



强降雨对透水船闸闸室横向渗流影响的研究

李肖

(济宁市港航事业发展中心, 山东 济宁 272019)

摘要: 为探究强降雨对透水船闸闸室横向渗流特性的影响, 采用 ANSYS 热分析模块建立透水船闸闸室二维数学模型, 考虑船闸通航的灌泄水运行情况, 对无降雨与多等级降雨工况下透水船闸闸室渗透特性进行研究。结果表明: 无降雨工况下, 闸室稳定运行后的观测点渗透压力水头呈稳定的周期性变化, 距闸室较远的观测点水头振幅与渗透坡降均较小; 当降雨强度较小时, 闸室渗透特性无明显变化; 当发生强降雨时, 除受闸室水位控制的观测点外, 其余观测点的渗透压力水头均显著上升, 渗透压力水头离差的增大与衰减滞后于降雨历程, 闸墙墙后观测点渗透特性变化较大, 渗透压力水头离差达 2.36 m, 最大渗透坡降之比达 2.33。强降雨对透水船闸闸室渗透特性的影响较大且具有滞后性, 闸墙墙后土体渗流特性受强降雨的影响更大。

关键词: 渗流; 降雨; 渗流特性; 透水船闸

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0200-06

Influence of heavy rainfall on the lateral seepage of permeable ship lock chambers

LI Xiao

(Jining Port and Shipping Industry Development Center, Jining 272019, China)

Abstract: To explore the influence of heavy rainfall on the lateral seepage characteristics of permeable ship lock chambers, this paper adopts the ANSYS thermal analysis module to establish a two-dimensional mathematical model of permeable ship lock chamber, considering the irrigation and drainage for navigation, and studies the seepage characteristics of permeable ship lock chambers under no-rainfall and multi-level rainfall conditions. The results show that under no-rainfall conditions, the seepage pressure head at observation points shows a stable periodic variation state after the chamber stable operation, the seepage pressure head amplitude and permeation gradient at the observation points far from the chamber are small. Under light rainfall conditions, the permeability characteristics of the chamber changes insignificantly. However, under heavy rainfall conditions, the seepage pressure head of other observation points rises significantly, except for the observation points controlled by the water level in chamber. The increase and attenuation of the seepage pressure head deviation lag behind the rainfall process. The permeability characteristics of the observation points behind the gate wall change significantly, the seepage pressure head deviation reaches 2.36 meters, and the maximum permeation gradient ratio reaches 2.33. The heavy rainfall has a significant impact on the permeability characteristics of permeable lock chambers and the impact is a hysteretic nature, the seepage characteristics of the soil behind the gate wall are more affected by heavy rainfall.

Keywords: seepage; rainfall; seepage characteristics; permeable ship lock

大量研究表明, 强降雨能够影响建筑物的渗透稳定性^[1-2], 透水闸室因其底板透水性, 其船闸

建筑物渗透稳定性更易受到强降雨引起的渗流条件变化的影响。

收稿日期: 2025-08-02 录用日期: 2025-09-16

作者简介: 李肖(1990—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为港口航道规划与工程管理、工程结构与介质相互作用。

近年来,国内已有专家学者对透水船闸闸室渗流特性做了研究,并取得了一定研究成果。王嘉炜等^[3]对透水闸室在检修工况下横向渗流特性进行了研究,分析了透水闸室透压力水头和渗透坡降的分布不均匀性;许瑞东等^[4]建立了新夏港双线透水船闸二维有限元数学模型,分析了船闸横向渗流场受墙后地下水位、相邻闸室水位、地层分布及其渗透系数的影响;何良德等^[5]对透水船闸闸室灌泄水过程进行非稳定渗流数值计算分析,得出在闸室灌泄水过程中渗透稳定系数降低、发生渗透破坏可能性增大的结论。从国内专家学者对透水船闸闸室渗流场的研究成果可知,透水船闸闸室横向渗流受多种渗流边界条件的影响。降雨入渗属于流量边界条件,强降雨必然将对透水船闸闸室横向渗流产生影响,然而透水船闸闸室横向渗流特性受强降雨入渗影响的研究成果较少,因此,在强降雨条件下对透水船闸闸室横向渗流特性变化进行深入研究十分必要。

