一种干式尾矿库安全高效回采方法

郭大平[1],胡良才[1],李玉雷[1],李哲辉[1],纪俊双[2],张 宁[1]

(1.中核第四研究设计工程有限公司,河北 石家庄 050021;
2.河北省水利规划设计研究院有限公司,河北 石家庄 050011)

摘要:在对尾矿库回采区域进行网格划分的基础上,规划回采条带和回采线路,形成以排洪井所在横剖面为起点,分别向上下游波形啮合推进的回采策略,同时提出了各回采线路回采能力的计算方法,以及回采边坡安全和排水措施。以具体工程为例对提出的回采方法进行了验证,结果表明本方法可消除回采机械之间的相互干扰,有效提高回采效率;同时可对回采能力进行精确计算,便于施工管理。

关键词:干式尾矿库;尾矿;回采;回采能力

中图分类号:TD868 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-8063(2023)01-0015-08

DOI:10.13426/j.cnki.yky.2022.05.29

尾矿是指矿石经磨细、选取有用组分后排放的固体废料[1]。尾矿作为一种潜在的二次资源,对其有效开发和综合利用已受到高度关注。尾矿中赋存的矿产资源可观,在技术经济许可的情况下,综合利用回采尾矿,可变废为宝,让不可再生的有限矿产资源得到循环利用,缓解资源和环境压力[2-4],具有很高的经济、社会及环境效益。

干式尾矿库的尾矿回采是指采用露天挖掘方式对库内干尾矿[5]进行回收开采,目前主要采用的方法是先将整个回采区域按一定面积大小划分为若干回采区域[6],规划回采区的排水系统和运输便道,然后按照一定顺序逐区回采[7];每个回采分区又从上至下逐层回采,每层回采分区沿尾矿库横向或纵向划分若干条带进行回采,直至最终完成全部回采作业。

现有回采技术缺少对回采机械行进、回采线路优化等问题的深入思考,无法对各回采分区应配给的回采能力进行精确计算,不能做到全部回采机械按照计划工期要求同步离场,回采过程中施工机械之间容易产生相互干扰,普遍存在回采能力闲置浪费、回采工期无法精确控制问题。

为此,提出了一种可以克服现有干式尾矿库尾矿回采技术缺陷的新方法。

1 干式尾矿库回采新方法

1.1 建立尾矿回采模型

收集干式尾矿库尾矿回采区的原始地形图,同时对回采区进行测量勘察,掌握回采区边界和底部原始地形情况,掌握不同类别尾矿层(尾砾砂、尾粗砂、尾中砂、尾细砂、尾粉砂、尾粉土、尾粉质黏土、尾黏土等)的分布情况,以及各尾矿层的容重、内摩擦角、粘聚力等物理力学指标[8]。

确定回采单元规格,综合考虑相关规范建议和常规施工机械的作业半径等因素,回采单元边长可取 8~15 m,高度可取 2~3 m[9-10],回采单元的平面形状通常为正方形。根据回采区边界和底部原始地形情况对回采区进行分层,分层厚度等于回采单元高度。不同区域回采单元高度可根据不同类别尾矿层进行设定,并从尾矿库排洪井的位置开始,按照回采单元的平面尺寸对回采区逐层进行网格划分。

1.2 划分回采条带

过排洪井所在位置做 1 条平行于堆积坝顶轴线的直线,以该直线作为各层回采区上下游分界线,将各层回采区的网格划分出若干纵向回采条带。回采条带的宽度为 3~10 个回采单元宽度,回采区中间区域的纵向回采条带宽度相同,边缘

收稿日期:2022-05-25

第一作者简介:郭大平(1985—),男,河北石家庄人,硕士,高级工程师,主要从事铀尾矿库相关科研设计工作。

区域的回采条带宽度可根据实际地形进行调整。位于上下游分界线上游方向的回采条带定义为上游回采条带，位于上下游分界线下游方向的回采条带定义为下游回采条带。

上游回采条带和下游回采条带各自以上下游分界线为起始位置，分别向上游方向、下游方向有序推进回采。按此方式进行回采，以排洪井为中心的调洪库容随之逐步扩大，从而使回采期内尾矿库防洪安全性逐步提升。回采条带和回采线路划分如图 1～2 所示。

