

基于多因素耦合作用下智能剥锌机剥离 载荷变化规律研究

郝二丽^{1,2}, 姜智³

(1. 云南驰宏资源综合利用有限公司, 云南 曲靖 655011; 2. 云南驰宏锌锗股份有限公司, 云南 曲靖 654200;
3. 青岛港湾职业技术学院 智能制造学院, 山东 青岛 266000)

[摘要] 本文以北矿机电科技有限责任公司研制的全流程数字化、智能化高效双板双工位智能剥锌机为研究对象,介绍了智能剥锌机总体结构及工作流程,针对剥锌机剥离过程核心环节进行剥离机理分析,建立了预剥离力学模型,分析了影响剥离效果的复杂因素,利用正交试验法构造了二次回归正交设计数学模型,分析了多因素耦合作用下智能剥锌机剥离载荷的变化规律,为智能剥锌机性能机理研究提供理论参考和技术支持,该方法在工程实践领域具有广阔的应用前景。

[关键词] 智能剥锌机; 剥离效果; 正交试验

[中图分类号] TP24 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2023)03-0015-06

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.03.003

0 前言

有色金属工业是我国经济的重要支柱,是实现制造强国的重要支撑^[1]。但由于有色金属冶炼的生产过程复杂、生产环境恶劣,全流程机械化和自动化的难度很大,国内有色金属冶炼厂家普遍存在生产自动化及智能化程度低、生产工作环境恶劣、生产安全保障性低、工艺和装备相对落后、关键设备长期依赖进口的问题,严重制约了我国有色金属冶炼行业的发展。随着制造业 2035 年远景规划以及“双碳”目标的制定,有色金属冶炼领域内对大规模、高效率、生产规范、环境友好的数字化、智能化、无人化综合生产技术和装备的需求已迫在眉睫^[2-5]。在国

家政策的导向以及国家“机械化换人、自动化减人”战略驱动下,以北矿机电科技有限责任公司研发团队为技术支撑,以云南驰宏锌锗股份有限公司为依托,打破国外技术垄断,国内首次成功研发出全流程数字化、智能化的新一代高效双板双工位智能剥锌机。打破国外技术垄断,解决了外国“卡脖子”关键核心技术,在我国有色金属锌冶炼生产领域应用示范了最新的智能化技术和装备,对推动有色金属冶炼企业的技术升级,节约能源消耗,提高劳动生产率,以及提升有色金属冶炼装备制造业及锌冶炼行业的核心竞争力有着重要意义^[6-7]。

1 智能剥锌机总体结构与工作流程

1.1 智能剥锌机总体结构

双板双工位智能剥锌机是一个全流程数字化、智能化的生产线系统,总体结构如图 1 所示。主要包括进板输送装置、横向输送装置、振打装置、预剥离装置、人工干预位、主剥离装置、码垛输送装置、自动称重单元、刷洗机组、回板输送装置等,通过螺纹连接、焊接等形成一体的“封闭化、自动化、精准化”大型自控剥锌流水线^[8-9]。

1.2 智能剥锌机工作流程

双板双工位智能剥锌机工作流程如图 2 所示。天车从电解槽吊取带锌阴极板分别放置到两套上料

[收稿日期] 2022-12-16

[第一作者] 郝二丽(1985—),男,山西河津人,电气工程师,主要从事铅锌冶炼、设备管理等工作,现任云南驰宏资源综合利用有限公司电解厂党支部书记、厂长。

[基金项目] 北京市科委项目“有色金属电解过程智能剥离装备研制与示范应用”(Z17110000817011);工信部智能制造专项“新型稀土铝锌合金智能生产系统及示范应用”(2017AA03)。

[引用格式] 郝二丽,姜智.基于多因素耦合作用下智能剥锌机剥离载荷变化规律研究[J].有色设备,2023,37(3):15-20.

