

王钦莹,张修峰,刘瑞丰,等. 2025. 山东李楼煤矿近场地震波衰减关系与矿震震级测定方法研究. 中国地震, 41(2): 277~288.

山东李楼煤矿近场地震波衰减关系 与矿震震级测定方法研究

王钦莹¹⁾ 张修峰²⁾ 刘瑞丰¹⁾ 蔡辉²⁾
李国营²⁾ 闫宪洋³⁾ 王子博¹⁾

1) 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

2) 山东能源集团有限公司, 济南 250101

3) 兖矿能源集团股份有限公司东滩煤矿, 山东济宁 273500

摘要 矿震的震级较小, 高频地震波丰富, 仅能利用 5km 以内的地震台站进行监测。为得到山东李楼煤矿近场地震波的衰减规律和近震震级 M_L 的量规函数, 在李楼煤矿布设了由 36 个地面台站和 33 个井下巷道台站组成的立体观测台网, 进行了 7 次爆破实验, 取得的主要成果如下: ①利用这些高质量的近场观测资料, 得到李楼矿区 5km 内地面台站和井下巷道台站 S 波衰减规律, 其中在 1km 内 S 波随震源距的衰减非常迅速; ②利用垂直向和水平向资料, 分别得到李楼矿区垂直向和水平向地方性震级的量规函数; ③分别利用垂直向和水平向资料和量规函数, 测定了 7 次爆破的震级, 结果表明利用不同震源距测定的单台震级一致性较好, 且利用水平向资料测定的震级与用垂直向资料测定的震级相差在 0.1 以内; ④根据国家标准 GB 17740—2017《地震震级的规定》, 在 5km 以内地方性震级 M_L 的量规函数是一个常数, 本文利用近场资料得到了 5km 内的量规函数, 是对 GB17740—2017 国家标准量规函数在 5km 内的拓展。本研究所构建的衰减模型及震级测定方法可以推广应用于其他矿区, 使矿山地震的震级测定与天然地震的震级测定协调一致。

关键词: 地震监测 近震震级 量规函数 采矿诱发地震

[文章编号] 1001-4683(2025)02-0277-12 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

在煤矿、金属矿山及地下工程中, 岩体由于应力释放会产生微小地震。微震监测技术可以实时监测和分析微小震动, 已被广泛应用于矿山、油气开采、地质灾害监测等领域。通过监测这些近场区域微震事件, 工程人员能够评估爆破风险和对周围结构的影响, 确保矿区人员和设施的安全, 同时为爆破设计和调整提供数据支持。震级是微震监测系统中的关键参

[收稿日期] 2025-01-20 [修定日期] 2025-05-06

[项目类别] 泰山产业领军人才工程(tscx202408130)、山东能源集团重大科技攻关揭榜挂帅项目(SNKJ2023A17-R01)和应急管理部重点科技计划(2024EMST070702)共同资助

[作者简介] 王钦莹, 女, 2001 年生, 硕士研究生, 主要从事震级测定研究工作。E-mail: wqy0090@163.com

数,在相似的构造区域环境下,震级越大,造成的破坏越严重。Richter(1935)最早提出了地方性震级 M_L 的概念,其利用伍德-安德森地震仪基于南加州的地震数据建立了标准化的地震测量方法。由于不同地质条件导致的衰减特性差异,研究人员对量规函数进行了修正,以适应各地区的需求(Brazier et al, 2008; Scordilis et al, 2013; Ristau et al, 2016; Quinones et al, 2019)。李善邦(1981)将 Richter(1935)原始震级公式引入中国,根据中国不同地区的地质条件和观测设备改进震级计算方法,为不同地理区域制定了地方性震级计算标准和分区量规函数。量规函数描述了地震波随震中距和震源深度变化衰减的特性,其与地壳构造紧密相关,区域构造环境差异较大时,使用同一个的量规函数并不合适。若量规函数不精确,不同区域的震级可能会产生偏差,导致相同震级的地震在不同地区会测出不同的结果(陈培善等,1983)。因此,建立分区地方性震级的量规函数很有必要。国家质量技术监督局(1999)编制了国家标准 GB 17740—1999《地震震级的规定》,规定了用于测定我国境内发生地震震级的量规函数,为震级测定提供了统一的标准和规范。王丽艳等(2016)依据大量观测资料重新测定了区域量规函数,得到了东北与华北、华南、西南、青藏和新疆等区域的地方性震级量规函数及其使用范围。在此基础上,刘瑞丰等(2017)编制了 GB 17740—2017《地震震级的规定》。然而,对于煤矿爆破和矿震,由于震级普遍较小,现有衰减模型未能满足实际需求。现行国家标准主要基于天然地震观测数据建立,而在震源距 5km 以内,地方性震级 M_L 的量规函数设定为常数,不能准确反映矿震在短距离内的复杂衰减规律。叶庆东等(2017)对龙门山断裂带附近微震事件的分析表明,传统量规函数在近震范围内存在显著偏差,建议采用基于实际数据构建的修正函数以提升震级测定的精度。综上所述,确定矿震微震事件震级的前提是建立适用于矿区地面和井下的精细衰减模型。但在近场范围内,震源位置的不确定性会显著影响衰减规律的建立,仅靠矿区的诱发矿震和天然地震记录无法解决这一问题。爆破技术在矿井开采中提高了效率,且爆破位置已知,显著减小了震源位置不确定性对结果的影响,从而为研究矿区衰减规律提供了重要的数据支持。本文利用李楼矿区的爆破数据,建立了适用于李楼煤矿的近场衰减模型和量规函数,并基于 5km 以内近场资料开展近场地方性震级 M_L 的测定方法研究。

