

引用格式:古健,张琦福,张鹏飞,等. 仿真技术在铜冶炼渣缓冷工艺中的应用[J]. 有色设备,2025,39(2):83-89.

GU Jian,ZHANG Qifu,ZHANG Pengfei,et al. Application of simulation technology in slow cooling process of copper smelting slag[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment,2025,39(2):83-89.

# 仿真技术在铜冶炼渣缓冷工艺中的应用

古 健<sup>1,2</sup>, 张琦福<sup>3</sup>, 张鹏飞<sup>1</sup>, 张 凯<sup>1</sup>, 刘韵芝<sup>1</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 西南医科大学 人文与管理学院, 四川 泸州 646600;  
3. 广西金川有色金属有限公司, 广西 防城港 538000)

**[摘 要]** 在新建或改造铜冶炼渣缓冷场时,存在设备数量多、设备间配合度高、调度方案复杂且多样等挑战。传统的图纸方式可以在缓冷场区域设计不同的功能分区,做静态展示分析,但是存在调度方案呈现困难、无法统计各设备利用率和故障无法模拟等问题。本文结合某铜冶炼渣缓冷场的实际工艺条件,仿真模拟了多种不同调度方案和故障情况,经验证表明,仿真技术不但可以解决上述问题,而且实现了对调度方案的优化调整和各调度方案间的综合对比分析。仿真结果显示,该渣缓冷场采用 3 台起重机、4 台电动平车用于作业为最优方案,为缓冷场的建设提供了数据支撑。

**[关键词]** 铜冶炼; 渣缓冷; 仿真; 调度; 方案; 起重机; 电动平车

**[中图分类号]** TP391.9; TF811 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)02-0083-07

**DOI:**10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.02.011

## 0 引言

渣缓冷工艺是对火法冶炼<sup>[1]</sup>过程中产生的含有铜、金等金属的大量熔融态炉渣实施两次回收的重要工序,既能提高有价金属的产率,也实现了企业的可持续发展<sup>[2-4]</sup>。因此,渣缓冷工艺在铜冶炼过程中发挥着重要的作用。

渣缓冷工艺本质上是对炉渣的转运调度,是一种特殊的物流作业。在铜冶炼厂中新建或改造渣缓冷场时,会综合考虑成本、效率、环境等影响因素。因此,在设计阶段会提出多种场地布局和调度方案。不同的场地布局方案可通过 CAD 技术快速设计,而渣缓冷场的调度方案通常较为复杂,缓冷场中关联的设备多,且要求设备间密切配合,因此用文字的方式准确描述的难度较大,同时存在着方案不够直观的问题。此外,不同调度方案之间可能存在显著差异,缺乏有效的比较来分析各设备的状态数据,也会增加调度方案的选择难度。最后,调度方案的可行性验证难以实现,某些方案看似可行,但通常由于细

节存在缺陷,导致方案不可行。

仿真技术是借助计算机技术,建立虚拟三维模型,通过对仿真模型的试验和分析,不断优化和改善产品和方案。仿真技术在冶金工业领域已得到广泛应用,王泽英等<sup>[5]</sup>仿真模拟超声在湿法冶金中的应用与现状,顾群<sup>[6]</sup>在湿法冶金全流程优化仿真算法分析,李静<sup>[7]</sup>在粉末冶金过程进行仿真应用,高明宇<sup>[8]</sup>等在冶金设备中仿真模拟应用,也有学者<sup>[9-10]</sup>将虚拟仿真技术引入到冶金行业的教学中。在铜冶炼渣缓冷仿真的应用中,有较多学者<sup>[11-14]</sup>关注于渣包、铜渣温度的仿真研究,而渣缓冷场在建设前的方案验证相关的研究学者较少。渣缓冷场的建设前需要确定整个缓冷场的场地布局、各类设备的调度方案等关键信息。因此,本文将仿真技术应用于渣缓冷工艺中,以期对渣缓冷场的建设提供数据支撑。

## 1 铜冶炼渣缓冷工艺介绍

本文以某企业的新建渣缓冷场为例,介绍仿真技术在铜冶炼渣缓冷工艺中的具体应用。该企业渣

**[收稿日期]** 2024-12-08

**[第一作者]** 古健(1993—),男,四川富顺人,软件工程师,硕士,主要从事有色金属领域软件系统的开发、管理、部署和维护工作。

缓冷场在工艺限制条件下计算出需要渣包 300 个。目前渣包运输主要有渣包车运输和起重机运输 2 种方式。因缓冷场场地大小限制,而渣包车运输转弯半径较大,空间利用率不高,因此该企业采用由起重机和电动平车为主的密集型渣包运输方案。

