

基于 XRD 与 SEM 研究风淬渣微粉用于重金属污染土壤的修复机理

张浩¹, 于先坤², 徐修平^{2*}, 杨刚³

1. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243032
2. 中钢集团马鞍山矿山研究院股份有限公司, 安徽 马鞍山 243000
3. 中冶宝钢技术服务有限公司, 上海 201999

摘要 钢渣是冶金工业中产生的主要固体废弃物, 其产量约为每年粗钢产量的 15%~20%。由于技术的局限, 导致我国钢渣利用率较低, 仅为年钢渣产量的 10%, 同时加之管理制度的不健全, 导致钢渣大量露天堆放, 对土地资源、地下水源, 以及空气质量形成严重影响。面对上述问题, 利用钢渣开发一种价格低廉的固化药剂用于重金属污染土壤的修复, 既是冶金固体废弃物可持续发展的重要途径之一, 也是大幅降低重金属污染土壤修复成本的重要途径之一。该研究创新性是用风淬渣微粉作为固化药剂对含有 Cd, Cu, Pb, Ni 和 Zn 的重金属污染土壤进行修复。研究了风淬渣微粉磨时间、风淬渣微粉掺量和养护时间对修复重金属污染土壤效果的影响。利用激光粒度分析仪测试风淬渣微粉的粒度分布、比表面积与孔隙度吸附仪测试风淬渣微粉的孔结构、扫描电子显微镜测试风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物的微观形貌、X-射线衍射仪测试风淬渣微粉的矿物成分, 分析风淬渣微粉修复重金属污染土壤的机理。结果表明, 风淬渣的性质安全, 对生态环境不存在污染, 可以用于修复重金属污染土壤的固化技术。当风淬渣粉磨时间为 100 min、风淬渣微粉掺量为 20%、养护时间为 14 d 时, 风淬渣微粉对重金属污染土壤中 Cu, Cd, Ni, Zn 和 Pb 的固化效果均达到 91% 以上。随着风淬渣粉磨时间的延长, 风淬渣微粉的粒径尺寸减小、粒度分布趋向均匀。风淬渣的多孔结构破坏、比表面积提高, 有利于提高风淬渣微粉对重金属污染土壤的修复效果。随着风淬渣微粉掺量的增加, 风淬渣微粉形成的水化凝胶(C—S—H)数量增加, 有利于提高风淬渣微粉包裹重金属污染土壤的效果, 以达到固化重金属污染土壤中 Cd, Cu, Pb, Ni 和 Zn 的目的。风淬渣微粉对固化重金属污染土壤中 Cu, Cd, Ni, Zn 和 Pb 具有选择性, 在不同养护时间下, 重金属分别以 Cd_2SiO_4 , $Cu(OH)_2 \cdot 2H_2O$, $PbCO_3$, $3Ni(OH)_2 \cdot 2H_2O$, Ni_2SiO_4 , $Zn(OH)_2$ 和 Zn_2SiO_4 形式存在。

关键词 风淬渣微粉; 重金属污染土壤; 修复效果; 固化药剂; 机理

中图分类号: TU528.041 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)01-0278-07

引言

钢渣作为炼钢过程中产生的固体废弃物, 其产量约占炼钢总产量的 15%~20%^[1-2], 即年产钢渣约 1.5 亿吨。目前我国钢渣的利用率小于 20%, 其大部分采用堆积的方式进行存放, 不仅占用大量土地, 而且污染环境, 给钢铁企业与社会带来严重的负担^[3-4]。如何大规模且高效的利用钢渣, 实现环境减负是钢铁企业与社会迫切需要解决的问题。风淬渣是将高温熔渣由渣罐倒入流渣槽, 在流渣槽出口处由高速空

气喷吹成粒状, 其具有安定性好的特点, 被广泛用于建筑材料、公路建设、农业等方面^[5], 但是存在利用附加值低的问题^[6-7], 极大的限制了其应用。因此如何提高风淬渣的利用附加值, 在降低环境污染的同时实现钢铁企业增效, 是钢渣综合利用的新思路。

