

矿区煤矸石淋溶对周边地下水环境污染分析

骈炜¹,张敬凯²,王金喜¹,程文净¹,牛红兰³,樊景森¹,牛红亚¹

(1. 河北工程大学 地球科学与工程学院,河北 邯郸 056038;2. 河南省煤田地质局,河南 郑州 450016;

3. 伊犁州建设工程质量监督中心站,新疆维吾尔自治区 伊宁 835000)

摘要:为了研究煤矸石中重金属元素对环境的污染情况,在河南巩义市内某煤矿区采集了煤矸石及周边浅层地下水样品。采用淋溶试验法及电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)分析测定了煤矸石及地下水中部分重金属元素的含量。结果表明:该地区煤矸石中元素Cr和Pb的含量较高;堆放在地表煤矸石随着时间的延长,淋溶出煤矸石中的元素总量随之增高,但溶出趋势各异;塌陷区的浅层地下水中除Cr和Sr元素外,其它元素的含量均高于非塌陷区对应的元素;塌陷区浅层地下水样品中Cr、Cu元素以及非塌陷区浅层地下水样品中Cr元素的含量偏高,分别为17.6、59.4和22.8 g/L。根据元素淋溶规律,对比塌陷区与非塌陷区元素含量,推断塌陷区浅层地下水中Cu和Pb元素值较高与矸石山有关。

关键词:煤矸石;重金属;环境污染;淋溶实验

中图分类号:X523

文献标识码:A

Environmental pollution of surrounding groundwater from coal gangue leaching in mining area

PIAN Wei¹, ZHANG Jingkai², WANG Jingxi¹, CHENG Wenjing¹, NIU Honglan³, FAN Jingsen¹, NIU Hongya¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038, China;

2. Henan Coal Field Geology Bureau, Henan Zhengzhou, 451150, China; 3. Yili Construction

Quality Supervision Center, Xinjiang Yining, 835000, China)

Abstract: In order to investigate the environmental pollution of heavy metals in coal gangue, samples of the coal gangue and shallow groundwater in surrounding areas were collected in Gongyi City, Henan Province. The coal gangue samples were treated by leaching experiment first. Then the contents of metallic elements in groundwater and treated coal gangue leaching water samples were measured by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The results showed that the contents of Cr and Pb were high in coal gangue, and the amount of the metallic elements increased as the coal gangue stacking over time with variable dissolution trends. The contents of most metallic elements in shallow groundwater were higher in the collapsed area than in the non-collapsed area, except for Cr and Sr. The contents of Cr and Cu in shallow groundwater samples from collapsed area, and Cr from non-collapsed area were high, as 17.6, 59.4 and 22.8 g/L, respectively. Based on the leaching characteristics, and comparison between the contents of metallic elements in the collapsed and non-collapsed areas, we suggested that the high contents of Cu and Pb in shallow groundwater in collapsed area were closely related to the coal gangue dump.

Key words: coal gangue; heavy metal; environmental pollution; leaching experiment

随着环境保护意识的提高,人们关于煤矸石 中有害金属对周围环境影响的关注度越来越

收稿日期:2016-04-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41541038);河北省自然科学基金资助项目(D2016402120);河北省教育厅优青基金资助项目(YQ2014020) 特约专稿

作者简介:骈炜(1991-),女,河北邯郸人,硕士,研究方向为环境地球化学。

高^[1-2]。一般情况下在采煤过程中所采集的煤矸石都是直接运输到地表堆放,大部分煤矸石堆积在地表并形成一定规模。由于风化、日晒、雨淋以及人为破坏等因素作用,煤矸石中的重金属等元素释放使矸石山周围,包括土壤、地表水、地下水等在内的周边环境和人体健康受到影响^[3-7]。余运波^[8]发现在煤矸石淋溶以及浸泡过程中会溶出重金属元素、硫化物、多环芳烃等,对矸石山周围环境造成污染。李旭华^[9]研究认为煤矸石为限制植物生存、生长和导致环境污染的重要污染源^[10]。冯吉艳等^[11]从生物的角度研究了煤矸石中重金属对人体可能会带来的影响。目前,国内外学者开展了有关降雨对矸石山周围土壤、地下水以及植被影响的相关研究,但该方面的研究仍存在很多不足。此次研究不仅研究了试验区煤矸石淋溶水,还与其它地区地下水进行了对比分析。另外采用电感耦合等离子质谱仪(HR-ICP-MS)(Element I, FinniganMAT)对样品进行分析,可以检测出更多微量元素,使研究数据更为全面。

