

尾矿干堆及脱水工艺研究应用与展望

周科平, 刘福萍, 邓红卫, 阮德修

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 为更好地应用尾矿干堆技术, 推动中国尾矿处理技术的发展, 在 Ei 数据库和中国期刊全文数据库中对尾矿干堆的相关文献进行检索统计的基础上, 对国内外尾矿干堆技术的应用现状及研究进展进行了综述性研究。分析了国内外尾矿干堆的应用, 列出了相关实例, 得到了尾矿浓度及降雨对干堆工艺的影响; 探讨了采用干堆法的原因, 对其优势和局限性进行了概括, 比较分析了国内外尾矿干堆的联系和区别。对尾矿干堆的关键技术脱水工艺的现状进行了总结, 认为尾矿压滤、尾矿浓缩—压滤/过滤和尾矿分级—浓缩—压滤是目前最常用的 3 种脱水工艺, 并对其脱水设备作了简要描述。对目前尾矿干堆技术存在的技术和管理问题进行了分析, 最后对尾矿干堆技术的应用前景进行了预测和展望。

关键词 尾矿干堆; 脱水工艺; 脱水设备

中图分类号 TD926.4

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.09.013

Applications and Prospects of Dry Tailings Disposal and Dehydration Technology

ZHOU Keping, LIU Fuping, DENG Hongwei, RUAN Dexiu

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract In order to apply the dry tailing stacking technology better and promote the development of the tailings disposal technology, the papers on the dry tailings disposal in the Database of Ei Compendex and Chinese Academic Periodical Full Text are searched and analyzed by using statistics methods, and based on the analysis, the application status and the research progress of the dry tailings disposal technology at home and abroad are reviewed, with examples, including the effects of the tailings concentration and the rainfall on the dry heaping of tails and the principles, advantages and limitations of the dry tailings disposal. The domestic dry tailings disposal is compared with that in other countries. The present situation of the dehydration technology and the key technology of the dry tailings disposal are also reviewed. The tailings pressure filtration dehydration technology, the tailings thickening—pressure filtration/thickening—filtration dehydration technology and the tailings classifying—thickening—pressure filtration dehydration technology are considered as the three most commonly used dehydration technologies. The related dewatering equipment is briefly discussed. The technical and management issues on the current dry tailings disposal technology are analyzed. At last, the future prospect for the application of the dry tailings disposal is suggested.

Keywords dry tailings disposal; dehydration technology; dewatering equipment

0 引言

选矿厂的尾矿通常以矿浆的形式排放, 筑坝储存在尾矿库中。尾矿浆浓度低、含水量高, 决定了尾矿库的稳定性系数低, 尤其是在洪水时期和地震多发区, 易发生溃坝事故。自 1970 年以来, 全世界发生了 35 起重大尾矿库溃坝事故, 导致

至少 471 人死亡及无法估计的环境危害^[1]。尾矿废水中含有重金属离子、酸性废水等污染物质, 因此尾矿库溃坝不仅会导致人员伤亡、财产损失, 还会对环境造成极大破坏。在尾矿库运行期间, 尾矿水的渗漏也会污染周边环境。

因此, 如何解决尾矿含水问题, 减少尾矿库溃坝事故的

收稿日期: 2012-11-16; 修回日期: 2013-02-09

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目 (2012BAC09B02)

作者简介: 周科平, 教授, 研究方向为深部采矿与矿山岩石力学与工程等, 电子邮箱: kpzhou@vip.163.com

发生,降低尾矿对环境的危害已逐渐成为专家学者研究的重点课题。20世纪70年代,一种更安全、更环保的尾矿处理方法——尾矿干堆法诞生了。尾矿干堆是指利用大型脱水设备,将选矿排出的尾矿浆,送入搅拌槽缓冲后用渣浆泵送到脱水车间,经脱水设备充分挤压成为干片状的尾渣饼,浓度达到80%以上,含水量仅有20%左右,利用皮带输送机运往尾矿干堆场里分层堆放的尾矿堆放方式^[2]。尾矿干堆可分为干排干堆和湿排干堆。选矿厂产生的矿浆先经管道运送至脱水车间,脱水后产生的滤饼再经皮带或汽车运送至干堆场的堆放方式称为湿排干堆;矿浆直接在选矿厂区脱水,再将脱水产生的干渣滤饼运送至干堆场的堆放方式称为干排干堆。干排干堆和湿排干堆在库区的堆存方式是没有区别的。尾矿干堆不仅具有安全性、环保性,还具有占地面积少,废水可循环利用,可减少土地征用费用、库区工程费用,增加尾矿库服务年限等优点,再加上世界各国不断加强对安全和环保的要

求,尾矿干堆技术迅速发展,干堆工艺日益成熟,应用范围日趋广泛。

为掌握国内外尾矿干堆的研究进展,笔者在美国工程索引Ei数据库和中国期刊全文数据库中对尾矿干堆的相关文献进行检索后,对这些文献进行统计分析,总结了国内外尾矿干堆应用实例及相应的脱水工艺,提出了尾矿干堆存在的问题,并对其发展前景进行了预测。

1 尾矿干堆相关文献的检索与统计

为清晰了解国内外尾矿干堆的发展动态,笔者以“dry stack tailings”或“dry tailing stacking”或“dry stackable tailings”或“dry tailings disposal”为检索词,在Ei数据库中进行全面搜索,得到国内外尾矿干堆的相关文献284篇(不包括2012年的文献)。图1、图2分别是国内外相关文献发表的时间分布情况统计和文献作者国别分布情况统计。