固化技术是重金属污染土壤修复的主要方法, 其具有对重金属的适用范围广、成本低、施工周期较短的特点^[8]。目前常用的固化药剂为水泥、石灰、沸石、膨润土、凹凸棒土等无机胶凝材料或多孔吸附材料^[9-10], 上述固化药剂普遍存在成本高且资源消耗大的问题。钢渣作为一种具有胶凝活性

收稿日期: 2019-12-27, 修订日期: 2020-05-16

基金项目: 中国博士后科学基金项目(2017M612051), 国家自然科学基金项目(51206002), 冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室(安徽工业大学)项目(KF17-08), 安徽省博士后研究人员科研活动经费项目(2017B168)资助

作者简介: 张浩, 1982 年生, 安徽工业大学建筑工程学院副教授 e-mail: fengxu19821018@163.com

* 通讯作者 e-mail: xxuxp@sina.com

的无机多孔材料,其性质与水泥、沸石较为相近,如何将价格低廉且存量巨大的钢渣用于固化药剂的研发,对发展重金属污染土壤的固化技术具有重要意义。针对上述构想杨刚等以滚筒渣制备固化药剂用于重金属污染土壤修复,并且取得良好的固化效果。但是钢渣种类繁多,其中风淬渣作为一种典型且产量大的钢渣,其用于重金属污染土壤进行固化修复的研究未见相关报道。

本研究采用粉磨工艺对风淬渣进行微粉化处理获得风淬渣微粉,利用风淬渣微粉作为固化药剂对含有 Cd, Cu, Pb, Ni 和 Zn 的重金属污染土壤进行修复,研究风淬渣粉磨时间、风淬渣微粉掺量和养护时间对固化重金属污染土壤效果的影响,并且分析风淬渣微粉固化重金属污染土壤的机理,以期开发一种价格低廉的固废型固化药剂,为风淬渣的高附加值利用提供新途径,实现钢铁企业“以废增效”与“以废治危”的目的。

1 实验部分

1.1 材料与试剂

风淬渣,马钢(集团)控股有限公司;重金属污染土壤,西南地区某矿区;实验用水为去离子水。

1.2 仪器

LS-C(IIA)型激光粒度分析仪(中国珠海欧美克仪器有

限公司),ASAP2460型比表面积与孔隙度吸附仪(美国麦克仪器公司),Quan-ta200型扫描电子显微镜(美国FEI公司),D8ADVANCE型X-射线衍射仪(德国布鲁克公司)。

1.3 方法

1.3.1 风淬渣微粉的制备

首先利用破碎机对风淬渣进行破碎后筛分获得粒径 ≤ 5 mm颗粒,并且将上述颗粒放入烘干温度为 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的干燥箱中烘干 12 h 。其次对烘干后的风淬渣颗粒进行筛分,获得粗颗粒(粒径 $1\sim 5\text{ mm}$)与细颗粒(粒径 $< 1\text{ mm}$),并且将上述粗、细颗粒各铺成一条长行料堆,每次取料各从两条长行料堆的横向截取,其中粗、细颗粒的质量比为 $2:1$,获得均化后风淬渣颗粒。最后利用转速为 $600\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的球磨机对均化后颗粒进行粉磨,其粉磨时间为 $60\sim 120\text{ min}$,获得不同粒径的风淬渣微粉。

1.3.2 性能测试与表征

风淬渣微粉固化重金属污染土壤中重金属效果测试:将不同粉磨时间的风淬渣微粉与重金属污染土壤按一定的掺量比进行混合,获得风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物,并且以固液比为 $3:1$ 向风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物中加入水,经过充分混合后在室温下自然养护 $1\sim 28\text{ d}$ 时间。依据USEPA Method 1311 TCLP方法,采用ICP-MS测试风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物中重金属浸出浓度,具体实验方案见表1。

表 1 实验方案

Table 1 Experimental scheme

No.	Wind quenching slag grinding time/min	Wind quenching slag powder content/%	Heavy metal contaminated soil content/%	Solid-liquid ratio	Curing time/d
1#	60	20	80	3:1	14
2#	80	20	80	3:1	14
3#	100	20	80	3:1	14
4#	120	20	80	3:1	14
5#	100	10	90	3:1	14
6#	100	15	85	3:1	14
7#	100	25	75	3:1	14
8#	100	20	80	3:1	1
9#	100	20	80	3:1	7
10#	100	20	80	3:1	28