1 数据

本研究的观测数据来自在山东李楼煤矿布设的 69 个爆破监测台站,包括 36 个地面台站和 33 个井下巷道台站,台站分布见图 1。地面台站平均间距约 200m,最远距离约为 5km;井下台站沿巷道布设,平均台站间距约 50m。

地面与井下均布设短周期速度型三分量地震仪,两类台站使用的传感器具有不同的幅频响应特性,如图 2 所示。安装于台站地面的地震计,其幅频响应曲线的截止频率约为 0.1Hz,能够有效捕获地震波中的低频成分;井下台站地震计的幅频响应曲线截止频率约为 4.5Hz,主要记录 4.5Hz 以上的高频成分。两种设备在频率响应特性上存在差异,其中地面台站低频段灵敏度更高,井下台站高频段响应更好。

在 2024 年 1 月 22 日至 1 月 27 日期间,共开展了 7 次煤矿爆破实验,炸药量从 20kg 到 280kg 不等,爆破的相关信息如表 1 所示。后续将使用上述台站收集到的地震记录进行分析。

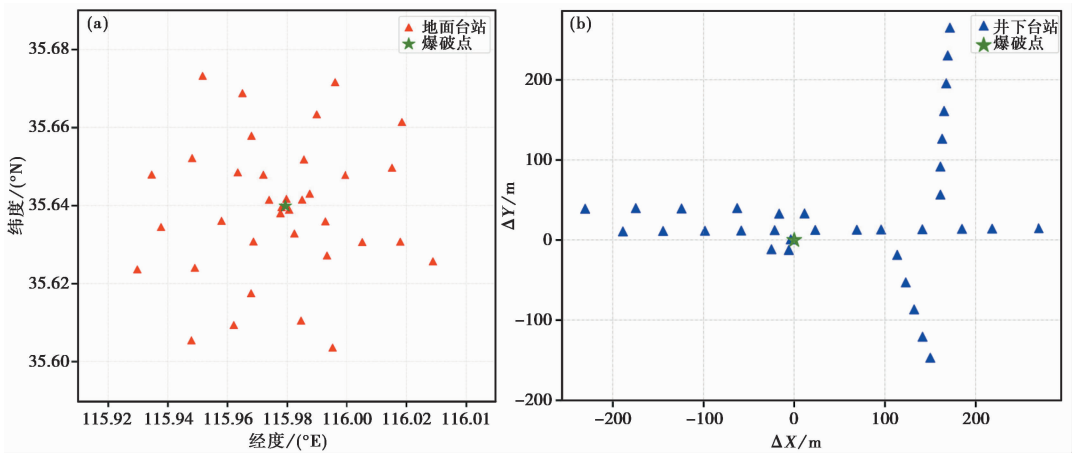


图 1 地面(a)和井下(b)台站分布

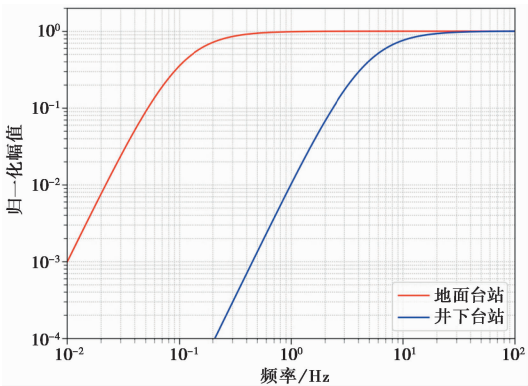


图 2 地面和井下台站地震仪器的归一化幅频响应曲线

爆破事件信息			
爆破事件	时间(年-月-日 T时:分)	爆破孔数	炸药量
1	2024-01-22 T18:52	1	共 20kg
2	2024-01-23 T17:27	2	每孔 40kg, 共 80kg
3	2024-01-23 T20:14	1	共 40kg
4	2024-01-24 T22:07	4	每孔 40kg, 共 160kg
5	2024-01-25 T19:57	5	每孔 40kg, 共 200kg
6	2024-01-26 T15:37	6	每孔 40kg, 共 240kg
7	2024-01-27 T22:47	7	每孔 40kg, 共 280kg

矿山微震或爆破产生的 P 波和 S 波的频率较高,在传播过程中 P 波和 S 波相互作用,尤其在岩体的裂缝和界面处,P 波部分能量转化为 S 波。具体来说,炮孔周围岩体的破碎与开裂是 S 波产生的主要原因,P 波与岩石界面的相互作用会激发透射 S 波和反射 S 波(金旭浩等,2011)。S 波相较于 P 波更易于携带能量,造成的破坏强度更大。在传播过程中,随着震