本文在国内专家学者研究成果的基础上,以典型透水船闸为研究对象,对强降雨条件下的透水船闸闸室横向渗流特性变化进行研究,旨在为透水船闸设计建设提供借鉴与参考。

1 透水船闸闸室横向渗流分析理论

1.1 ANSYS 渗流分析理论

由于渗流分析理论与热传导理论存在诸多的相似性,近年来,国内外许多学者使用大型通用有限元软件 ANSYS 中的温度场分析模块进行渗流分析计算^[6-8]。根据达西定律和地下水运动的连续性,可压缩各向异性非均质非稳定瞬态渗流微分方程^[9]为:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{s,x}\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_{s,y}\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_{s,z}\frac{\partial h}{\partial z}\right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中: h 为测压管水头; $k_{s,x}$ 、 $k_{s,y}$ 、 $k_{s,z}$ 分别为 x 、 y 、 z 方向的渗透系数; S_s 为单位贮存量。

各向异性非均质瞬态热传导微分方程^[10]为:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{t,x}\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_{t,y}\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_{t,z}\frac{\partial T}{\partial z}\right) = C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中: T 为温度; $k_{t,x}$ 、 $k_{t,y}$ 、 $k_{t,z}$ 分别为 x 、 y 、 z 方向的热传导传热系数; C 为比热。

由式(1)、(2)可见,热传导理论与渗流理论的微分方程具有相似性。对于边界条件,渗流场上的边界条件包含水头边界条件与流量边界条件,温度场上的边界条件包括温度值函数边界条件与热流量边界条件,二者仍具有相似性。因此,在利用 ANSYS 温度场分析模块求解渗流问题时,只需保证温度场各项参数、边界条件函数分别与渗流场各项参数、边界条件函数一一对应即可。

1.2 降雨入渗分析理论

根据降雨入渗相关研究^[11],一般降雨入渗过程分为3个阶段:降雨强度入渗控制阶段、非饱和入渗阶段、饱和入渗阶段。考虑降雨过程中闸室墙后土的含水率逐渐升高,土壤基质吸力等参数随之变化,本文采用受入渗能力控制的降雨入渗模式^[12],即当降雨强度小于土体饱和渗透系数时,降雨全部入渗。

当降雨强度大于土体饱和渗透系数,土体相对干燥时,降雨入渗能力为较大定值;当基质吸力存在,且土体介于干燥和饱和之间时,降雨入渗能力为基质吸力的函数;当土体饱和时,土体入渗能力等于饱和渗透系数,即降雨强度大于土体饱和渗透系数时,降雨入渗用方程表示为:

$$I(h) = \begin{cases} R_{\max} & (h < -h_0) \\ \frac{k_s - R_{\max}}{h_0}h + k_s & (-h_0 \leq h < 0) \\ k_s & (h \geq 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中: R_{\max} 为最大降雨入渗能力,以能使闸墙后表层填土短时间内达到饱和的降雨强度作为 R_{\max} ; h 为压力水头,在非饱和区,该值的绝对值作为基质吸力; h_0 为闸室运行期间的最大基质吸力,以长期无降雨时闸室平均运行水位对应的最大基质吸力作为 h_0 ; k_s 为土体饱和渗透系数。

在船闸运行与降雨入渗过程中采用应用最广泛的 van Genuchten-Mualem 模型计算土体非饱和渗透系数^[13]:

$$k(h) = \frac{\{1 - (ah)^{n-1} [1 + (ah)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (ah)^n]^{m/2}} k_s \quad (4)$$

式中： $k(h)$ 为非饱和渗透系数； h 为基质吸力； a 、 n 为经验常数， $m = 1 - (1/n)$ 。

2 典型有限元案例建模

选取典型透水船闸进行分析，船闸长 230 m，闸室宽 27 m，船闸上游水深 9 m，下游水深 4 m，透水闸底由上到下分别采用厚 0.5 m 块石层、0.5 m 碎石层、0.5 m 中粗砂填筑，闸室地基为砂壤土，各材料的饱和渗透系数见表 1。闸墙高 12 m，采用钢筋混凝土重力式结构，墙后就地采用砂壤土回填。船闸按船舶双向进出闸满负荷运行，采用忽略惯性水头影响的船闸水力特性曲线绘制方法得到闸室水位随时间的变化情况^[14]，以模拟船闸闸室非恒定输水过程。闸室运行工况与水位见表 2。