采用中国珠海欧美克仪器有限公司LS-C(IIA)型激光粒度分析仪对风淬渣微粉的粒度分布进行测试。采用美国麦克仪器公司ASAP2460型比表面积与孔隙度吸附仪对风淬渣微粉的孔结构进行测试。采用美国FEI公司Quan-ta200型扫描电子显微镜对风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物的微观形貌进行测试。采用德国布鲁克公司D8ADVANCE型X-射线衍射仪对风淬渣微粉的矿物成分进行测试。

2 结果与讨论

2.1 原材料测试分析

从表2可以看出,重金属污染土壤中Cd, Cu, Pb, Ni和

Zn的浸出浓度较高,其中Cd, Pb和Ni的浸出浓度远远高于浸出浓度限值(GB5085.3—2007),说明重金属污染土壤存在极大的不安全性,对生态环境有严重影响;风淬渣中Cd, Cu, Pb, Ni和Zn的浸出浓度远远小于浸出浓度限值(GB5085.3—2007),说明风淬渣的性质安全,对生态环境不存在污染,可以用于修复重金属污染土壤的固化技术。

2.2 风淬渣粉磨时间对修复重金属污染土壤效果的影响

从表3可以看出,当风淬渣微粉掺量一定时,不同粉磨时间的风淬渣微粉与重金属污染土壤进行混合经过 14 d 养护后,随着风淬渣粉磨时间的延长,风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物中重金属浸出浓度呈现下降的趋势,说明风淬渣微粉固化重金属污染土壤中重金属效果良好。当风淬渣粉磨

时间为 100 min 以上时, 风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物 属效果均基本稳定。
中重金属浸出浓度、风淬渣微粉固化重金属污染土壤中重金

表 2 重金属污染土壤与风淬渣中重金属浸出浓度

Table 2 Leaching concentrations of heavy metal in heavy metal contaminated soil and wind quenching slag

No.	Leaching concentration of heavy metal/(mg · L ⁻¹)				
	Cd	Cu	Pb	Ni	Zn
Heavy metal contaminated soil	7.87	5.56	14.23	7.09	47.42
Wind quenching slag	0.09×10^{-3}	13.45×10^{-3}	2.97×10^{-3}	78.92×10^{-3}	8.69×10^{-3}
Leaching concentration limit (GB5085.3—2007)	1	100	5	5	100

表 3 风淬渣粉磨时间对修复重金属污染土壤效果的影响

Table 3 Effect of the wind quenching slag grinding time on the repairing of heavy metal contaminated soil

No.	Wind quenching slag grinding time/min	Leaching concentration of heavy metal in wind quenching slag fine powder-heavy metal contaminated soil mixture/(mg · L ⁻¹)					Effect of wind quenching slag fine powder curing heavy metals in heavy metal contaminated soil/%				
		Cd	Cu	Pb	Ni	Zn	Cd	Cu	Pb	Ni	Zn
		1#	60	1.17	0.86	2.11	1.09	7.26	85.13	84.53	85.17
2#	80	0.92	0.67	1.76	0.85	5.62	88.31	87.95	87.63	88.01	88.15
3#	100	0.58	0.45	1.18	0.53	3.95	92.63	91.91	91.71	92.52	91.67
4#	120	0.49	0.40	1.02	0.46	3.34	93.77	92.81	92.83	93.51	92.96

从表 4 可以看出, 随着风淬渣粉磨时间的延长, 一方面风淬渣微粉的粒径 d_{10} , d_{50} 和 d_{90} 均降低, 说明风淬渣微粉的粒径尺寸减小; 另一方面风淬渣微粉的粒度分布宽度比系数 Z 与粒径分布宽度 H 均减小, 说明风淬渣微粉粒度分布趋向

均匀^[11-12]。同时随着风淬渣粉磨时间的延长, 风淬渣微粉孔结构显著变化, 即比表面积增加、孔体积和孔径均降低, 说明在粉磨过程中风淬渣微粉的比表面积虽然提高, 但是风淬渣的多孔结构破坏。

表 4 风淬渣粉磨时间对风淬渣微粉粒度分布与孔结构的影响

Table 4 Effect of the wind quenching slag grinding time on the particle size distribution and pore structure of wind quenching slag powder

