

尾砂固结排放的重金属固化效应研究

侯运炳¹, 刘畅^{1,2*}, 丁鹏初¹, 韩帅¹, 韩冬¹, 张兴¹, 曹曙雄¹, 孙翔¹, 金珠鹏^{1,3}

(1.中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院,北京 100083; 2.天地科技股份有限公司 开采技术事业部,北京 100013;
3.黑龙江科技大学 矿业工程学院,黑龙江 哈尔滨 150022)

摘要:为了解决尾砂地面排放的重金属污染和堆排体稳定性的问题,提出采用掺水泥的方法排放尾砂。分析了尾砂排放中污染物来源和重金属迁移原理:尾砂中重金属污染主要通过堆排场浸滤液和排放初期泌出水释放,其迁移动力主要有对流、分子扩散、机械弥散三方面作用。采用电镜扫描研究了尾砂固结过程中微观结构演化规律,发现水泥水化会使固结体结构致密、渗透系数降低。开展了浸滤实验研究固结体在水环境中结构稳定性,研究表明,尾砂固结体中水泥掺量较小时遇水会发生崩解;随着水泥掺量增加,固结体抗崩解性能增强;水泥掺量大于3%不易崩解,固结体稳定性提高。单轴抗压强度试验表明,水泥掺量大于4%时固结体强度随水泥掺量急剧增长,说明水泥掺量4%是固结改性的临界掺量,大于此值尾砂排放体发生了改性。通过电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES)测定了固结体浸滤液中重金属含量并与《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)进行了对照。实验表明,添加水泥不会影响泌出水中重金属含量,但会显著降低浸滤液中重金属含量,且随着水泥掺量增加浸滤液中重金属含量减小。当掺量大于3%时,浸滤液中重金属含量急剧减小,达到能够符合国家相关排放的标准。综上可知,重金属的迁移与固结体微观结构、渗透性和抗崩解性能有很大关系,渗透性越好、抗崩解性能越差,浸滤液与水接触程度越大,重金属浸出越多。

关键词:尾砂排放; 重金属; 微观结构; 浸滤液; 水泥掺量

中图分类号:X753

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)05-0231-08

Study on Solidification Effect of Heavy Metal by Tailings Cementation and Discharging Technology

HOU Yunbing¹, LIU Chang^{1,2*}, DING Pengchu¹, HAN Shuai¹, HAN Dong¹,
ZHANG Xing¹, CAO Shuxiong¹, SUN Xiang¹, JING Zhupeng^{1,3}

(1.College of Resources and Safety Eng., China Univ. of Mining and Technol. (Beijing), Beijing 100083, China; 2.Coal Mining and Designing Dept. Tiandi Sci. and Technol. Co., Ltd, Beijing 100013, China; 3.Inst. of Mining Eng., Heilongjiang Univ. of Sci. and Technol., Harbin 150022, China)

Abstract: In order to solve the problems of heavy metal pollution and tailings slope stability, tailings cementation and discharging technology were put forward. The pollutant source and heavy metal migration principle in tailings were analyzed. Results showed that heavy metal is mainly contained in leachate and bleeding water of tailings. Its diffusion depends on convection, molecular diffusion, and mechanical dispersion. The microstructure evolution was studied by electron microscopy and the result showed that the permeability coefficient decrease when cement is used. The cemented tailings soaked experiment was carried out. Results showed that with the increase of cement content, the anti-disintegration of cemented tailings is enhanced. When cement content is larger than 3%, the cemented tailing is no longer disintegration. The compression test also shows that 4% is the criticality content. Heavy metal content determination experimental results show that cement can hardly affect the content of heavy metals in bleeding water, but it can induce a decrease of the heavy metals in leachate water with the increase of cement content. When the cement content exceeds 3%, the amount of heavy metal decreases rapidly which can meet the national emission standards. In conclusion, the migration of heavy metals has a lot to do with the microstructure, permeability and anti-disintegration performance of the emissions. The larger the permeability is and the weaker anti-disintegration performance is, the more heavy metal leaching.

收稿日期:2017-11-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674263);中央高校基本科研业务费资助项目(2011YZ02)

作者简介:侯运炳(1962—),男,教授,博导,博士。研究方向:资源开发与规划、矿业系统工程。E-mail:hoyunbing2000@163.com

*通信联系人 E-mail:15536888908@163.com

网络出版时间:2018-08-29 23:39:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180829.2339.003.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

Key words: tailings discharge; heavy metal; microstructure; percolate; cement content

尾砂排放方式包括采空区充填、尾矿库湿式排放及尾砂干式堆存^[1]。由于尾砂中通常会存在铅、汞、砷等有毒害重金属,当采用尾矿库排放时会发生重金属浸出,造成土壤、地下水的重金属污染^[2];采用地面干堆的办法排放尾矿时,干固后的尾砂会形成扬尘,随风扩散到周边土壤中;堆排在地面的尾砂和扩散到土壤中的尾砂中的重金属会随地表径流或雨水淋滤浸出,污染周边土壤及水体。其中,张德洲^[3]和Robinsky^[4-5]介绍了干排尾砂的实践,指出了其在干旱地区使用对环境保护作用。Mcphail等^[6]介绍了尾砂干排在澳大利亚Osborne Mine的实践,证明了该技术在安全和环境保护方面的优越性。张黎^[7]研究了干排尾砂过程中铅元素的迁移特征,指出了铅元素在空气、生物氧化等作用下会转移到周边环境,造成污染。Agnew^[8]介绍了尾砂干排时采用表面固化技术对尾砂中酸性废水污染的防治作用。可以看出,相比于尾矿库排放,干排尾砂引起的污染已经降低,但当排放尾砂不采取防污措施,特别是在多雨地区排放时,仍会引起环境问题。应当采取合理的方法来阻止重金属浸出对环境造成损伤。

