

高寒地区细粒尾矿堆坝方案研究^①

王伟明^{1,2}, 张诏飞^{2,3,4}

(1.伊春鹿鸣矿业有限公司,黑龙江伊春 152500; 2.中铁资源集团有限公司,北京 100039; 3.中铁资源集团勘察设计有限公司,河北廊坊 065000; 4.河北省非煤矿山岩土工程技术创新中心,河北廊坊 065000)

摘要:以小兴安岭地区某尾矿库为例,开展了全尾矿湿排堆坝、全尾矿池填法堆坝和旋流器分级堆坝试验。结果表明,旋流器分级堆坝具有对比优势,可有效提高坝前尾矿的排水固结能力,增大干滩长度和坝前区域尾矿的强度,同时可形成较大的沉积滩坡度、保证安全超高,改善坝体渗流条件、提高滩面承载能力和堆坝效率。通过细化旋流器分级堆坝工艺,采用非冬季堆坝、冬季放矿的宽体子坝堆筑方案可在一定程度上解决沉积滩含水量大、承载力低、无法尾砂堆筑子坝等问题,但在粗砂利用率、高等级尾矿库子坝宽度、冻土发育等方面仍存在不足。最终结合旋流器分级宽体子坝和模袋法两种堆坝工艺,有效解决了尾矿库堆坝所面临的主要问题,可作为高寒地区细粒尾矿堆坝的高效方案加以推广。

关键词:高寒地区;尾矿库;堆坝;细粒尾矿;池填法堆坝;宽体子坝;旋流器分级堆坝

中图分类号:TD926.4

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.03.003

文章编号:0253-6099(2024)03-0011-05

Scheme of Fine-Grained Tailings Dam in Regions with High Altitude and Cold Weather

WANG Weiming^{1,2}, ZHANG Zhaofei^{2,3,4}

(1.Yichun Luming Mining Co Ltd, Yichun 152500, Heilongjiang, China; 2.China Railway Resources Group Co Ltd, Beijing 100039, China; 3.China Railway Resources Group Survey and Design Co Ltd, Langfang 065000, Hebei, China; 4.Technology Innovation Center of Non-coal Geotechnical Engineering, Langfang 065000, Hebei, China)

Abstract: With a tailings pond in Lesser Khingan Mountains region as an example, experiments were carried out on tailings embankment respectively by upstream construction with discharged wet metallic tailings, by filling a pond with metallic tailings, and by construction with overflow and underflow of tailings separately from cyclone. It is shown that the embankment construction with overflow and underflow separately from cyclone is superior over other two methods based on comparison. It can not only effectively improve consolidation of the tailings in front of the embankment through drainage, prolong the length of dry beach and increase the strength of the tailings in front of the embankment, but also create a wide sloping sediment, keep the embankment within the freeboard, improve the seepage condition of the dam body, as well as increase the bearing capacity of beach surface and the efficiency of embankment construction. By improving the cycloning process, a scheme including constructing embankment during non-winter seasons and discharging tailings in winter to build a wide sub-dam is proposed, which can solve the previously existing problems to a certain extent, such as sediment beach with high water content and low bearing capacity, as well as inability to build sub-dam with tailings sand. However, both the utilizing rate of coarse sand, the width of sub-dam of high-grade tailings pond and development of frozen soil still need to improve. Finally, it is found that the embankment construction by adopting technique of building wider sub-dam with underflow and overflow of tailings from cyclone combined with geofariform method can effectively resolve the existing problems for tailings dam. Thus, this technique can be promoted as an effective embankment construction scheme with fine-grained tailings in regions with high altitude and cold weather.

Key words: regions with high altitude and cold weather; tailings pond; embankment construction; fine grained tailings; dam construction by filling pond; sub-dam with wide body; embankment with overflow and underflow from cyclone

① 收稿日期:2023-12-13

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC2904500)

