断裂按平面展布方向可分为 NE、NNE 及 NW 向三组。代县凹陷位于忻定盆地东北部,北、南界分别受恒山南麓断裂和五台山北麓断裂控制。恒山南麓断裂长约 66km,走向 NEE,倾向 SSE,由一系列阶梯状正断层组成;五台山北麓断裂,长约 85km,走向 $N 60^\circ E \sim 70^\circ$,倾向 NW,是一高角度的断裂带,两断裂皆为第四纪全新世活动断裂,由于凹陷南侧断裂活动幅度大于北侧,使得凹陷基底向南倾斜,凹陷中心偏向南侧,南北两侧新生界不等,构成不对称的掀斜构造组合(杨国礼,1983)。盆地内断裂在几何学和运动学方面所表现出的特征与区域应力场的作用密切相关。无论是深部物探资料、微震活动面状分布特点(尹兆民,1986;蔡妍等,2014),还是 2.0 级以上弱震震源机制解(郭祥云等,2017),研究结果均一致表现出区域应力场为拉张的特性。

4 塌陷发展过程特征及成因机理分析

金属矿山地下开采地面塌陷是由于矿山地下开采形成采空区,采空区上覆岩体在自重

和上覆岩土体的压力作用下,产生向下的弯曲与移动(周春梅等,2010)。垂直方向上形成所谓的“三带”,即弯曲带、断裂带、垮落带(王超凡等,1998;武磊彬等,2009;郭念民等,2012)。

金属矿山在岩体物理力学性质、地层结构、矿体形态、赋存条件以及采矿方法方面与煤矿存在较大差异,但在引发矿震的成因机理方面二者也有相似之处。现今利用数字技术和现代化手段针对金属矿山的研究越来越丰富和全面,越来越多的研究成果为我们今天认识和解析同类型的实例提供了依据。本文结合实际地震记录图特征,进一步探求该区塌陷的发展、发震机理。

4.1 现象 1: 塌陷的前兆记录及持续调整现象

在实际地震观测波形记录中,发现 DAX 台在记录小的前兆破裂发生进展阶段,繁峙塌陷记录到的破裂之后持续调整现象多于代县塌陷,且持续时间也远远长于代县塌陷。在 3 月 22 日记录到破裂后的震动持续时间由原来的不到 1 s 增长为 3~6s,而且出现次数也明显增多;其后调整时长延续更长、破裂次数更多。而代县塌陷孕震过程中,这种现象相对较少。就此回头查看 2 次塌陷前后时段的波形数据和周围的地震情况,见图 4。