尾砂固结排放是一种能够将重金属固化的技术^[9-10]。常规干式堆存由于脱水后浓度大,具有一定支撑强度、堆存成本低而被应用于适宜的堆排场。由于露天干式堆排遇水泥化、流化,如何保证尾砂在复杂环境中排放是该技术面临的主要问题。尾砂排放时加入少量水泥,使尾砂排放体形成有一定强度的、遇水不会泥化的固结体能够较好的克服这一问题。研究表明,由于水泥水化反应产物将尾砂颗粒胶结,尾砂排放体由渗透系数较大的(通常可达 $10^{-5} \sim 10^{-4}$)、遇水容易崩解的散体介质,改性为渗透性较小的(改性后降低为 $10^{-7} \sim 10^{-6}$),不会崩解、泥化的多孔介质^[11]。尾砂排放体渗透性显著降低、抗崩解性能提高,尾砂中的重金属也会被密封到水化产物间,从而显著降低了重金属的浸出。现有文献对尾砂固结体的力学性能演化开展了研究^[12-14],也认识到了固结排放的重金属固化作用^[15],但对固结排放中固结体微观结构、渗透特性演化及重金属浸出的研究仍不足。

作者通过理论分析及室内实验研究了尾砂固结排放对微观结构特征及渗透性能、抗崩解性能、力学性能及重金属浸出性能的影响。阐明了尾砂中重金属浸出机制和尾砂固结排放固化重金属效应,探索了可以控制重金属浸出的临界水泥掺量。

1 尾砂排放过程中污染物来源及其迁移原理

1.1 尾砂排放污染源

按照国家对于矿山固体废弃物排放的要求,排

放到地面的尾砂(或尾砂固结体)、堆排场浸滤液应当符合《危险废物鉴别标准》(GB5085—2007)、《一般工业固体废物贮存、处置场污染控制标准》(GB 18599—2001)《土壤环境质量标准》(GB 15618—2008)、《地表水环境质量标准》(GB3838—2002)、《地下水质量标准》(GBT14848—93)、《污水综合排放标准》(GB8978—2002)等标准。因此,首先应当对尾砂排放过程中污染的来源进行分析。尾砂中重金属浸出与其排放过程中水环境有很大关系,分析尾砂排放整个工艺流程,可得尾砂固结排放过程中重金属污染来源:

1)尾砂膏体(或料浆)排放到堆排场的初期,水化反应尚未完成,当排放的尾砂料浆浓度较小时,会由于料浆沉降泌出较多的水。泌出水与尾砂充分接触,造成重金属的浸出。这部分水释放到地表水、土壤、地下水中,会对环境造成污染。

2)长期在尾砂中堆置的尾砂(或尾砂固结体)会不可避免的接触到降雨、地表径流等水源,由于尾砂或尾砂固结体为多孔介质,在水环境中会发生渗流,导致其浸滤液中会存在浸出的重金属。浸滤液扩散到周围环境中,会对环境造成污染。

1.2 尾砂中重金属迁移原理

尾砂中重金属的浸出与扩散原理可按污染物迁移动力学来分析。污染物在介质中迁移机制有三方面:一是对流作用,即污染物在水流的带动下,向下游运动;二是分子扩散,即在浓度梯度作用下,污染物由高浓度向低浓度位置扩散;三是机械弥散作用,这是由于多孔介质骨架的存在,使得污染物的微观迁移速度无论是大小还是方向都与平均水流速度不同而引起的污染物范围的扩展^[16]。

1)对流作用下污染物迁移通量为:

$$F_n = unC \quad (1)$$

其中: F_n 为对流通量,为对流作用下单位时间垂直通过单位面积的污染物质量, $M/(L^2 \cdot T)$; n 为空隙度; C 为污染物浓度, M/L^3 ; u 为流体运动的实际速度, L/T 。

2)浓度梯度引起的污染物迁移通量为:

$$F_d = -D_d \frac{dC}{dl} \quad (2)$$

式中, C 为污染物浓度, M/L^3 ; l 为流向上距离, L ; D_d 为扩散系数, L^2/T 。多孔介质中分子扩散系数 D^* 与纯溶液中分子扩散系数 D_d 之间的关系可表示为:

$$D^* = \tau D_d \quad (3)$$

式中, τ 为与介质弯曲度 T 有关的参数,称为弯曲因子, $0 < \tau < 1$ 。

3)机械弥散作用引起的污染物迁移通量为:

$$F_m = -D' \frac{dC}{dl} \quad (4)$$

其中: C 为污染物浓度, M/L^3 ; l 为流向上距离, L ; D' 为机械弥散系数, L^2/T 。

可以看出,污染物迁移是伴随流体而发生的。对于不同来源、不同方式排放的尾矿(尾矿库湿式排放、干式堆排、固结堆排),由于其孔隙结构的差异、孔隙结构稳定性不同,其孔隙中流体流动特征也存在差异:

1)对于尾砂排放过程中的泌出水,由于泌水发生在尾砂排放的初期,在此阶段水泥不能将尾砂胶结,泌出水会流经空隙度较大、孔隙结构稳定性较差的散体介质。由于泌水量本身较少,泌出水流动只会引起尾砂沉降、造成空隙度的减小,不会冲散尾砂颗粒、破坏孔隙结构。因此,这一阶段排放体中发生空隙度减小的、散体介质中的渗流。