作者简介:王伟明(1988—),男,黑龙江伊春人,高级工程师,主要从事选矿及尾矿库技术管理工作。E-mail:419562963@qq.com

通信作者:张诏飞(1987—),男,河北唐山人,高级工程师,主要从事矿山地质方面的研究工作。E-mail:729897184@qq.com

在我国西藏、黑龙江等高寒地区,尾矿库运行面临冻土、堆坝、防洪库容等问题^[1-2];第一,冻土发育带来的渗透、冻胀、融沉等问题,对库区渗流、坝体稳定等造成影响;第二,冬季排矿条件下,尾矿浆排水条件差,影响到尾砂固结;第三,冻土融化形成的春汛减少了防洪库容。同时,随着选矿技术不断发展,矿物磨得越来越细,矿体分选程度越来越高,尾矿粒径随之减小。细粒尾矿自身具有抗剪强度低、渗透系数小、固结稳定慢等特点^[3],使得高寒地区尾矿库堆坝问题进一步复杂化。

20世纪末,已有研究者对高寒地区细粒尾矿筑坝技术进行了探讨,并从放矿、排渗、坝体防护等方面提出了提高坝体稳定的技术措施^[2];近年来,随着矿产资源开发行业回暖,国内矿山从业者在高寒尾矿库、细粒尾矿库方面进行了大量研究^[3-6],研究成果对高寒地区细粒尾矿堆坝工作具有指导和借鉴意义。

小兴安岭腹地某大型矿山尾矿库采用初期坝+尾砂上游法筑坝方案,2014年至今,分别采用全尾矿湿排法、全尾矿池填法和旋流器分级筑坝法进行堆坝试验。本文对以上堆坝方式的应用条件、工艺参数、应用效果等开展了对比研究,最终选择适合于尾矿库运行条件的堆坝方案,研究结果可为高寒地区其他同类细粒尾矿堆坝工艺选择提供参考。

1 尾矿库概况

案例尾矿库位于北纬47.35°,库内封冰期为每年9月下旬至次年2月底,次年3月上旬为解冰期,冰层逐渐融化;1月份最冷,平均气温-23.8℃,最低气温-42.6℃。该尾矿库为山谷型尾矿库,采用湿排法和上游法放矿筑坝,初期坝为透水堆石坝,坝顶标高440m,设计总坝高198m,总库容为 $4.29 \times 10^8 \text{ m}^3$,为二等尾矿库。尾矿堆积坝采用上游式筑坝,每期子坝高3.0m,年上升高度6~7m。

尾矿库设计采用非冬季筑坝,冬季冰下集中放矿,年入库量1500万吨。2014—2021年入库尾矿粒级分布如表1所示。

表1 2014—2021年入库尾矿粒级分布表

粒级/mm	粒级产率/%				
	2014年	2016年	2018年	2019年	2021年
+0.074	40.74	46.83	40.98	41.02	48.66
-0.074+0.054	16.46	16.98	18.67	19.46	6.41
-0.054+0.038	11.11	5.83			9.16
-0.038+0.025	6.17	6.08	17.83	11.27	2.96
-0.025	25.52	24.28	22.52	28.25	29.81
合计	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

表1统计结果显示,历年入库尾矿中+0.074mm粒级含量占比40.74%~48.66%, -0.025mm粒级含量占比22.52%~29.81%。排入尾矿库的尾矿粒级分布呈现“两头多,中间少”的规律。按照有关标准,入库尾矿为细粒尾矿^[7-9]。

因入库尾矿粒度细、冰冻期放矿等因素,尾矿库前期运行存在滩面坡度平缓、尾矿含水量大、滩面承载力低、多层冻土发育等问题。企业多次开展了现场放矿试验研究,调整堆坝工艺,力图解决尾矿库存在的上述问题。

2 堆坝初步方案

2.1 全尾矿湿排上游法堆坝

尾矿库前期(2017年以前,坝顶标高456.0m、滩顶标高451.0m以下)采用尾矿湿排放矿方式,尾矿放矿质量浓度40%~42%,放矿支管管径150mm,正常运行同时开启18根支管,支管间距7.5m,根据滩面上升情况调整支管开启位置及数量。该段时间放矿形成的沉积滩面坡度平缓,干滩长度短,绝大部分为湿滩,坝前无法取砂筑坝。