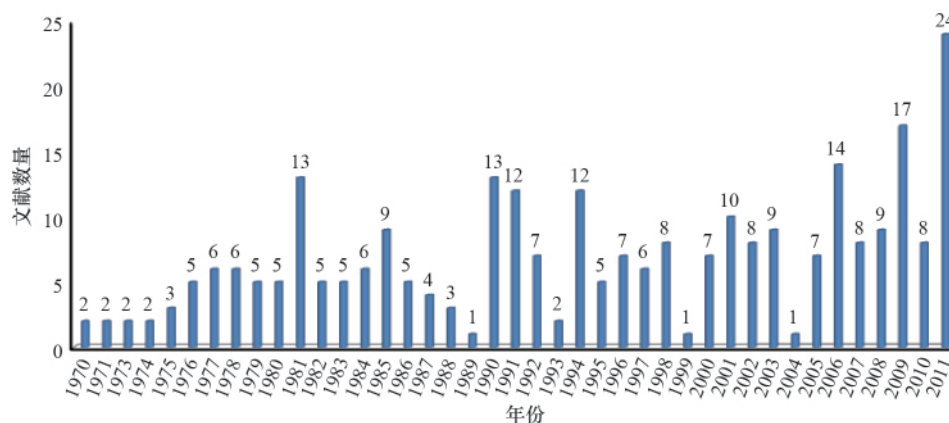


图1 国内外相关文献发表的时间分布情况

Fig. 1 Distribution of papers at home and abroad versus time of publication

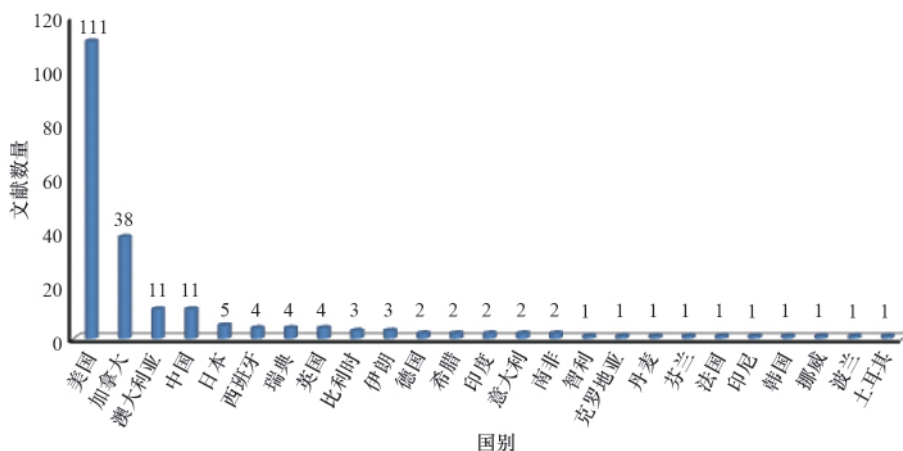


图2 国内外相关文献的国别分布情况

Fig. 2 Distribution of papers at home and abroad versus author's countries

为进一步了解中国尾矿干堆的研究现状,在中国期刊全文数据库中,采用“高级检索”,以“主题”为检索项,以“尾矿干堆”或“尾矿干排”或“尾矿干式堆存”为检索词,进行“模糊

匹配”检索,得到与尾矿干堆相关的文献858篇(不包括2012年的文献)。图3是国内尾矿干堆相关文献发表时间分布情况的统计。

由图1~图3的统计分析得出以下4点结论:

(1) 从图1可以得出,文献数量起伏变化较大,无严格的上升或下降趋势,但1990年之后平均每年的文献数量整体均大于1990年之前的年平均文献数量,可推测自1990年以

来,尾矿干堆得到世界各国更多的重视,世界越来越多的学者开始关注尾矿干堆的研究与应用。

(2) 从图2可以看出,美国的尾矿干堆研究成果最多,加拿大其次。由于这两个国家的经济较发达,可为高成本的尾

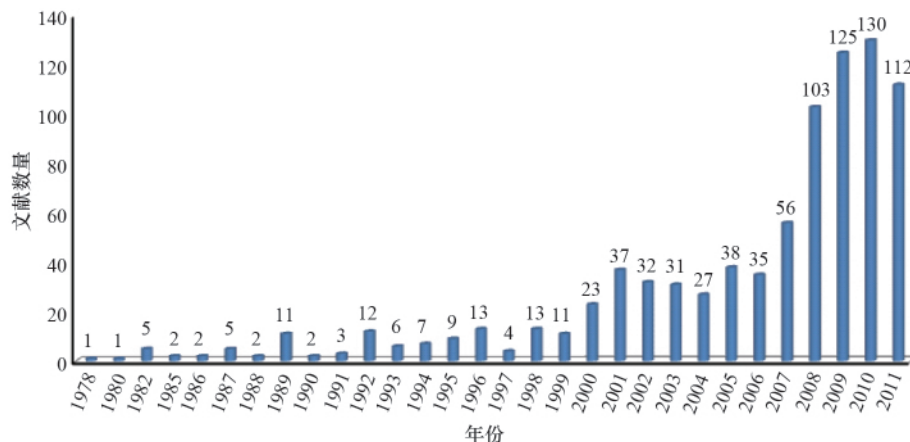


图3 国内相关文献发表的时间分布情况

Fig. 3 Domestic paper distribution versus time of publication

矿干堆提供有利的经济支持,推动了两国的研究进展。与美国、加拿大相比,中国的发表情况虽有较大差距,但较之其他国家,中国也取得了一定的研究成果。

(3) 从图3可以得出,国内尾矿干堆相关的文献数量总体呈上升趋势。2000年以前中国尾矿干堆的研究成果很少,2000年之后,尤其是2008年之后发展迅速;随着近年来社会各界对环保和安全的要求不断提高,尾矿脱水技术和干堆工艺的不断改进和完善,越来越多的企业开始认可和采纳尾矿干堆技术。