表 1 材料饱和渗透系数

Tab. 1 Material saturated hydraulic conductivity

岩土类型	块石	碎石	中粗砂	沙壤土
饱和渗透系数/($m \cdot s^{-1}$)	1.1×10^{-2}	4.0×10^{-3}	4.1×10^{-4}	9.03×10^{-5}

表 2 闸室运行工况与水位

Tab. 2 Operating condition and water level of lock chamber

运行工况节点	用时/ min	闸室 水位/m
阀门开启,开始输水	0	4.00
阀门全开,继续输水	6	7.77
输水完成,船舶开始高水位进出闸	4	9.00
船舶高水位进出闸完成,阀门开启,开始泄水	42	9.00
阀门全开,继续泄水	6	5.23
泄水完成,船舶开始低水位进出闸	4	4.00
船舶低水位进出闸完成	42	4.00

选取船闸闸室中部断面为计算断面，计算宽度取闸室宽度的 3.5 倍，断面右边界恒定水位取 4.00 m，在闸墙墙底与墙后设渗流观测点，船闸闸室渗流计算断面示意及观测点 A、B、C、D 位置见图 1。选取 ANSYS 平面单元 PLANE55 建立闸室二维有限元计算模型，闸室有限元模型见图 2。

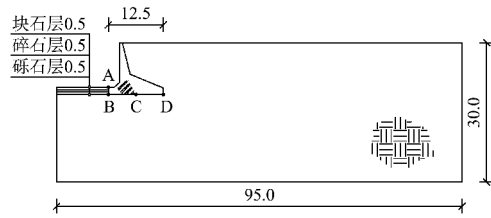


图 1 闸室断面(单位:m)

Fig. 1 Lock chamber section(unit:m)

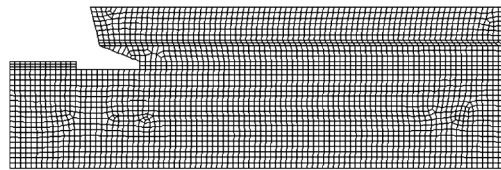


图 2 闸室有限元模型

Fig. 2 Finite element model of lock chamber

3 透水船闸闸室横向渗流特性受强降雨的影响分析

3.1 无降雨工况下闸室横向渗流特性

对透水船闸闸室有限元模型进行瞬态非稳定渗流计算。当闸室横向渗流达到相对稳定状态后，由于闸室灌泄水的影响，各观测点渗透压力水头呈现周期性变化，且水头曲线振幅随着观测点距闸室距离的增大而减小，其中，观测点 A 由于位于闸室内表面，其水头直接受闸室运行水位影响并与闸室运行水位相同；闸墙底部观测点 B、C 的水头振幅相对于 A 点大幅减小；观测点 D 的水头振幅极小，基本可忽略。闸室各观测点渗透压力水头随时间变化的曲线见图 3。由于观测点 A 的水头曲线代表了闸室水位的变化情况，由图 3 可知，当闸室水位达到最大值时，B、C、D 点水头并未达到最大值，渗透压力水头变化存在一定滞后现象，且观测点 B、C、D 的滞后现象呈逐渐显著的趋势，这是观测点距闸室距离的增加与土体单位贮存量 S_s 共同作用的结果。

闸室横向渗流达到相对稳定状态后，各观测点最大渗透坡降见表 3。可见，靠近闸室土体最大渗透坡降值较大，距闸室较远的墙底和墙后土体的最大渗透坡降值相对较小。

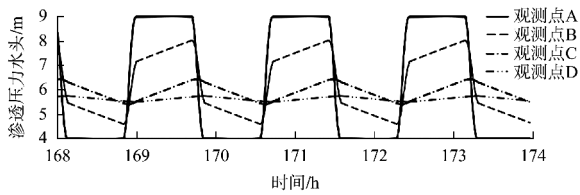


图 3 相对稳定状态下各观测点渗透压力水头变化曲线
Fig. 3 Variation curve of seepage pressure head at each observation point in relatively stable state