由于无法取砂筑坝,在堆坝实践过程中,尾矿库第1~5级实际子坝采用挖掘机、推土机进行废石堆筑。由于坝轴线长、废石运距较远,每年筑坝工程费用相对较高。

在第1~5级子坝堆筑过程中,曾采用90根和180根放矿支管同时放矿,并调整放矿浓度,开展不同放矿流量及不同放矿浓度的现场放矿试验,旨在通过放矿试验进一步摸清和解决尾矿湿排筑坝的难题。试验结果表明:①增加放矿支管数量在初期能够形成一定滩面坡度,但由于尾矿矿浆保水性高、分选性差,在堆积一定高度后失稳滑塌使得滩面再次平缓;②流量一定的情况下,放矿浓度35%~45%对尾矿的分级和滩面坡比没有明显影响,坝前尾矿多支管分散放矿时形成的沉积滩坡度约0.5%。

现场放矿试验及运行情况表明,由于入库尾矿量较大,全线开启放矿支管,滩面始终处于放矿湿滩状态,承载力低,矿浆无法形成一定坡度的尾矿堆积体,堆积体在自重作用下会逐渐趋于平缓。减少放矿支管数量,单管流量增加,未放矿坝段滩面经短暂晾晒后有一定强度,但受到相对较大矿浆流量冲刷后形成滩面放矿冲沟,矿浆沿冲沟径直流向库内,也无法有效形成干滩。另外,矿浆浓度增加时,尾矿分选性变差,粗细尾矿在饱水状态下自稳能力差,难以形成坡度;降低放矿浓度,会增加含水量及矿浆流量,湿滩抗冲刷能力差,易产生滩面冲沟,无法形成均匀上升滩面。

以上结果表明,尾矿湿排放矿情况下,受到尾矿量

大、尾矿特性差的影响,通过调整放矿浓度及矿浆流量改善滩面坡度意义不大。

2.2 全尾矿池填法堆坝

为进一步优化尾矿库堆坝方案,2016年9月在尾矿库现场开展了全尾矿池填法堆坝试验。

试验方法:采用池填法堆筑子坝,分为4个池子,池子平面尺寸为153 m×50 m,围埝高2.0 m,顶宽1.5 m,内外坡比1:1。采用DN500PVC管作为溢流管,间距30 m。充填池底部铺设Φ150 mm全断面透水管,坡度1%,间距10 m,以加速充填池内尾矿固结。尾矿放矿时采用分散放矿向池内充填,放矿时溢流管高度始终稍低于矿浆液面,使细粒尾矿通过溢流管排至库内,粗砂沉积于池内,当充填至埝顶时停止放矿,晾晒干燥,进行下一个池填作业。

试验效果:虽布置有排渗设施,但池内尾矿长时间呈饱和状,尾砂排水固结效果极差,经过长时间浸泡后的尾砂围埝稳定性也极差,围埝冲毁严重,全尾矿池填法堆坝同样无法解决细粒尾矿固结、透水及坝体稳定问题。

2.3 初期旋流器分级尾砂堆坝

2017年以后,开始尝试采用旋流器进行分级筑坝(坝顶标高456.0 m、滩顶标高451.0 m及以上),底流管在坝前处放矿、溢流管在库内70 m以外放矿,旋流器型号为FX350,旋流器底流浓度约70%,底流沉砂中+0.074 mm粒级含量约70%。底流尾矿在坝前沉积后形成较大的滩面坡度,溢流至水边线滩面坡度平缓;滩面平均坡度约0.8%。底流尾矿由于粗砂比例大、含水量低、沉积滩自稳能力高,底流矿浆流动性相对较差,矿浆冲刷滩面能力弱,底流放矿能形成较大的沉积滩坡度。

2.4 初步方案比选

对全尾矿湿排法、全尾矿池填法和旋流器分级堆

坝的工艺效果进行了对比,结果见表2。

表2 3种堆坝工艺效果对比

堆坝工艺	处理效果			
	干滩长度	滩面坡度	滩面承载力	冻土发育
全尾矿湿排法	短	平缓	低	有
全尾矿池填法	短	平缓	低	有
旋流器分级法	较长	较大	较高	有

不难看出,相比于全尾矿湿排法和全尾矿池填法,旋流器分级法堆坝优势明显,通过坝前粗颗粒分选沉积,可达到以下效果:①提高坝前尾矿的排水固结能力,增大干滩长度和坝前区域尾矿强度;②底流尾砂粒径粗,矿浆质量浓度大,流动性较差,可形成较大的沉积滩坡度,保证安全超高;③改善坝体渗流条件,提高滩面承载能力和堆坝效率。同时,在减小冻土发育范围、加速冻土消融等方面,旋流器分级堆坝工艺尚需进一步细化和改善。