(4) 综合图1~图3,从世界范围来看,虽然尾矿干堆只有40多年的发展历史,但随着对安全和环境的关注,采矿技术的提高,尾矿干堆获得了很多国家的认可和推广,呈现了良好的发展趋势。而国内尾矿干堆较国外起步更晚,但作为一种新技术,近几年发展迅速,逐渐凸显了该方法在安全和环保等方面的重要作用。

2 国内外尾矿干堆具体应用分析

2.1 国外尾矿干堆应用分析

尾矿干堆是一种新的尾矿处理模式,1973年,加拿大安略省的Kidd Creek矿山采用尾矿干堆法,建成了世界上第一座浓缩尾矿干堆场^[3]。目前国外很多矿山都采用了尾矿干堆工艺,如坦桑尼亚的Bulyan hulu矿山、俄罗斯的Kubaka矿山、加拿大的Ekati Diamond和印度的Hindustan铜有限公司均采用了尾矿干堆法^[4]。智利的La Coipa矿山也采用了尾矿干堆工艺,其干堆场是世界上最大的尾矿干堆场之一^[5]。1985年后,国外多家铝冶炼厂也开始采用尾矿干堆法,如Kwinana冶炼厂、VAW Stade冶炼厂等^[6]。另外,Rosemont铜矿进行了尾矿干堆设计^[7];南斯拉夫的Zirovski铀矿开展了尾矿干堆零

废水排放的实验^[8]。

文献[9]~[11]分析了尾矿干堆的优势:降低环境污染,节约水源,简化闭库问题^[9];随着脱水设备的高效化,尾矿干堆能较好缓解水资源日益缺乏的状况^[10];干堆体表面可以形成稳定的表面,有利于后期复垦,尾矿堆场可以少筑坝甚至不筑坝^[11]。

文献[12]~[15]针对尾矿干堆的某一特定方面开展了研究:尾矿干堆设计中要考虑的土力学因素^[12];尾矿干堆的管理问题,特别指出防止场外水流介入和场内渗流可显著降低污染性废水的产生^[13];油砂尾矿的过滤脱水性能^[14];流变学在尾矿干堆中的应用^[15]。

2.2 国内尾矿干堆应用分析

20世纪70年代末,国内开始了尾矿干堆的研究,但直到20世纪90年代才把尾矿干堆真正应用于生产实践中,表1总结了国内尾矿干堆的应用实例^[16-30]。

另外,迁安蔡园镇金岭铁矿^[37]、河北承德某铁矿^[38]也采用了尾矿干堆法,但文献没有对干堆的具体原因或效果等进行详细的描述。文献[39]介绍了新桥矿业公司临时干堆场的设计。文献[25]、[26]、[28]、[29]分别对贵州黔东南州某金矿、云南镇沅金矿、凤城地区黄金矿山、甘肃省天水李子金矿的干堆工艺,包括筑坝、尾矿堆放、防渗、防洪、护坡和回水等工程进行了详细描述。

根据国内尾矿干堆应用实例分析,国内尾矿干堆的应用现状主要有以下几点:

(1) 采用了尾矿干堆工艺的企业类型。主要有矿山和化工企业、冶炼厂等,其中在矿山中又以金矿和铁矿应用最多。

(2) 尾矿滤饼浓度对尾矿干堆工艺的影响。尾矿滤饼的浓度均在75%~90%之间。如果尾矿浓度太低,尾矿难以夯实,

表 1 国内尾矿干堆实例
Table 1 Examples of domestic dry tailings disposal

企业名称	类型	尾矿浓度/%	干堆启用日期	采用干堆工艺的原因	干堆效果	文献
山东归来庄金矿	金矿	77~78	1994	尾矿回水率低,已溶金流失	缓解了与地方争水、争地的问题,每年节省 246.34 万元	[16], [17]
北京市京都黄金冶炼厂	金矿冶炼厂	77~80	1995	含氰废水达不到排放标准,尾矿库渗漏水污染下游河流	已溶金回收,滤液回收,每年多创效益 125.1 万元	[18]
大安河金矿	金矿	82	1996	选矿费用居高不下	年收益 170 多万元,废水排放达标	[19]
哈密市金矿	金矿		1997	比采用湿堆法更有优势	减少了氰化物的排放,且增加经济效益 422 万元/年	[20]
新疆阿希金矿	金矿		1998	一期尾矿坝无法继续使用时,经过方案比较选择了尾矿干堆法	降低了环境污染,节约了用水量,年净增效益 520 万元	[20]
内蒙古撰山子金矿	金矿			原尾矿库库容将满,改用尾矿干堆法比湿式尾矿堆存法更具优势	环境效益好,避免氰化物污染周边环境且每年增收 186.02 万元	[21]
赤峰柴胡栏子金矿	金矿	82		原尾矿库已超期服役,改用尾矿干堆法比传统堆存法更具优势	大幅度减少污水排放量,每年可增收 95.81 万元	[22]
辽宁省排山楼金矿	金矿	80		为节省水力资源,减少占地面积,回收尾液中药剂和有价金属	节省了大量水资源,减少了污水排放,且每年可增效益 498.04 万元	[23]
河南某金矿	金矿	>85		漂白粉处理尾矿成本高,尾矿液中已溶金银流失	回水率高,可最大限度回收氰化钠,年综合效益达 327.855 万元	[24]
贵州黔西南州某金矿	金矿		2008	出于环保和安全方面的考虑	降低了环境污染风险,提高了库容利用率,减少了溃坝风险	[25]
云南镇沅金矿	金矿	85	2009	原尾矿库多次出现溃坝险情,含有氰离子的尾矿水超标排放	提高了尾矿库的安全程度,减少了雨季防洪、防污染投入	[26]
天昊黄金选矿厂	金矿	83	2009	尾矿湿堆投资大、维护费用高、占地面积广,严重影响生态环境	增加库容量,延长尾矿服务年限	[27]
辽宁天利金业有限责任公司	金矿	~80		尾矿库势能高,坝体稳定性差,难以满足区域水环境类别要求	提高经济效益、增大尾矿库安全系数,增加尾矿库服务年限	[28]
辽宁黄金矿业有限责任公司	金矿	~80		受地形影响,尾矿库安全性差	减少环境污染,增加安全和经济效益	[28]
甘肃省天水李子金矿	金矿		2010	原尾矿库库容已满	提高了回水利用率,实现了尾矿废水“零排放”	[29]
山东金岭铁矿	铁矿	79	2002	现运行的尾矿库与井下采空区联通,危险性大且回水率低	可增加三、四坑尾矿库库容;年获经济效益 52 万元	[30]
鞍矿风水沟尾矿库	铁矿			现有尾矿库有塌坝的潜在危险,现有尾矿库服务年限短	增加尾矿库库容,节省土地征用费 17.6 亿元	[31]
东川矿业包子铺铁矿	铁矿	75(干季) 67(雨季)	2010	原尾矿库被认定为“危库”而不能使用	已采用干堆,但目前来说干堆投资和运行成本比湿堆高	[32]
湖北三宁化工股份有限公司磷矿选矿厂	磷化工企业	>88	2009	难以找到合适的库址	解决了征地难的问题	[33]
东川汤丹铜矿	铜矿	68		尾矿库只能设在老蒋家沟,该处地震烈度为 9 级,传统堆坝法不经济、不安全	避免了坝体震动液化问题,比传统湿法堆存更安全、更经济	[34]
湖北三鑫金铜股份有限公司	铜矿	>82	2011	原尾矿库库容接近饱和,若新建尾矿库,面临审批时间长、征地、资金问题	实现了尾矿的安全、环保堆放	[35]
丰宁鑫源矿业	钼矿		2010	为落实节水、节电、节能减排计划	提高坝体稳定性、安全性;增加尾矿库服务年限;节水、节能	[36]