源距的增加,高频地震波会迅速衰减。

为了更准确分析计算爆破事件的震级,本研究对原始地震波数据去除仪器响应并进行仿真处理。仿真是将给定的一种地震仪记录图映射成另一种地震仪记录图,使不同仪器测得的数据标准化,以便在震级计算中使用一致的参考模型。本研究将爆破产生的短周期地震仪记录转换为伍德-安德森地震仪的记录,消除不同仪器响应特性带来的振幅测量偏差。对于频率高于 1 Hz 的地震波,伍德-安德森地震仪的灵敏度是一个常数,相当于一个高通滤波器,特别适合用于测定矿山微震或爆破的地方性震级 M_L 。

2 方法

2.1 参数拟合反演方法

Richter(1935)最早提出了地方性震级 M_L 的概念,其利用伍德-安德森地震仪建立了标准化的震级测量方法。地方性震级 M_L 的计算公式为

$$M_L = \lg(A) - \lg(A_0) \quad (1)$$

其中, A 是在伍德-安德森地震仪上测得的振幅峰值, $-\lg(A_0)$ 是用于几何扩散和衰减校正的位移校正项,也被称为震级量规函数。

量规函数可以描述地震波随震源距的衰减特性。刘瑞丰(2017)参考 Richter(1935)提出的地方性震级 M_L 的测定方法,制定了国家标准 GB 17740—2017《地震震级的规定》。该标准在设计时综合考虑了台网密度和震级范围,设定的量规函数是关于震源距的分段函数,适用范围为震源距 0~600 km,一般更适合用于固定台站记录的、台间距较大的地震,而不适用于流动台站记录的近场微小地震。项月文等(2018)在应用国家标准量规函数时也发现,震源距小于 60 km 时量规函数明显偏小。在震源距 0~5 km 范围内,由于台站分布稀疏且观测数据不足,国家标准将量规函数设定为常数。煤矿爆破的规模较小,区域衰减特征差异明显,在测定爆破事件的震级时,需要充分考虑震源距 5 km 范围内的台站资料,现有的 5 km 内量规函数标准难以满足矿震震级测定的实际需求。因此,需要根据不同地区的局部特征,建立适用于该区域的精确量规函数。

在近场地震中, M_L 使用 S 波的最大振幅测定。S 波的振幅 A 可以表示为与震源距 r 相关的函数,即

$$A(r) = A_0 r^{-\beta} e^{-\frac{\pi f r}{v Q}} \quad (2)$$

其中, A_0 为震源处初始幅度; β 为几何扩散因子; f 为频率; v 为路径平均 S 波速度; Q 为品质因子,与非弹性衰减成反比。

对式(2)取对数,可以得到

$$\lg(A(r)) = -\beta \lg(r) - 0.43 \frac{\pi f r}{v Q} + \lg(A_0) \quad (3)$$

进一步简化位移校正项,即量规函数 $-\lg(A_0)$, 重新整理上式可得

$$-\lg(A_0) = -\lg(A(r)) - \beta \lg(r) - 0.43 \frac{\pi f r}{v Q} \quad (4)$$

假设 f 、 v 、 Q 是常数, $A(r)$ 为实测数据中已知震源距 r 处测量到的振幅,此时,式(4)的形式可写为

-lg(A₀) = -alg(r) - br - c (5)

其中，a、b、c 为表示几何扩散、衰减及基准水平相关的常数项。量规函数 -lg(A₀) 很好地描述了振幅随震源距的衰减关系，本文基于该衰减模型(式(5))进行参数 a、b、c 的拟合，进一步计算震级。

此时，整理式(1)，地方性震级计算公式可写作

M_L = lg(A) + alg(r) + br + c (6)

2.2 实测数据分析及拟合

由第 7 次爆破地面和井下台站的记录波形(图 3)可以看出，地面与井下台站记录在波形特征上存在明显差异，由于地表附近有沉积层，地面台站高频记录衰减较快，而井下台站高频记录相对丰富。其中，井下台站的波形并未表现出震相到时随震源距增大而增大的规律性，这主要是由于井下台站大多布设在巷道拐角或不规则空间中，传播路径不一定是等距辐射，理论上的震源距并不能完全代表地震波传播路径长度。同时，爆破产生的波形复杂，井下台站布设时距离爆破源较近，井下爆破释放的能量可能沿某个方向集中辐射，受到传播路径及位置的影响，某些较远台站接收到更早的能量成分，使得部分震相到时不随震源距单调变化。