1 样品采集与分析

1.1 研究区概况及样品采集

本研究区域位于河南省郑州市巩义市境内,该区为低山丘陵地形,总的构造走向大致呈北西、倾角平缓的单斜构造。构造以断层为主,局部为褶皱。综合考虑煤矸石山周围的具体环境,根据采样需求于2014年6月在该研究区煤矸石山及附近非塌陷区周围采集样品,其中煤矸石样品一份(GS),在受煤矸石山影响的塌陷区采集浅层地下水一份(W1),在非塌陷区采集浅层地下水一份(W2)。

1.2 样品处理及分析

(1) 样品处理

将煤矸石样品平铺在托盘中自然风干,风干后将煤矸石样品中的杂草、碎石等去除,从而减少实验误差。用粉碎制样机将煤矸石样品粉碎,一部分用球磨机研磨至200目备用;另一部分煤矸石样品用粉碎机粉碎至粒径 ≤ 2 mm^[12]。

浅层地下水水样采集后,每升水样滴入10 ml硝酸(分析纯),水样在4℃冷藏室保存。

(2) 消解实验

将研磨至200目的煤矸石样品放入干燥箱中干燥。称取干燥后的煤矸石样品放入聚四氟乙烯瓶中并加入浓硝酸、氢氟酸和高氯酸。将聚四氟乙烯瓶放入消解罐中拧紧,再放入烘箱中160℃烘15 h,待常温后将聚四氟乙烯瓶放在电热板上210℃进行赶酸,向赶酸完毕后的聚四氟乙烯瓶中加入1 mL硝酸、2 mL去离子水,放入消解罐中拧紧,再放入烘箱中160℃烘3 h。用浓度为2%的硝酸定容至50 g,放入聚乙烯瓶中待测^[13]。

(3) 淋溶实验

根据当地雨水的pH值和成分分析,选用硫酸、硝酸、去离子水配制pH值为5.5~5.7之间的淋溶液。将研磨粒径 ≤ 2 mm的煤矸石样品用去离子水浸泡24 h。石英砂用去离子水清洗至水不再浑浊,放入质量分数为4%的盐酸浸泡24 h,要求质量分数为4%的盐酸体积比石英砂大20%~30%,再用去离子水洗至中性。实验装置为直径 $d=200$ mm,高度为 $h=250$ mm的筒式分液漏斗;选用PVC管、PVC管固和纱布制作滤柱,将直管和管固连接处夹上纱布,在纱布上放置2张快速滤纸,以防止淋溶过程中出现底部煤矸石渗漏的现象^[2]。将浸泡后的煤矸石样品装入PVC管中约30 cm,在煤矸石上均匀的铺上处理过的石英砂,厚度约为5 cm,以保证均匀布水。

动态淋溶模拟实验采用间歇式蓄水的动态淋溶,模拟当地大气降水过程,根据当地往年的降水量设计实验,每收集2 500 mL淋溶液取样一次,代表模拟一年的降水量,连续收集10次。每次取样50 mL后加入硝酸3 ml酸解,采用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)分析方法分析酸解后的淋溶水样品。淋溶实验所得样品GL1~GL10,分别代表煤矸石淋溶实验第1~10天的水样。

(4) 电感耦合等离子质谱 ICP-MS 分析

本研究采用电感耦合等离子质谱仪(HR-ICP-MS)(Element I, FinniganMAT),根据DZ/T0223-2001电感耦合等离子质谱(ICP-MS)分析方法对样品进行分析。雾化室:石英双通道, Piltier 半导体控温于20℃;采样锥材料 Ni;功率1 350 W;炬管:石英一体化,2.5 mm中心通道;载气流速:1.08 L/min;在线内标:ICP-MS仪器的工作参数为仪器全自动优化调协给出,满足仪器安装标准要求的背景值、稳定性、灵敏度等各项参数。

表 1 煤矸石样品中元素的含量(mg/kg)