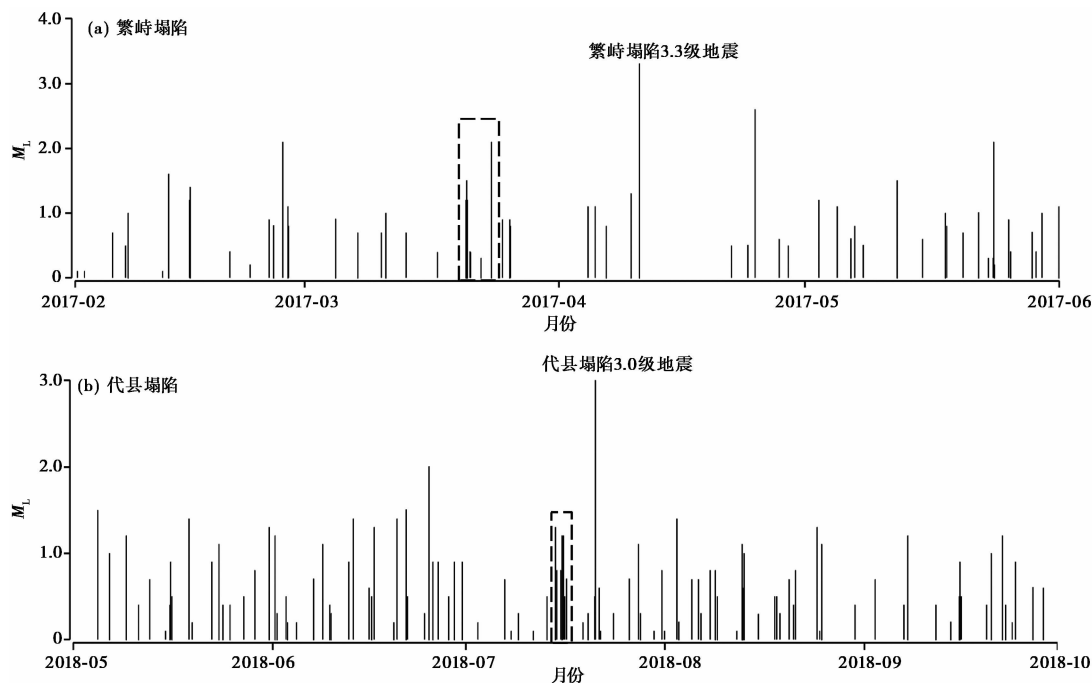


图 4 繁峙和代县 2 次塌陷前后时段地震 $M-t$ 图

通过查看记录,发现其一是繁峙塌陷区域周围 50km 范围内同时期小震频发,图 4(a)中虚线框部分为山阴小震密集。2017 年 3 月 20 日繁峙北西距离约 48km 的山阴在 16 时 16 分~19 时 25 分短短不到 3.2h,就密集发生 27 次小震,震级在 0.4~0.9 级的有 22 次,1.0~1.5 级的有 5 次,23 日 18 时山阴再次发生 2.1 级地震,能量累计达一次 3.0 级的地震,震源深度(8.1 ± 2.0)km。26 日紧邻繁峙西 10km 的代县发生 0.8 级地震,4 月 4 日繁峙当地距离震中约 13km 处发生 1.1 级地震。如此在山阴和繁峙代县两边交替发震,22 日在地脉动

记录中多次出现“破裂—弹性调整—应变恢复—再次破裂”的现象;26 日后调整时长延续到 12~100s。图 4(b)虚线框中表现的是 2018 年代县塌陷前 40km 范围内原平和代县小震增多。这些充分说明了小震的密集发生对区域局部的应力调整影响明显,矿区大面积采空区的围岩和顶板原来所处的平衡状态被打破,受其作用产生形变,从而寻求新的稳定状态。此时顶板受到水平向张力及剪切力作用,处于失稳状态。杨美宏等(2018)对大梨树沟铁矿采空区对地表稳定性影响进行模拟分析,结果表明采空区周围岩体强度的折减远远大于采空高度变化对地表沉降量的影响,说明围岩受力并未达到平衡状态,不断有弹性能转化为裂隙表面能而引起岩体的破坏。其二是 DAX 台周围爆破时间如往日一样,日均 6~8 次,震级在 0.4~1.8 级之间。图 5 为 2017 年 3 月 23 日 17 时 59 分 DAX 台 N-S 向记录的一次爆破的特征,部分爆破后有明显的引起地面震动的效应,说明采矿使顶板产生张裂,采矿爆破震动可造成采空区上部的顶板越来越疏松(杨美宏等,2018),爆破后的破裂表明顶板岩层内部形成的张拉应力弹性势能在转化。2017 年 4 月 10 日 19 时 43 分相隔 3s 发生 2 次爆破,爆破产生的波叠加,传播经过繁峙矿区采空区,引起同步振荡,19 时 44 分诱发 3.3 级的塌陷地震。因此,在繁峙塌陷中,爆破加速了矿震的发生进程。