遇下雨天气还可能会发生滑坡、坍塌等危险。因此尾矿需达到一定浓度才能堆放,理论上讲,浓度越高越好,但尾矿浓度越高,脱水工序越复杂,成本越高,从经济角度来讲,是不可取的。

(3) 降雨对尾矿干堆工艺的影响。国内采用干堆工艺的矿山大多位于干旱地区,多雨的南方地区的矿山很少采用干堆工艺,因为大量降雨会使库区积水,并冲刷干堆体,影响其稳定性。随着尾矿干堆技术的发展,南方也有企业开始采用尾矿干堆法,2010年湖北三鑫金铜股份有限公司在尾矿扩容时采用了尾矿干堆法^[5],填补了国内南部有色矿山尾矿干堆的空白。

(4) 尾矿干堆工艺的局限性。大部分矿山都不是在设计阶段采用尾矿干堆法,而是在尾矿库扩容或改造后开始采用干堆法,主要原因是干堆成本较高,在没有特殊的环保、安全限制的情况下,大部分矿山会优先考虑湿堆方案,但当扩容或改造时面临征地难、征地费用高、新建尾矿库投资大等问题时,矿山会考虑转向尾矿干堆法。因此,降低尾矿干堆成本是扩大干堆应用范围的关键。

(5) 尾矿干堆的优势。虽然尾矿干堆在国内的应用仍存在局限,但具有很多优势促进这种方法在国内的发展:尾矿干堆可以解决湿堆工艺不能解决的一些难题,如增强坝体稳定性,实现废水回收利用,节约水资源,回收有用金属,减少环境污染等,从而为矿山带来良好的安全效益、环境效益、经济效益和社会效益。

(6) 尾矿干堆工艺的应用环境。综合考虑尾矿干堆工艺应用的企业类型、影响因素、优缺点,得出尾矿干堆工艺适用于如下矿山:位于降雨量少的干旱地区的矿山,尾矿库建设征地难的矿山,尾矿废水中还存留较多有价值的矿物元素、需进行废水回收的矿山以及采用尾矿湿排法不能满足当地安全和环保要求的矿山。

2.3 国内外尾矿干堆对比分析

国内外的尾矿干堆存在一些共同点:在国内外都是一种

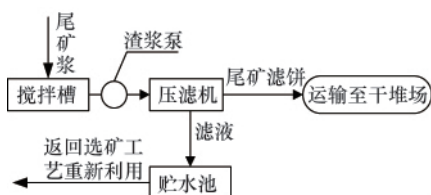


图4 尾矿产压滤脱水工艺

Fig. 4 Tailings pressure filtration dehydration technology

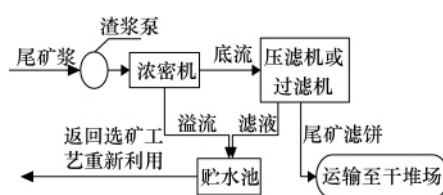


图5 尾矿浓缩—压滤/过滤脱水工艺

Fig. 5 Tailings thickening-pressure filtration/thickening-filtration dehydration technology

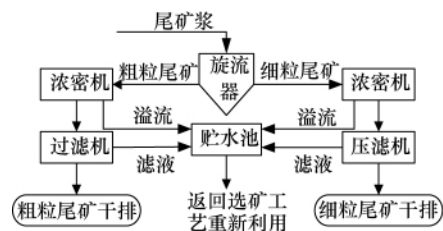


图6 尾矿分级—浓缩—压滤脱水工艺

Fig. 6 Tailings classifying-thickening-pressure-filtration dehydration technology

子金矿^[29]、新疆阿希尔金矿和哈密市金矿^[20]。

图5所示是联合使用浓密机与过滤机/压滤机的脱水工艺。首先浓密机对尾矿浆进行初步脱水,形成的浓密底流在过滤机/压滤机中进一步脱水。这种工艺在尾矿产压滤脱水工艺的基础上增加了浓密机。湖北三宁化工股份有限公司^[33]采用的是这种脱水工艺。