2)对于尾砂库湿式排放、尾砂干排,由于排放的尾砂未固结,为散体介质。在强补水或地表径流作用下,排放体遇水容易崩解,孔隙结构发生失稳,尾砂颗粒被冲散成为尾砂浆液。其流体扩散速度相比在多孔介质的渗流速度呈数量级跃迁。

3)对于尾砂固结排放,由于排放的尾砂被水化产物固定,排放体形成孔隙结构稳定的多孔介质。其浸滤液在降雨和地表径流作用下发生空隙度不变的渗流。

上述分析可以看出,不同来源、不同方式排放的尾砂中液体流动性有很大不同,其根本原因在于细微观结构的差异。其中,固结排放尾砂可以显著改变排放体的细微观结构,避免排放体崩解、孔隙结构失稳,从而改变尾砂颗粒间的流体的流动特征。按照式(1)、(2)的原理可知,由于排放体微观结构和渗流特征发生了改变,当介质空隙度 n 、流体实际速度 u 发生改变时,由对流引起的重金属迁移通量 F_n 会随之改变。相比固结排放的尾砂,湿式排放尾砂、强补水条件下干排尾砂的等效空隙度 n 、流动速度 u 呈数量级跃迁,从而造成重金属迁移通量 F_n 急剧增长。而通常情况下,在渗透性能好、水流速度快的介质中,对流 F_n 通常是污染物迁移的主要动力。此外,按照式(3)、(4)可知,当固结排放改变了排放体的微观结构后,介质弯曲因子 τ 也会发生改变,进而导致重金属迁移通量 F_d 改变。

因此,应当开展实验探究尾砂固结过程中排放

体的细微观结构和渗透性能的演化,研究抗崩解、抗泥化性能的演化,以及当渗透性能、抗崩解泥化性能发生变化时,排放体重金属浸出性能的变化。

2 材料与实验设计

2.1 材料

实验全尾砂取自安徽某矿尾矿库,采用珠海欧美克生产的LS-C(II A)型激光粒度分析仪对尾矿粒径进行分析,该尾矿粒径分布如图1所示。全尾砂 $d_{60}=200.79 \mu\text{m}$, $d_{30}=135.32 \mu\text{m}$, $d_{10}=55.27 \mu\text{m}$, 不均匀系数 $C_u=3.636$, 曲率系数 $C_c=1.657$ 。因而该全尾砂不均匀系数较小,属级配不良材料。基本物理特性见表1,化学分析结果见表2。根据矿物化学成分指标得出该尾砂碱度系数0.059,属于酸性尾矿。

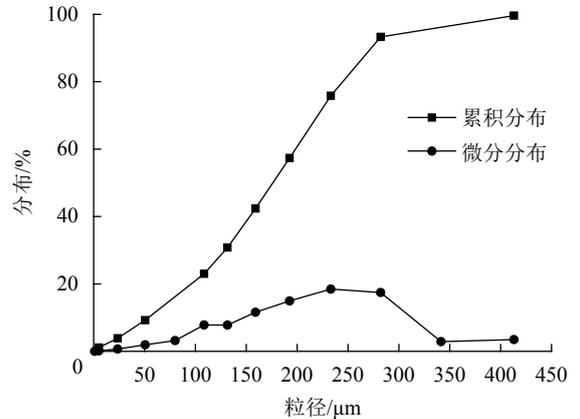


图1 全尾砂粒径分布图

Fig. 1 Size fraction distributed map of total tailings

表1 全尾砂基本性能参数

Tab. 1 Basic performance parameters of total tailings in Lilou-Wuji iron mine

真密度/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	松散密度/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	孔隙率/%	自然安息角/($^\circ$)
2.80	1.74	37.86	39.5

表2 全尾砂化学分析表

Tab. 2 Chemical analysis of the total tailings

材料	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Na ₂ O	MnO	Fe ₂ O ₃
尾砂	2.413	3.849	82.052	2.461	0.179	0.021	8.003

2.2 实验设备及设计

实验分3部分,首先是尾砂固结的细微观结构的研究,主要目的是揭示尾砂固结过程中微观结构演化的一般性规律。制备质量浓度76%、水泥掺量5%的尾砂固结体试件,使用电镜扫描的办法对其养护7、28 d的试件细微观结构进行扫描。

其次是尾砂排放体抗崩解泥化性能演化的研究,主要是探讨水泥掺量对固结体抗崩解性能的影响。制备质量浓度76%,水泥掺量0.6%、1.2%、1.8%、

2.4%、3%、4%、8%、10%，养护28 d的固结体试件，将试件在水中浸泡模拟长期补水环境，观察记录其不同时间的崩解程度。

最后是重金属浸出性能演化规律的研究，定量说明由于微观结构和抗崩解性演化而引起的重金属浸出性能响应。从抗崩解泥化实验浸泡液从取水样，通过电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES)测定上述质量浓度76%，水泥掺量0.6%、1.2%、1.8%、2.4%、3%、4%、8%、10%的固结体试件浸泡液水中重金属含量。

对于泌出水中重金属含量，制备质量浓度76%、78%、80%，水泥掺量0%、4%、6%、8%、10%的固结体试件，测量其泌出水量；通过电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES)测定质量浓度78%，水泥掺量0%、4%、6%、8%、10%的固结体泌出水中重金属含量。