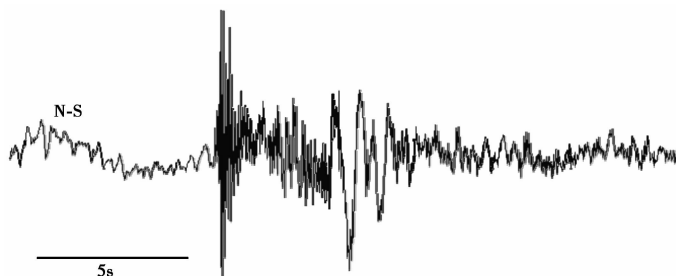


图 5 2017 年 3 月 23 日 17 时 59 分 DAX 台 N-S 向记录的一次爆破的特征

4.2 现象 2: 繁峙塌陷脆裂的现象多,代县塌陷脆裂少

记录中还发现,脆裂的现象在繁峙塌陷前较多,而在代县塌陷前较少,即 DAX 台记录到频发的周期在 0.01~0.03s,较之破裂而言,高频的小事件与爆破频率(周期约为 0.04s)相似但形态特征又有别,垂直分向初动多数向下,有的衰减不到 1s,2~3 个周期很快结束;有的几乎等幅持续 2~5s;在小震(群)频发时段该类高频事件相伴多次发生,有时会相继连续数次,比相同幅度的爆破记录到的台站要少,如果发生爆破,周围 3~5 个台会同期有地震动记录,而这些高频小幅事件基本仅在 DAX 台出现,且在 DAX 台的北南向强于 EW 向,垂直分向最弱(图 2(c))。这表明当时区域主要受水平外力的作用,即 SN 向受到挤压所致。

这些事件从记录的“形”上与谷新建(2002)描述的冒顶岩层发响征兆“岩层内小响如鞭炮声”的“声”相吻合,表明岩层浅部受挤压破坏,岩体发生小的脆性破裂,围岩受力并未达到平衡状态,不断有弹性能转化为裂隙表面能而引起岩体的破坏。一般而言,顶板冒落总是以部分岩层缓慢破裂为先导,随着破裂过程的不断延伸,有关岩体最终将从母体中脱落下来,并相继冒落(谷新建,2002)。当岩块弹射崩落后使得另外一部分岩石暴露,岩石的崩落使得应力又重新分布,未崩落的岩体应力更大,新暴露的岩石受力状态由三轴应力转化为单轴应力,这样就造成持续性的、滞后性的第 2 次乃至更多次的矿震(刘大勇等,2007)。

代县塌陷的这类前兆现象较少,我们认为原因主要在于岩层中孔隙水的含量不同,繁峙塌陷发生在经历数月风大干寒的冬季后少雨的春季,岩体的韧性被削弱,更多地增加了其脆性。代县塌陷发生在 7 月,正处于当地一年中降雨集中的时段,很好地改善了矿区周围和顶层岩体中孔隙水含量,增加了其韧性,降低了脆性,同时也降低了岩石的抗压、抗剪强度,而且由于裂隙的产生、扩大,破坏了岩体的整体性,增加了不稳定因素,改变了地压的分布状态,受弱的外力时容易通过弹性变形来调整释放该能量。

4.3 现象 3:2 次塌陷前的短临现象

2 次主塌陷前均出现短临前兆,破裂间歇性高频率突发(图 2(d))。具体现象是主震前 10~30min,前震破裂开始明显增多,其中 1s 左右低频波组居多,偶有 33Hz 左右的高频波组。这些低频前震波形态与主震波高度相似,能量有大有小,且衰减均很快,其中能量小的仅在最近的 DAX 台记录清楚。低频前震破裂短时间内密集发生,表明应力集中部位已产生塑性变形,处于临界破裂状态。这种前兆现象和刘万琴等(1999)描述的现象基本一致,后者采用弹性波理论和地震破裂成核理论进行分析,认为低频振动可能是亚临界扩展向前时激发的长周期波,是不可恢复的形变;高频振动是脆性破裂辐射的波场。震前短临阶段孕震断裂端点的扩容区体积变化不大,亚临界扩展不仅激发长周期波,而且也常诱发小事件,主震发生时,扩容区体积迅速增大。