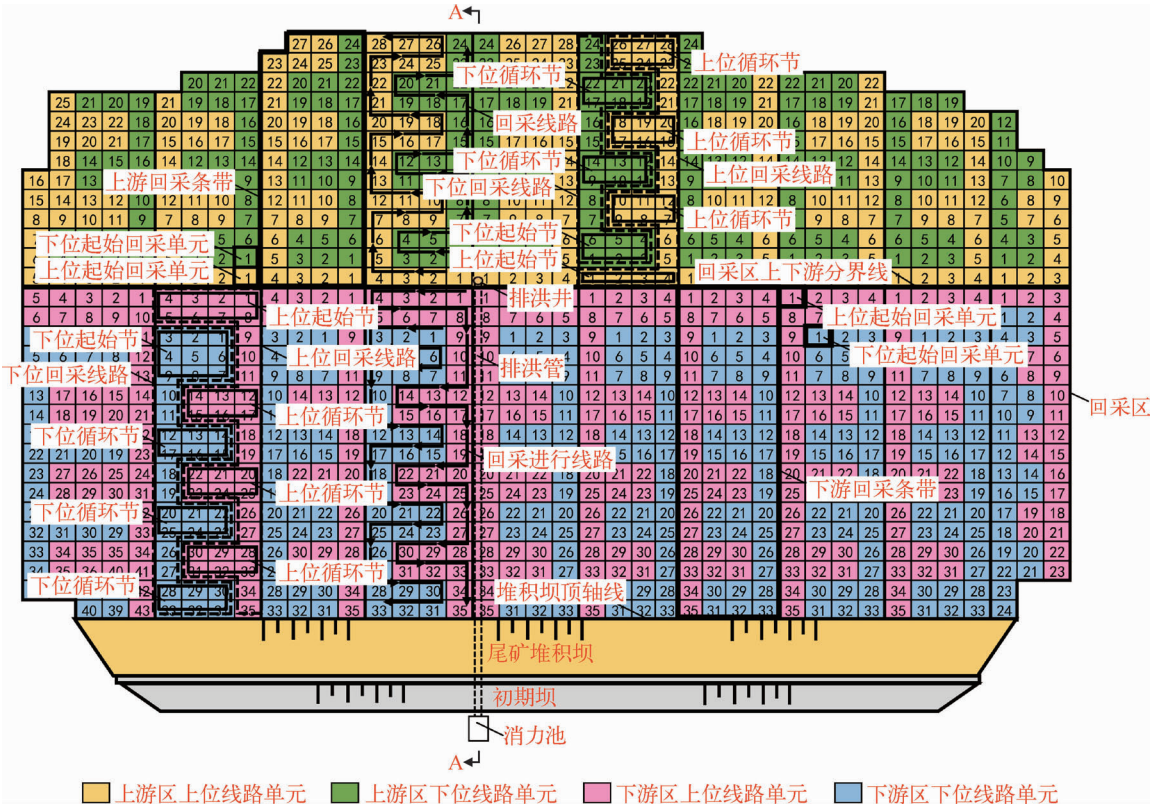


图 1 回采条带和回采线路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of recovery stripes and recovery routes

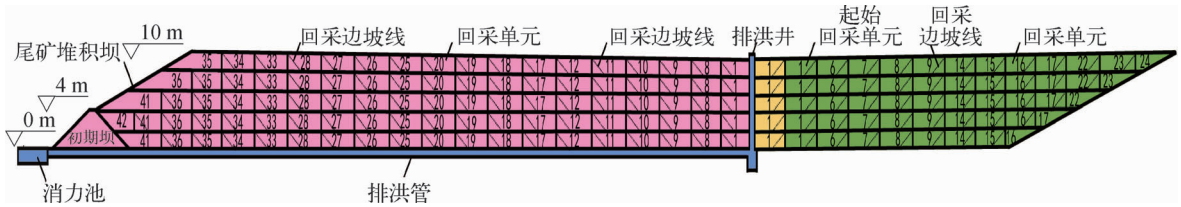


图 2 A-A 剖面图

Fig. 2 Section profile of A-A

1.3 规划回采线路

每个回采条带包含上位和下位 2 条回采线路，每条回采线路的起始回采单元均布置在靠近所述上下游分界线和排洪井的一端，将起始回采单元与分界线相邻的线路定义为上位线路，另外一条定义为下位线路。上位线路与下位线路之间采用波形啮合推进的方法，自排洪井横剖面位置逐层向上下游两侧推进，进行无缝回采作业，最终完成全部回采作业。

本回采线路规划的优点：1）回采线路结构简单明了，便于施工组织；2）上位线路和下位线路的起始位置之间相隔一定距离，可在回采初期同时

开拓出 2 条横向排水沟，快速构建回采区截排水能力；3）上下位线路循环进尺可选择范围大，施工安排部署灵活性高；4）回采线路一侧是纵向的笔直线路，车行线路顺畅，方便尾矿运输。

回采线路中的“节”是指线路上通过左右无隙对折往返形成的一个个矩形区域，左右往返的次数为节的进尺。每条回采线路由起始节和循环节 2 部分构成，起始节只有 1 节，循环节数量由该回采线路所在的回采条带长度确定。起始节可以调整上位线路和下位线路循环节起始单元的启动时间，使上位线路和下位线路的循环节基本保持同步推进。