新发展起来的尾矿处理技术,已在部分矿山取代了传统湿排尾矿法的应用;符合社会对安全和环保的要求;相对于传统的尾矿湿排法有很多优势;都面临着干堆成本高的问题。但是由于国情、地理、气候等的不同,国内外尾矿干堆也存在差异。表2列出了国内外尾矿干堆的两点主要区别。

表2 国内外尾矿干堆的区别

Table 2 Difference between the domestic dry tailings disposal and the dry tailings disposal in other countries

	应用范围	研究范围
国内	主要在金矿、铁矿、少数铜矿中应用	着重对尾矿干堆的实际应用、具体脱水工艺、脱水设备进行研究
国外	不仅在金矿、铁矿、铜矿中应用,还涉及在铀矿、油砂矿、铝冶炼厂中的应用	除了研究尾矿干堆的实际应用,还展开了一些基础研究:如研究干堆设计中要考虑的因素;研究流变学在尾矿干堆中的应用;研究某种尾矿的脱水性能

国内尾矿干堆较国外起步晚,国内矿山采用干堆法时可借鉴国外经验,扩大干堆应用范围,加强干堆基础知识的研究,为国内干堆应用提供有力的技术支撑。

3 尾矿干堆脱水工艺技术现状

3.1 尾矿干堆脱水工艺

尾矿含水量的多少是干堆和湿堆的主要区别,因此脱水工艺是尾矿干堆的关键技术。国内尾矿干堆常用的尾矿脱水工艺可分为3大类,如图4~图6所示。

图4所示是尾矿产压滤脱水工艺,采用的主要设备包括搅拌槽、渣浆泵、压滤机、贮水池和皮带运输机(或者采用汽车运输)。采用此种脱水工艺的矿山有大安河金矿^[19]、山东归来庄金矿^[16]、辽宁排山楼金矿^[23]、云南镇沅金矿^[26]、甘肃省天水李

图6所示方法是分级—浓缩—压滤尾矿脱水方法:先将尾矿分成粗粒和细粒尾矿,再根据不同的粒级选用合适的脱水设备。这种方法可以减轻浓密机的负荷,从整体上提高尾矿脱水效率。所需设备只需在图5所示工艺的基础上增加一个旋流器。山东某铁矿是应用此种脱水工艺的典型代表之一^[40]。文献[41]考虑了尾矿的综合利用,对图6所示方法进行了

改进,即将分级后的粗粒尾矿用作建筑材料,而将细粒尾矿浓缩压滤后干堆。河南某金矿^[24]和河北某铁矿^[42]都采用了类似的尾矿脱水工艺,但含粗粒尾矿的旋流器底流不再经过浓缩压滤,而是直接送入脱水筛脱水后干排。

除上述常用的3类脱水工艺,文献[43]提出水力旋流器-浓密机串联浓缩工艺和由旋流器、分泥斗及浓密机组成的旋流器-浓密机闭路浓缩工艺;文献[44]提出了一种高效低能耗的尾矿水处理工艺,即尾矿浆在脱水设备中震动脱水,筛上物直接干堆,筛下物进入斜管沉淀池进行处理,斜管沉淀池底流进入固液分离设备,最后将分离出的泥饼干排;文献[45]提出预先分级-液中造粒-过滤工艺,该工艺适用于细粒物料的脱水。

3.2 尾矿干堆脱水设备

浓缩设备主要有普通圆池型浓密机、斜板浓密机、斜管

浓密机和高效浓密机4类^[46]。脱水设备主要有过滤机和压滤机。过滤机按获得过滤推动力的方法不同,分为重力过滤器、真空过滤器和陶瓷过滤器3大类。压滤机也有板框压滤机、厢式压滤机、立式压滤机和带式压滤机^[47-48]。为了不断优化脱水工艺和改善脱水设备,国内相关专家学者不断地开展新研究,目前已研发出了一些新的尾矿脱水设备,如表3所示。

国外用到的脱水设备有张弛筛、振动筛、振动离心机、斜板分离器等,其中张弛筛和振动筛用于尾矿的筛分,斜板分离器可用于有毒废水的澄清和矿浆浓缩^[52]。依据尾矿处理量、尾矿类型、尾矿性质等,矿山在实施尾矿干堆时除了选择常用的尾矿脱水设备,也可以尝试采用合适的新型设备或引进国外设备,实现尾矿高效脱水。

表3 部分尾矿干堆脱水新设备

Table 3 Selected new dewatering equipment used in dry tailings disposal

设备	特点
叠层复合振动筛系列产品 ^[49]	占地面积小、筛分效率高、能耗低,推动中国细粒筛分分级技术的进步,已在黑色金属选矿磨后分级、尾矿脱水干堆等领域推广应用
PLC程序控制全自动压滤机 ^[50]	全自动的滤水设备,直接将尾矿压滤脱水,形成脱水滤饼,丰宁鑫源矿业成功应用了此设备
一种可移动轮斗式尾矿脱水机 ^[50]	该脱水机主要包括沉砂厢、旋流器、排水槽、捞砂斗,旋流器给料管连接有渣浆泵,投资、能耗、运行成本较常规浓缩过滤工艺少
一种尾矿干排专用陶瓷过滤器 ^[51]	从原来陶瓷过滤器槽体底部的放矿口接入一台小型渣浆泵,通过管道从过滤器槽体两端的底部再高速流入槽体,带动整个槽体内的矿浆动起来,消除了因矿浆沉降速度快而导致的压耙现象

4 尾矿干堆存在的问题及发展前景

4.1 尾矿干堆存在的问题

虽然中国尾矿干堆应用已渗透到矿山、冶炼厂、化工厂,并且发展速度较快,但应用范围主要局限于金矿和少数铁矿,尤其是在中国南方有色金属矿中的应用几乎处于空白状态。尾矿干堆在技术和管理方面都还存在一些问题。