Wind quenching slag grinding time/min	Particle size distribution of wind quenching slag					Pore structure of wind quenching slag		
	$d_{10}/\mu\text{m}$	$d_{50}/\mu\text{m}$	$d_{90}/\mu\text{m}$	$Z = d_{90}/d_{10}$	$H = (d_{90} - d_{10})/d_{50}$	比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔体积/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	孔径/ nm
60	2.53	16.06	45.17	17.85	2.66	0.244	4.954×10^{-3}	1.56×10^2
80	2.48	15.29	42.68	17.21	2.63	0.266	4.472×10^{-3}	1.37×10^2
100	2.18	14.04	37.23	17.08	2.50	0.289	3.721×10^{-3}	1.24×10^2
120	2.08	13.47	35.41	17.02	2.47	0.282	3.688×10^{-3}	1.21×10^2

综合表 3 与表 4 可以看出, 随着风淬渣粉磨时间的延长, 风淬渣的多孔结构被破坏形成风淬渣微粉, 风淬渣微粉的粒径降低, 比表面积增加, 有利于提高风淬渣微粉修复重金属污染土壤的效果。当风淬渣粉磨时间大于 100 min 时, 风淬渣微粉的粒度分布与孔结构基本稳定, 对固化重金属污染土壤中 Cd, Cu, Pb, Ni 和 Zn 的效果均达到 91% 以上。

2.3 风淬渣微粉掺量对修复重金属污染土壤效果的影响

从表 5 可以看出, 当风淬渣粉磨时间一定时, 不同掺量的风淬渣微粉与重金属污染土壤进行混合经过 14 d 养护后, 随着风淬渣微粉掺量的增加, 风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物中重金属浸出浓度呈现先大幅下降后趋向稳定的趋势。当风淬渣微粉掺量为 20% 以上时, 风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物中重金属浸出浓度与风淬渣微粉固化重金属

污染土壤中重金属效果基本稳定。

从图 1 可以看出, 随着风淬渣微粉掺量的增加, 风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物的修复效果逐渐提高。当风淬渣微粉掺量较低时, 即图 1(a)与图 1(b), 存在大量散落的重金属污染土壤, 这是因为风淬渣微粉掺量少, 未能对重金属污染土壤进行有效包裹。当风淬渣微粉掺量较高时, 即图 1(c)与图 1(d), 一方面几乎不存在散落的重金属污染土壤, 风淬渣微粉与重金属污染土壤形成连续的块状体; 另一方面在风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物的块状体表面出现大量针状水化物, 这可能是由于风淬渣微粉中 Ca_2SiO_4 形成水化凝胶(C—S—H)对重金属污染土壤形成有效的包裹, 以达到固化修复的作用。

综合表 5 与图 1 可以看出, 随着风淬渣微粉掺量的增加, 风淬渣微粉中形成的水化凝胶(C—S—H)数量增加, 有

利于提高风淬渣微粉包裹重金属污染土壤的效果, 以达到固化重金属污染土壤中 Cd, Cu, Pb, Ni 和 Zn 的目的。当风淬渣微粉掺量大于 20% 时, 风淬渣微粉与重金属污染土壤形成

连续的块状体, 且生成大量水化凝胶(C—S—H), 对重金属污染土壤的修复效果良好。

表 5 风淬渣微粉掺量对修复重金属污染土壤效果的影响

Table 5 Effect of the wind quenching slag powder content on the repairing of heavy metal contaminated soil

No.	Wind quenching slag grinding time/min	Leaching concentration of heavy metal in wind quenching slag fine powder-heavy metal contaminated soil mixture/(mg · L ⁻¹)					Effect of wind quenching slag fine powder curing heavy metals in heavy metal contaminated soil/%				
		Cd	Cu	Pb	Ni	Zn	Cd	Cu	Pb	Ni	Zn
5#	10	1.59	1.06	3.13	1.48	10.62	79.80	80.94	78.00	79.13	77.60
6#	15	1.26	0.83	2.36	1.14	8.05	83.99	85.07	83.42	83.92	83.02
3#	20	0.58	0.45	1.18	0.53	3.95	92.63	91.91	91.71	92.52	91.67
7#	25	0.52	0.41	1.13	0.47	3.82	93.39	92.63	92.06	93.37	91.94