密集型渣包运输方案涉及的设备主要有电动平车、起重机、渣包、移动平台和喷淋柱。电动平车负责热渣包从出渣口运送至缓冷场或从缓冷场运送

空渣包至出渣口接渣。起重机负责将热渣包吊运至缓冷场、将空渣包吊运至电动平车和将冷渣包吊运至倒渣场翻包。渣包是负责盛装熔融态炉渣的容器,在炉渣冷却后将炉渣倒掉,可反复使用。移动平台负责协助电动平车实现热包轨道与空包轨道之间变换。喷淋柱是在热渣包完成空冷后不断喷水的水冷设备。密集型渣包运输方案工艺流程如图 1 所示。

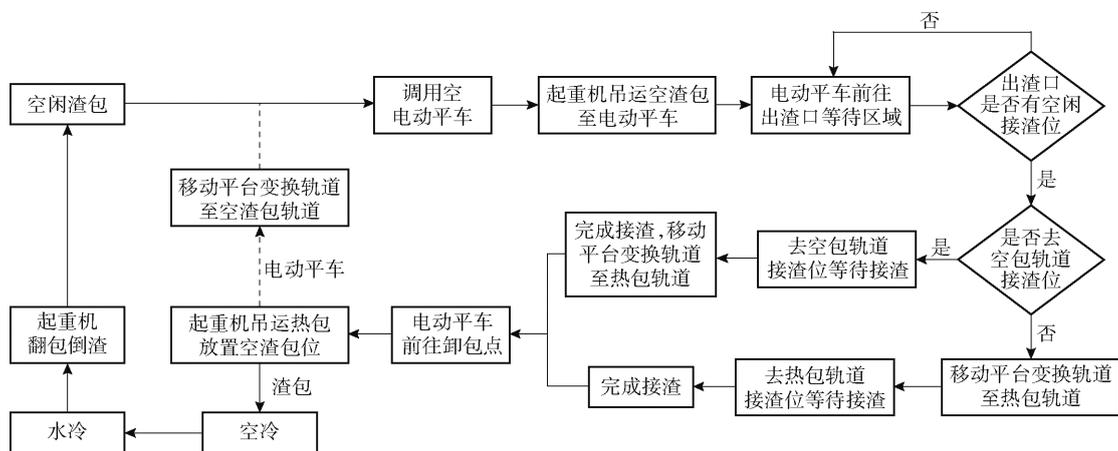


图 1 密集型渣包运输渣缓冷工艺流程

Fig. 1 High-density slag pot transportation and slag slow cooling process

本文以 3 台起重机、6 台电动平车(4 用 2 备)为主要设备的调度方案为例,分析仿真应用于渣缓冷场的整个过程。其他情况的调度方案将在多方案比较中进行介绍,如不同取渣包顺序、不同台数电动平车作业、不同台数起重机作业等。

## 2 仿真模拟渣缓冷场调度

仿真技术应用于渣缓冷场主要有 3 个步骤:①需要进行缓冷场中的场地布局设计和主要设备再进一步完成三维仿真建模;②根据调度方案中的调度逻辑,在仿真软件中配置对应的调度逻辑流程;③运行仿真系统,并在运行验证过程中不断优化与调整调度逻辑。模拟仿真运行如图 2 所示。



图 2 模拟仿真运行

Fig. 2 Simulation operation

### 2.1 设备三维建模及布置

密集型渣包运输方案中需要三维建模的设备有

电动平车、起重机、渣包、移动平台。仿真建模在上述设备基础上还需要渣缓冷场布局图作为仿真底图,渣缓冷场布局图包含整个渣缓冷场的场地布局信息,可为仿真模型的布置和运行时提供参照。在第三方建模软件中完成设备三维建模后,导出符合标准格式的模型文件。

将模型及渣缓冷场布局图导入仿真软件后,根据实际的设备运行参数在仿真软件中设置对应参数。起重机参数包括大车满载速度、大车空载速度、小车满载速度、小车空载速度、提升速度、挂钩时间、脱钩时间、倒渣时间。电动平车参数包括满载速度、空载速度。其他必要参数包括渣包数量、出渣速度、空冷时间、水冷时间、移动平台速度等。