上位线路的起始节进尺可取 1～3 个单元，根据所建回采模型，推导出下位线路起始节进尺的计算公式为

$$b = \text{round}\left[\frac{m \cdot a}{m-2}\right],$$

式中：b—下位线路起始节进尺，以回采单元个数计；round[]—对计算结果四舍五入取整数（当 a 为奇数时，b 取小于计算值且最接近的偶数；当 a 为偶数时，b 取小于计算值且最接近的奇数）；m—回采条带宽度，以回采单元个数计；a—上位线路起始节进尺，以回采单元个数计。上位线路和下位线路的循环单节进尺可取 2～8 个单元，且为相等的偶数。

当回采区内排洪井数量多于 1 座时，按照海拔高度由高到低的顺序完成第 1 座排洪井控制范围内尾矿的回采作业后；继续按照上述方法开始第 2 座排洪井控制范围内尾矿的回采作业，直至完成全部回采作业。

1.4　边坡安全和施工排水

在每个回采单元的回采作业过程中，为保证回采安全，采用放坡形式（图 2）下挖回采单元，同时上下相邻两层回采边坡之间预留 2～3 m 宽的平台[11]。回采边坡坡比根据勘察数据通过边坡稳定验算确定，采用毕肖普法计算的最小安全系数不应小于 1.2[12-13]；如无条件进行稳定验算，根据尾矿类别和物理力学指标在 1∶1.75～1∶2.5 之间选取边坡坡比[14]。

为有效降低回采区浸润线高度，提高边坡安全系数，同时减少降雨径流对回采作业的影响，随着回采进度的推进，在回采区设置横向排水沟和纵向排水沟，构成排水网络系统，收集的水通过排洪井排出库外。横向排水沟包括主排水沟和其他横向排水沟，主排水沟布置在回采区上下游分界线位置；其他横向排水沟按 30～60 m 间距与主排水沟平行布置。纵向排水沟布置在相邻回采条带交界处。横向排水沟及纵向排水沟应随着回采深度的增加逐层更新，断面大小可通过水力计算确定。

2　回采能力计算

任一回采线路由上至下的第一层起始回采单元，在工程准备阶段集中了该线路所有分层的回采能力，当第一层的起始回采单元回采完毕，第一层的回采能力按照预定线路继续第一层的回采作业，其余回采能力下沉至该线路由上至下的第二层起始回采单元；当第二层的起始回采单元回采完毕，第二层的回采能力按照预定线路继续第二层的回采作业，其余回采能力下沉至该线路由上至下的第三层起始回采单元并进行回采作业；以此类推，直到下沉至最底层。根据所建回采模型，笔者推导出某回采条带任一层回采线路应配备的回采能力 a_m 的计算公式为

$$T-m+1=\frac{v_{m1}}{\sum_{i=1}^{n}a_i-\sum_{i=1}^{m-1}a_i}+\frac{\varphi\cdot\sum_{j=2}^{t_m}v_{mj}}{a_m},$$

式中：T—计划工期，d；m—计算回采线路所在的层数，自上至下起算；v_{m1}—计算回采线路起始回采单元体积，m^3；a_i—第 i 层回采线路应配给的回采能力，m^3/d；v_{mj}—计算回采线路从起始回采单元起算第 j 个回采单元的体积，m^3；n—计算回采线路所在的回采条带按回采单元高度所划分得到的总层数；φ—调整系数，取 0.9～1.0；t_m—计算回采线路上的待回采单元总数量；a_m—计算回采线路应配给的回采能力，m^3/d。

如计算回采线路较长，线路上各回采单元体积可近似按相等考虑。

3　回采方法应用示例

3.1　项目基本情况

某尾矿库为采用上游法堆筑的山谷型干式尾矿库，初期坝高 4 m，堆积坝高 6 m，滩面面积约 112 400 m^2，库内采用 1 座排洪井连接排洪管进行排洪。

库内待回采尾矿总量为 102.04 万 m^3，尾矿

为性质均一的尾细砂，容重 17.5 kN/m^3，内摩擦角 31°。考虑适当强度折减，尾矿粘聚力取 0 kPa。在排洪井上游、下游汇水面积范围内，10 年一遇暴雨洪峰流量分别为 0.98 m^3/s 和 0.43 m^3/s。

3.2 回采方案设计

回采单元平面形状采用 10 m×10 m 的正方形，高为 2 m。回采区分为 5 层，从排洪井的位置开始，按照回采单元的平面尺寸对回采区逐层进行网格划分。回采区中间区域的纵向回采条带宽度采用 4 个回采单元宽度，边缘区域的回采条带宽度根据实际地形调整。

上游回采条带的上位线路起始节进尺取 1 个回采单元，下位线路起始节进尺根据公式计算取 2 个回采单元，上位和下位循环节进尺均取 2 个回采单元。下游回采条带的上位线路起始节进尺取 2 个回采单元，下位线路起始节进尺根据公式计算取 3 个回采单元，上位线路和下位循环节进尺均取 2 个回采单元。

通过起始节的调节，使本条回采条带上位线路和下位线路的循环节能够基本保持同步推进，如上位线路和下位线路第 1 个循环节的起始单元格（包含节与节之间的连接线路）均是第 7 个单元格，第 2 个循环节的起始单元格（包含节与节之间的连接线路）均是第 15 个单元格。