(1) 技术问题。① 尾矿脱水工艺复杂,脱水成本高,如何提高尾矿脱水设备系数、简化尾矿脱水工序、降低尾矿脱水成本还有待进一步研究;② 研究多雨地区尾矿干堆的文献较少,尤其是缺乏对国内南方多雨地区尾矿干堆的详细、系统的研究^[25];③ 目前的研究成果中,还没有一套完全适用于尾矿干堆的设计规范,在尾矿干堆设计中,一般是参照传统湿式尾矿排放法的设计规范;④ 深入研究有待于加强,关于干堆体稳定性分析的文献几乎没有,适用于尾矿干堆的评价体系和评价模型也尚未建立。

(2) 管理问题。尾矿干堆场安全管理主要是参照适用于传统尾矿的《尾矿库安全管理规定》(国家经贸委令第20号)和《尾矿库安全监督管理规定》(国家安监总局第38号令),但尾矿干堆在安全管理过程中,具有一些特殊要求,如应注意避免运输沿途的污染;尾矿中含有毒物质时要定期清洗运输车辆和压滤车间;高寒地区压滤车间要有保暖设施;机械碾压尾矿时要注意保护防渗设施等。

4.2 尾矿干堆发展前景预测

尽管尾矿干堆工艺还存在一些问题,但尾矿干堆符合社会对安全和环保的要求,随着相应的政策、规范、技术、设备的不断完善,尾矿干堆具有较大的发展空间,具体体现在:

(1) 应用范围更广。① 政府和社会提倡安全和环保,支持尾矿干堆的应用;② 适用于尾矿干堆的设计规范、安全管理规定正不断完善;③ 随着防渗排洪技术的发展以及对多雨地区尾矿干堆体防护措施的进一步研究,雨水对干堆体的影响可以逐步消除,尾矿干堆技术也可以在南方得到推广应用。

(2) 应用成本更低,经济效益更好。① 脱水设备将朝着自动化、智能化的方向发展。目前已有矿山在干堆时采用自动脱水设备,如PLC程序控制全自动压滤机的采用^[36]。② 脱水工艺将朝着高效化方向发展。渣浆泵可以采用变频控制,使送矿压力随着脱水设备的压力变化而变化。③ 脱水工艺将朝着简单化的方向发展。在尾矿中加入固化剂可简化脱水工艺,不仅能较好地解决细粒尾矿脱水难的问题,并且能增强干堆体的稳定性。④ 通过改造脱水工艺,可使金矿选矿滤液中已溶金的回收率更高,如哈密市金矿在压滤机后串联炭吸附柱,吸附滤液中的已溶银^[20],类似的方法也可以在其他矿山采用,加强有用金属的回收利用。⑤ 尾矿干堆与尾矿综合利用结合起来。现在已研发出的脱水设备可将粗粒尾砂分离出

来作为建筑用砂,充分实现尾矿的资源化利用。

(3) 安全效益和环境效益更佳。随着尾矿干堆技术的推广和使用,更多矿山可避免溃坝事故的发生和尾矿废水对环境的污染,社会的安全和环保将得到更好的保障。

5 结论

(1) 对国内外尾矿干堆相关文献进行了检索和分析,结果表明,尾矿干堆是一种新的尾矿处理技术,发展历史不长,但发展速度较快,相关的文献数量总体呈增长趋势。

(2) 国内尾矿干堆工艺的应用需考虑投资运行成本、气候等的影响,主要在金矿和铁矿企业中得到应用,而干堆效果受到尾矿浓度、降雨等的影响,其应用具有一定的局限性,但同时具有诸多优点,因此,应逐步克服该工艺的应用难题,同时借鉴国外经验,使中国尾矿干堆工艺得到进一步的推广应用。

(3) 脱水工艺是尾矿干堆的关键技术,目前常用的脱水工艺主要有3大类,而脱水设备种类繁多,企业选择脱水设备时应考虑尾矿处理量等,努力降低脱水成本,实现尾矿干堆系统高效运行。

(4) 目前尾矿干堆工艺的应用面临着一些技术问题和管理工作,在今后尾矿干堆的研究应用中主要需解决脱水成本高、受降雨影响大、无设计管理规范、无安全评价体系等问题,扩大该工艺的应用范围,降低其应用成本,争取为企业和社会带来良好的安全环保效益。

参考文献 (References)

- [1] Sofra F, Boger D V. Environmental rheology for waste minimisation in the minerals industry[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2002(86): 319-330.
- [2] 林心. 干堆工艺在尾矿库建设中的应用[J]. *南方金属*, 2010(4): 30-32. Lin Xin. *Southern Metals*, 2010(4): 30-32.
- [3] Jewell R J, Fourie A B. Paste and thickened tailings-A guide [M]. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2002.
- [4] Spearing A J S, Millette D, Gay F. The potential use of foam technology in underground backfilling and surface tailings disposal [C]// *Proceedings of MassMin 2000*. Brisbane: Australian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, 2000: 193-197.
- [5] Davies M P, Rice S. Dry stack filtered tailings[J]. *Mining Environment Management*, 2002(1): 10-13.
- [6] Power G, Gräfe M, Klauber C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices [J]. *Hydrometallurgy*, 2011, 108(1/2): 33-45.
- [7] Newman L, Arnold K, Wittwer D. Dry stack tailings design for the Rosemont Copper project [C]// *International Conference on Tailings & Mine Waste*. Tailings and Mine Waste' 10: Proceedings of the 14th International Conference. Boca Raton: CRC Press, 2011: 315-326.
- [8] Slivnik J, Stergarsek A. Dry tailings disposal at Uranium mine Zirovski Vrh related to water circuit in ore treatment [C]. *First International Conference on Uranium Mine Waste Disposal*, Vancouver, British Columbia, Canada, May 19-21, 1980.
- [9] Tielens A J. "Dry" disposal can eliminate decant tailings pond for