Tab. 1 Content of metallic elements in coal gangue (mg/kg)

	Cr	Ni	Cu	Pb	Ce	Co	Y	V	Sr
GS	207	19	14	102	82	15	42	242	147
河南土壤背景值 ^[14]	63.8	26.7	19.7	19.6	65.2	10.0	24.4	94.2	160
巩义市煤矸石 ^[15]	80.5	52.5	19.2	52.9	-	14.7	-	119.3	169.3

表 2 煤矸石淋溶水中元素的含量(g/L)

Tab. 2 Contents of metallic elements in leaching water from coal gangue (g/L)

	Cr	Ni	Cu	Pb	Ce	Co	Y	Sr
GL1	30.4	198	136	123	2.82	19.4	0.655	503
GL2	29.2	63.8	56.9	68.1	0.577	7.12	0.106	288
GL3	35.3	50.8	60.7	41.9	0.460	5.22	0.074	236
GL4	20.1	53.2	73.6	36.0	0.400	4.34	0.064	229
GL5	31.4	30.9	59.5	28.6	0.167	2.69	0.037	151
GL6	12.3	30.7	21.1	32.1	0.673	2.83	0.332	166
GL7	23.7	35.6	35.9	27.7	0.432	3.09	0.177	176
GL8	19.8	26.9	29.9	25.7	0.219	2.48	0.088	137
GL9	14.8	24.3	30.0	18.0	0.203	1.72	0.052	104
GL10	16.9	22.7	24.5	20.1	0.125	1.93	0.041	120

2 结果和讨论

2.1 煤矸石中元素含量分析

ICP-MS 分析仪对煤矸石样品中的元素含量进行分析,分析结果见表 1。

由表 1 可知,煤矸石样品中元素 Cr、Pb、Ce、Co、Y、V 的含量高于河南省土壤背景值。对比巩义市煤矸石元素的平均值可知,大峪沟矿煤矸石中的 Cr 的含量高出巩义市煤矸石元素平均值 126.5 mg/kg; V 的含量高出巩义市煤矸石元素平均值 122.7 mg/kg; Pb 的含量高出巩义市煤矸石元素平均值 49.1 mg/kg。张明亮^[16]等研究的山东某矿区煤矸石中 Cr 和 Pb 元素分别为 121.01 和 125.5 mg/kg; 欧阳赛兰^[2]研究的邯郸九龙矿区煤矸石中该两元素分别为 46.76 和 20.2 mg/kg; 章建议^[17]研究的贵州盘县矿区煤矸石中 Cr 和 Pb 元素分别为 12.19 和 8.74 mg/kg。与以上各地煤矸石中 Cr 元素含量相比,该研究区域内的煤矸石中 Cr 元素含量高出其它地区 1~16 倍。而除山东某矿区^[16]煤矸石中 Pb 元素略高于本研究区内的值,其它地区煤矸石中 Pb 的含量均低于本研究区域的值。

2.2 动态淋溶过程元素溶出机理

动态淋溶模拟实验通过模拟降水过程中煤矸石中各元素的溶出状况,进而分析煤矸石溶解释放金属元素的特点。

由表 2 可知,淋溶水中各元素的含量整体趋势随着淋滤时间的增加均呈逐渐下降的趋势。其中 Ni、Cu、Pb、Ce、Co、Y、Sr 元素在第二次淋溶水中的含量明显降低,之后趋于平稳,这与山东某矿区煤矸石淋溶实验结果^[16]相似。元素 Cr 释放较为平稳,但整体为下降趋势与山东某矿区的实验结果^[16]不同,与贵州盘县^[17]和河北九龙矿区^[2]的实验结果相似。与张明亮^[16]等所得出的研究结果对比发现,虽然元素 Cu 的本底值并不高,但淋出率相对较高。

由于煤矸石山的露天堆放且场地固定,长时间的雨水冲刷溶出的各元素会在矸石山下方土壤的过滤吸附作用下,在同一地方不断累积进而扩散,故在此计算其各元素的累计溶出量来进行研究。由以上数据可知,Cr 元素随着淋溶时间的延长溶出总量也随之增加,溶出时间与溶出总量呈正比。由于 Cr 释放速率不变,释放总量会随着淋溶时间的延长而增多。