3 结果与讨论

3.1 尾砂固结的细微观结构及渗透性演化

3.1.1 细微观结构演化

通常情况下排放的尾砂呈浆液状；当采用干式堆存排放尾砂时，尾砂浆液经过脱水形成高浓度膏体。这两种情况下组成尾砂排放体均为尾砂与水混合体，其细观结构为饱和或半饱和散体介质。当采用固结排放尾砂时，尾砂固结体通过水泥水化反应产物的骨架支撑与尾砂颗粒的填充增强形成不易崩解的多孔介质^[13]。可以看出，随着水化反应的进行尾砂堆排体的细微观结构发生了很大变化，这种结构的演化显然会影响到堆排体的稳定性、渗透性及毒性浸出性能。

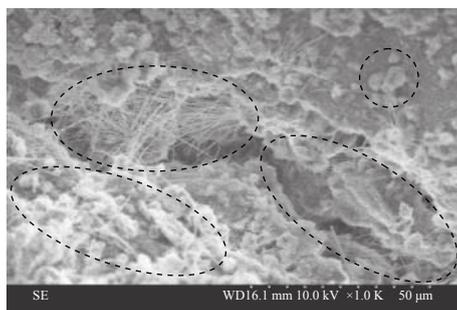
图2为尾砂固结过程中SEM扫描图。对比不同养护阶段固结体SEM扫描图可得尾砂固结体细微观结构演化特征如下^[17]：

1)尾砂固结的初期(7 d)，固结体中基本完成了片状、层状框架结构搭建的水化反应。尽管如此，由于水化反应尚不完全，仍存在大量颗粒状物质附着在片状、层状结构上；固结体中还存在被水化反应产物包裹、联结的团絮状物质，这部分物质胶结在片状、层状结构上，并随着水化反应产物增多，形成新的片状、层状结构；片状、层状结构通过絮凝状物质局部连接，但仍存在很大的处于未连接状态的部分^[18]。

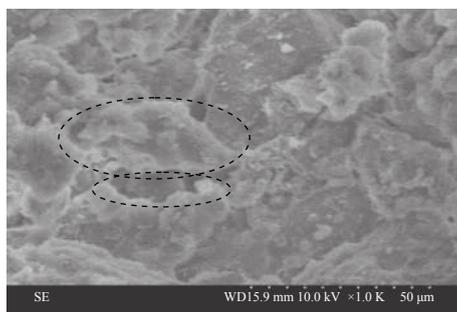
2)尾砂固结较长时间后(28 d)，固结体中基本无颗粒状、团絮状物质；固结体由片状、层状物质胶结在一起，结构间未连接的孔裂隙显著减小。

3.1.2 渗透性能演化

不同于井下充填体受顶板压力的影响，尾砂地面堆排受应力影响较小，其渗透性主要取决于堆排体的细微观结构。结合图2可以看出，随着堆排体中



(a) 养护7 d



(b) 养护28 d

图2 尾砂固结过程中SEM扫描图

Fig. 2 SEM scans during the cementation

水泥掺量的、养护时间的增加，堆排体的细微观结构发生了变化，尾砂固结体实现了从散体介质到固体多孔介质的改性。这种改性作用会引起堆排体渗透系数发生数量级的改变，表3为不同水泥掺量下尾砂固结体的渗透系数。

表3 尾砂胶结体的渗透系数

Tab. 3 Permeability coefficients of cemented tailings

波特兰水泥量 (重量)%	孔隙比	渗透系数(以不含水泥 的为100%)/%
0	0.689	100.00
4	0.664	25.40
8	0.644	10.10
12	0.646	5.03
16	0.603	2.43

分析尾砂固结对堆排体渗透系数演化的作用可知，随着水泥掺量增加，堆排体渗透系数发生了显著的减小。渗透系数的改变会显著影响重金属迁移的能力，显著提高重金属固化的效果。

3.2 尾砂固结改性的抗崩解性能演化及其力学响应

3.2.1 尾砂固结的抗崩解泥化改性效应

除了能显著改变堆排体细微观结构、降低堆排体的渗透性外，尾砂固结改性最主要的效应便是能改善细微观结构的稳定性，提高排放体的抗崩解、泥化性能。通常情况下，尾砂干式堆排主要依靠高浓度膏体流动性差、具有一定自立性以及排水固结后有

一定强度而维持堆排体的稳定性。然而,这种堆排体一旦遭遇降雨便容易发生堆排边坡失稳,发生大面积滑坡。滑坡除了会造成安全的问题外,尾砂浆液也会随地表径流扩散,造成堆排场以外的土壤、地表水甚至地下水污染。而采用尾砂固结排放能显著改善堆排边坡稳定性外,还能有效的控制尾砂中重金属扩散,降低重金属的环境损伤。在实践中,由于尾砂崩解浆液化造成的污染是重金属扩散首先应当避免的情况,也是堆排稳定性主要考虑的安全问题。

图3所示为不同水泥掺量下养护28 d尾砂固结体浸泡的模拟实验。可以看出,水泥掺量会显著影响固结体在水环境下的泥化、崩解性能,进而影响固结体的稳定性。此外,浸泡时间长短也会影响固结体的稳定性。主要结论如下:

1) 水泥掺量很小时(0.6%),固结体遇水迅速崩解,完全成为散体状态。这意味着当不添加胶凝材料的干式排放场发生降雨时,堆排体极易崩解,堆排边坡稳定性、环境损伤存在较大问题。