- thixotropic mill wastes[J]. *Engineering and Mining Journal*, 1997(1): 84-86.
- [10] Breitenbach A J. Overview: Tailings disposal and dam construction practices in the 21st century [C]// *International Conference on Tailings & Mine Waste*. Tailings and Mine Waste' 10: Proceedings of the 14th International Conference. Boca Raton: CRC Press, 2011: 49-57.
- [11] Noakes F. An end to tailings dams is in sight waste disposal [J]. *Australian Mining*, 2005, 97(10): 18.
- [12] Lupo J, Hall J. Dry stack tailings-Design considerations [C]// *International Conference on Tailings & Mine Waste*. Tailings and Mine Waste 10: Proceedings of the 14th International Conference. Boca Raton: CRC Press, 2011: 327-334.
- [13] Davies M P, Rice S. Dry stack filtered tailings[J]. *Mining Environmental Management*, 2002(1): 10-13.
- [14] Xu Y M, Tadek D, Kan J M. Filterability of oil sands [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2008, 86(4): 268-276.
- [15] Nguyen Q D, Boger D V. Application of rheology to solving tailings disposal problems[J]. *International Journal Mineral Processing*, 1998, 54 (3-4): 217-233.
- [16] 田赞生. 对黄金矿山尾矿压滤干式堆存的认识[J]. *甘肃冶金*, 2007, 29(2): 44-46. Tian Zansheng. *Gansu Metallurgy*, 2007, 29(2): 44-46.
- [17] 姚香. 黄金尾矿干堆技术若干问题的探讨[J]. *金属矿山*, 2005(S1): 527-530. Yao Xiang. *Metal Mine*, 2005(S1): 527-530.
- [18] 陈希龙. 尾矿浆全压滤工艺在全泥氰化炭浆厂的应用[J]. *黄金*, 1998, 19(10): 34-36. Chen Xilong. *Gold*, 1998, 19(10): 34-36.
- [19] 李娟, 律清阳. 大安河金矿采用板框压滤机处理尾矿的生产实践[J]. *黄金*, 2000, 21(3): 40-42. Li Juan, Lü Qingyang. *Gold*, 2000, 21(3): 40-42.
- [20] 张韧. 论尾矿压滤工艺在新疆黄金矿山的应用[J]. *新疆有色金属*, 2001(2): 10-12. Zhang Ren. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 2001(2): 10-12.
- [21] 金大安. 撰山子金矿尾矿压滤新工艺的应用[J]. *有色矿山*, 1998(5): 22-25. Jin Daan. *Nonferrous Mines*, 1998(5): 22-25.
- [22] 白金禄, 赵连全. 尾矿压滤、干式堆存处理工艺[J]. *黄金*, 2000(5): 40-41. Bai Jinlu, Zhao Lianquan. *Gold*, 2000(5): 40-41.
- [23] 梁国海, 洪小鹏. 尾矿压滤干堆工艺在排山楼金矿的成功应用与改造实践[J]. *黄金*, 2003, 24(12): 47-49. Liang Guohai, Hong Xiaopeng. *Gold*, 2003, 24(12): 47-49.
- [24] 刘义良, 王有春, 左金宽, 等. 多频脱水筛工艺在全泥氰化尾矿干堆的应用[J]. *矿业工程*, 2011(S1): 45-47. Liu Yiliang, Wang Youchun, Zuo Jinkuan, et al. *Mining Engineering*, 2011(S1): 45-47.
- [25] 曾宪坤, 沈楼燕. 关于在我国南方多雨地区实施尾矿干堆技术的探讨[J]. *中国矿业*, 2011, 20(5): 90-92. Zeng Xiankun, Shen Louyan. *China Mining Magazine*, 2011, 20(5): 90-92.
- [26] 彭华, 刘松韬, 张清华. 云南镇沅金矿尾矿干堆工艺研究[J]. *云南冶金*, 2010, 39(6): 54-57. Peng Hua, Liu Songtao, Zhang Qinghua. *Yunnan Metallurgy*, 2010, 39 (6): 54-57.