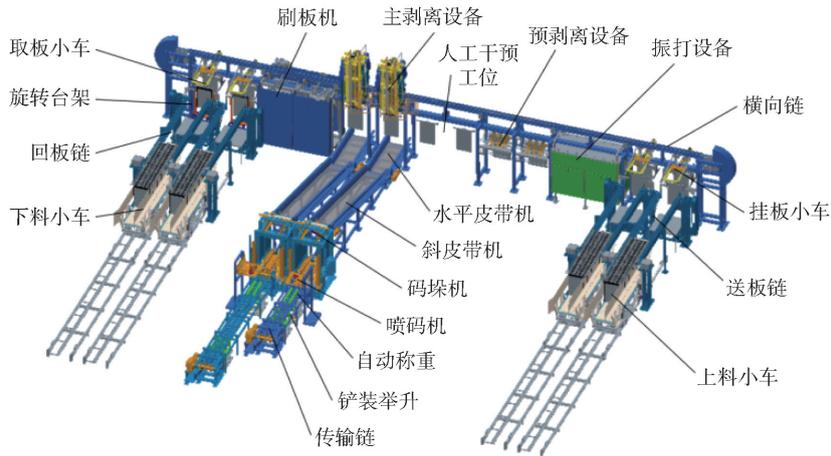


图 1 智能剥锌机总体结构示意图

小车上;由上料小车将带锌阴极板送至送板链的前端;送板链步进至挂板下车工位,由挂板小车将阴极板挂到横向链上;横向链步进两个工位,将两块阴极板输送至振打工位进行振打操作;完成后横向链再次步进两个工位,将两块振打完成的阴极板输送至预剥离工位进行预开口;完成后横向链再次步进两个工位,将两块完成预开口的阴极板送至人工干预工位,如果预开口失败,由人工干预处理,然后由横向链步进两个工位进行主剥离,如果预开口正常,继续由横向链步进两个工位进行主剥离,主剥离剥离的锌片通过皮带机码垛机输送系统进行码垛称重传输;完成主剥之后的阴极板步进两个工位至刷板机进行刷板;完成刷板后再步进两个工位至取板工位,由取板小车将横向链上的阴极板放置到回板链上;再通过下料小车将回板链上的阴极板取走,由天车将下料小车上的阴极板吊取回槽,由此完成一次循环操作。

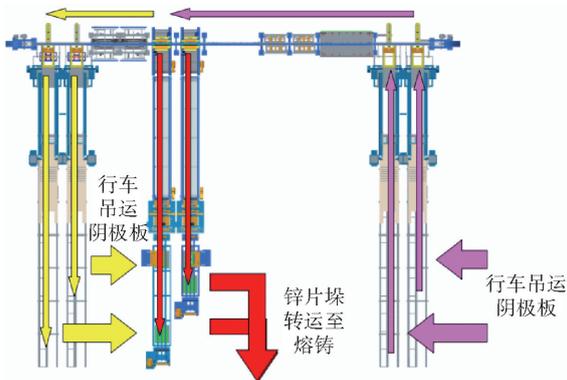


图 2 智能剥锌机工作流程图

2 智能剥锌机剥离效果影响因素分析

2.1 剥锌机剥离机理分析

智能剥锌机是一个全流程数字化、智能化的生产线系统,在整个系统高效运行过程中,剥离开口过程是整个系统的核心环节,是衡量整个生产系统效率高低的关键指标^[10-11]。剥离机理力学模型如图 3 所示。

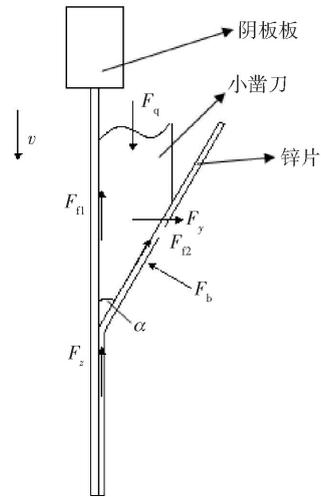


图 3 剥锌机剥离机理力学模型

假定剥离过程中预开口小凿刀的进刀速度是恒定的,建立预剥离开口状态力学模型并进行受力分析,由静力学平衡原理可得式(1)~(4)。

$$F_q = F_{f1} + F_z + F_{f2} \cdot \cos \alpha + F_b \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

$$F_b \cdot \cos \alpha = F_y + F_{f2} \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

$$F_{f1} = \mu \cdot F_{y'} \quad (3)$$

$$F_{y'} = F_y \quad (4)$$

由式(1)、式(2)、式(3)和式(4),得式(5)~(6)。

$$F_{f_2} = \frac{F_b \cdot \cos \alpha - F_y}{\sin \alpha} \quad (5)$$

$$F_q = F_z + \left(\mu - \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} \right) \cdot F_y + \left(\frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} + \sin \alpha \right) \cdot F_b \quad (6)$$