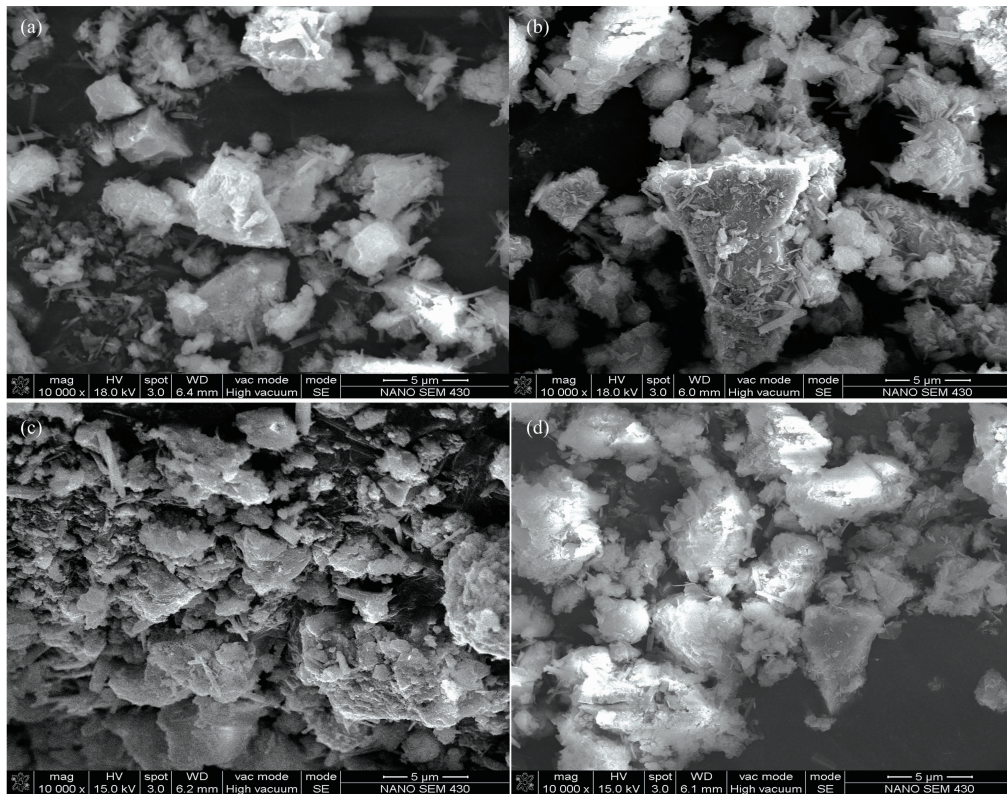


图 1 风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物的扫描电镜图

(a): 5#; (b): 6#; (c): 3#; (d): 7#

Fig. 1 SEM of mixture of wind quenching slag powder-heavy metal contaminated soil

(a): 5#; (b): 6#; (c): 3#; (d): 7#

2.4 养护时间对修复重金属污染土壤效果的影响

从表 6 可以看出, 当风淬渣粉磨时间与风淬渣微粉掺量均一定时, 随着养护时间的延长, 风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物浸出浓度下降, 风淬渣微粉固化重金属污染土壤中重金属效果提高。养护时间对各重金属的固化效果有显著影响, 即养护时间为 1 d 时, 重金属污染土壤中 Cu 的固化效果达到 90% 以上; 养护时间为 7 d 时, 重金属污染土壤中 Cu,

Ni 和 Zn 的固化效果均达到 90% 以上; 养护时间为 14 d 时, 重金属污染土壤中 Cu, Cd, Ni, Zn 和 Pb 的固化效果均达到 91% 以上; 养护时间为 28 d 时, 重金属污染土壤中 Cu, Cd, Ni, Zn 和 Pb 的固化效果均达到 92% 以上。说明一方面风淬渣微粉对固化重金属污染土壤中 Cu, Cd, Ni, Zn 和 Pb 具有选择性; 另一方面当养护时间大于 14 d 后, 风淬渣微粉对重金属污染土壤的修复效果基本稳定。