各元素的溶出总量为实验中每次与前几次淋溶出各元素的总量,校正决定系数(R)可以用来评价回归方程的优劣。由图 1(a)可见 Y 元素溶解初期、中期和末期释放速度分别为慢、快、慢。由于这种元素达到一定淋溶时间后释放速率会随着淋溶时间的增长而逐渐减少,因此煤矸石在地表堆放过程中 Y 元素的释放会达到平衡,无限接近于一个常数。

图 1(b)和(d)表明,Ni、Cu、Pb、Ce、Co、Sr 的

溶出规律为对数关系,这些金属元素溶解初期为快速释放,末期为慢速释放。Ni、Cu、Pb、Ce、Co 和 Sr 在煤矸石中的含量分别为 19、14、102、82、15 和 147 mg/kg。通过煤矸石动态淋溶实验可知 Ni、Cu、Pb、Ce、Co、Sr 这六种金属元素呈幂数释放趋势,随淋溶时间的增长释放量减少。所以此类金属元素的释放会逐渐达到平衡。

通过对动态淋溶实验淋溶水中元素含量分析,可知虽然溶出趋势有所不同,但淋溶出的金属元素的总量会随着煤矸石在地表堆放时间的延长而增多。图 1 曲线趋势表明 Cr 元素的溶出速率几乎不变,且该地煤矸石中 Cr 元素含量较高,故长期堆放于地表其污染程度不可小视;Ni、Cu、Pb、Ce、Co、Sr 在地表堆放过程中呈对数增长,随着时间的增加释放量会逐渐减少;Y 达到一定淋溶时间后释放速率会随着淋溶时间的增长而逐渐减

少。由此可见,随着煤矸石在地表堆放时间的增长,Ni、Cu、Pb、Ce、Co、Sr、Y 对矸石山周围土壤环境和地下水环境的影响趋于一个常值,这与张明亮^[16]等研究山东矿区所得出的结论相似。

2.3 浅层地下水中重金属元素含量分析

不同种类的土壤对重金属的吸附作用是不同的,所以淋溶水对地下水的污染程度首先取决于土壤的渗透能力,此外还取决于渗入雨量、塌陷区底部的岩性、土性质、岩层隔水和含水性^[18-19]。为研究矸石山对浅层地下水的影响状况,在该区域采集了两处地下水样品,W1 位于塌陷区,距矸石山约 400 m;W2 位于矸石山西北的非塌陷区,距矸石山约 3 000 m。表 3 为浅层地下水中各元素的含量。