通过上述步骤可得到：回采区分为 5 层，第 1 层包含 20 个回采条带，40 条回采线路，计 1 124 个回采单元；第 2 层包含 18 个回采条带，36 条回采线路，计 1 118 个回采单元；第 3 层包含 17 个回采条带，34 条回采线路，计 1 031 个回采单元；第 4 层包含 16 个回采条带，32 条回采线路，计 977 个回采单元；第 5 层包含 15 个回采条带，30 条回采线路，计 852 个回采单元。各层回采区的回采条带划分和回采线路规划如图 3～7 所示。

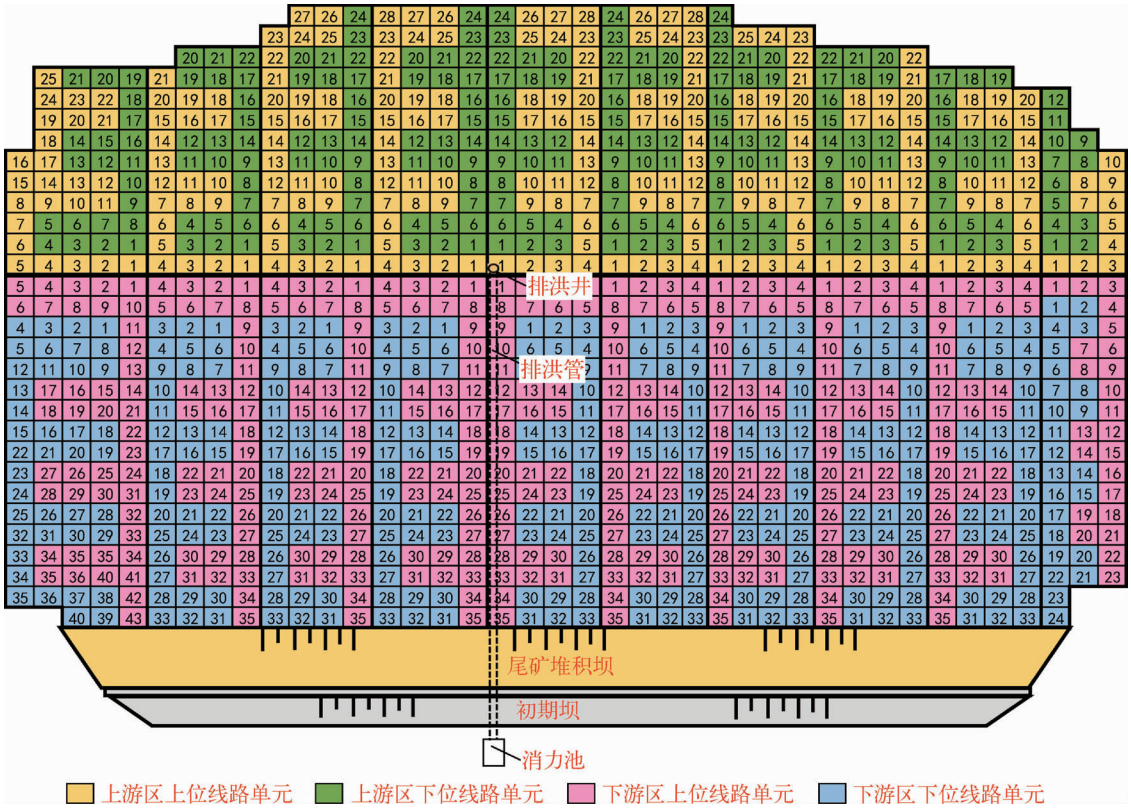


图 3 第 1 层回采区平面图

Fig. 3 Planar graph of first floor of the recovery area