在完成参数设置后,还需在仿真软件中手动设定设备的初始位置、绘制电动平车行进路线、移动平台行进路线等必要基础数据。其中 4 台电动平车放置于热包轨道,2 台备用电动平车分别放置于热包、空包轨道端头,确保不占用正常运行的轨道,如图 3 所示。

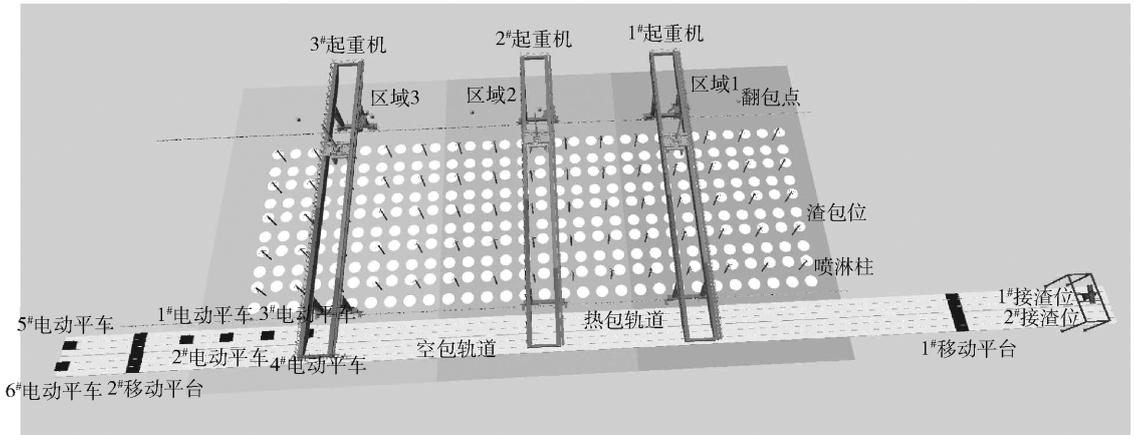


图3 三维模型布置

Fig. 3 Three-dimensional model layout

## 2.2 编写仿真调度逻辑

### 2.2.1 渣包布局逻辑

根据缓冷场的尺寸,配置10排30列一共300个渣包,并对全部渣包位和渣包从小到大依次编号。

将缓冷场均匀划分为3部分,每部分包含100个渣包,3台起重机分别各自处理100个渣包,在执行任务时从空间规划上避免了起重机之间发生碰撞的问题,如图4所示。

区域3										区域2										区域1									
300	290	280	270	260	250	240	230	220	210	200	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
299	289	279	269	259	249	239	229	219	209	199	189	179	169	159	149	139	129	119	109	99	89	79	69	59	49	39	29	19	9
298	288	278	268	258	248	238	228	218	208	198	188	178	168	158	148	138	128	118	108	98	88	78	68	58	48	38	28	18	8
297	287	277	267	257	247	237	227	217	207	197	187	177	167	157	147	137	127	117	107	97	87	77	67	57	47	37	27	17	7
296	286	276	266	256	246	236	226	216	206	196	186	176	166	156	146	136	126	116	106	96	86	76	66	56	46	36	26	16	6
295	285	275	265	255	245	235	225	215	205	195	185	175	165	155	145	135	125	115	105	95	85	75	65	55	45	35	25	15	5
294	284	274	264	254	244	234	224	214	204	194	184	174	164	154	144	134	124	114	104	94	84	74	64	54	44	34	24	14	4
293	283	273	263	253	243	233	223	213	203	193	183	173	163	153	143	133	123	113	103	93	83	73	63	53	43	33	23	13	3
292	282	272	262	252	242	232	222	212	202	192	182	172	162	152	142	132	122	112	102	92	82	72	62	52	42	32	22	12	2
291	281	271	261	251	241	231	221	211	201	191	181	171	161	151	141	131	121	111	101	91	81	71	61	51	41	31	21	11	1

图4 渣包布置

Fig. 4 Slag pot layout

喷淋柱负责4个相邻渣包的喷水,将相邻2行2列的4个渣包设置为1组,渣包既有自身编号也有组号。如图3中在编号为1、2、11、12的渣包位中心安装1根喷淋柱,同时向编号为1、2、11、12的渣包喷水。根据以上渣包布局规则,在仿真软件中编写对应的脚本,以快速生成全部渣包以及对应的区域号、组号和渣包号等附属数据信息。