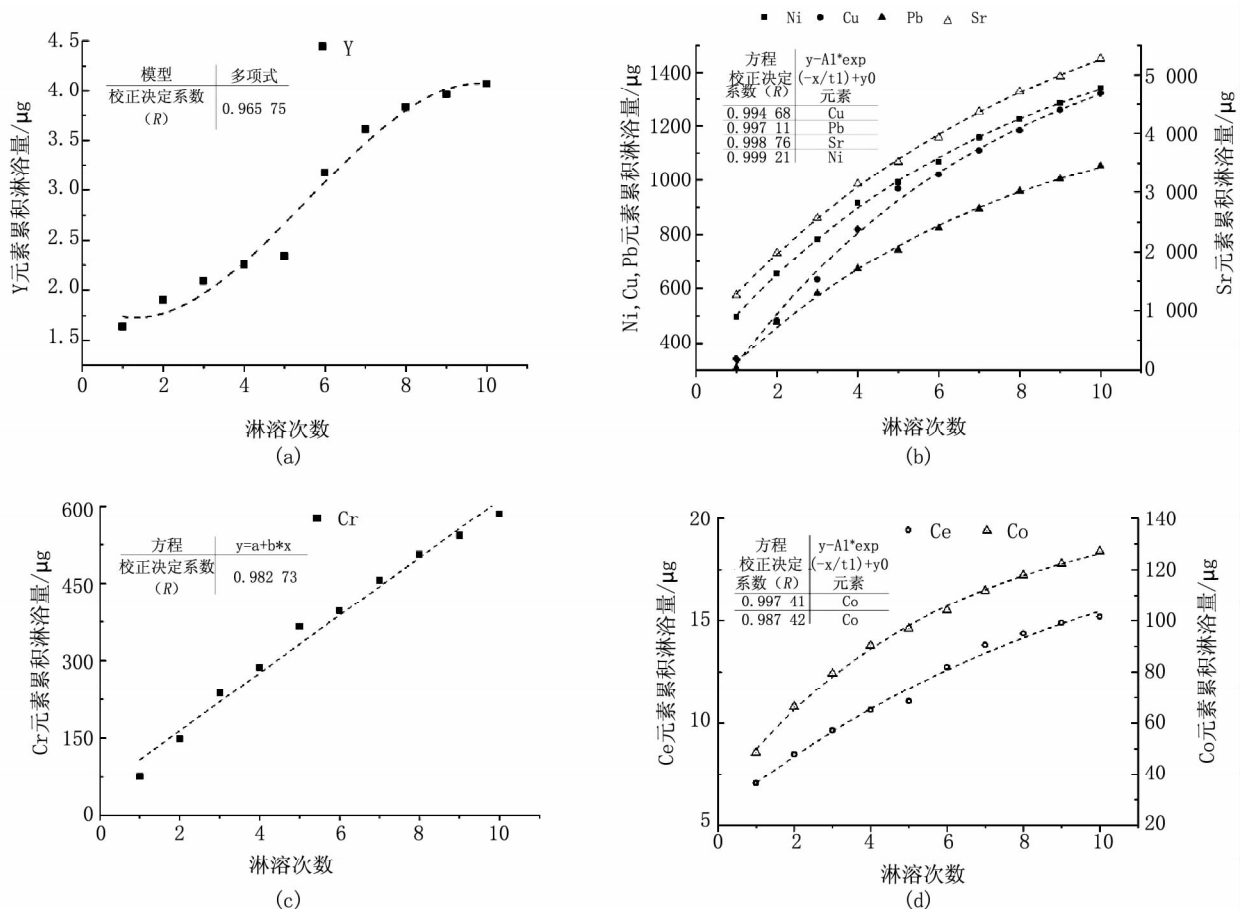


图 1 元素溶出规律

Fig.1 Leaching characteristics

表 3 浅层地下水样品中元素的含量(g/L)

Tab.3 Contents of metallic elements in shallow groundwater (g/L)

	Cr	Ni	Cu	Pb	Ce	Co	Y	Sr
W1	17.6	44.5	59.4	6.01	0.886	2.37	0.604	2 133
W2	22.8	10.3	6.95	0.423	0.052	0.620	0.077	2 516

表4 地下水质量分类指标^[20]

Tab.4 Groundwater quality classification index

类别标准值项目	I类	II类	III类	IV类	V类
铜(Cu)/mg·L ⁻¹	≤0.01	≤0.05	≤1.0	≤1.5	>1.5
钴(Co)/mg·L ⁻¹	≤0.005	≤0.05	≤0.05	≤1.0	>1.0
铬(六价)(Cr ⁶⁺)/mg·L ⁻¹	≤0.005	≤0.01	≤0.05	≤0.1	>0.1
铅(Pb)/mg·L ⁻¹	≤0.005	≤0.01	≤0.05	≤0.1	>0.1
镍(Ni)/mg·L ⁻¹	≤0.005	≤0.05	≤0.05	≤0.1	>0.1

由表3可知,塌陷区的浅层地下水中除Cr和Sr外,其它元素的含量均高于非塌陷区浅层地下水中同类元素的含量。由表4可知,非塌陷区浅层地下水样品中Cu、Pb、Co元素和塌陷区浅层地下水中Co元素的含量较低,达到一级国家土壤环境质量标准。塌陷区浅层地下水样品中Cr、Cu元素和非塌陷区浅层地下水样品中的Cr元素的含量偏高,为III类水标准。塌陷区浅层地下水样品中Ni、Pb元素和非塌陷区浅层地下水样品中的Ni元素的含量均在二级标准以内。由以上数据可知,两地浅层地下水中Cu和Pb元素的值相差较大,塌陷区明显高于非塌陷区,并且根据本研究区域的煤矸石元素值可知Pb元素的含量相对较高,淋溶数据显示元素Cu的淋出率相较其它地区溶出率偏高,由此推断塌陷区浅层地下水中Cu和Pb元素值较高与矸石山有关。陈志良^[21]等在研究关东大宝山矿区时的实验数据显示Cu和Pb元素在酸性的水环境下更容易渗出,Cu和Pb元素有较为一致的渗出特点。元素Cr在两地浅层地下水中均有检出,非塌陷区浅层地下水中Cr的含量略高于塌陷区Cr的含量且相差较小,这可能是由于煤矸石淋溶水中Cr元素的溶出率较低,加之淋溶水经过土壤对Cr的吸附后使其进入水体中的量相对较少;另一方面郝汉舟^[22]等也曾对河南省的地下水水质进行了详细的评价分析指出河南省浅层地下水水质处于II类—III类水之间,所以本研究区浅层地下水中Cr元素的值受当地浅层地下水背景值的影响较大。