4.4 现象 4:2 次塌陷的特点及 DAX 台横波段波形存在差异

2 次塌陷地震波的形态基本一致,说明诱发因素、形成机制和矿震类型相同;DAX 近台 S 尾波段存在不同,说明落体激发的振动波的频率不同,这可能与采空区内赋存物不同有关。查看当地气象资料,显示 7、8 月是当地一年中降雨集中的月份,也是一年主要的降雨期,雷雨天气多。实际的降雨情况是,2018 年 6 月有数日少量降雨,7 月 1~21 日间有 12 天断续降雨,其中 8~9 日、17 日、19 日和 20 日雨量均很大。雨水大量渗透,采空区内容易形成积水,改变了采空区的赋存物质,空区内水气共存。2017 年 4 月 10 日震前,4 月 7~8 日也有连续降雨,雨量中等,但绵绵春雨,滴滴浸润,不足以在采空区内形成积水。共同之处是降雨大大增加了上覆岩体和上覆土体自重、渗透压力以及静水压力,不断给地下中空层增加负担。重力作用增大,超过顶层岩体的最大临界载荷时,偌大塌落体瞬时崩落,对空区内的气体产生的冲击和对水气共存物质产生的冲击激发了不同频率震动波。因此,降雨是 2 次塌陷发生的自然因素的助推器和催化剂,更是导致代县塌陷的“最后一根稻草”。

纵观尾波衰减形态,WUJ、YUY 等台站记录有明显的不同。如图 6 中 YUY 台的记录与 ZCH 台的三道记录形态就不同,横波段衰减长,YUY 台 U-D 分向毛刺比较多、不光滑,而两水平分向在衰减后又再次增强,产生一串较光滑的相对低频的波。

对上述两现象,卫红学等(2014)和段建华等(2010)给出解释,认为采空区以空洞(充水、充气、水气共存)的形式存在时,采空区处的反射波与两边的煤层形成的反射波相比,能量变强(振幅增强),频率变低。查阅地质灾害、国土资源等诸多相关资料确定,右玉地区是山西老矿区,采空区确实存在。这也启发我们通过波形记录图的不同形态特征,充分地读解和利用这些波形数据的内涵,以探索地下的更多“秘密”。