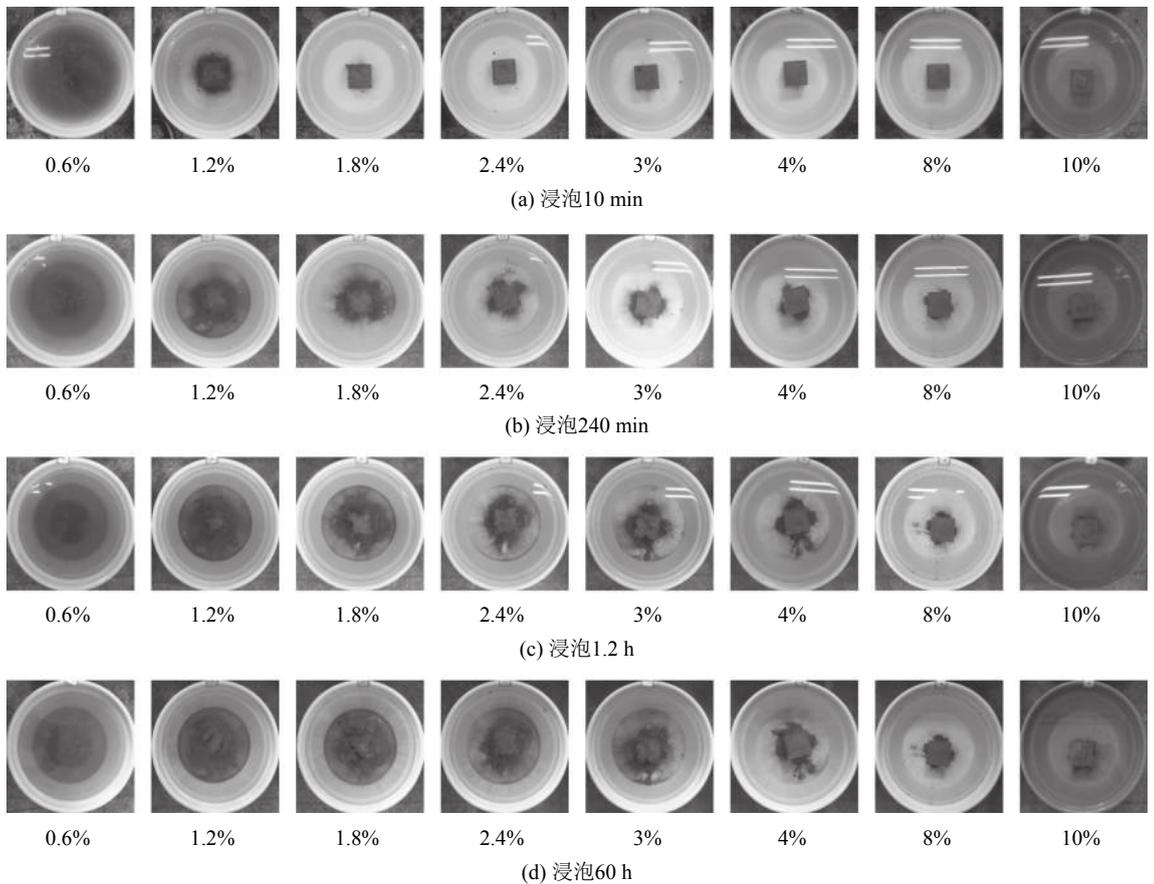


图3 浸泡过程中固结体的抗崩解性演化

Fig. 3 Stability evolution of cemented tailings in immersion period

2) 当水泥掺量提高时(1.2%~1.8%),固结体遇水还会发生崩解。进一步分析可知,随着水泥掺量增加,崩解程度降低;随着浸泡时间增加,崩解程度也会增大。可以看出,添加少量水泥会改善堆排边坡稳定性、降低环境污染,但是在长时补水下,堆排边坡的稳定性、环境损伤仍较大。

3) 当水泥掺量进一步提高时(2.4%~3%),固结体崩解显著减小,即便在长时浸泡下固结体崩解程度有所增加,但主要以固结体四角处局部的崩解为主,在不受外力干扰情况下,固结体能保证较好的稳定性。

4) 当水泥掺量较大时(大于4%),固结体基本不

再发生崩解,仅固结体表面有局部的崩解、脱落,这样的崩解很难影响固结体整体稳定性。

可以看出,添加适量胶凝材料可实现堆排体抗崩解性能的改变,从根本上改善堆排体的稳定性,防止重金属随干排尾砂遇水崩解甚至浆液化扩散造成污染。实验可得固结体崩解泥化的临界水泥掺量为3%~4%,大于此值,可预防尾砂崩解、扩散造成的重金属污染。

3.2.2 尾砂固结改性作用的力学响应

尾砂固结体崩解主要是由于水分渗透进入固结体孔隙,对尾砂颗粒或胶结后的孔隙形成孔隙水压力;水分渗入还会排出孔隙间气体,气体的运移会造

成对尾砂颗粒或胶结后孔壁的动载作用。在这两者的作用下,固结体中未胶结尾砂颗粒发生运动、弱胶结孔壁被破坏,固结体发生崩解,由形态固定的固体变为散体甚至浆液状。由于地表堆排高度通常不会很大,降雨补水条件通常也有限,固结体内孔隙水压力通常较小,引起崩解破坏的主要原因是水化反应程度不足,颗粒间胶结力本身较弱。而固结体这种与胶结程度相关的特征,也会直接影响尾砂固结体的力学性能。研究发现,固结体抗压强度对水泥掺量的力学响应与尾砂固结体抗崩解泥化性能的演化有较好的一致性。