分析浅层地下水可知塌陷区的浅层地下水中除Cr和Sr元素外其它元素的含量均高于非塌陷区对应元素的含量。Cu和Pb元素的值相差较大,根据本研究区域的煤矸石中各元素值可知Pb元素的含量相对较高,淋溶数据显示元素Cu的淋出率相较其他地区淋出率较高,所以推断塌陷区浅层地下水中Cu和Pb元素值较高与矸石山有关。

3 结论

1)研究区煤矸石中Cr和Pb元素含量明显高于国内其它地区。

2)淋溶水中各元素的含量整体趋势随淋滤时间的延长所测各项指标浓度值均呈逐渐下降的趋势,元素Cr释放较为平缓。

3)虽然淋溶水溶出趋势有所不同,但随着煤矸石在地表堆放时间的延长各元素淋出总量也会随之增加。

4)塌陷区的浅层地下水中除Cr和Sr元素外其它元素的含量均高于非塌陷区对应的元素。Pb元素的含量相对较高,淋溶数据显示元素Cu的淋出率相较其他地区淋出率较高,塌陷区浅层地下水中Cu和Pb元素值较高与矸石山有关。

参考文献:

- [1]全国人民代表大会常务委员会. 中华人民共和国固体废物污染环境防治法[M]. 北京:法律出版社,2005.
- [2]欧阳赛兰. 煤矸石山污染物的淋溶实验研究[D]. 邯郸:河北工程大学,2013.
- [3]AZEUE J M. Environmental impacts of mining activities: Emphasis on mitigation and remedial measures [M]. New York:Springer,1999.
- [4]党志. 煤矸石—水相互作用的溶解动力学及其环境地球化学效应研究[J]. 矿物岩石地球化学学报,1997,16(4):259-261.
- [5]徐磊,张华,桑树勋. 煤矸石中元素的地球化学行为[J]. 煤田地质与勘探,2002,30(4):1-3.
- [6]邓丁海,岑文龙. 煤矸石堆放区的环境效应研究[J]. 中国矿业,1999(6):87-91.
- [7]韩周,刘征涛,于森,等. 煤矸石中几种重金属元素含量及形态变化[J]. 山西农业科学,2012,40(11):1200-1203.
- [8]余运波,沈照理. 煤矸石堆放对水环境的影响—以山东省一些煤矸石堆为例[J]. 地学前缘,2001,8(1):163-169.

(下转第108页)

土外罐的破坏属于脆性破坏。

3) 比例距离大于 1 时, 现有超压计算公式能比较好的拟合超压的衰减规律; 比例距离小于 1 时, 现有超压计算公式预测结果存在较大差别, 需要进一步细化研究。

4) 采用经验公式平均值的方法, 对模拟结果进行修正, 修正后的公式能够较准确地描述冲击波超压峰值与比例距离的关系。

5) 基于有限元软件 LS - DYNA 实现 TNT 炸药爆炸的数值模拟计算是可行的, 所得模拟结果偏小, 说明该方法仍存有一定的缺陷, 可结合实验数据和理论分析的结果对数值模拟结果进行修正。

参考文献:

- [1] 李晓勇, 崔村燕, 陈景鹏, 等. LS - DYNA 软件开展爆炸冲击波计算时需考虑的问题[J]. 装备学院学报, 2014, 25(4): 79 - 84.
- [2] GB6722 - 2011, 爆破安全规程[S].
- [3] BRODE H L. Blast wave from a spherical charge[J]. Phys Fluids, 1959, 2(2): 217.
- [4] 亨利奇. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国译. 北京: 科学出版社, 1987.
- [5] SADOVSKIY M A. Mechanical action of air shock waves of explosion, based on experimental data [M]. Moscow:

Izd Akad Nauk SSSR, 1952.