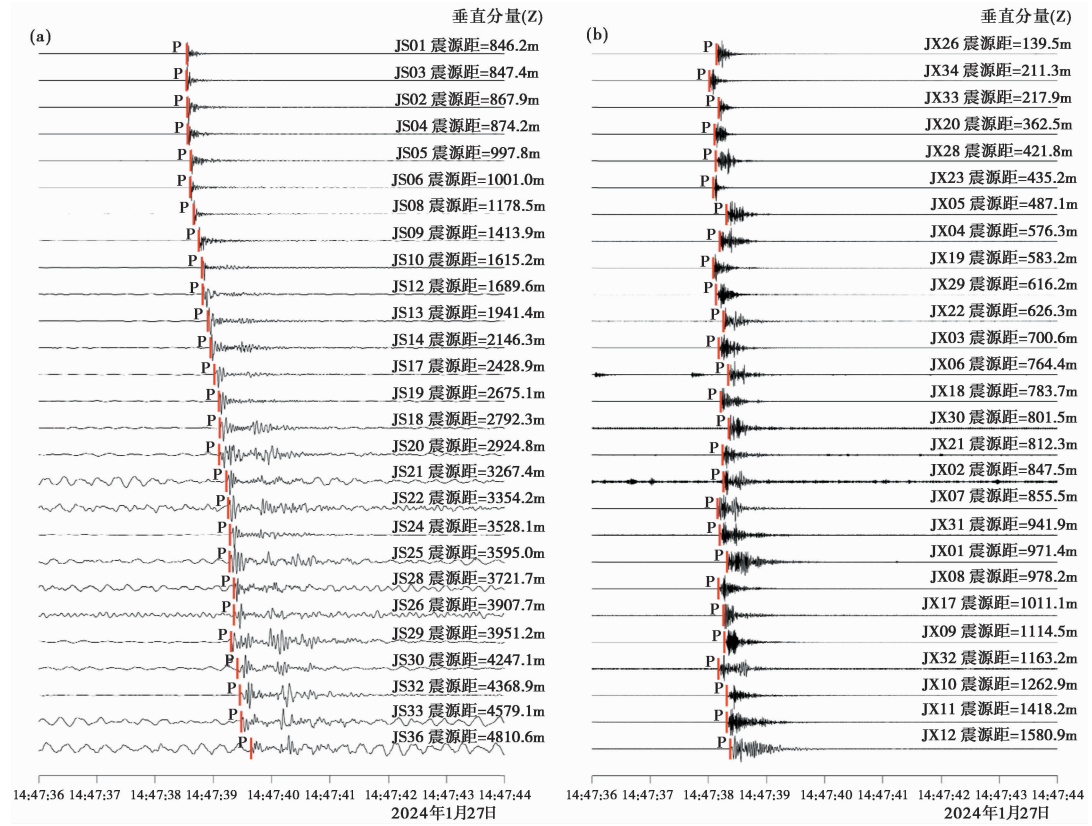


图 3 第 7 次爆破 (280kg) 按震源距排序的垂直向地面 (a) 和井下 (b) 记录

我们测定了这7次爆破事件中垂直向、北南向和东西向地面与井下台站的峰值速度,得到的峰值速度随震源距的衰减关系如图4所示。在震源距1km内,井下台站的数据更为充分,而地面台站的记录相对较少,因此分析主要基于井下数据。在此范围内,尤其是0.5km的近距离区域,井下台站的峰值速度显著衰减。地面台站峰值速度在2km内衰减迅速。