式中: F_q 为剥离驱动力; F_y 为预剥离小凿刀所受的正压力; $F_{y'}$ 为 F_y 的反作用力; F_b 为锌片的外掰力; $F_{b'}$ 为 F_b 的反作用力; F_z 为进刀剥离过程阻力; F_{f_1} 为阴极板与刀具之间摩擦力; F_{f_2} 为刀具和分离锌片之间的摩擦力; μ 为刀具与阴极板之间滑动摩擦系数; α 为刀具的角度。

2.2 剥锌机剥离效果影响分析

锌片剥离的过程是一个时变不确定的过程,剥离效果受工艺材料、设备性能、运动过程参数等各种复杂因素影响,剥锌效果影响因素分析如图4所示。结合现场生产实际情况,去除工艺不稳定因素的影响,基于剥锌机剥离机理分析和过程分析,针对锌片厚度、刀具角度、刀具宽度和粘结层粘结强度等四种主要单因素作用下的剥锌机剥离载荷变化规律进行研究。

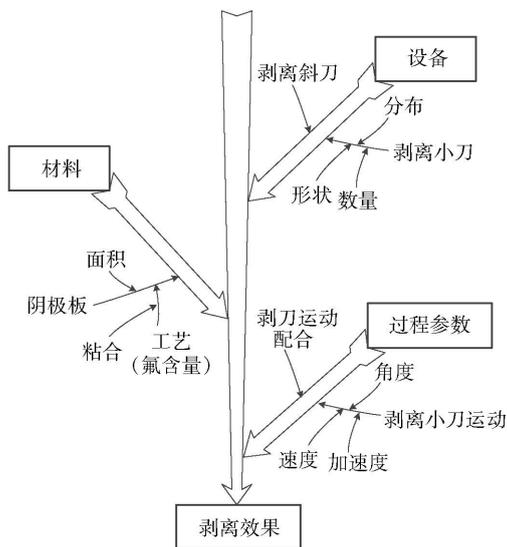


图4 智能剥锌机工作流程图

3 单因素条件下剥离载荷变化规律研究

3.1 正交试验

利用试验法寻找最佳工艺参数时,通常需要从整体的角度出发,对试验安排、数据处理和回归

方程精度这三者共同加以考虑,在保证回归方程精度的情况下进行更少次数的试验,并利用试验得到的数据,建立各个因素变化过程的统一的数学模型,以便更为精确地对指标进行预测和控制^[12-13]。

针对 N 个变量对指标的影响,本文应用二次多项式,构造二次回归正交设计数学模型如式(7)所示。

$$\eta = \beta_0 x_0 + \sum_{i=1}^N \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^N \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (7)$$

式中: $x_0 = 1$, β_0 , β_i , β_{ij} 和 β_{ii} 分别代表零次项、一次项、交互项和二次项的系数; ε 为误差项。

通过试验,依据多元回归方法估计,即可得到某性能的响应回归方程如式(8)所示。

$$y = b_0 x_0 + \sum_{i=1}^N b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^N b_{ii} x_i^2 \quad (8)$$

式中: y 称为响应, x_1, x_2, \dots, x_n 为自变量,表示影响响应的各种因素; b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} 是回归系数; $\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$ 和 β_{ii} 是理论系数的估计。

从正交试验设计的正交性原理(整齐可比、均衡分散)角度出发,在前期研究成果的基础上,筛选因素,最终确定了刀具角度、刀具宽度、锌片厚度、粘结强度四个因素为主要因素,进行四因素五水平的二次正交回归设计。根据试验结果,按二次正交回归设计的原理,可得最大剥离载荷的四因素公式如式(9)所示。

$$y_1 = 81.184x_1^2 - 3093.1x_1 - 0.1039x_2^2 + 44.029x_2 + 0.735x_1x_2 + 115.75x_3^2 + 1.482x_1x_4 - 699.25x_3 - 921.3x_3x_1 - 6451.1x_4^2 + 19219x_4 - 5.25x_2x_4 - 47.24x_2x_3 - 225187x_3x_4 + 2457.83 \quad (9)$$

式中: y_1 代表最大剥锌载荷。

从试验数据的回归方程中可以看出,刀具角度、刀具宽度、锌片厚度、粘结强度四因素与锌片剥离载荷有着较好的回归关系。为探讨这四个因素对锌片最大剥离载荷的影响规律,利用所求回归方程,研究多因素耦合作用下最大剥离载荷的变化规律。