3 堆坝最终方案

3.1 旋流器分级宽体子坝

2018年以来,通过开展放矿筑坝综合研究工作,逐渐形成底流粗尾砂宽体子坝堆筑形式。

3.1.1 非冰冻期放矿

非冰冻期,采用旋流器分级分区放矿筑坝工艺(如图1所示),坝前区域为宽体子坝超高区,其上游为库内调洪区,两区连接处为滩面坡度陡降段。宽体子坝超高区采用旋流器底流放矿堆筑,其长度应达到尾矿库各运行期等级规定的最小干滩长度要求,其与调洪区水位高差应至少满足调洪高度需要。库内调洪区由部分底流与溢流放矿形成,汛期可用于调洪。

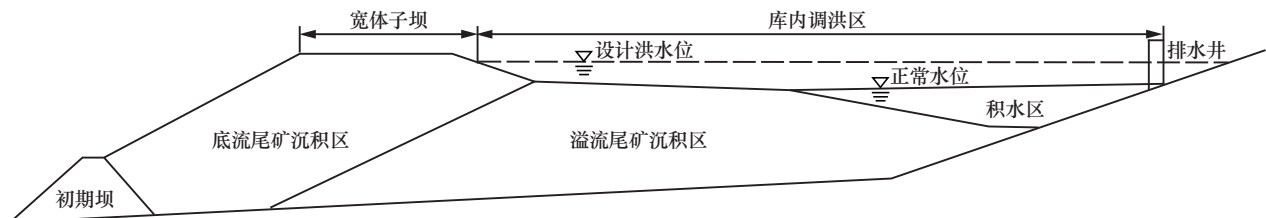


图1 尾矿分级分区堆存方式示意图

3.1.2 冰冻期放矿

冰冻期,采用尾矿库内集中放矿方式,尾矿经输送上坝后经相对粗管径支管(直径不小于150 mm)延伸至坝前一定距离放矿,放矿时采用支管后退式操作方式,即冬季放矿初期,放矿支管长度尽可能长,当支管

放矿口区域滩面上升较快,放矿口区域矿浆出现回流、放矿口处于即将淹没时,撤除上游支管使放矿口后退。冰冻期放矿时,尽量减少放矿支管数量、降低放矿口调整频率,出现清液层深度骤降等回水困难情况时,可再选另外一处进行集中放矿。

堆坝效果:实际放矿时,坝上同时开启44台FX350旋流器,运行过程中通过不断移动旋流器位置形成宽体子坝;控制宽体子坝宽度50~70 m,宽体子坝向内为底流粗尾砂自然流淌所形成的滩前陡坡段,长度50 m左右、坡度5%以上,之后的滩面基本为溢流细尾砂缓坡段直达水区。

3.2 宽体子坝堆坝存在的问题

旋流器分级尾砂堆坝一定程度上解决了湿排上游法阶段尾矿库所面临的沉积滩含水量大、承载力低、无法尾砂堆筑子坝等问题,该堆坝方案自2019年实施以来,满足了企业正常生产需求,但也存在不少问题,主要表现在以下几个方面:

1) 采用旋流器粗尾砂筑坝时间短,同时底流粗砂实际利用率低。① 由于冬季寒冷漫长,每年11月初至次年3月底之间,旋流器出口冻结。② 由于底流粗尾砂缺乏拦挡措施,在正常旋流器作业时底流尾砂存在流失现象,随尾矿矿浆流入库内,汛期暴雨冲刷进一步加剧底流尾砂流失。③ 汛期为保证防洪安全,一定时间内只进行旋流器放矿但不挪移旋流器,旋流器分级只调坡不筑坝。④ 有关研究和统计结果显示,坝前旋流器底流尾砂产率45%,但筑坝实际底流尾砂利用

率只有20%~22%,将近一半的底流尾砂流失。

2) 砂量不足,后期宽体子坝宽度无法满足规范最小干滩长度要求。目前阶段,尾矿库为三等库,旋流器分级筑坝在产率22%条件下基本满足最小干滩长度70 m的要求。根据测算,待尾矿库变为二等库以后,若尾矿库仍采用宽体子坝,坝顶宽度100 m时,实际所需产率在30%以上,现有的尾砂利用率无法满足后期宽体子坝的堆坝需求。