4.5 现象 5:同一区域相继发生 2 次 3 级(以上)塌陷

日常实时监测记录显示,矿区及其周围构造地震时有发生,爆破作业日复一日进行,新

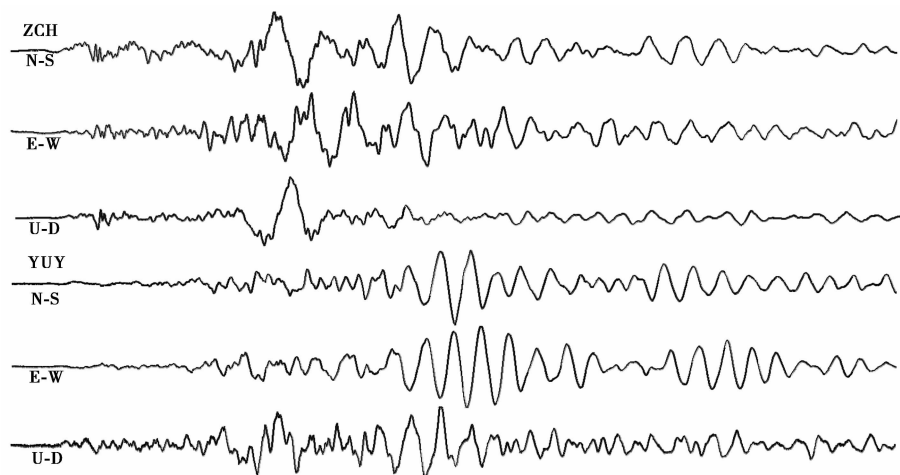


图 6 繁峙塌陷 YUY 台的尾波衰减特征

的采空区也在不断形成、扩大。微小震级的矿震日均十次之多,因其多数不被人们察觉而不受关注。但是,每次这些事件的发生,都会使得围岩和顶板的应力和位移的平衡被打破,应力和位移的分布呈现出各自不同的特点。随着周围采空区的不断形成,在某一个区域内形成了一个“采空区群”,该区域的应力和位移分布较单个采空区均有了较大增加,且增加幅度并不是单纯的叠加,说明在该区域内形成了一种采空区的“群效应”,这种效应使采空区的围岩和顶板的应力状态更加危险,加剧了采空区的危险等级。在采空区群形成过程中,采空区顶板的垂直向位移、应力和矿柱的应力均保持着增加,围岩的应力应变状态在采空区群区域的中心位置最差,而非某个采空区(付建新等,2013)。这也就是说,塌陷的震源体并不大,3级以上的矿震震源体也不足百米,而孕震体尺度远远大于震源体(车用太等,1995)。所以在高应力叠加区域,作业、降雨等因素影响上覆岩体极限承压能力,导致其失去平衡和稳定,诱发连续的矿震。而且,有研究显示,随着开采的继续和周围应力应变的持续动态调整,矿震级别也有逐渐增高的趋势。

5 结论

纵观代县和繁峙 2 次塌陷地震的发展到发震,过程受区域拉张应力作用影响,并和周围地震的活动关系密切,也与持续的开采、采空区的成片、采深的增加以及自然气象因素(如降雨)等息息相关。可见该区域塌陷地震的孕育发震成因机理有着复杂性、多因性、表现性、持久性等特性,因而难以规避塌陷发生的风险。查阅 2008 年以来山西台网记录到的 $M_L \geq 2.5$ 的塌陷,其中有像代县和繁峙塌陷类似特征的情况,比如大同地区部分塌陷,但并非全部。这说明前兆特征表现与区域地质、应力、构造及每次诱发(主要、次要)等因素关系密切。曾有山西大同矿务局第一中学周忠银先生用微震法(LJ-1 微震仪)成功预报了 1980 年 12 月 19 日晋华宫矿南山井古塘塌陷和 1981 年 6 月 7 日煤峪矿小煤窑顶板陷落引起的塌陷地震(贺秀全等,1997),故我们有必要收集和积累更多震例,深入研究,探索预报的可能。另外,2 次塌陷地震的孕育、发生过程,均历时数十天。震源体附近高精度的测震仪器,真实记录了发

展过程的表征现象。因此,可采取措施,加强矿区安全监测预警系统,便于捕捉有前兆特征的塌陷来预报和预警,更好服务社会,服务应急等相关部门,防患于未然,努力将塌陷可能造成的灾害损失减到最小。

致谢: 本文在成文过程中得到中国地震台网中心赵永老师的指导,部分图件得到山西省地震局李丽的帮助,匿名评审专家对本文提出了宝贵修改意见,在此一并致谢!