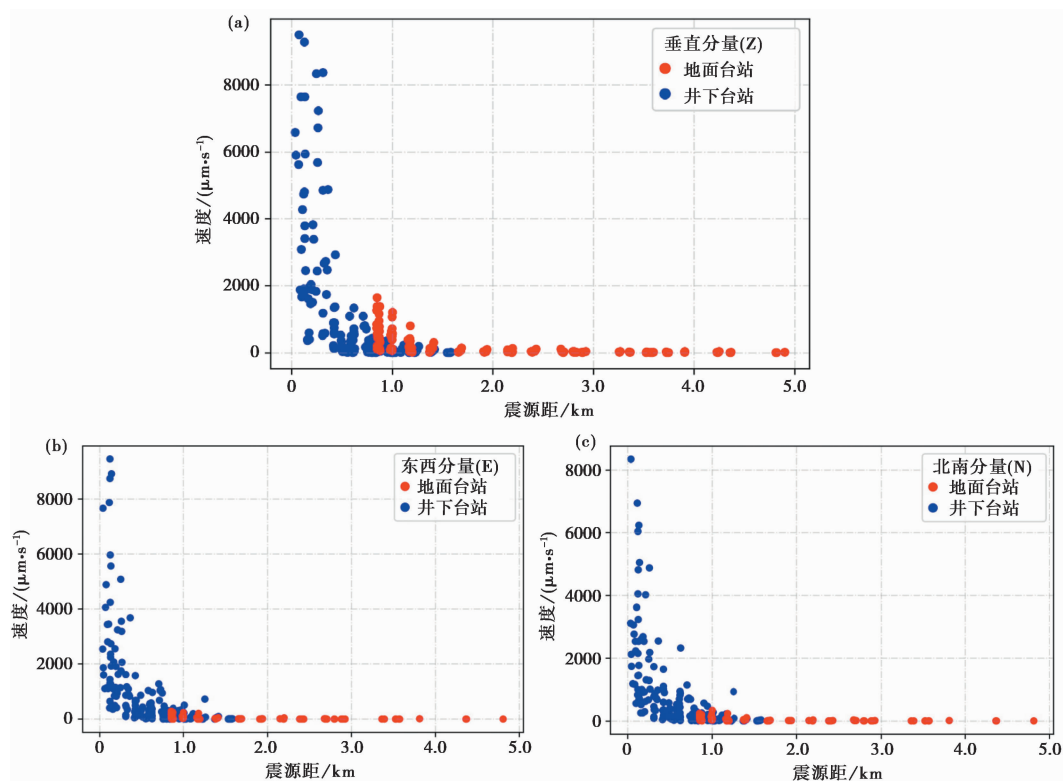


图4 垂直向(a)、东西向(b)和北南向(c)峰值速度随震源距的衰减关系

地面记录与井下记录的波形特征、震源距等均不一致,且井下地震波传播路径复杂,与地面差异较大。因此,需要分别测定地面和井下的量规函数再进一步综合分析。

天然地震的能量主要集中在S波内,在地震台网的地方性震级测定中使用水平向振幅。然而,目前我国安装的煤矿监测系统中,部分仅具有单分量垂直向地震仪,且爆破释放的能量主要集中在P波,垂直向记录的能量更大。同时,地面与井下环境在地质构造、介质属性等方面存在差异,地震波在不同环境的衰减规律也不一样。已有研究表明,使用垂直分量的振幅来确定 M_L 也能得到相同的效果(Alsaker et al, 1991; Kim, 1998; Saunders et al, 2013)。为了更全面地分析爆破事件,需要分别测定垂直向和水平向的量规函数。

综合上述分析,本研究分别测定地面和井下垂直向和水平向的量规函数。

在使用水平向振幅时,根据李善邦的震级测定方法,有

$$A = \frac{A_N + A_E}{2} \quad (7)$$

其中, A_N 和 A_E 分别为南北向和东西向的峰值振幅,单位为微米(μm)。

按照上述流程,基于地面与井下台站的实测数据,将仿真后的位移记录代入衰减模型,可以确定量规函数中的 a 和 b 值。拟合过程中剔除了异常点,使用非线性最小二乘法拟合峰值位移与震源距之间的衰减关系,并以最小化残差平方和(RSS)为目标优化模型参数。残差平方和(RSS)的计算公式如下

$$RSS = \sum_{i=1}^n (A_{\text{observed},i} - A_{\text{predicted},i})^2 \quad (8)$$

其中, $A_{\text{observed},i}$ 为第 i 个观测数据点的实际振幅, $A_{\text{predicted},i}$ 为拟合模型计算出的预测振幅。拟合结果如图 5 所示。

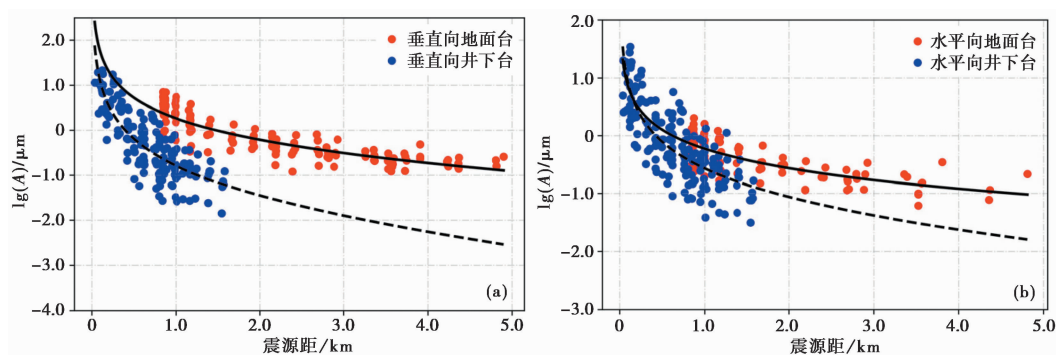


图 5 垂直向(a)和水平向(b)拟合结果

地面台站对应的 c 值(c_1)理论上可根据地方性震级公式确定。Richter(1935)震级公式是基于美国南加州天然地震数据确定的,而本研究区域观测的爆破事件规模较小,震源特性与天然地震不同,其量规函数可能并不适用。已有研究表明,震源距 5km 以内观测台站记录的矿震震级一般高于更远距离台站记录的结果,建议在 5km 范围内采用新的 M_L 常数进行校正(Butcher et al, 2017)。Luckett 等(2019)通过分析多种诱发地震和矿震数据,提出了改进后的地方性震级公式,其公式中引入了一个新的指数项,以改善震源距较近时振幅过高的问题。该公式已被英国地质调查局采纳,用于近震的震级计算。Luckett 等(2019)的研究结果基于地面台站记录的数据建立,本研究参考该震级公式,采用震源距 5km 处对应的 M_L 值 1.27,将其作为地面校正的基准值,即 c_1 的取值。