表 6 养护时间对修复重金属污染土壤效果的影响

Table 6 Effect of the curing time on the repairing of heavy metal contaminated soil

No.	Curing time/d	Leaching concentration of heavy metal in wind quenching slag fine powder-heavy metal contaminated soil mixture/(mg · L ⁻¹)					Effect of wind quenching slag fine powder curing heavy metals in heavy metal contaminated soil/%				
		Cd	Cu	Pb	Ni	Zn	Cd	Cu	Pb	Ni	Zn
8#	1	2.51	0.52	3.74	1.12	8.84	68.11	90.65	73.72	84.20	81.36
9#	7	1.77	0.48	2.36	0.55	4.21	77.51	91.37	83.42	92.24	91.12
3#	14	0.58	0.45	1.18	0.53	3.95	92.63	91.91	91.71	92.52	91.67
10#	28	0.55	0.41	1.12	0.49	3.77	93.01	92.63	92.13	93.09	92.05

从图 2 可以看出,当养护时间 1 d 时,风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物中重金属以 Cu(OH)₂ · 2H₂O, 3Ni(OH)₂ · 2H₂O, Zn(OH)₂, PbCO₃ 和 Cd₂SiO₄ 形式存在,其中 Cu(OH)₂ · 2H₂O 的 XRD 特征峰数量多且峰强度高、3Ni(OH)₂ · 2H₂O 和 Zn(OH)₂ 的 XRD 特征峰数量较多且峰强较高、PbCO₃ 的 XRD 特征峰数量较少且峰强较低、Cd₂SiO₄ 的 XRD 特征峰数量少且峰强低,说明在养护时间 1 d,具有碱性的风淬渣微粉产生大量的 OH⁻ 与 Cu, Ni 和 Zn 进行结合。当养护时间 7 d 时,风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物中重金属以 Cu(OH)₂ · 2H₂O, Zn(OH)₂, PbCO₃, Zn₂SiO₄, Cd₂SiO₄ 和 Ni₂SiO₄ 形式存在,其中 Cu(OH)₂ · 2H₂O 和 Zn(OH)₂ 的 XRD 特征峰数量多、PbCO₃ 的 XRD 特征峰数量增加、Cd₂SiO₄ 的 XRD 特征峰强增加,同时出现一定量 Ni₂SiO₄ 和 Zn₂SiO₄ 的 XRD 特征峰,说明在养护时间 7 d,风淬渣微粉的 Ca₂SiO₄ 在水化过程产生水化凝胶(C—

S—H)与 Cd, Ni, Zn 进行结合形成链状结构。当养护时间 14 d 时,风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物中重金属以 Cu(OH)₂ · 2H₂O, PbCO₃, Zn₂SiO₄, Cd₂SiO₄ 和 Ni₂SiO₄ 形式存在,其中 Cu(OH)₂ · 2H₂O 的 XRD 特征峰数量多但峰强下降、PbCO₃ 的 XRD 特征峰数量与峰强稳定、Zn₂SiO₄ 和 Ni₂SiO₄ 的 XRD 特征峰强提高、Cd₂SiO₄ 的 XRD 特征峰数量增加,说明在养护时间 14 d,风淬渣微粉产生的水化凝胶(C—S—H)数量进一步增加,有利于 Cd, Ni, Zn 形成、Ni₂SiO₄ 和 Zn₂SiO₄,同时风淬渣微粉的 CaCO₃ 与 Pb 进一步结合形成 PbCO₃。当养护时间 28 d 时,风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物中重金属以 Cu(OH)₂ · 2H₂O, PbCO₃, Zn₂SiO₄, Cd₂SiO₄ 和 Ni₂SiO₄ 形式存在,其 XRD 特征峰数量与峰强与养护时间 14 d 时的 XRD 特征峰数量与峰强基本一致,说明在养护时间 14 d 后,风淬渣微粉对重金属污染土壤的修复效果趋向稳定。