空渣包通过电动平车运输接渣完成后,热渣包依然会放置于原渣包位,渣包与渣包位进行逻辑绑定。

### 2.2.2 仿真设备调度逻辑

渣包本身有3层序号,分别是缓冷场区域序号、

渣包组号和渣包序号,因此存在多种取渣包顺序,即区域序号优先、渣包组号优先、渣包序号优先。区域序号优先是将同一缓冷场区域的渣包取完后到下一个区域取渣包;渣包组号优先是按缓冷场区域号顺序依次取完一组渣包后到下一区域取渣包;渣包序号优先是按缓冷场区域号顺序再按渣包组号顺序和渣包序号顺序取渣包,一次在一个缓冷场区域的一个组中取出一个渣包。现采用渣包序号优先的方式取包,如1→101→201;2→102→202;11→111→211;12→112→212。其他的取包顺序将在后文模拟仿真中说明。

以渣包维度渣缓冷调度逻辑,初始状态是空渣

包,空渣包在出渣口接完热渣后,状态变为热渣包;在热渣包完成空冷后转变为温渣包,此状态可以开始水冷;等待水冷完成后改变为冷渣包,此状态可以开始翻包;待翻包完成后,状态回归至空渣包,此状态可以重新开始接渣,如图5所示。

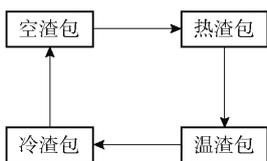


图5 渣包调度

Fig.5 Slag pot scheduling

以电动平车维度仿真调度逻辑,电动平车沿空

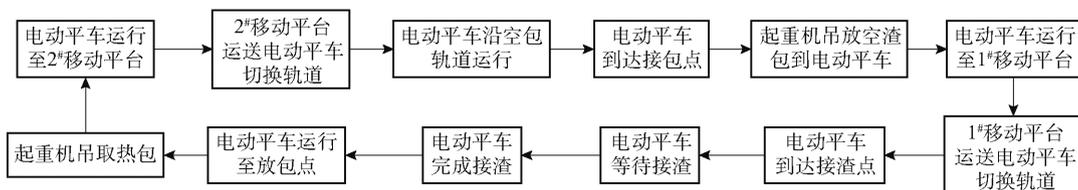


图6 电动平车调度

Fig.6 Electric flat car scheduling

以起重机维度仿真调度逻辑,起重机在整个缓冷场中主要负责从缓冷场吊取空渣包、放置空渣包

包轨道行驶至接包点,接包点是在空包轨道上距离空包最近的点位。起重机从缓冷场吊取空渣包放置在电动平车上,电动平车待起重机上升到一定安全高度后,继续沿空包轨道行驶到1#移动平台前等待,等到接渣点的电动平车完成接渣并完全通过1#移动平台后,该电动平车借1#移动平台行驶至接渣位等待接渣。

完成接渣后,电动平车将借1#移动平台优先驶出接渣位后,沿热包轨道行驶至放包点,放包点是在热包轨道距渣包位号最近的点位。在到达放包点后,起重机将热渣包吊运至该渣包的渣包位。电动平车继续沿热包轨道行驶至2#移动平台,借2#移动平台切换至空包轨道。电动平车调度流程如图6所示。

至电动平板车、从电动平板车吊取热渣包、从缓冷场吊取冷渣包、在翻包点翻包倒渣等任务,如图7所示。

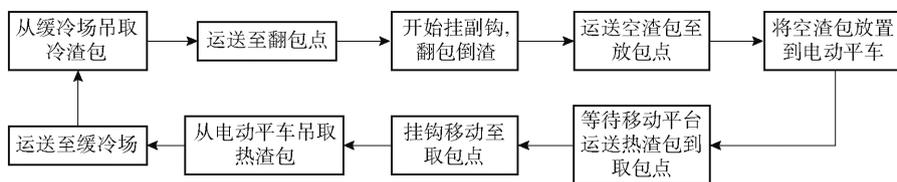


图7 起重机调度

Fig.7 Crane scheduling

### 3 仿真运行验证

仿真模型在仿真软件中按照设定逻辑执行,如果设定的逻辑存在问题,软件运行时会停止或报错提示,此时需根据提示信息修改调整。在仿真运行过程中,未出现停止或报错提示,此时并不能证明仿真逻辑完全正确,还需要观察出渣口位置处是否会出现无电动平车的情况,以验证逻辑的准确性。