将拟合得到的地面 a 、 b 值及 5km 处的振幅数据代入式(6),可得地面的 c 值(c_1)。

井下台站的数据主要分布在震源距 1km 内,为保证地面与井下数据的一致性,井下的 c 值(c_2)通过与地面结果对接来确定。对于同一次爆破事件,地面和井下记录的震级结果应无系统性差异。本研究对 7 次事件的观测结果进行统计,分析计算每次事件地面和井下震级的差值,调整 c_2 的取值,使两者的震级平均值相等,确保地面和井下震级测定结果的一致性。

3 结果与讨论

3.1 量规函数

通过拟合实测数据,得到适用于山东李楼矿区的地面和井下垂直向与水平向的量规函数参数 a 、 b 、 c (表 2),并据此绘制了相应的量规函数曲线(图 6)。

表 2 地面和井下垂直向及水平向量规函数参数

类别	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
地面台站(垂直向)	1.45	0.04	0.06
井下台站(垂直向)	1.75	0.14	0.86
地面台站(水平向)	1.05	0.02	0.44
井下台站(水平向)	1.41	0.07	0.68

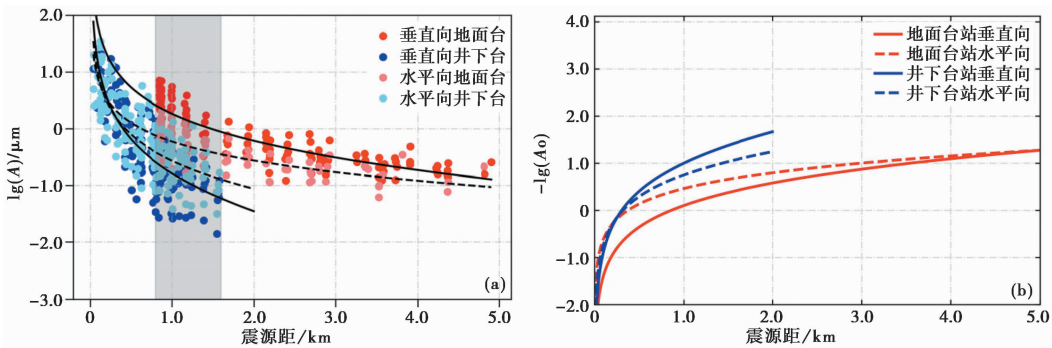


图 6 衰减拟合曲线(a)和量规函数曲线(b)

可以看出,地面和井下的 a 、 b 、 c 值存在显著差异,反映出地震波传播在不同环境中的衰减特性差异。其中, a 表示地震波振幅随震源距的对数衰减速率,井下台站的 a 值均高于地面台站,说明地震波在井下的振幅衰减更快,这一现象也可从图 6(b)中得到验证,井下曲线相比地面更加陡峭; b 体现了路径效应(如散射、吸收等)对振幅衰减的影响,井下的 b 值均高于地面,说明井下的路径效应更为明显,这可能与井下更复杂的地质环境有关,地下介质的高散射和吸收使得振幅随震源距快速衰减; c 表示基准震级水平的校正量,井下的 c 值(c_2)较地面台站的 c 值(c_1)高,说明井下记录的震级水平整体高于地面,进一步验证了分别建立地面和井下量规函数的必要性。

受井下巷道施工条件的限制,井下台站的布设位置相较于地面台站更为受限,难以灵活调整,因此井下台站分布的范围大多集中在爆破点 1km 以内,地面台站大多位于 1km 外,两者存在震源距上的分布偏差。为进一步排除震源距分布差异对参数差异的影响,本文选取震源距为 0.8~1.6km 的地面与井下台站数据进行对比分析,如图 6(a)所示。该区间内地面与井下台站均有较多记录,且属于两类台站震源距的主要重合段。通过对比发现,在该段范围内,井下台站的振幅衰减整体仍大于地面台站,井下拟合结果中 a 值和 b 值也显著高于地面。这表明传播路径的复杂性和介质差异是造成参数差异的主要因素,而不仅仅是由震源距分布范围引起的系统偏差。

3.2 震级计算

将拟合得到的垂直向和水平向量规函数代入式(6),计算得到 7 次爆破事件的震级。震级计算结果及其差值见表 3,垂直向和水平向的震级结果对比见图 7,单台震级结果分布特征见图 8。

由表 3 可以看出,利用两种记录测定的震级差异较小,其中 6 次爆破事件的震级差值均

表 3 地面和井下垂直向及水平向震级及差值

事件	震级(垂直向)	震级(水平向)	震级差(水平向-垂直向)
1	0.16	0.16	0
2	0.81	0.83	0.02
3	0.37	0.46	0.09
4	0.93	0.97	0.04
5	1.00	0.97	-0.03
6	0.94	0.74	-0.20
7	1.24	1.19	-0.05