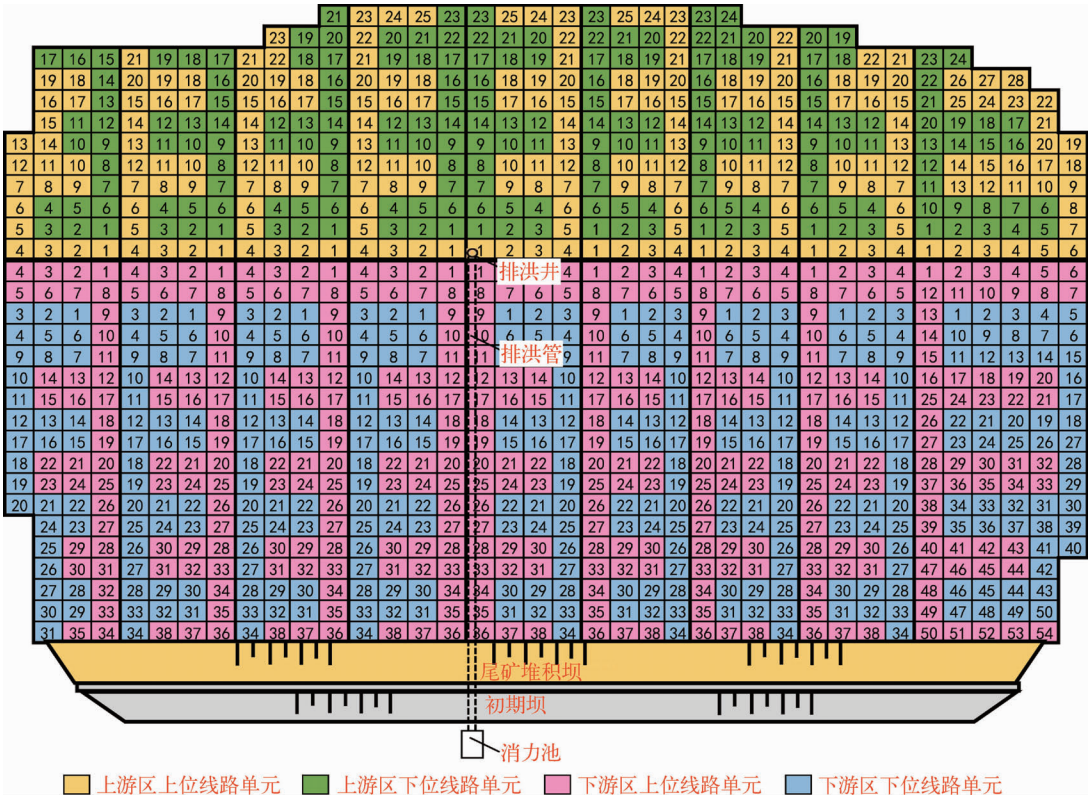


图 4　第 2 层回采区平面图

Fig. 4　Planar graph of second floor of the recovery area



图 5　第 3 层回采区平面图

Fig. 5　Planar graph of third floor of the recovery area

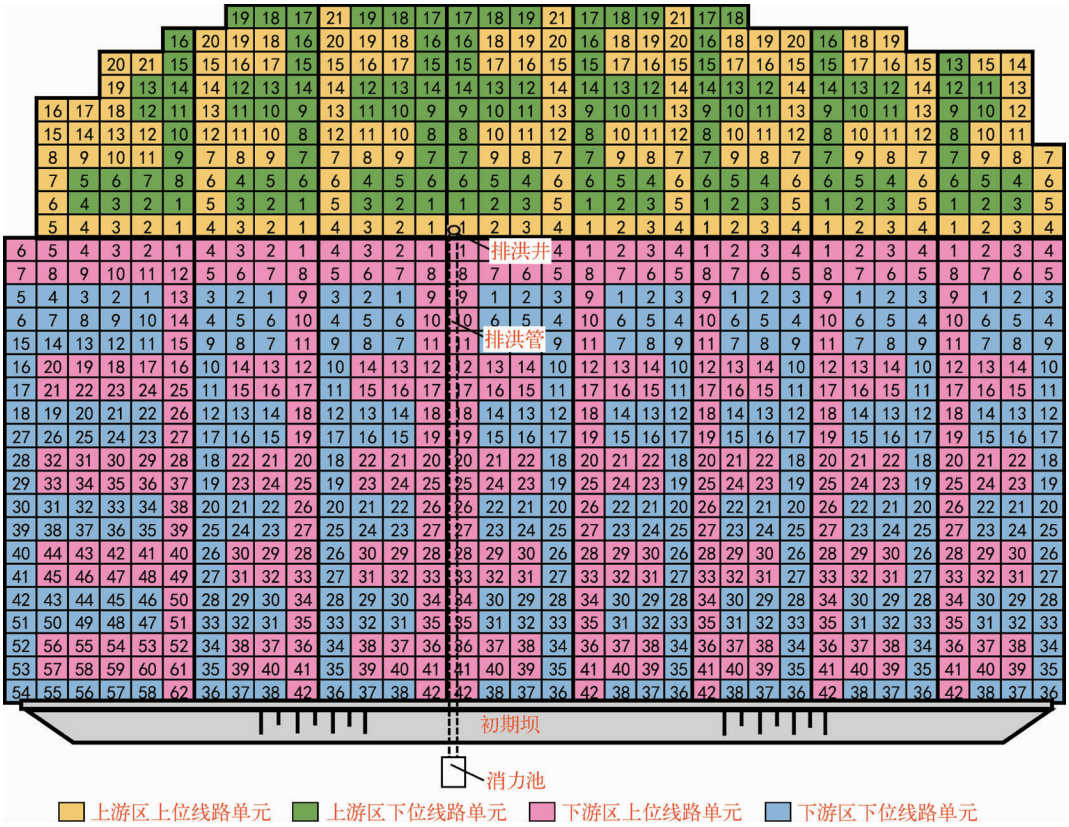


图 6 第 4 层回采区平面图

Fig. 6 Planar graph of fourth floor of the recovery area

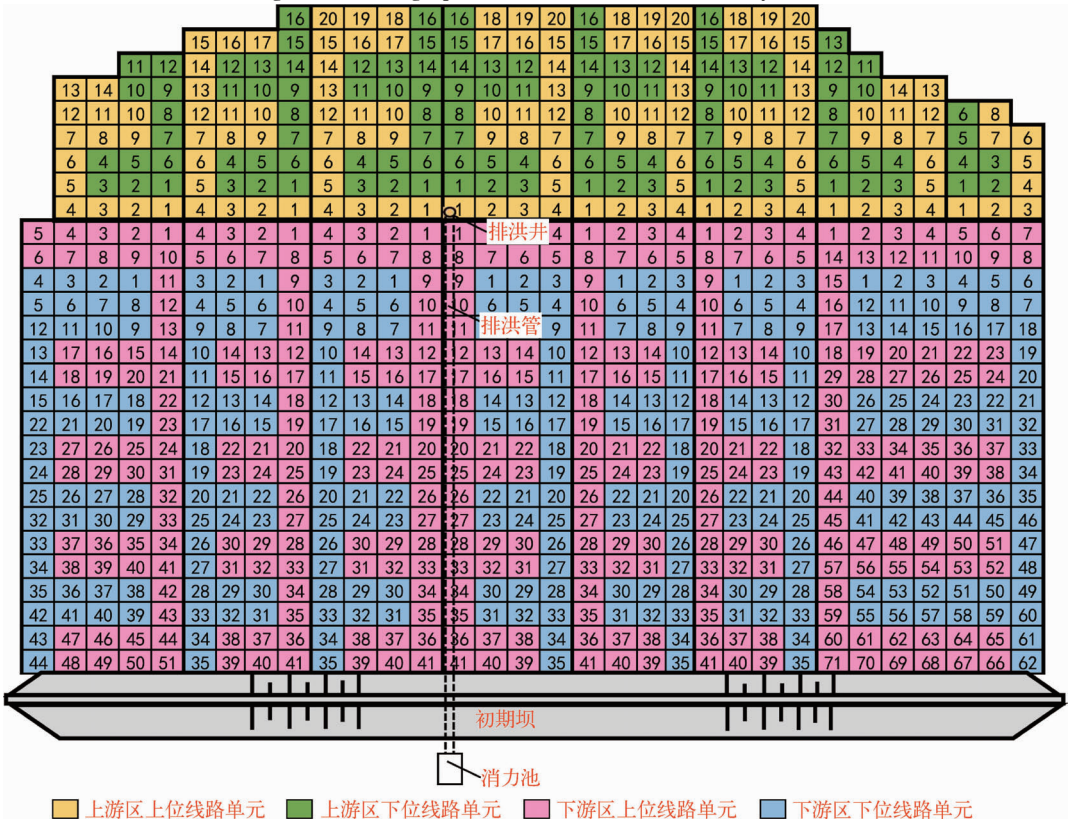


图 7 第 5 层回采区平面图

Fig. 7 Planar graph of fifth floor of the recovery area

3.3　边坡和排水设计

回采下挖过程中的最大开挖边坡坡比采用1∶1.75，上下相邻边坡之间预留台面最小宽度为2 m。根据尾矿物理力学参数，采用毕肖普法计算得到1级、2级、3级、4级、5级台阶的最小安全系数分别为1.240、1.582、1.672、1.628、1.738，均大于1.2的安全系数限值。

在排洪井位置设置与堆积坝顶轴线平行的主排水沟，在滩面上布置横纵排水沟，其他横向排水沟间距60 m；每2个回采条带在相邻交界处设置纵向排水沟，间距80 m。根据明渠均匀流公式[15]，确定主排水沟断面为1.0 m×1.0 m，上游排水沟断面为0.8 m×0.8 m，下游排水沟断面为0.6 m×0.6 m。排水网络如图8所示。