表 3 各观测点最大渗透坡降
Tab. 3 Maximum permeation gradient at each observation point

观测点	A	B	C	D
最大渗透坡降	1.28	0.74	0.14	0.15

3.2 强降雨工况下闸室横向渗流特性分析

根据国家气象部门规定的降水量等级标准，降雨可分为小雨(降雨量处于 0.1~4.9 mm/12 h)、中雨(降雨量处于 5~14.9 mm/12 h)、大雨(降雨量处于 15~29.9 mm/12 h)、暴雨(降雨量达 30~69.9 mm/12 h)、大暴雨(降雨量达 70~139.9 mm/12 h) 和特大暴雨(降雨量超过 140 mm/12 h)。一般将暴雨以上级别降水称为强降雨。北京“23·7”特大暴雨洪水降雨总持续时间 68 h，总降雨量 374.1 mm，其中降雨强度最大的 12 h 内降雨量达 162.2 mm，属于特大暴雨。将北京“23·7”特大暴雨洪水最大降雨强度缩小至 0.1、5、15、30、70、140 mm/12 h，即小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨、特大暴雨级别，并等比例缩放整个降雨过程的降雨强度，则累计降雨量分别为 0.22、10.92、32.76、65.52、152.88、305.76 mm。在船闸保持满负荷稳定运行且闸室横向渗流达到相对稳定状态后，采用受入渗能力控制的降雨入渗模式分别计算不同降雨强度工况下降雨时段的降雨入渗速率，并将降雨入渗速率作为流量边界条件，施加在有限元模型边界上进行不同工况条件下的降雨入渗影响分析。由计算结果可知，当降雨强度较小时，各观测点渗透压力水头、渗透坡降均无明显变化；当降雨强度达到暴雨级别时，观测点 C、D 最大渗透压力水头较无降雨工况时有较大增加，其中 D 点最大渗透压力水头增幅达 0.19 m；当降雨强度达到特大暴雨级别时，除渗透压力水头受闸室水位控

制的观测点 A 外，其余观测点渗透压力水头均大幅上升，其中 D 点渗透压力水头达到 8.10 m，增幅达 2.36 m，且 D 点最大渗透坡降上升至 0.35，超出无黏性土管涌型渗透变形允许渗透坡降的上限值，表明强降雨对透水船闸渗透特性具有显著影响。不同降雨强度工况下降雨时段最大渗透压力水头、最大渗透坡降见表 4、5。

表 4 降雨时段各观测点最大渗透压力水头
Tab. 4 Maximum seepage pressure head at each observation point during rainfall period

工况	最大渗透压力水头/m			
	观测点 A	观测点 B	观测点 C	观测点 D
无雨	9.00	8.02	6.43	5.74
小雨	9.00	8.02	6.43	5.74
中雨	9.00	8.02	6.43	5.74
大雨	9.00	8.02	6.43	5.76
暴雨	9.00	8.06	6.54	5.93
大暴雨	9.00	8.20	6.99	6.70
特大暴雨	9.00	8.47	7.84	8.10

表 5 降雨时段各观测点最大渗透坡降
Tab. 5 Maximum permeation gradient at each observation point during rainfall period

工况	最大渗透坡降			
	观测点 A	观测点 B	观测点 C	观测点 D
无雨	1.28	0.74	0.14	0.15
小雨	1.28	0.74	0.14	0.15
中雨	1.28	0.74	0.14	0.15
大雨	1.28	0.74	0.14	0.15
暴雨	1.28	0.74	0.14	0.15
大暴雨	1.28	0.74	0.14	0.16
特大暴雨	1.32	0.78	0.17	0.35

为进一步探究强降雨对闸室横向渗透特性的影响规律，对特大暴雨工况下各观测点渗透特性变化规律进行深入分析。将降雨情况下各观测点渗透压力水头与未降雨情况下渗透压力水头之差记为降雨入渗压力水头离差 D_s 。从降雨入渗压力水头离差 D_s 变化情况可知，除渗透压力水头受闸室水位控制的观测点 A 外，其余各观测点降雨入渗压力水头离差 D_s 在降雨发生一段时间之后开始增大，且最大降雨入渗压力水头离差 D_s 出现在降雨强度峰值时段之后，降雨结束后，观测点 B、C、D 的 D_s 值仍较大且缓慢趋向于零，这是因为当降雨入渗改变土体渗透压力水头时，土体将释放或吸收部分入渗雨量，即土体单位贮存量的意