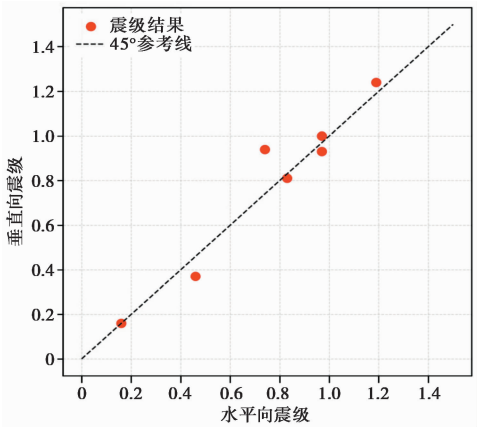


图 7 垂直向和水平向震级结果对比

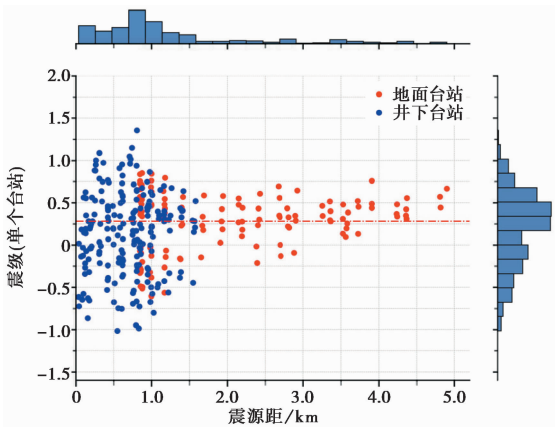


图 8 单台震级结果分布特征

在 0.1 级以内,满足国际地震学与地球内部物理学协会(IASPEI)提出的震级测定标准。第 6 次爆破事件的水平向与垂直向震级差异达 0.2,明显高于其他爆破事件。分析认为,该事件井下台站记录的高频成分显著增强,可能与爆破地点的岩性结构差异或爆破装药方式有关,导致 S 波在井下路径中的衰减更强烈,影响了垂直向记录结果。除此之外,靠近爆破点的台

站常出现幅值异常大的波形,这可能由局部路径效应或仪器放大引起,会导致部分峰值速度偏高。且震中附近个别台站信噪比较低,波形质量较差,影响了振幅测定的准确性,因此震级差异偏大。这表明,垂直向记录和水平向记录的震级测定结果具有较高的一致性,在实际测定中均可以使用。将垂直向和水平向震级结果与 45° 参考线进行对比(图 7),可以看到大部分事件的震级点均分布在参考线附近,进一步说明两种记录的震级结果一致性较好,少量点偏离主要与信号质量和观测台站的差异有关。

图 8 展示了不同震源距地面台站与井下台站的单台震级,结果显示,不同震源距台站测定的震级值无明显系统性偏差,说明新的量规函数能够有效校正震源距的影响,使不同震源距的台站测定的震级值基本一致。其中,井下台站的震级离散度明显高于地面台站,这主要是由于井下台站记录到的高频成分更多,受到的衰减效应影响更明显。地面台站记录则受高频影响较小,因此测定的震级分布更加集中。在上文拟合量规函数时,井下台站的量规函数参数 a 值和 b 值显著大于地面台站,也已反映这一现象。

综上,本文研究结果与 Butcher 等(2017)的研究结果一致,同样验证了震源距 5km 内的观测震级会偏高,并通过拟合新的量规函数解决了这一问题。Luckett 等(2019)的震级公式修正了近场振幅过高的问题,但其研究结果仅基于地面数据,缺乏地下观测信息的支持,本文井下量规函数的研究方法补充了这一不足。

4 结论

本研究通过对山东李楼煤矿 7 次爆破事件的观测数据进行分析,建立了适用于矿区地面和井下的近场衰减模型和地方性震级量规函数,主要结论如下:

(1) 对 36 个地面台站和 33 个井下台站测定的峰值速度进行综合分析,得到李楼矿区 5km 范围内 S 波衰减规律。研究表明,在震源距 1km 内,井下台站数据更为充分,地面台站在此范围内数据较少,衰减分析主要基于井下记录。在此范围内,S 波的衰减非常迅速,尤其是在震源距 0.5km 以内的近震区域,井下台站记录的高频地震波衰减显著。

(2) 利用垂直向和水平向资料,分别拟合得到地面和井下垂直向与水平向的量规函数。拟合结果表明,量规函数参数 a 、 b 、 c 值存在差异,反映了地震波在不同环境中的衰减特性存在差异。

(3) 使用本文得到的量规函数测定了 7 次爆破的震级。结果表明,利用不同震源距台站测定的震级一致性较好,垂直向和水平向记录的震级差异较小,6 次爆破事件的震级差异均在 0.1 级以内,符合国际震级测定标准。

(4) 国家标准 GB 17740—2017《地震震级的规定》中 5km 以内地方性震级 M_L 的量规函数为常数,本研究利用近场资料得到了李楼矿区 5km 内的量规函数,是对 GB 17740—2017 国家标准的拓展。

(5) 本研究建立的近场衰减模型和震级测定方法,不仅适用于山东李楼煤矿,还可推广应用与其他矿区的监测系统,优化现有的矿震震级测定方法,提高矿山地震与天然地震震级测定的一致性,同时还能帮助监测矿震、设计爆破以及评估地震风险。

参考文献

陈培善,秦嘉政. 1983. 量规函数、台站方位、台基及不同测量方法对近震震级 M_L 的影响. 地震学报, 5(1): 87~98.