3) 筑坝方案无法有效避免坝体内冻土形成。根据冬季放矿的一般规律,如果库内水边的坚硬冻结尾砂在融化前被排放尾矿覆盖,就有可能成为永冻层(见图2)。冰冻层为相对不透水层,如果坝前存在冰冻层,对尾矿库降低浸润线是相当不利的,同时坝前形成坚硬冻土,会导致坝体稳定性降低。如果能够采取措施使得冰冻层远离坝坡,那么它对坝坡渗流和稳定的影响会大幅度减小。目前尾矿库冬季放矿实施方案为:集中在坝前80 m位置处采用多点分区放矿,放矿后期往往伴随着尾矿回流至坝前滩面附近;冬季放矿过程中尾矿矿浆距离坝前过近,客观上更容易在坝前一定滩面范围内形成冰夹层。随着坝体继续堆筑,逐年形成的冰层将形成坝体抗滑稳定性的薄弱地带,不利于坝体稳定性。

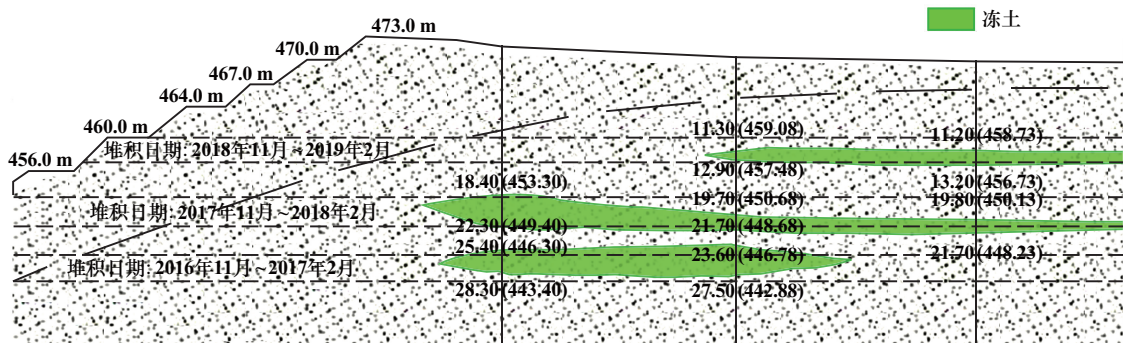


图2 库内典型剖面冰冻层分布图

通过上述分析,下阶段应在现有旋流器分级尾砂宽体子坝堆筑方案基础上,围绕采取何种措施提高粗砂利用率以构筑足够宽的宽体子坝,以满足减少坝前冻结尾砂分布、降低坝体浸润线的目的;同时依靠宽体子坝形成足够的汛期干滩长度及防洪安全超高,保证坝体安全及防洪安全是方案设计的核心。

3.3 旋流器分级粗砂+模袋宽体子坝

针对以上问题,经综合比选,最终选择旋流器分级粗砂+模袋宽体子坝法作为最终的堆坝方案。

作为一种土工材料复合土体方法,模袋法最初应用于水利工程河堤加固中,我国科研人员在2010年首次尝试模袋法进行细粒尾矿筑坝,因其独特的透水保

砂性,获得了非常好的工程效果^[10]。设计思路为:在距离坝前100~120 m的远滩面,采用模袋堆筑拦挡围埝,模袋坝前采用旋流器分级后尾砂堆存。每年模袋子坝分两层堆筑,按照堆坝上升速度6 m/a考虑时,当前坝轴线长度约2 km,堆筑两级3 m高模袋子坝(模袋顶宽6 m,高度3 m,上下游坡比1:2.0),考虑1.35倍的沉降系数,模袋围埝筑坝工程量约15万立方米/年。模袋堆筑子坝采用旋流器底流尾砂快速充灌堆筑形成,具有脱水固结快、机动灵活的特性,可保证效率,在软弱滩面上快速堆坝,实现粗尾砂的有效拦挡。