在确认仿真逻辑无误后,可加快仿真速度,以实现仿真软件快速运行。经过长时间运行后,各设备的状态数据将趋于稳定。在采用3台起重机和6台电动平车的方案中,仿真模拟运行4320h,未出现

出渣口无电动平车的情况。各设备的状态统计如图8所示。

由图8得知,3台起重机和4台电动平车的设备配置方案中,起重机运行负荷较为适中,作业过程存在一定的时间余量。电动平车的运行负荷也较为适中,作业过程存在的时间余量较起重机稍少,整体符合缓冷场实际的作业要求。

### 4 仿真在渣缓冷场中的作用

#### 4.1 方案比较

采用3台起重机和6台电动平车大方案的前提下,有多种调度方案,如取渣包顺序、使用不同数量

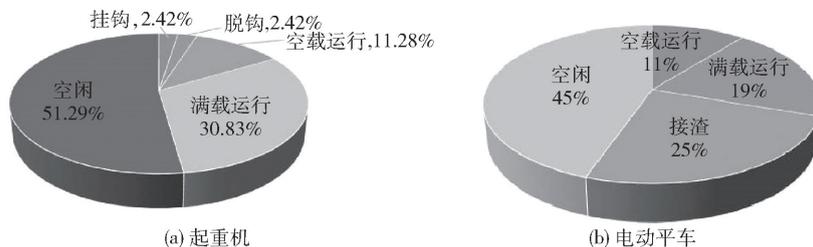


图 8 起重机与电动平车状态统计(3 台起重机,4 台电动平车)

Fig. 8 Crane and electric flat car status statistics

电动平车用于作业、使用不同数量起重机用于作业等,在仿真软件中设置对应的调度逻辑,然后根据仿真软件的运行情况综合分析各调度方案的可行性。

#### 4.1.1 模拟不同取渣包顺序

在仿真软件中,设置区域序号优先的取包顺序,经仿真验证其优势是渣包会按照区域顺序依次排列渣包,渣包的不同状态分界明显,操作人员可快速识别渣包的状态。然而,在实际仿真过程中,发现该方式在需要先将冷渣包翻包,再放置到电动平车时,存在耗时较长的问题,导致无法满足出渣口必须要存在空渣包的条件。

在仿真软件中设置渣包组号优先的取包顺序,经仿真验证其优势在于能够最快地将同一组内的全部渣包放满,各渣包的开始水冷时间间隔最短,加速水冷过程的启动。因现场喷淋阀是 4 个出水口同时开关,所以需最后的热渣包完成空冷后,方可开始水冷。但是此取包方式依然无法满足出渣口无空渣包等待的条件。

配置渣包序号优先的取包顺序。经过仿真运行验证,其优势是各起重机作业状态平稳,避免出现短时间负荷增大的情况,并且符合渣缓冷工艺的各种限制条件。

各取包顺序可行性仿真模拟数据见表 1。

表 1 各取包顺序可行性仿真模拟

Table 1 Feasibility simulation of different slag pot retrieval orders

取包顺序	出渣口是否出现 无空渣包情况	是否可行
区域序号优先	是	否
渣包组号优先	是	否
渣包序号优先	否	是

#### 4.1.2 模拟不同数量电动平车作业

采用 5 台电动平车用于常规作业,1 台作为应急备用。该电动平车使用方案经过仿真运行验证,可以满足缓冷场的各种要求,但是会存在电动平车利用率较低的情况,并且在轨道中运行了过多的电动平车不利于故障出现后的调度。在某台电动平车出现故障后,通常需要借助第三方的设备将电动平车送至检修区域维修,此时若其他电动平车在正常运行,在处理故障时,将会阻碍后续电动平车的运行。

随后,考虑采用 3 台电动平车用于常规作业,3 台作为应急备用。经过仿真运行验证,该方案在运行时会出现出渣口无电动平车的情况,因此,该方案不具备可行性。

采用 4 台电动平车用于常规作业,2 台用于应急备用。经仿真运行验证了该方案的有效性,4 台电动平车各自状态较为清晰,1 台接热渣,1 台等待接渣,1 台运送热渣包,1 台等待前往接渣位,避免出现 1 条轨道上有 2 台电动平车的情况。