- [27] 张立征, 赵福财, 谭琦. 天昊黄金选矿厂尾矿压滤干堆的工艺改造及效益分析[J]. 湖南有色金属, 2011, 27(6): 48-50, 78.
Zhang Lizheng, Zhao Fucui, Tan Qi. Hunan Nonferrous Metals, 2011, 27(6): 48-50, 78.
- [28] 傅学忠. 尾矿压滤干堆在凤城地区黄金生产中的应用[J]. 黄金, 2012, 33(4): 49-51.
Fu Xuezhong. Gold, 2012, 33(4): 49-51.
- [29] 刘怀礼. 尾矿压滤干排堆放工艺在李子金矿的应用[J]. 黄金, 2011, 32(6): 50-53.
Liu Huaili. Gold, 2011, 32(6): 50-53.
- [30] 刘远清, 李传营, 王博. 尾矿压滤干堆技术在金岭铁矿的应用 [J]. 矿业快报, 2006(6): 404-406.
Liu Yuanqing, Li Chuanying, Wang Bo. Express Information of Mining Industry, 2006(6): 404-406.
- [31] 于克旭, 周征, 张树军. 风水沟尾矿库扩容的可行性[J]. 矿业工程, 2009, 7(6): 25-27.
Yu Kexu, Zhou Zheng, Zhang Shujun. Mining Engineering, 2009, 7(6): 25-27.
- [32] 邱崇栋. 尾矿干堆技术在东川包子铺铁矿的应用实践[J]. 矿业工程, 2011(S1): 28-31.
Qiu Chongdong. Mining Engineering, 2011(S1): 28-31.
- [33] 李茂. 干堆反浮选磷尾矿的实践[J]. 科技传播, 2011(21): 129.
Li Mao. Science and Technology Communication, 2011(21): 129.
- [34] 乐云. 汤丹尾矿库堆存方案的确定[J]. 有色金属设计, 1997, 24(1): 30-32, 37.
Le Yun. Nonferrous Metals Design, 1997, 24(1): 30-32, 37.
- [35] 黄国强. 用科技手段综合治理尾矿库[J]. 劳动保护, 2011(8): 107-109.
Huang Guoqiang. Labor Protection, 2011(8): 107-109.
- [36] 刘永龙, 霍雪梅. 节能减排新工艺, 尾矿干排新创举——访丰宁鑫源矿业公司总经理于彩东[N]. 河北经济日报, 2010-10-21.
Liu Yonglong, Huo Xuemei. A new technology of energy saving and emission reduction, a new pioneering work of dry tailings emission: Visiting Yu Cai-dong, the general manager of Fengning Xinyuan Mining Company[N]. Hebei Economic Times, 2010-10-21.
- [37] 李建军, 刘辉, 丽雪. 迁安金岭铁矿尾矿干堆系统建成投产, 实现安全生产节能降耗双赢[N]. 唐山劳动日报, 2009-07-14.
Li Jianjun, Liu Hui, Li Xue. Tailings dry stacking system of Qianan Jinling Iron Mine has been put into operation, achieving a win-win situation of safe production and energy saving [N]. Tangshan Labor Daily, 2009-07-14.
- [38] 付永祥. 大型山谷型尾矿干堆场设计理念与实例[J]. 金属矿山, 2009(10): 1-4, 31.
Fu Yongxiang. Metal Mine, 2009(10): 1-4, 31.
- [39] 康虔, 张钦礼. 新桥矿业公司含硫全尾矿综合处理技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
Kang Qian, Zhang Qinli. A study about comprehensive treatment technology for sulphur-bearing crude tailings in Xinqiao Mining Corporation Limited[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [40] 马达昌, 马新涛, 闰勇. 铁矿尾矿干堆排放工艺及装备[J]. 金属矿山, 2010(S1): 286-288, 297.
Ma Dachang, Ma Xintao, Run Yong. Metal Mine, 2010(S1): 286-288, 297.
- [41] 李俊宁, 杨任新, 常前发, 等. 铁矿尾矿整体利用和处置工艺: 中国, ZL200910116430.9[P]. 2009-08-26.
Li Junning, Yang Renxin, Chang Qianfa, et al. Whole utilization and disposal technology of iron ore tailings: China, ZL200910116430.9[P]. 2009-08-26.
- [42] 刘培坤, 王磊, 崔学奇, 等. 高效旋流器与变频脱水筛在河北某铁矿尾矿干排工艺中的生产实践[J]. 矿业工程, 2011(S1): 21-22.
Liu Peikun, Wang Lei, Cui Xueqi, et al. Mining Engineering, 2011(S1): 21-22.
- [43] 吕宪俊, 连民杰. 金属矿山尾矿处理技术进展[J]. 有色矿冶, 2004, 20(S1): 11-14.
Lü Xianjun, Lian Minjie. Non-ferrous Mining and Metallurgy, 2004, 20(S1): 11-14.
- [44] 吴爱华. 一种高效低能耗的尾矿干排及尾矿水处理工艺: 中国, ZL200910307895.2[P]. 2010-03-03.
Wu Aihua. An efficient and low energy consumption dry tailings disposal and tailings water treatment technology: China, ZL200910307895.2[P]. 2010-03-03.
- [45] 西安建筑大学科技处. 尾矿高效脱水技术[R]. 西安: 西安建筑大学科技处, 2004.
Science and Technology Department of Xi'an University of Architecture. Efficient tailings dewatering technology [R]. Xi'an: Science and Technology Department of Xi'an University of Architecture, 2004.
- [46] 周兴龙. 选矿厂固液分离技术及设备研究应用进展[J]. 现代矿业, 2009, 9(S1): 59-63.
Zhou Xinglong. Modern Mining, 2009, 9(S1): 59-63.
- [47] 蒋勇. 矿物脱水设备年评[J]. 金属矿山, 2001(10): 1-3.
Jiang Yong. Metal Mine, 2001(10): 1-3.
- [48] 毛星蕴, 姜立新, 梁金龙. 国外脱水设备的研究与进展[J]. 过滤与分离, 1997(2): 3-9.
Mao Xingyun, Jiang Lixin, Liang Jinlong. Filtration and Separation, 1997(2): 3-9.
- [49] 李传曾, 刘维生, 李中昆, 等. 叠层复合振动筛系列产品研制[R]. 唐山: 唐山陆凯科技有限公司, 2011.
Li Chuanzeng, Liu Weisheng, Li Zhongkun, et al. Research on laminated composite vibrating screen series products [R]. Tangshan: Tangshan Lu Kai Science and Technology Corporation, 2011.
- [50] 刘海斌, 王志良, 张宪宝, 等. 一种可移动轮斗式尾矿脱水机: 中国, ZL201020555407.8[P]. 2011-05-11.
Liu Haibin, Wang Zhiliang, Zhang Xianbao, et al. A movable round bucket machine used in tailings dewatering: China, ZL201020555407.8 [P]. 2011-05-11.
- [51] 王海丰. 一种尾矿干排专用陶瓷过滤器: 中国, ZL201020548814.6[P]. 2011-08-10.
Wang Haifeng. A special ceramic filter used in dry tailings disposal: China, ZL201020548814.6[P]. 2011-08-10.
- [52] Mathewson D, Norris R, Dunne M. Cost-effective dry screening, dewatering and water treatment[C]//Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Proceedings Green Processing. Melbourne: Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, 2006: 125-132.

(责任编辑 许冰, 吴晓丽)