义, 降雨入渗对渗透压力水头的影响表现出了滞后性。通过对比同一时刻各观测点降雨入渗压力水头离差 D_s 值的大小可以看出, 观测点 A、B、C、D 的 D_s 值呈现依次递增现象, 通过降雨工况下降雨时段各观测点最大渗透坡降与无降雨工况下最大渗透坡降的比值可以看出, 距闸室距离较远的观测点 D 的最大渗透坡降的增大幅度相较于其他观测点更大, 表明在闸室水位控制、土体单位贮存量、降雨入渗路径长度的共同影响下, 距闸室距离较远的闸墙墙后部位受降雨入渗的影响更大。降雨时段各观测点降雨入渗压力水头离差 D_s 变化见图 4, 最大渗透坡降比值见表 6。

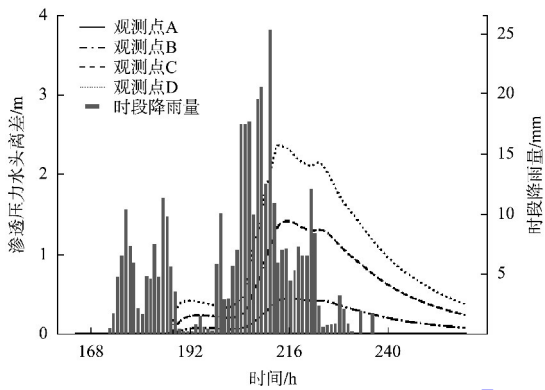


图 4 降雨时段各观测点渗透压力水头离差曲线
Fig. 4 Curve of seepage pressure head dispersion at each observation point during rainfall period

表 6 各观测点最大渗透坡降比值

Tab. 6 Ratio of maximum permeation gradient at each observation point

工况	最大渗透坡降			
	观测点 A	观测点 B	观测点 C	观测点 D
无降雨	1.28	0.74	0.14	0.15
特大暴雨	1.32	0.78	0.17	0.35
特大暴雨与无降雨之比	1.03	1.05	1.21	2.33

4 结语

1) 强降雨能够对闸室横向渗流特性造成显著影响。无降雨工况下闸室渗透压力水头呈稳定的周期性变化, 强度较小的降雨对闸室渗透特性几乎无影响。当发生强降雨后, 除受闸室水位控制的观测点外, 其余观测点渗透压力水头离差大幅增加, 即渗透压力水头大幅上升, 闸墙墙后观测

点渗透压力水头上升幅度更大, 且其渗透坡降较无降雨工况时显著增大, 表明闸墙墙后土体渗透特性受强降雨的影响更大。

2) 降雨入渗对船闸渗流的影响具有滞后性。最大渗透压力水头离差出现在降雨强度峰值时段之后, 且降雨停止后, 部分观测点的渗透压力水头离差在较长时间内较大, 表明强降雨入渗能够在较长时间内对闸室稳定性造成影响。在工程实际中, 应考虑强降雨对船闸渗流稳定造成的不利影响。

参考文献:

[1] 石浩, 李远耀, 许艺林, 等. 不同类型暴雨下堆积层滑坡渗流特征与稳定性分析[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 222-233.
SHI H, LI Y Y, XU Y L, et al. Seepage characteristics of accumulation landslides under different types of heavy rainfall stability analysis [J]. Hydrogeology and engineering geology, 2025, 52(3): 222-233.

[2] 陈建伟, 黄晓虎, 陈陆军, 等. 降雨诱发堆积体浅层破坏特征及机理研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(2): 147-151.
CHEN J W, HUANG X H, CHEN L J, et al. Study on shallow destruction characteristics and mechanism of rainfall-induced accumulation body [J]. Water resources and power, 2024, 42(2): 147-151.

[3] 王嘉炜, 陶桂兰, 李志成, 等. 透水闸室结构横向渗流特性研究[J]. 水运工程, 2020(10): 115-119.
WANG J W, TAO G L, LI Z C, et al. Study on transversal seepage characteristics of permeable lock chamber structure [J]. Port & waterway engineering, 2020(10): 115-119.