以上不同数量电动平车作业可行性仿真模拟结果见表 2。

表 2 不同数量电动平车作业可行性仿真模拟

Table 2 Feasibility simulation of operations with different numbers of electric flat cars

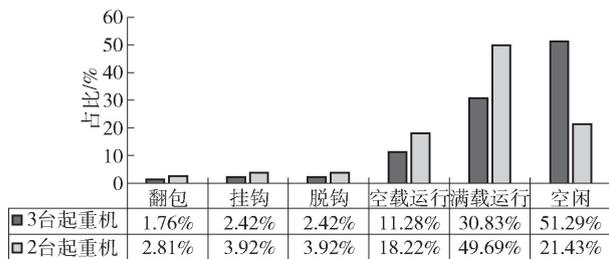
作业电动平车情况	出渣口是否出现 无空渣包情况	是否可行
5 用 1 备	否	是
3 用 3 备	是	否
4 用 2 备	否	是

#### 4.1.3 模拟不同数量起重机作业

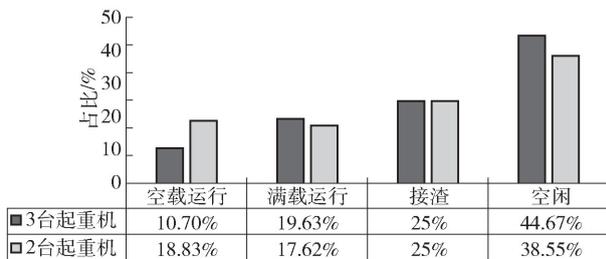
采用 2 台起重机用于作业,需要将缓冷场区域均分为 2 部分,由 2 台起重机各自负责,从空间上进行隔离,能有效保证运行安全。根据此方案设置仿

真逻辑,经验证该方案可行,在仿真模拟 4 320 h 后,对比 3 台起重机作业和 2 台起重机作业时,起重机

和电动平车的各工作状态的分析,如图 9 所示。



(a) 起重机各状态百分比



(b) 电动平车各状态百分比

图 9 不同起重机作业各状态百分比对比

Fig. 9 Percentage comparison of statuses in different crane operations

根据图 9 表明,2 台起重机用于作业时,起重机工作负荷较大,空闲率较低,虽然可以在限定条件下运行,但是如果起重机出现故障或需要检修,此时将影响缓冷场的整体运行。采用 3 台起重机用于作业时,起重机的工作负荷较采用 2 台时明显降低,并且在起重机检修或故障时,几乎不影响整个缓冷场正常运行。

#### 4.2 设备异常情况模拟

在仿真软件中,设置 3 台起重机用于作业时,若 1 台起重机出现故障后,仿真会根据对应的异常处理逻辑继续运行,缓冷场自动切换为 2 台起重机作业,由 2 台起重机均分故障起重机区域中的渣包,在 2 台起重机的工况下,缓冷场仍能保持正常运行。

在仿真软件中模拟电动平车出现故障,在电动平车出现故障后,由第三方设备将故障电动平车吊离轨道,备用电动平车顶替故障电动平车继续运行,整个缓冷场受影响较小。

#### 4.3 调度逻辑过程优化

在运行仿真调度逻辑的过程中,会出现出渣口没有电动平车的情况,可以通过不断的运行调试和原因分析优化调度逻辑。

1) 电动平车的放热渣包点和取空渣包点应尽可能靠近渣包位,需根据渣包位动态计算取放渣包点。

2) 电动平车与起重机应同时并行作业,在电动平车前往取渣包点过程中,起重机同时吊取空渣包并前往同一个取包点。最初方案设计为起重机与电动平车串行作业,此模式下出现了出渣口无空渣包的情况,不满足渣缓冷工艺条件。

3) 起重机在完成翻包倒渣后应直接将空渣包

放置到电动平车上,而不能直接放置于原渣包位。将翻包完成后的空渣包重新放置于原渣包位,此时起重机在完成同样功能的前提下,会多出脱钩和挂钩等步骤,将影响作业效率。

## 5 结论

本文详细地阐述了将仿真技术运用到渣缓冷场中的关键步骤及其实现过程,实现了调度方案的可视化呈现。

本文分别模拟仿真并验证了不同的取渣包顺序、不同数量电动平车用于作业、不同数量起重机用于作业等三种场景下调度方案的可行性。此外,对典型的设备异常场景进行了仿真模拟,并给出了相应的策略。在仿真模拟过程中,对调度逻辑方案中的缺陷进行了优化。