各个因素之间的交互作用需要用等高线图来反映。若要探索 x_1 与 x_2 之间的交互作用规律,可令锌片剥离载荷计算公式中的 $x_3 = x_4 = 0$,解 $y = f(x_1, x_2)$ 的方程,后计算在其它两个因素为基准水平时,锌片剥离载荷的取值范围,可令 $y = 4000, 5000, 6000 \dots$ 各值,其中一个 x 值可依次假定为 $-1.414, -1, 0, 1, 1.414$ 各值,分别解方程即可求得剩下

的另一个 x 的值。由此可得一系列的 (x_1, x_2) 值,以 (x_1, x_2) 值为坐标值,即可绘制 $x_1 - x_2$ 的二维等高线,其它两因素耦合作用规律的二维等高线绘制方法与上述方法一致。理论上讲,在等高线图中,哪一方向等高线距离较小,则该方向对应的坐标轴所表示的因素即为主要因素。

3.2 剥离载荷随刀具角度与刀具宽度耦合作用的变化规律

取 $x_3 = x_4 = 0$, 则式(9)变为式(10)。

$$y_1 = 81.184x_1^2 - 3093.1x_1 - 0.1039x_2^2 + 44.029x_2 + 0.735x_1x_2 + 2457.83 \quad (10)$$

按上述方法计算可得一系列 (x_1, x_2) 值,以各对 (x_1, x_2) 值为坐标,可绘 $x_1 - x_2$ 的二维等高线如图 5 所示。

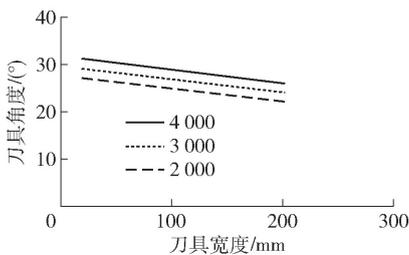


图 5 剥离载荷随刀具角度与刀具宽度耦合作用变化规律

由上图 5 可以看出:(1)在两者的耦合作用中,刀具角度方向上的等高线间距比在刀具宽度方向上的要小,所以此时影响锌片最大剥离载荷的主要因素为刀具角度;(2)当刀具角度一定时,随着刀具宽度的增加,锌片剥离载荷逐渐增大;(3)当刀具宽度一定时,锌片最大剥离载荷随着刀具角度的增加而增大。

3.3 剥离载荷随刀具角度与锌片厚度耦合作用变化规律

取 $x_2 = x_4 = 0$, 则式(9)变为式(11)。

$$y_1 = 81.184x_1^2 - 3093.1x_1 + 115.75x_3^2 - 699.25x_3 - 921.3x_3x_1 + 2457.83 \quad (11)$$

将 x_1 值假定为 $-1.414, -1, 0$ 等值代入上式,则可得到一系列的 (x_1, x_3) 值,以各对 (x_1, x_3) , 可绘制 $x_1 - x_3$ 的二维等高线如图 6 所示。

由上图 6 可以看出:(1)在两者的交互作用中,刀具角度方向上的等高线间距比在锌片厚度方向上的小,所以此时刀具角度对锌片最大剥离载荷的影响要比锌片厚度大;(2)当刀具角度一定时,随着锌片厚度的增加,锌片最大剥离载荷逐渐增大;(3)当

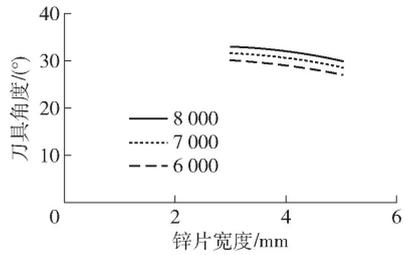


图 6 剥离载荷随刀具角度与锌片厚度耦合作用变化规律

锌片厚度一定时,随着刀具角度的增加,锌片最大剥离载荷呈逐渐增大的趋势。

3.4 剥离载荷随刀具角度与粘结强度耦合作用变化规律

取 $x_2 = x_3 = 0$, 则式(9)变为式(12)。

$$y_1 = 81.184x_1^2 - 3093.1x_1 - 6451.1x_4^2 + 19219x_4 + 1.482x_1x_4 + 2457.83 \quad (12)$$

将 x_1 值假定为 $-1.414, -1, 0$ 等值,则可得到一系列的 (x_1, x_4) , 以各对 (x_1, x_4) 值为坐标,可绘制 $x_1 - x_4$ 的二维等高线如图 7 所示。