从操作可行性上讲:① 旋流器分级尾砂模袋堆筑围埝,具有脱水固结快、机动灵活的特性,可在软弱滩

面上快速堆坝;② 每级模袋子坝筑坝工程量小,工程投资相对经济合理;③ 模袋子坝快速形成后可快速形成第一道防洪安全超高,保证坝体的防洪安全;④ 围埝起到完全隔离冬季库及非冬季库的目的,实现库内冰层不对坝前的宽体子坝形成任何干扰,冬季可在宽体子坝以内的远距离库内实现延伸放矿,减小坝前冰层发育范围。

结合前述宽体子坝堆坝问题,可通过以下思路解决:① 通过模袋保砂,提高粗砂利用率;② 通过提高粗砂利用率,加快尾砂脱水固结,提升干滩强度,保证宽体子坝宽度满足最小干滩长度要求;③ 通过围埝完全隔离冬季库及非冬季库,避免库内冰层对宽体子坝的干扰,减小冻土发育范围。

从实际堆坝效果看,旋流器分级粗砂+模袋宽体子坝法较好解决了粗砂利用率问题,试验段宽体子坝宽度接近 100 m,库区尾砂排水固结效率提高,上游干滩与水面分界线清晰可见。同时,模袋堆坝有效减少了冻土的发育范围,坝前区域下方,最上层冻土的发育范围向库区上游显著推进。规模化和长期应用该堆坝方案,可有效改善库区渗流环境,达到降低浸润线、提高坝体稳定性的目的。

4 结 论

针对高寒地区细粒尾矿堆坝问题,以小兴安岭地区某尾矿库为例,开展了全尾矿湿排法、全尾矿池填法、旋流器分级堆坝试验,并对选定的旋流器分级堆坝方案做进一步深入研究,最终解决细粒尾矿干滩长度短、滩面平缓、滩面承载力低等问题,以及冻土发育问题,得到以下主要结论:

1) 通过旋流器分级,将粗砂留在坝前堆筑,可有效提高坝前尾矿的排水固结能力,增大干滩长度,提升坝前区域尾矿强度;同时可形成较大的沉积滩坡度,保

证安全超高;改善坝体渗流条件,提高滩面承载能力和堆坝效率。

2) 通过非冬季堆坝、冬季放矿的旋流器分级宽体子坝堆筑方案可在一定程度上解决沉积滩含水量大、承载力低、无法尾砂堆筑子坝等问题,但在粗砂利用率、高等级尾矿库子坝宽度、冻土发育等方面仍存在不足。

3) 结合旋流器分级宽体子坝和模袋法两种堆坝工艺,能有效解决尾矿库堆坝面临的主要问题,可作为高寒地区细粒尾矿堆坝的高效方案加以推广。

参考文献:

- [1] 沈楼燕. 关于西藏高原尾矿库设计的一些问题的探讨[J]. 金属矿山, 2009(1):156-158.
- [2] 唐艳华. 高寒地区细粒尾矿堆坝技术[J]. 黄金, 1995(1):25-29.
- [3] 胡再强,郭 婧,梁志超,等. 黏粒含量对细粒尾矿物理力学性质的影响[J]. 岩土工程学报, 2020,42(增刊1):16-21.
- [4] 陈荣健,张诏飞,席 伟,等. 高寒地区尾矿库冻土分布及冻融规律研究[J]. 金属矿山, 2023(2):209-216.
- [5] 刘欣欣,盛明强,史晓阳,等. 高寒地区高浓度尾矿库分级上游池填法筑坝试验[J]. 现代矿业, 2020,36(12):168-173.
- [6] 刘银坤. 细粒尾矿库沉积特性及稳定性评价方法研究[D]. 廊坊:华北科技学院, 2020.
- [7] 王文松,尹光志,魏作安,等. 高烈度地震区细粒尾矿上游法筑坝动力反应与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017,36(5):1201-1214.
- [8] 蔡 清,程江涛,于沉香. 细粒尾矿的定义及分类方法探讨[J]. 土工基础, 2014,28(1):91-93.
- [9] 周汉民. 偏细粒尾矿堆坝中的新技术及其发展方向[J]. 有色金属(矿山部分), 2011,63(5):1-3.
- [10] 周汉民. 基于模袋法堆坝的尾矿坝稳定性研究[D]. 北京:北京科技大学, 2017.

引用本文:王伟明,张诏飞. 高寒地区细粒尾矿堆坝方案研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):11-15.