- 国家质量技术监督局. 1999. GB 17740—1999 地震震级的规定. 北京: 中国标准出版社.
- 金旭浩, 卢文波, 田勇, 等. 2011. 岩石爆破过程 S 波的产生机制分析. 岩土力学, **32**(S2): 228~232.
- 李善邦. 1981. 中国地震. 北京: 地震出版社.
- 刘瑞丰, 陈运泰, 许绍燮, 等. 2017. GB 17740—2017 地震震级的规定. 北京: 中国标准出版社.
- 王丽艳, 刘瑞丰, 杨辉. 2016. 全国分区地方性震级量规函数的研究. 地震学报, **38**(5): 693~702.
- 项月文, 陈浩, 肖孟仁, 等. 2018. 江西地区地方性震级的量规函数与台基校正研究. 中国地震, **34**(1): 122~132.
- 叶庆东, 王生文, 余大新, 等. 2017. 龙门山断裂带科学钻探 3 号井孔附近微震近震震级与矩震级的关系及意义. 中国地震, **33**(3): 385~395.
- Alsaker A, Kvamme L B, Hansen A, et al. 1991. The M_L scale in Norway. Bull Seismol Soc Am, **81**(2): 379~398.
- Brazier R A, Miao Q, Nyblade A A, et al. 2008. Local magnitude scale for the Ethiopian Plateau. Bull Seismol Soc Am, **98**(5): 2341~2348.
- Butcher A, Luckett R, Verdon J P, et al. 2017. Local magnitude discrepancies for near-event receivers: implications for the U.K. traffic-light scheme. Bull Seismol Soc Am, **107**(2): 532~541.
- Kim W Y. 1998. The M_L scale in eastern North America. Bull Seismol Soc Am, **88**(4): 935~951.
- Luckett R, Ottemöller L, Butcher A, et al. 2019. Extending local magnitude M_L to short distances. Geophys J Int, **216**(2): 1145~1156.
- Quinones L, DeShon H R, Jeong S, et al. 2019. Tracking induced seismicity in the Fort Worth Basin: A summary of the 2008~2018 North Texas earthquake study catalog. Bull Seismol Soc Am, **109**(4): 1203~1216.
- Ristau J, Harte D, Salichon J. 2016. A revised local magnitude(M_L) scale for New Zealand earthquakes. Bull Seismol Soc Am, **106**(2): 398~407.
- Saunders I, Ottemöller L, Brandt M B C, et al. 2013. Calibration of an M_L scale for South Africa using tectonic earthquake data recorded by the South African National Seismograph Network: 2006 to 2009. J Seismol, **17**(2): 437~451.
- Scordilis E, Kementzetzidou D, Papazachos B. 2013. Local magnitude estimation in Greece, based on recordings of the Hellenic Unified Seismic Network(HUSN). Bull Geol Soc Greece, **47**(3): 1241~1250.

Near-field Seismic Wave Attenuation Relationship and Magnitude Determination Method for Mining-induced Earthquakes in Lilou Coal Mine of Shandong Province

Wang Qinying¹⁾, Zhang Xiufeng²⁾, Liu Ruifeng¹⁾, Cai Hui²⁾, Li Guoying²⁾,
Yan Xianyang³⁾, Wang Zibo¹⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Shandong Energy Group Co., Ltd., Jinan 250101, China

3) Dongtan Coal Mine, Yankuang Energy Group Co., Ltd., Jining 273500, Shandong, China

Abstract Mining-induced earthquakes are typically of low magnitude and dominated by high-frequency seismic waves, which can only be effectively recorded by seismic stations located within 5km of the source. To investigate the attenuation characteristics of near-field seismic waves and to develop a local magnitude (M_L) calibration function for the Lilou Coal Mine in Shandong, this study established a three-dimensional seismic observation network comprising 36 surface stations and 33 underground tunnel stations. Seven controlled blasts were conducted to generate high-quality seismic data. The main findings are as follows: (1) Using the near-field seismic records, the S-wave attenuation characteristics within 5km were derived for both surface and underground stations. S-wave attenuation was observed to be particularly rapid within 1km of the source. (2) Calibration functions for M_L were established using both vertical and horizontal components, enabling magnitude estimation in both directions. (3) Applying these calibration functions, the magnitudes of the seven blasts were determined. The results showed strong consistency across various hypocentral distances, with the difference between magnitudes derived from horizontal and vertical components remaining within 0.1. (4) According to the national standard General Ruler for Earthquake Magnitude (GB 17740—2017), the M_L calibration function within 5km is constant. However, this study derived a new calibration function specifically for near-field conditions, thereby extending the applicability of the national standard to mining environments. The attenuation model and magnitude determination method developed here can be applied to other mining regions, enhancing consistency in the magnitude assessment of mining-induced and natural seismic events.

Keywords: Seismic monitoring; Near-field earthquake magnitude; Calibration function; Mining-induced seismicity