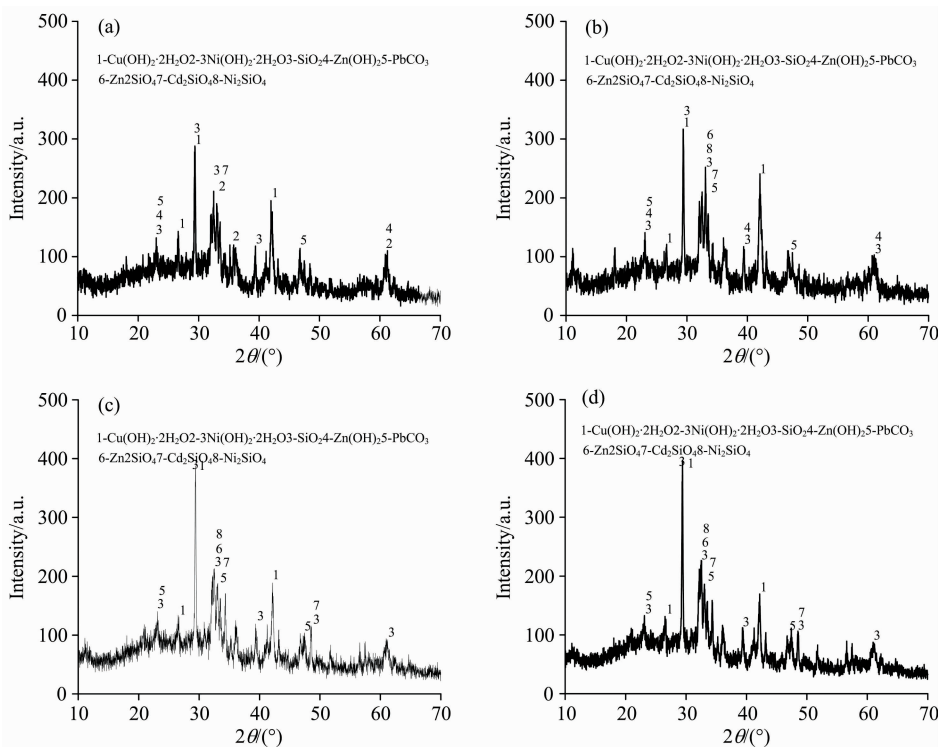


图 2 风淬渣微粉-重金属污染土壤混合物的 X 射线衍射图

(a): 8#; (b): 9#; (c): 3#; (d): 10#

Fig. 2 XRD of mixture of wind quenching slag powder-heavy metal contaminated soil

(a): 8#; (b): 9#; (c): 3#; (d): 10#

3 结 论

(1) 风淬渣的性质安全, 对生态环境不存在污染, 可以用于修复重金属污染土壤的固化技术。当风淬渣粉磨时间为 100 min、风淬渣微粉掺量为 20%、养护时间为 14 d 时, 风淬渣微粉对重金属污染土壤中 Cu, Cd, Ni, Zn 和 Pb 的固化效果均达到 91% 以上。

(2) 随着风淬渣粉磨时间的延长, 风淬渣微粉的粒径尺寸减小、粒度分布趋向均匀。风淬渣的多孔结构破坏、比表

面积提高, 有利于提高风淬渣微粉对重金属污染土壤的修复效果。

(3) 随着风淬渣微粉掺量的增加, 风淬渣微粉形成的水化凝胶(C—S—H)数量增加, 有利于提高风淬渣微粉包裹重金属污染土壤的效果, 以达到固化重金属污染土壤中 Cd, Cu, Pb, Ni 和 Zn 的目的。

(4) 风淬渣微粉对固化重金属污染土壤中 Cu, Cd, Ni, Zn 和 Pb 具有选择性, 在不同养护时间下, 重金属分别以 Cd_2SiO_4 , $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, PbCO_3 , $3\text{Ni}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Ni_2SiO_4 , $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 和 Zn_2SiO_4 形式存在。