通过对不同数量下的电动平车和起重机工作状态数据进行了对比分析,并经过仿真验证后得出,该企业的渣缓冷场在工艺限制条件下,采用 3 台起重机、4 台电动平车用于作业为最优方案。

将仿真技术应用于渣缓冷工艺中取得了显著效果,为渣缓冷场的建设提供了数据支撑。

#### [参考文献]

[1] 董越,李晓霞. 国内铜火法冶炼技术现状及展望[J]. 现代工业经济和信息化,2023,13(5):283-286,289.  
 [2] 张智,熊双鹰,艾新桥,等. 广西金川渣缓冷工艺探索与实践[J]. 大众科技,2021,23(6):36-38.  
 [3] 刘国庆,杨慧兰. 铜冶炼炉渣缓冷工艺技术探讨及展望[J]. 山西冶金,2024,47(7):83-85.  
 [4] 何桂荣. 铜熔炼渣缓冷工艺管理及改进[J]. 湖南有色金属,2021,37(2):41-44.  
 [5] 王泽英,林国,胡途,等. 超声在湿法冶金中的应用及仿

- 真模拟现状[J]. 有色金属工程, 2024, 14(1): 43 - 50.
- [6] 顾群. 湿法冶金下游流程的分层优化及全流程优化仿真算法分析研究[J]. 湿法冶金, 2023, 42(2): 205 - 214.
- [7] 李静. 计算机仿真在粉末冶金过程的应用及研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2021, 39(4): 366 - 372.
- [8] 高明宇, 高英杰. 多物理场耦合分析在真空冶金设备仿真模拟中的应用[J]. 今日自动化, 2023(12): 130 - 131, 162.
- [9] 杨霞, 马立峰, 朱艳春, 等. 虚拟仿真实践教学平台在冶金机械专业教学中的探索与实践[J]. 大学教育, 2024(8): 49 - 52.
- [10] 杨文强, 夏文堂, 尹建国, 等. 虚拟仿真在有色金属冶金方向实践教学中的应用[J]. 中国冶金教育, 2021(2): 83 - 84, 88.
- [11] 张恒星, 袁水平, 陈杭, 等. 不同渣型缓冷制度下铜渣的热场仿真与分析[J]. 中国冶金, 2020, 30(10): 76 - 83.
- [12] 朱立, 姜观辉, 李娜, 等. 铜渣选矿生产工艺流程优化[J]. 绿色矿冶, 2023, 39(6): 62 - 67.
- [13] 肖瑶. 关于铜渣缓冷过程的数值仿真研究[J]. 科学技术创新, 2021(7): 31 - 32.
- [14] 王旭成, 张立华. 铜渣缓冷制度条件下渣包温度场的仿真与分析[J]. 稀有金属, 2020, 44(2): 186 - 194.

## Application of simulation technology in slow cooling process of copper smelting slag

GU Jian<sup>1,2</sup>, ZHANG Qifu<sup>3</sup>, ZHANG Pengfei<sup>1</sup>, ZHANG Kai<sup>1</sup>, LIU Yunzhi<sup>1</sup>

(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;

2. School of Humanities and Management, Southwest Medical University, Luzhou 646000, China;

3. Guangxi Jinchuan Nonferrous Metals Co., Ltd., Fangchenggang 538002, China)

**Abstract:** In the construction or renovation of copper smelting slag slow cooling plants, challenges include numerous equipments, high equipment coordination requirements, complex scheduling schemes, and diverse operational scenarios. Traditional drawing-based methods can design functional zones for static analysis but have difficulty in visualizing dynamic scheduling, tracking equipment utilization rates, or simulating faults. This paper combines the actual process conditions of a copper smelting slag slow cooling plant to simulate various scheduling strategies and fault scenarios. Results demonstrate that simulation technology not only addresses these limitations but also optimizes scheduling plans and enables comprehensive comparisons between different strategies. The simulation concludes that the optimal configuration for this plant is 3 cranes and 4 electric flat cars, providing data-driven support for plant construction.

**Keywords:** copper smelting; slag slow cooling; simulation; scheduling; plan; crane; electric flat car