图 4 所示为不同料浆质量浓度下(76%、78%、80%)尾砂固结体单轴抗压强度之和随水泥掺量和养护龄期的变化曲线。实验发现,当水泥掺量小于1%时,固结体强度较小,压力试验机已无法测得有效数值;当水泥掺量小于4%,固结体单轴抗压强度略有增加,但不显著;当水泥掺量大于4%时,固结体单轴抗压强度显著增加。

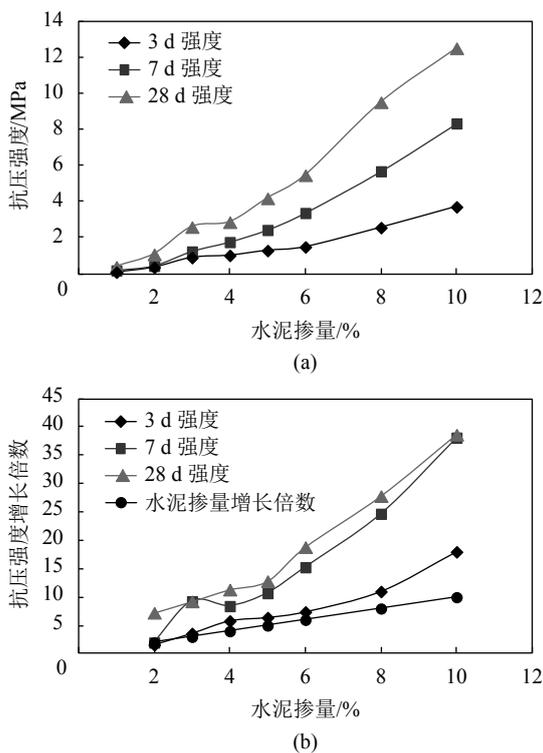


图 4 固结体抗压强度变化规律

Fig. 4 Variation of cemented tailings' uniaxial compressive strength

据此认为水泥掺量4%为转折点,水泥掺量大于此值认为固结体内尾砂颗粒被水化产物固定,不会影响固结体稳定性;水泥掺量小于4%,固结体在长时补水条件下可能发生崩解,造成堆排失稳。对照上节可知,这一结果和固结体浸泡实验固结体崩解临界水泥掺量接近。

3.3 固结排放过程中重金属浸出性能演化

前文主要对固结体微观结构和抗崩解性能演化的演化进行了研究,而对于排放体重金属浸出性能的演化,应当通过定量的手段进行测定。采用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES)测定固结体浸滤液中重金属含量测定来定量研究。此外,还应对不同水泥掺量下排放体泌出水中重金属进行测定,以探讨水泥掺量对泌出水中重金属浸出的影响。

3.3.1 全尾砂固结体浸滤液重金属含量演化特征研究

考虑到排放到地面的尾砂会不可避免的受降雨或地表径流浸泡,造成重金属会浸出。采用室内模拟实验监测不同配比条件下尾矿固结体浸泡液中重金属含量,模拟堆排场浸滤液中重金属含量演化特征。样品取自第3.2.1节中固结体浸滤液,如图5所示。检测结果由北京新奥环标理化分析测试中心提供。

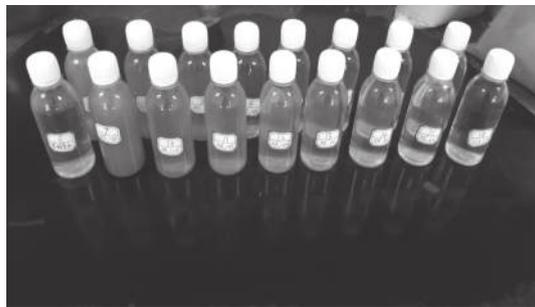


图 5 送检样品

Fig. 5 Test samples

图 6 可以看出随着水泥掺量增加,尾砂固结体浸泡液中检测出的重金属含量呈减小趋势,且不同料浆浓度下检出重金属含量变化趋势相同。其中,水泥掺量小于3.00%时,检出重金属接近或超过环境质量标准0.07 mg/L(GB3838—2002);水泥掺量大于3.00%时,检出重金属小于环境质量标准0.07 mg/L(GB3838—2002)。料浆浓度78%的固结体,当胶凝剂含量高于8.00%时,由于浸滤液中重金属含量低于检出限,无法检出。

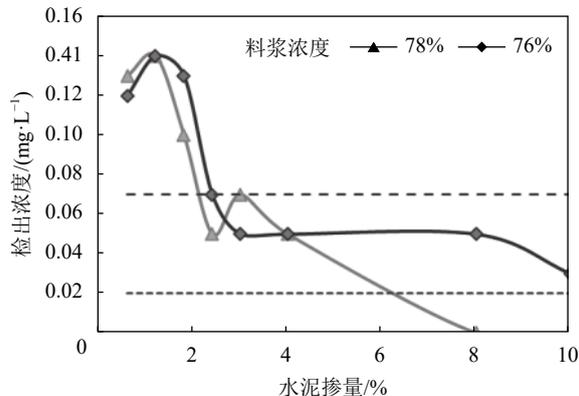


图 6 不同水泥掺量下固结体浸泡液中重金属含量演化规律

Fig. 6 Heavy metal content within cemented tailings

分析可知,随着水泥掺量增加,固结体孔隙结构逐渐稳定下来。当水泥掺量大于3.0%时,固结体遇水不再崩解、泥化。具有抗崩解泥化的、稳定孔隙结构的固结体可以将重金属密封到固结体内部。在固结堆排体排放到贮存场后,被固化的重金属浸出大大减小,甚至消失。可以看出,添加胶凝材料能有效将重金属固化,降低重金属浸出损伤环境。