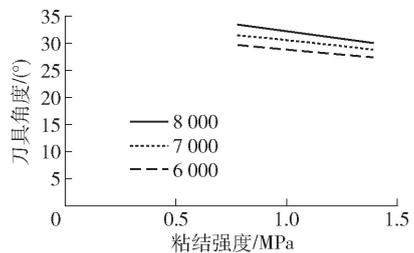


图 7 剥离载荷随刀具角度与粘结强度耦合作用变化规律

由图 7 可以看出:(1)在两者的交互作用中,刀具角度方向上的等高线间距比粘结强度方向上的要小,所以此时刀具角度对锌片最大剥离载荷的影响要比荷载大;(2)当刀具角度一定时,随着粘结强度的增加,锌片最大剥离载荷逐渐增大;(3)当粘结强度一定时,随着刀具角度的增加,锌片最大剥离载荷呈逐渐增大的趋势。

3.5 剥离载荷随刀具宽度与锌片厚度耦合作用变化规律

取 $x_1 = x_4 = 0$, 则式(9)变为式(13)。

$$y_1 = -0.1039x_2^2 + 44.029x_2 + 115.75x_3^2 - 699.25x_3 - 47.24x_2x_3 + 2457.83 \quad (13)$$

将 x_2 值假定为 $-1.414, -1, 0$ 等值,则可得到一系列的 (x_2, x_3) , 以各对 (x_2, x_3) 值为坐标,可绘制 $x_2 - x_3$ 的二维等高线如图 8 所示。

由图 8 可以看出:(1)在两者的交互作用中,刀

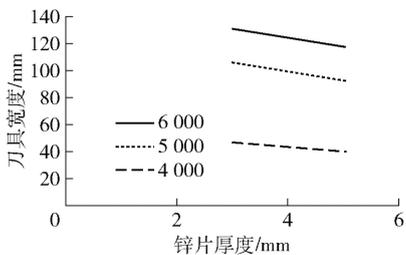


图8 剥离载荷随刀具宽度与锌片厚度耦合作用变化规律

具宽度方向上的等高线间距比锌片厚度方向上的要小,所以此时影响锌片最大剥离载荷的主要因素为刀具宽度;(2)当刀具宽度一定时,随着锌片厚度的增加,锌片最大剥离载荷逐渐增大;(3)当锌片厚度一定时,随着刀具宽度的增加,锌片最大剥离载荷逐渐增大。

3.6 剥离载荷随刀具宽度与粘结强度耦合作用变化规律

取 $x_1 = x_3 = 0$, 则式(9)变为式(14)。

$$y_1 = -0.1039x_2^2 + 44.029x_2 - 6451.1x_4 + 19219x_4 - 5.25x_2x_4 + 2457.83 \quad (14)$$

将 x_3 值假定为 $-1.414, -1, 0$ 等值, 则可得到一系列的 (x_3, x_4) , 以各对 (x_3, x_4) 值为坐标, 可绘制 $x_3 - x_4$ 的二维等高线如图9所示。

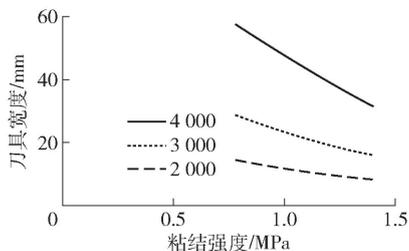


图9 剥离载荷随刀具宽度与粘结强度耦合作用变化规律

由上图9可以看出:(1)在两者的交互作用中,刀具宽度方向上的等高线间距比粘结强度方向上的要小,所以此时影响锌片最大剥离载荷的主要因素为刀具宽度;(2)当刀具宽度一定时,随着粘结强度的增加,锌片最大剥离载荷逐渐增大;(3)当粘结强度一定时,随着刀具宽度的增加,锌片最大剥离载荷逐渐增大。

3.7 剥离载荷随锌片厚度与粘结强度耦合作用变化规律

取 $x_1 = x_2 = 0$, 则式(9)变为式(15)。

$$y_1 = 115.75x_3^2 - 699.25x_3 - 6451.1x_4 + 19219x_4 - 225187x_3x_4 + 2457.83 \quad (15)$$

将 x_3 值假定为 $-1.414, -1, 0$ 等值, 则可得到一系列的 (x_3, x_4) , 以各对 (x_3, x_4) 值为坐标, 可绘制 $x_3 - x_4$ 的二维等高线如图10所示。