References

- [1] Zhang H, Li Z H. *Open Medicine*, 2019, 14: 673.
- [2] Zhang Y J, Kang L, Liu L C. et al. *Applied Surface Science*, 2015, 331: 399.
- [3] Zhang H, Yuan F. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 781: 201.
- [4] Morel F, Bounor-Legaré V, Espuche E, et al. *European Polymer Journal*, 2012, 48(5): 919.
- [5] Makela M, Watkins G, Poykio R, et al. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 207-208: 21.
- [6] Navarro M C, Pérez-Sirvent C, Martínez-Sánchez M J, et al. *Journal of Geochemical Exploration*, 2008, 96(2-3): 183.
- [7] Zhuang P, McBride M B, Xia H P, et al. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(5): 1551.
- [8] Demirbas A. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 157(2-3): 220.
- [9] Mao Y, Sun M, Yang X, et al. *Soils Sediments*, 2013, 13(2): 403.
- [10] Gang L, Fan C P, Zhou D M, et al. *Chemosphere*, 2013, 90(8): 2326.
- [11] ZHANG Hao(张 浩). *Journal of Materials Engineering(材料工程)*, 2018, 46(1): 114.
- [12] ZHANG Hao(张 浩). *Journal of Materials Engineering(材料工程)*, 2017, 45(8): 24.

Study on Repairing Mechanism of Wind Quenching Slag Powder in Heavy Metal Contaminated Soil by XRD and SEM

ZHANG Hao¹, YU Xian-kun², XU Xiu-ping^{2*}, YANG Gang³

1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China

2. Sinosteel Ma'anshan General Institute of Mining Research Co., Ltd., Ma'anshan 243000, China

3. MCC Baosteel Technology Services Co., Ltd., Shanghai 201999, China

Abstract Steel slag tailings are the main solid waste in metallurgical industry, with the production of 15%~20% of crude steel. The utilization ratio is quite low and only reaches 10% of steel slag tailings production due to limited technology. Meanwhile, steel slag tailings are disposed of in direct stacking and landfill in general since the management system is not perfect, which pollutes land source, underground water source and air quality. In the face of the above problems, the development of an inexpensive curing agent is used for repairing of heavy metal contaminated soil has become not only one of the main methods to the sustainable development of metallurgical solid waste, but also one of the main methods to achieve the greatly reduce the production cost of heavy metal contaminated soil remediation. Wind quenching slag powder was used as curing agent to repair the heavy metal contaminated soil including Cd, Cu, Pb, Ni and Zn in this paper. This study investigates the wind quenching slag grinding time, wind quenching slag powder content and curing time on the repairing effect of heavy metal contaminated soil. The particle size distribution of wind quenching slag powder was characterized by LPSA, the pore structure of wind quenching slag powder was characterized by BET, the microstructure of mixture of wind quenching slag powder-heavy metal contaminated soil was characterized by SEM, mineral composition of wind quenching slag powder was characterized by XRD in order to the mechanism of wind quenching slag powder repairing heavy metal contaminated soil was analyzed. The results indicate that the properties of wind quenching slag are safe and there is no pollution to the ecological environment, which can be used as a curing technology for remediation of heavy metal contaminated soil. The solidification effect of wind quenching slag powder (the wind

quenching slag grinding time, wind quenching slag powder content and curing time are 100 min, 20% and 14 d, respectively) on Cd, Cu, Pb, Ni and Zn of heavy metal contaminated soil was more than 91%. With the extension of wind quenching slag grinding time, the particle size of wind quenching slag powder is decreased and its particle size distribution tends to be uniform. The damage of porous structure and the increase of the specific surface area of wind quenching slag are beneficial to improve the effect of wind quenching slag powder on heavy metal contaminated soil restoration. With the increase of wind quenching slag powder content, the amount of hydrated gel (C—S—H) formed by wind quenching slag powder is increased, which is beneficial to improve the effect of wind quenching slag powder covering heavy metal contaminated soil, so as to achieve the purpose of curing Cd, Cu, Pb, Ni and Zn in heavy metal contaminated soil. Wind quenching slag powder can selectively be curing Cu, Cd, Ni, Zn and Pb in heavy metal contaminated soil. Under different curing times, heavy metals exist in the form of Cd_2SiO_4 , $\text{Cu}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, PbCO_3 , $3\text{Ni}(\text{OH})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Ni_2SiO_4 , $\text{Zn}(\text{OH})_2$ and Zn_2SiO_4 , respectively.

Keywords Wind quenching slag powder; Heavy metal contaminated soil; Repairing effect; Curing agent; Mechanism

(Received Dec. 27, 2019; accepted May 16, 2020)

* Corresponding author