3.3.2 尾砂料浆泌水及重金属浸出规律

料浆拌合结束养护初期,质量较大的固体颗粒发生沉降,料浆中水份随固体颗粒沉降、挤压到上方。这部分水在堆排时若不能恰当的处理,会大量泌出并扩散到周围的土壤或水体中。因此,应当对固结过程中泌出水进行测定。

图7所示为料浆浓度76%、78%、80%,水泥含量4%、5%、6%、8%、10%下尾砂固结泌水量。图7(a)中可以看出,随着水泥添加量的增加,泌水率呈减小的趋势。分析可知,胶凝材料增加,水化反应程度加大,反应耗水量增加,泌出水减小。尽管泌水率会随水泥添加量改变而改变,图中可以看出胶凝材料添加量由4%增加到10%的过程中,泌水率变化通常不超过4%,变化幅度较小。

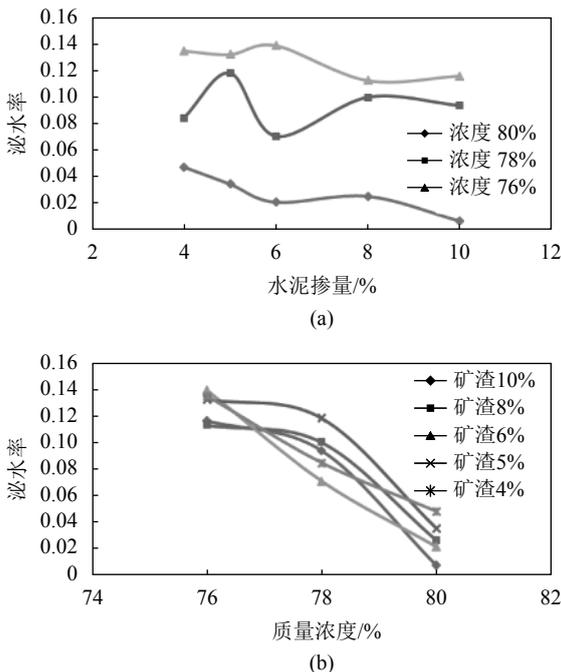


图7 固结过程中泌水率与水泥掺量的关系

Fig. 7 Bleeding rate evolution with different cement content

图7(b)中随着料浆质量浓度由76%增加到80%,泌出水量显著减小,泌水率变化不小于5%,通常能达到7%以上。对比图7(a)、7(b)可知,由于物料质量浓度引起泌出水变化幅度要大于胶凝材料添加量引起的泌水量的变化。因此,在全尾砂固结过程中,对物料沉降泌水量产生主要影响的因素为物料质量浓

度。考虑到泌出水可能对环境造成损伤,可通过提高料浆浓度来降低其对环境的损伤。

3.3.3 泌出水毒性鉴定

采用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-AES)测定不同水泥掺量、不同料浆浓度下全尾砂固结体泌出水中重金属含量,用以评定泌出水对环境的损伤作用,实验结果如图8所示。

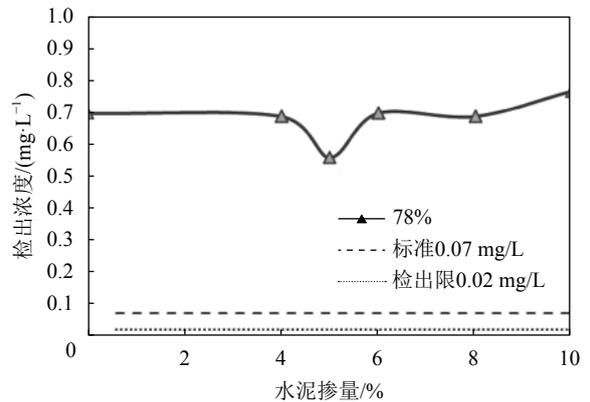


图8 固结过程中泌出水重金属含量与水泥掺量的关系
Fig. 8 Heavy metal content evolution in bleeding water with different cement content

图8为不同水泥掺量下尾砂固结泌出水重金属检测结果。分析可知,无论是否添加水泥、水泥掺量多少,尾砂固结泌出水中重金属含量和全尾砂浸滤液中重金属含量基本一致。分析可知,这是由于尾砂固结泌水时间远小于水泥水化时间,泌水结束时水化反应程度较小。故而尾砂固结行为本身对泌出水中重金属含量影响较小,泌出水中重金属含量即为尾砂浆液中重金属。考虑到尾砂固结泌水会对环境造成损伤,而泌水发生在固结的初期,不同于长期弃置在环境中的固结体,可通过合理的废水(即泌出水)循环工艺对回收进入污水处理系统。

4 结论

1)尾砂地面排放重金属污染主要来源于堆排场浸滤液,其次为尾砂料浆排放初期的泌出水。浸滤液中重金属的含量与其流经尾砂排放体时的渗流特性有关。而尾砂固结会对排放体的微观结构、抗崩解性能造成影响,进而影响浸滤液流经尾砂排放体时的渗流特征。