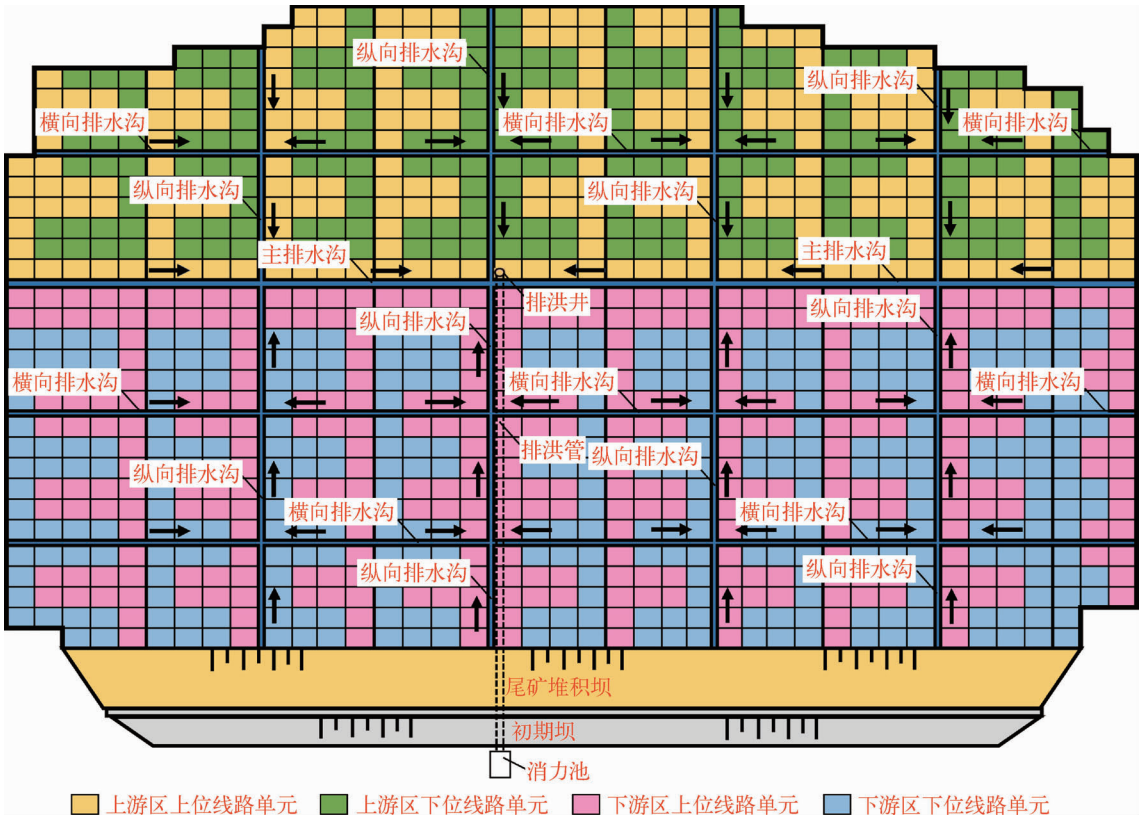


图8　排水网络布置图

Fig. 8　Arrangement of the drainage network

3.4　回采能力计算

本回采方法将整个回采区划分为若干独立的回采线路，每条回采线路施工互不影响，且每条回采线路施工工期相等。回采能力计算的目的是实现对全部回采线路回采能力的分配。以邻近排洪井的上游回采条带上位线路为例，说明线路回采能力的计算过程。

本方法在任意计划工期条件下均能够实现回采能力的量化计算和回采机械的同步退场。此次计算假定计划工期为30 d，回采单元平均体积近似取200 m^3，折减系数取1.0。所计算线路第1层至第5层的待回采单元总数分别为28、25、22、21、20。

从最下一层向上递进计算，根据回采能力计算公式，计算第5层应配给的回采能力 a_5：

$30-5+1=200/a_5+1.0\times200\times(20-1)/a_5$，解得 $a_5=(200+1.0\times200\times19)/(30-5+1)=153.85$ m^3/d。

第4层应配给的回采能力 a_4：

$30-4+1=200/(a_4+153.85)+1.0\times200\times$

(21－1)/a_4，求解并舍去负值，取 a_4＝151.83 m^3/d。

第 3 层应配给的回采能力 a_3：

30－3＋1＝200/(a_3＋151.83＋153.85)＋1.0×200×(22－1)/a_3，求解并舍去负值，取 a_3＝152.38 m^3/d。

第 2 层应配给的回采能力 a_2：

30－2＋1＝200/(a_2＋152.38＋151.83＋153.85)＋1.0×200×(25－1)/a_2，求解并舍去负值，取 a_2＝167.36 m^3/d。

第 1 层应配给的回采能力 a_1：

30－1＋1＝200/(a_1＋167.36＋152.38＋151.83＋153.85)＋1.0×200×(28－1)/a_1，求解并舍去负值，取 a_1＝181.50 m^3/d。

因此，回采初期应在该上位线路第 1 层起始回采单元内布置的回采能力为 181.50＋167.36＋152.38＋151.83＋153.85＝806.92 m^3/d。

当第 1 层起始回采单元回采完毕，第 1 层配给的回采能力(181.50 m^3/d)向前推进，完成第 1 层上位线路的剩余回采工作；其余回采能力 167.36＋152.38＋151.83＋153.85＝625.42 m^3/d 下沉至第 2 层起始回采单元。

当第 2 层起始回采单元回采完毕，第 2 层配给的回采能力(167.36 m^3/d)向前推进，完成第 2 层线路的剩余回采工作；其余回采能力 152.38＋151.83＋153.85＝458.06 m^3/d 下沉至第 3 层起始回采单元。

当第 3 层起始回采单元回采完毕，第 3 层配给的回采能力(152.38 m^3/d)向前推进，完成第 3 层线路的剩余回采工作；其余回采能力 151.83＋153.85＝305.68 m^3/d 下沉至第 4 层起始回采单元。