[4] 许瑞东, 何良德, 陆新洋, 等. 新夏港双线船闸闸室横向渗流稳定性分析[J]. 水运工程, 2017(5): 118-124.
XU R D, HE L D, LU X Y, et al. Analysis of lateral seepage stability on the new Xiangang double-lane ship lock chamber [J]. Port & waterway engineering, 2017(5): 118-124.

[5] 何良德, 王晨晨, 张成君, 等. 船闸闸室灌泄水过程非稳定渗流特性[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 246-252.

- HE L D, WANG C C, ZHANG C J, et al. Characteristic analysis of unsteady seepage in the filling and emptying process of lock chamber[J]. Journal of Hohai University (natural sciences), 2018, 46(3): 246-252.
- [6] 杨洋. 出山店土石坝渗流与变形分析[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
- YANG Y. Analysis on seepage and deformation of earth rock dam in Chushandian [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020.
- [7] 李耀柱, 林钢. 基于 ANSYS 温度场模拟的均质土坝稳定渗流数值计算[J]. 水运工程, 2009(2): 48-51.
- LI Y Z, LIN G. Computation of stable seepage flow of the homogeneous earth dam based on the ANSYS function of temperature field analysis[J]. Port & waterway engineering, 2009(2): 48-51.
- [8] 加勒尼. 基于 ANSYS 的某湖堤渗流场模拟分析研究[J]. 水利科技与经济, 2020, 26(10): 26-31.
- JIA L N. Study on simulation analysis of seepage field of lake dyke based on ANSYS [J]. Water conservancy science and technology and economy, 2020, 26(10): 26-31.
- [9] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.
- MAO C X. Seepage computation analysis and control[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1990.
- [10] 康雄才, 陈昌平, 李婧文, 等. 基于 ANSYS 的土石坝渗流数值模拟研究[J]. 大连大学学报, 2016, 37(6): 34-38.
- KANG X C, CHEN C P, LI J W, et al. Numerical simulation of the earth rock dam seepage based on ANSYS[J]. Journal of Dalian University, 2016, 37(6): 34-38.
- [11] 朱伟, 陈学东, 钟小春. 降雨入渗规律的实测与分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1873-1879.
- ZHU W, CHEN X D, ZHONG X C. Observation and analysis of rainfall infiltration [J]. Rock and soil mechanics, 2006, 27(11): 1873-1879.
- [12] 闫彭彭. 考虑降雨作用的海堤渗流场模拟及监控模型研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- YAN P P. Research on seepage field simulation and monitoring model of seawall considering rainfall [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [13] 岳庆河. 基于 ANSYS 的土石坝渗流与稳定分析研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008.
- YUE Q H. Seepage and stabilization study with ANSYS on earth rock-fill dam[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2008.
- [14] 刘晓平, 陶桂兰. 渠化工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- LIU X P, TAO G L. Channelized engineering [M]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- (本文编辑 赵娟)
-
- (上接第 148 页)
- [12] 陈杨. 基于 EDEM 对链斗式连续卸船机链斗抛料分析[J]. 起重运输机械, 2025(3): 60-65.
- CHEN Y. Analysis of chain bucket rejection of continuous ship unloader based on EDEM[J]. Hoisting and conveying machinery, 2025(3): 60-65.
- [13] 刘永生. 基于 EDEM 对连续卸船机中心溜筒的料流分析[J]. 起重运输机械, 2023(14): 45-49.
- LIU Y S. Material flow analysis of central chute of continuous ship unloader based on EDEM[J]. Hoisting and conveying machinery, 2023(14): 45-49.
- [14] 段建强. 链斗式连续卸船机取料提升系统运行分析[J]. 起重运输机械, 2024(22): 88-92.
- DUAN J Q. Operation analysis of material taking and lifting system of chain bucket continuous ship unloader [J]. Hoisting and conveying machinery, 2024(22): 88-92.
- [15] 倪立. 两类卸船机的特点和对比[J]. 中国设备工程, 2023(9): 128-129.
- NI L. Characteristics and comparison of two types of ship unloaders [J]. China plant engineering, 2023(9): 128-129.
- [16] 河港总体设计规范: JTS 166—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020.
- Standard for general design of river ports: JTS 166-2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020.
- (本文编辑 赵娟)