参考文献

- 蔡妍,吴建平,房立华,等,2014. 鄂尔多斯东缘地震重定位及拉张盆地过渡区的地震分布特征. 地球物理学报, **57**(4): 1079~1090.
- 车用太,马志峰,王尤培,等,1995. 深井水位的矿震效应. 地震学报, **17**(1): 89~95.
- 董星宏,韩恒悦,邵辉成,等,2005. 对陕西榆林地区三次矿震灾害的认识. 灾害学, **20**(2): 96~98.
- 段建华,杨文强,倪新辉,2010. 三维地震技术在探测煤矿腔状采空区中的应用. 中国煤炭地质, **22**(8): 21~24, 38.
- 付建新,宋卫东,杜建华,2013. 金属矿山采空区群形成过程中围岩扰动规律研究. 岩土力学, **34**(增刊1): 508~515.
- 谷新建,2000. 青山硫铁矿区发生地震的原因分析. 中国矿业, **9**(1): 84~87.
- 谷新建,2002. 冒落型矿震成因机理的研究. 中国安全科学学报, **12**(2): 60~63.
- 国家地震局研究所,1984. 中国诱发地震. 北京:地震出版社.
- 郭念民,吴国忱,2012. 非重复采集时移地震正演模拟及可行性分析. 地球物理学进展, **27**(1): 232~245.
- 郭祥云,韩立波,2017. 晋冀蒙交界地区构造应力场特征. 国际地震动态, (8): 129~130.
- 贺秀全,曹金亮,许枝,1997. 山西煤矿采空区塌陷地震特征与预报研究. 中国地质灾害与防治学报, **8**(增刊1): 108~113.
- 黄福明,李群芳,黄佩玉,1992. 山西地震带活动趋势的初步研究. 中国地震, **8**(4): 34~42.
- 李占金,郝家旺,孙文诚,等,2018. 深部大规模开采岩体稳定性数值模拟研究. 金属矿山, (2): 56~60.
- 刘大勇,宋建潮,王恩德,2007. 基于双岩模式的抚顺煤田矿震成因机理探讨. 地质灾害与环境保护, **18**(2): 9~14.
- 刘万琴,李世恩,郑治真,等,1999. 破坏性矿震震前短临阶段震源过程研究. 地震学报, **21**(1): 57~64.
- 王超凡,赵永贵,靳洪晓,等,1998. 地震 CT 及其在采空区探测中的应用. 地球物理学报, **41**(增刊1): 367~375.
- 卫红学,查文峰,冯春龙,2014. 采空区上地震时间剖面的特征分析. 地球物理学进展, **29**(4): 1808~1814.
- 闻军,勾宪斌,赵京铁,2007. 邢台石膏矿矿震孕育过程及警示. 地震地磁观测与研究, **28**(2): 36~40.
- 武磊彬,徐爽,2009. 叠前时间偏移技术在淮北某煤矿采区三维地震勘探中的应用与效果. 地球物理学进展, **24**(6): 2267~2273.
- 杨国礼,1983. 山西的下第三系. 山西省地质局区域地质调查队. 未出版.
- 杨美宏,李占金,郝家旺,等,2018. 大梨树沟铁矿采空区对地表稳定性影响分析. 矿业研究与开发, **38**(6): 40~43.
- 尹兆民,1986. 山西忻定盆地活动断裂几何学、运动学特征及地震活动性研究. 山西地震, (1): 7~12.
- 周春梅,李沛,虞珏,等,2010. 金属矿山地下开采引起地面塌陷的规律. 武汉工程大学学报, **32**(1): 61~64.
- 周辉,2000. 矿震孕育过程的混沌性及非线性预测理论研究. 岩石力学与工程学报, **19**(6): 813.

Mechanism and Cause of Two Collapsed Earthquakes in Daixian and Fanshi, Northeast of Shanxi Province

Dong Chunli^{1,2)} *Wang Zhuojun*^{1,2)} *Zhang Na*^{1,2)} *Ding Xuewen*^{1,2)} *Guo Liqin*³⁾

1) National Continental Rift Valley Dynamics Observatory of Taiyuan, Taiyuan 030025, China

2) Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan 030021, China

3) Seismic Station of Shuozhou Earthquake Hazard Prevention Center, Shuozhou 036000, Shanxi, China

Abstract Deep mining in metal mines is likely to cause cave-in type mining tremor. In this paper we analyze and summarize the process characteristics, morphological characteristics and genetic mechanism of two collapsed earthquakes that occurred in two adjacent iron mining areas of Fanshi and Daixian. It is believed that the generation of these two earthquakes is closely related to the factors such as structural stress, rainfall and artificial mining around the area. The precursor characteristics of the two collapses are clear so that we can make full use of the collapsed data recorded by seismic monitoring network, to screen and collect more earthquake cases. By further studying of the relation between collapse and induced earthquake, we will be able to forecast mining tremor events in time, in order to serve emergency departments and our society better.

Keywords: Goaf; Mine seismic monitoring; Collapse mechanism; Precursor characteristics; Forecast