当第 4 层起始回采单元回采完毕，第 4 层配给的回采能力(151.83 m^3/d)向前推进，完成第 4 层线路的剩余回采工作；剩下的回采能力 153.85 m^3/d下沉至第 5 层起始回采单元，并向前推进完成第 5 层线路的回采工作。

其余回采线路计算过程同上。最终，各层回采区的回采工作将在计划工期内全部同时完成；同时实现施工机械全程无干扰，施工结束可同时退场。

4 结论

与现有的干式尾矿库回采技术相比，本研究提出的干式尾矿库安全高效回采方法将回采区划分为回采条带和回采线路，采用双回采线路波形啮合的回采推进方法，消除了回采机械之间的相互干扰；上下各层回采线路可同时进行回采，回采效率高；可以对各层回采线路的回采能力进行精确计算，便于精细化施工管理。

参考文献：

[1] 常前发.我国矿山尾矿综合利用和减排的新进展[J].金属矿山，2010(3)：1-4.

[2] 王红，吴刚，张丽.尾矿资源化与矿山的可持续发展[J].化工矿物与加工，2009(3)：30-31.

[3] 中华人民共和国财政部，中华人民共和国国土资源部.矿产资源节约与综合利用专项资金管理办法[S].财建〔2013〕81 号，2013.

[4] 工业和信息化部，科学技术部，国家安全生产监督管理总局.金属尾矿综合利用先进适用技术目录[N].工联节〔2011〕第 139 号，2011.

[5] 段蔚平，郭金峰，汪斌.我国金属矿山尾矿堆存技术及发展方向[J].金属矿山，2013(12)：118-122.

[6] 赵武鹍，徐启明，王杰，等.尾矿安全回采工程实践[J].现代矿业，2013(2)：17-19.

[7] 张春芳.砂锡尾矿开采利用的实践[J].中国矿业，2015(12)：71-73.

[8] 建设部综合勘察研究设计院.岩土工程勘察规范：GB 50021—2001[S].北京：中国建筑工业出版社，2009.

[9] 中国恩菲工程技术有限公司，长沙有色冶金设计研究院有限公司，北京矿冶科技集团有限公司，等.尾矿库安全规程：GB 39496—2020[S].北京：中国标准出版社，2020.

[10] 辽宁省安全科学研究院.尾矿干式回采过程安全技术规程：DB21/T 1770—2009[S].沈阳：辽宁人民出版社，2010.

[11] 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院.碾压式土石坝设计规范：DL/T 5395—2007[S].北京：中国电力出版社，2020.

[12] 核工业第四研究设计院.核工业铀水冶厂尾矿库、尾渣库安全设计规范：GB 50520—2009[S].北京：中国计划出版社，2010.

[13] 重庆市设计院，中国建筑技术集团有限公司.建筑边坡工程技术规范：GB 50330—2013[S].北京：中国建筑工业出版社，2010.

[14] 化建新，郑建国.工程地质手册：第五版[M].北京：中国建筑工业出版社，2021.

[15] 吴持恭.水力学：第 3 版[M].北京：高等教育出版社，2005.

(下转第 54 页)

Application of DCS Control System in ^{76}Ge Isotope Centrifugal Separation Plant

JIAO ZhenHua
(Cangzhou Nuclear Fuel Co., Ltd., CNNC, Cangzhou 061001, China)

Abstract: Taking the detection and control of centrifugal cascade in the first ^{76}Ge isotope separation project in China as the object, the hardware structure and configuration programming of DCS(Distributed Control System) were controlled to ensure the safety of the main process key equipment (the rotary stabilizer). The system realizes the real-time view of various process parameters on site, remote switches on and off the electric valve, starts and stops the vacuum pump, and adjusts the opening of the electric regulating valve on the process pipeline, which effectively ensures the safe and stable operation of the ^{76}Ge isotope production line.

Key words: ^{76}Ge isotope; DCS; hardware; configuration

(Continued from page 22)

A Safe and Efficient Method of Tailings Recovery for Dry Tailings Pond

GUO Daping[1], HU Liangcai[1], LI Yulei[1], LI Zhehui[1], JI Junshuang[2], ZHANG Ning[1]
(1. The Fourth Research and Design Engineering Corporation, CNNC, Shijiazhuang 050021, China;
2. Hebei Water Conservancy Planning and Design Institute Co., Ltd., Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: On the basis of meshing recovery area, design recovery stripes and recovery routes, forming the recovery strategy of starting from the cross section of flood shaft, advancing respectively upward and downward in wedge and wave shape, and at the same time put forward calculation formula of recovery capability of each route, and slope steady and draining measures during recovery process. The method is then verified by a specific engineering case, the results show that this method can eliminate interference of recovery machines, prominently boost recovery efficiency, and calculate precisely of recovery capability, which is good for recovery management.

Key words: dry tailings pond; tailings; recovery; recovery ability