- [6] BAKER W E. Explosions in air[M]. Austin: University of Texas Press, 1974.
- [7] WU Chengqing, HAO Hong. Modeling of simultaneous ground shock and from surface Explosions [J]. Int. J. Impact Eng., 2005, 31(6): 699 - 717.
- [8] 管友海, 贾娟娟, 林楠, 等. 大型 LNG 储罐液固耦合模态分析[J]. 当代化工, 2015, 44(1): 148 - 151.
- [9] 吴彦捷, 高轩能. 爆炸冲击波数值模拟及超压计算公式修正[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2014, 35(3): 321 - 326.
- [10] 吴媛媛, 宋振森. 挡墙后爆炸冲击波绕流现象研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2014, 31(2): 9 - 14.
- [11] 申祖武, 张耀辉, 谢伟平, 等. 爆炸冲击波的环流效应数值模拟研究[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(2): 42 - 44.
- [12] 仲倩, 王伯良, 黄菊, 等. TNT 空中爆炸超压的相似律[J]. 火炸药学报, 2008, 33(2): 32 - 35.
- [13] 杨鑫, 石少卿, 程鹏飞. 空气中 TNT 爆炸冲击波超压峰值的预测及数值模拟[J]. 爆破, 2008, 25(1): 15 - 19.
- [14] 董桂旭, 杜茂华, 黄雪峰. 某型炸药的冲击波超压峰值计算公式参数的修正[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(5): 542 - 544.

(责任编辑 王利君)

(上接第 84 页)

- [9] 李旭华, 段宁, 王心义, 等. 矿区煤矸石对周围农田玉米作物污染研究[J]. 合肥工业大学学报, 2008, 31(11): 1748 - 1759.
- [10] 田采霞, 郭保华. 煤矸石堆对周围土壤中微量元素元素的影响分析[J]. 矿业安全与环保, 2007, 34(3): 23 - 25.
- [11] 冯吉艳, 刘志斌. 煤矸石中金属元素对人体健康影响的研究[J]. 露天采矿技术, 2006(3): 41 - 44.
- [12] 骈炜, 张敬凯, 王金喜, 等. 煤矸石中有机物对环境的污染分析[C]//2015 年中国环境科学学会学术年会论文集. 中国学术期刊电子杂志社有限公司出版, 2015: 4995 - 5000.
- [13] WANG J, WANG Q, SHI J, et al. Distribution and enrichment mode of Li in the No. 11 coal seam from Pingshuo mining district, Shanxi province [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2015, 33(2): 203 - 215.
- [14] 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [15] 崔淑敏, 李尉卿, 王春峰. 河南煤矸石成分测定与综合

利用[J]. 化学研究, 2004, 15(2): 45 - 48.

- [16] 张明亮, 王海霞. 煤矿区矸石山周边土壤重金属污染特征与规律[J]. 水土保持学报, 2007, 21(4): 189 - 192.
- [17] 章建义. 贵州盘县矿区两煤矸石主要有害元素的比较分析及对资源化利用的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009.
- [18] 吴敦敖, 鲁文毓. 土壤对铬的吸附作用研究[J]. 上海环境科学, 1991, 10(2): 19 - 23.
- [19] 曹云全, 张双圣, 刘汉湖, 等. 煤矸石中重金属动态淋滤和静态浸泡溶出特征研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2010, 27(1): 76 - 80.
- [20] GB/T 14848 - 93, 地下水环境质量标准[S].
- [21] 陈志良, 张越男, 李忠斌, 等. 大宝山矿区地下水重金属污染季节特征与环境风险[J]. 中国农学通报, 2014, 30(23): 190 - 196.
- [22] 郝汉舟, 靳孟贵, 汪丙国. 河南省浅层地下水质量评价[J]. 江西农业大学学报, 2007, 29(4): 654 - 659.

(责任编辑 王利君)