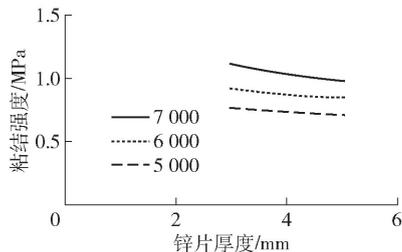


图10 剥离载荷随锌片厚度与粘结强度耦合作用变化规律

由上图10可以看出:(1)在两者的交互作用中,粘结强度方向上的等高线间距比锌片厚度方向上的要小,所以此时影响锌片最大剥离载荷的主要因素为粘结强度;(2)当锌片厚度一定时,随着粘结强度的增加,锌片最大剥离载荷逐渐增大;(3)当粘结强度一定时,随着锌片厚度的增加,锌片最大剥离载荷逐渐增大。

综上所述可知:对于刀具最大剥离载荷的显著性影响强弱从大到小排序依次为刀具角度、刀具宽度、粘结强度、锌片厚度,在进行剥离工艺的设计时应充分考虑四种因素的综合影响。

4 结论

1)国内首次成功研发出全流程数字化、智能化的新一代高效双板双工位智能剥锌机,打破国外技术垄断,解决了“卡脖子”的关键核心技术。

2)针对剥锌机剥离过程核心环节进行剥离机理分析,建立了预剥离力学模型,分析了影响剥离效果的复杂因素。

3)利用正交试验法构造了二次回归正交设计数学模型,分析了多因素耦合作用下智能剥锌机剥离载荷的变化规律。

4)该方法为智能剥锌机性能机理研究提供理论参考和技术支持,在工程实践领域具有广阔的应用前景。

[参考文献]

[1] 赵翠青. 当前中国锌工业的发展形势与思考[J]. 中国金属通报, 2006(23): 4-5.

- [2] 赵继平. 大极板剥锌机预剥离技术研究[D]. 北京:北京矿冶研究总院,2016.
- [3] 刘玉芳,张明哲,刘玉弟. 锌锭生产线的发展现状与未来智能化展望[J]. 有色设备,2022,36(3):12-15.
- [4] 陈德华,郭鑫. 锌电解自动剥板机在云南某冶炼厂的应用[J]. 矿冶,2019,28(3):94-97.
- [5] 魏昶,王吉坤. 湿法炼锌理论与应用[M]. 昆明:云南科技出版社,2003.
- [6] 罗涛. 大极板电积锌技术和设备的发展[J]. 世界有色金属,2019(18):41-44.
- [7] 王振启,杨支海,吕艳琼,等. 基于图像识别系统的自动剥锌机智能剔补板技术研究[J]. 有色设备,2022,36(4):11-15+31.
- [8] 谭敏. 锌电积中铝阴极耐腐蚀性及剥锌力的研究[D]. 株洲:湖南工业大学,2018.
- [9] 钟国伟,刘宝松,王勇,等. 阴极板移栽小车结构及运行原理设计[J]. 有色设备,2022,36(2):36-40.
- [10] 石峰,冯孝华,顾洪枢,等. 阴极板锌片冲击式预开口装置[P]. CN 202595302 U. 2012-12-12.
- [11] 张志国,姜智,王勇,等. 智能剥锌机锌片剥离过程建模及瞬态动力学分析[J]. 有色设备,2022,36(2):28-32+40.
- [12] 张鹏,胡小飞,姚伟岸. 内聚力模型裂纹问题分析的解析奇异单元[J]. 固体力学学报,2017,38(2):157-164.
- [13] 张自强. 阴极板剥板力学建模及剥锌机理研究[D]. 北京:北京矿冶研究总院,2020.

Study on the Change of Stripping Load of Intelligent Zinc Stripper under Multi-factor Coupling

HAO Er-li, JIANG Zhi

Abstract: This paper takes the full-process digital, intelligent and efficient double-plate double-station intelligent zinc stripping machine developed by Beimine Electromechanical Technology Co., Ltd. as the research object, introduces the overall structure and work flow of the intelligent zinc stripping machine, analyzes the stripping mechanism of the core link of the stripping process of the zinc stripping machine, establishes the pre-stripping mechanical model, and analyzes the complex factors affecting the stripping effect. The quadratic regression orthogonal design mathematical model was constructed by orthogonal test method, and the variation law of stripping load of intelligent zinc stripper under multi-factor coupling was analyzed, which provided theoretical reference and technical support for the research of performance mechanism of intelligent zinc stripper.

Key words: Intelligent zinc stripping machine; Stripping effect; Orthogonal experiment