2)电镜扫描实验和文献统计表明,尾砂固结生成的水化产物会使排放体微观结构更加致密,孔隙尺寸显著减小,渗透性能显著降低。

3)尾砂固结体的抗崩解性能随水泥掺量逐渐提高,其中水泥掺量3%~4%是固结体在水中浸泡崩解的临界掺量,大于此值,固结体不易崩解。力学实验表明,此临界水泥掺量也是固结体强度随水泥掺量增加的拐点,大于此值,固结体强度显著增加。两者

具有较好的一致性。

4) 重金属浸出的检测发现, 水泥掺量大于 3% 以后, 浸滤液中重金属含量显著降低, 可达到国家相关标准, 故此可通过尾砂固结来控制尾砂长期堆排过程中重金属污染; 提高水泥掺量无法降低泌出水含量和泌出水中的重金属含量。可通过提高料浆浓度、污水回收来控制这部分重金属造成污染。

参考文献:

- [1] Sun Wei. Macro-micro mechanical behaviors of subsidence disposal paste and compatible deformation control[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2015. [孙伟. 塌陷区膏体处置体宏观力学行为及协调变形控制研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.]
- [2] Xu Chao, Xia Beicheng, Wu Haining. Speciation and bioavailability of heavy metals in tailings and agricultural soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11): 2293–2296. [许超, 夏北成, 吴海宁. 尾矿库尾砂及周边农田土壤重金属形态分布及其生物有效性[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(11): 2293–2296.]
- [3] Zhang Dezhou. Development and application of paste tailings stacking technology[J]. *China Mine Engineering*, 2010, 39(2): 49–53. [张德洲. 尾矿膏体堆存技术的发展和应[J]. *中国矿山工程*, 2010, 39(2): 49–53.]
- [4] Robinsky E I. Tailings disposal by the thickened discharge method for improved economy and environmental control[C]// Proceedings of the 2nd International Tailings Symposium-Tailing Disposal Today. Denver, 1987: 75.
- [5] Robinsky E I. Thickened discharge-A new approach to tailings disposal[J]. *Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, 1975, 68(764): 47–51.
- [6] Mcphail G, Noble A, Pageorgiou G, et al. Development and implementation of thickened tailings discharge at Osborne Mine, Queensland, Australia[C]// Proceedings of the international Seminar on Paste and Thickened Tailings. Cape Town, 2004: 31–38.
- [7] Zhang Li. Study on the environmental chemical characteristics of lead from gold copper mine in the mineral processing-dry starcking system[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2016. [张黎. 铅元素在金铜矿选矿 - 干堆尾矿系统中的环境化学特征[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2016.]
- [8] Agnew M, Taylor G. Laterally extensive surface hardpans in tailings storage facilities as possible inhibitors of acid rock drainage[C]// Proceedings of the 5 th International Conference on Acid Rock Drainage, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton: SME, 2000: 1337.
- [9] 侯运炳, 唐杰, 魏书祥. 尾矿固结排放技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2016.
- [10] Wei Shuxiang. Study on tailings cementation and discharging technology[M]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2010. [魏书祥. 尾矿固结排放技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.]
- [11] 赵阳升. 多孔介质多场耦合作用及其工程响应[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [12] Wang Yong, Wu Aixiang, Wang Hongjiang, et al. Damage constitutive model of cemented tailing paste under initial temperature effect[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2017, 39(1): 31–38. [王勇, 吴爱祥, 王洪江等. 初始温度条件下全尾胶结膏体损伤本构模型[J]. *工程科学学报*, 2017, 39(1): 31–38.]
- [13] Li Keqing, Feng Ling, Gao Shujie. Preparation of cementitious materials for backfilling by using nickel slag[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2015, 37(1): 1–6. [李克庆, 冯琳, 高木杰. 镍渣基矿井充填用胶凝材料的制备[J]. *工程科学学报*, 2015, 37(1): 1–6.]
- [14] Fall M, Samb S S. Effect of high temperature on strength and microstructural properties of cemented paste backfill[J]. *Fire Safety Journal*, 2009, 44 (4) 642–651.
- [15] Zhao Shuhua, Chen Zhiliang, Zhang Taiping, et al. Advances in Solidification/Stabilization Technology Treatment of Heavy Metals in Contaminated Soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(6): 1531–1536. [赵述华, 陈志良, 张太平, 等. 重金属污染土壤的固化/稳定化处理技术研究进展[J]. *土壤通报*, 2013, 44(6): 1531–1536.]
- [16] 仵彦卿. 多孔介质污染物迁移动力学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2007: 23–27.
- [17] Hou Yunbing, Li Wenchen, Zhu Shiting, et al. High early strength property and its mechanism of large charge slag unclassified tailing solidification agent[J]. *China Mining Magazine*, 2016, 25(3): 146–149. [侯运炳, 李文臣, 朱时廷, 等. 大掺量矿渣全尾砂固结剂早强性能与机理研究[J]. *中国矿业*, 2016, 25(3): 146–149.]
- [18] Xu Wenbing, Tian Xichun, Hou Yunbin, et al. Experimental study on the pore and strength properties of cemented unclassified during the consolidation process[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2016, 45(2): 272–279. [徐文彬, 田喜春, 侯运炳, 等. 全尾砂固结体固结过程孔隙与强度特性实验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2016, 45(2): 272–279.]

(编辑 黄小川)

引用格式: Hou Yunbing, Liu Chang, Ding Pengchu, et al. Study on solidification effect of heavy metal by tailings cementation and discharging technology[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2018, 50(5): 231–238. [侯运炳, 刘畅, 丁鹏初, 等. 尾砂固结排放的重金属固化效应研究[J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(5): 231–238.]