

智能剥锌机锌片剥离过程建模及瞬态动力学分析

张志国¹, 姜智², 王勇³, 姜勇⁴, 郭鑫^{4,5}

(1. 呼伦贝尔驰宏矿业有限公司, 内蒙古 呼伦贝尔 021000; 2. 青岛港湾职业技术学院, 山东 青岛 266404;
3. 云南驰宏锌锗股份有限公司会泽冶炼分公司, 云南 会泽 654211; 4. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;
5. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

[摘要] 本文以矿冶科技集团有限公司研发的智能剥锌机为研究对象, 对其基本结构及锌片剥离过程进行了分析, 建立了锌片剥离过程的仿真模型并对其瞬态动力学特性进行仿真分析, 分别获得了单一主应力内聚模型和混合内聚模型下剥离载荷与刀具行程的变化规律, 为智能剥锌机锌片剥离过程优化和智能控制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; 锌片剥离; 瞬态动力学

[中图分类号] TP24

[文献标志码] A

[文章编号] 1003-8884(2022)02-0028-05

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2022.02.007

据不完全统计, 我国锌冶炼企业大小超过 350 家, 只有云南驰宏锌锗、新疆紫金等少数大型企业采用大极板电解和自动剥锌, 其余绝大部分采用小极板电解和人工剥锌^[1]。目前, 国外拥有成熟大极板自动剥锌技术的公司只有保尔沃特 (Paul Wurth)、日本三井 (MESCO) 和芬兰奥图泰 (Outotec) 公司。而国内只有几家院所企业对大极板自动剥锌技术进行了深入研究, 尤以矿冶科技集团有限公司研发的智能剥锌机技术最为成熟^[2-3]。2015 年完成国内首台大极板自动剥锌机工业示范应用, 各项指标远超进口剥锌机, 达到国际领先水平。目前已在云南驰宏锌锗、新疆紫金有色、山东恒邦、金鼎锌业、陕西锌业等多家企业成功应用。本文以矿冶科技集团有限公司研发的全新一代智能剥锌机 BGRIMM-3.2 为研究对象, 在前期研究成果的基础上, 对锌片的剥离过程进行了深入研究, 详细分析了不同内聚

模型下剥离载荷与刀具行程的瞬态动力学特性, 为智能剥锌机锌片剥离过程优化和智能控制提供理论参考和技术支持。

1 智能剥锌机基本结构及剥离过程分析

智能剥锌系统主要包括上部剥锌系统和下部接锌码垛系统^[4], 其中锌片剥离过程的主体装备结构, 如图 1 所示。

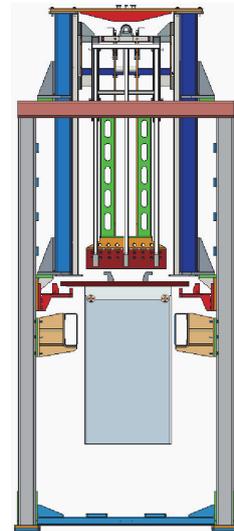


图 1 剥离主体装备示意图

锌片剥离过程如下^[5-6]:

(1) 待剥离的阴极板被放置在阴极板支撑架上, 由锌板支撑架和阴极板限位块共同作用, 限制阴

[收稿日期] 2021-12-09

[作者简介] 张志国 (1983—), 男, 辽宁建平人, 电气工程师, 大学本科, 主要从事有色冶金装备管理、铅系统生产管理工作, 现任呼伦贝尔驰宏矿业有限公司铅厂厂长、综合回收厂厂长。

[基金项目] 北京市科技计划“有色金属电解过程智能剥离装备研制及示范应用”(Z171100000817011)

[引用格式] 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.

极板的位移。

(2) 主剥刀架在阴极板的上方, 开合油缸处于收缩状态, 主剥刀处于打开状态。

(3) 主油缸伸出, 主剥刀向下进刀, 使主剥刀的刀刃到达阴极板上沿以下, 锌片上沿以上。

(4) 开合油缸伸出, 刀刃闭合。

(5) 主油缸继续伸出, 主剥刀开始剥锌, 直至油缸伸出完毕, 主剥刀刀刃到达锌片下沿下方, 锌片与阴极板剥离完毕。

(6) 开合油缸收回, 刀刃打开。

(7) 主油缸收回回到初始位置, 等待剥离完的阴极板被运走。

2 锌片剥离过程建模及仿真

2.1 剥离模型的构建及简化假设

将锌铝粘结层用内聚力模型进行等效, 建立锌铝结合层的力学模型和剥锌机构三维模型, 其中剥离刀具角度为 30 度, 锌片厚度为 4 mm, 长度为 1 560 mm, 铝阴极板厚度为 7 mm, 长度为 1 760 mm。将此三维结构模型转化并导入有限元软件中^[7], 为保证有限元计算结果收敛, 对剥锌机构及层结构模型进行以下理想化的假设:

(1) 为解决模拟过程中已剥离锌片穿透两侧挡板和刀具造成计算结果不收敛的问题, 将挡板和刀具假设为刚体, 不考虑其变形。

(2) 实际剥离过程中刀具与阴极板之间存在缝隙, 所以忽略锌片与刀具之间的摩擦。

(3) 假设刀具与锌片温度场为稳态温度场, 不考虑刀具剥离过程中温度变化的影响。

(4) 锌片和铝阴极板为均匀连续的各向同性材料。

(5) 假设沿粘结层厚度方向的粘结应力为常数, 忽略粘结层厚度对粘结应力沿横向分布的影响。

在以上假设前提下, 设置模型各结构的材料参数, 划分各结构有限元网格并施加载荷和约束, 求解刀具与锌片接触面各时刻的载荷, 对刀具剥离锌片过程进行仿真模拟。

2.2 网格划分与材料参数设置

(1) 网格划分

本文建立的几何模型, 对于锌片、阴极板和挡板主要使用四面体的单元类型; 对于刀具主要使用了六面体和五面体的单元类型, 以达到在保证计算精

确性的前提下缩短计算时间的目的。

为探索裂纹拓展行为, 在锌片和阴极铝板之间插入一层零厚度的内聚力层来模拟裂缝的产生, 这层单元的单元类型选择六面体单元。网格划分完成后, 网格划分结果如图 2 所示。

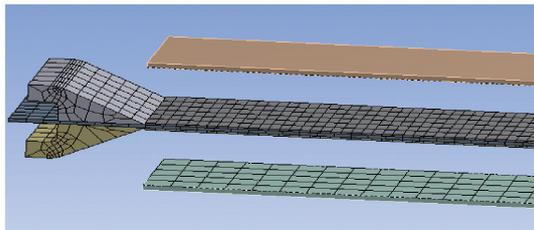


图 2 模型有限元网格划分

(2) 材料参数选择

在 ANSYS 材料库中选择主剥刀, 铝, 锌片的材料参数, 本文主要应用的材料参数是其弹性模量和泊松比, 刀具, 铝, 锌片的材料参数, 如表 1 所示。

表 1 零件材料参数

零件名称	材料类型	杨氏模量/Pa	泊松比
刀具	钢	2.5×10^{13}	0.3
锌片	锌	9.9×10^{10}	0.25
铝阴极板	铝	3.3×10^{11}	0.238

(3) 模型控制参数的确定

结合界面强度主要用来描述材料沿界面破坏时结合界面的承载能力, 对于锌铝结合界面, 在不考虑端面端奇异点或不存在奇异点的情况下, 目前方向垂直于结合界面的正应力和与界面相切的剪应力常被用作内聚力模型的控制参数^[8]。

它们对应的强度值称为结合界面的剥离强度与剪切强度, 确定该参数的方法主要有两种: 一种是直接针对特定的对象做拉伸断裂实验, 根据实验测得在给定裂纹嘴张开位移时载荷的大小; 另一种是根据材料的断裂韧性实验测得的载荷及载荷位移曲线, 与数值仿真得到的相应曲线拟合, 根据拟合效果判断选择的内聚力模型参数是否合适^[9]。

谭敏^[10]等采用万能测量试验机测得在最终开裂位移值等于 0.5 mm 的条件下锌片不同部位结合强度值如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 铝作为阴极首次电沉积制锌, 与锌的最大结合强度为 7.8 kg/cm^2 。当电积的次数增加到 50 次时, 铝锌结合界面的最大结合强度

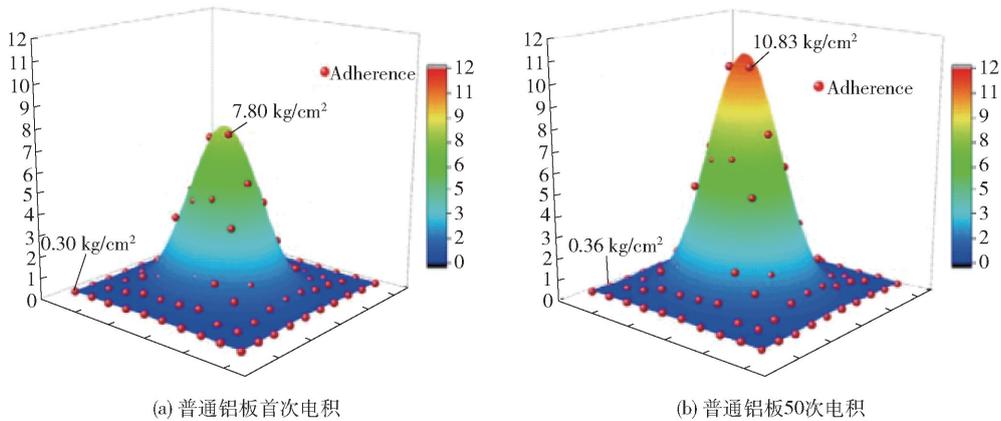


图3 锌片剥离强度示意图

达到了 10.83 kg/cm^2 。且铝阴极板中心位置附近结合强度最大, 锌与铝的结合更加紧密, 四周则逐渐减小。目前方向垂直于结合界面的正应力和与界面相切的剪切应力常被用作内聚力模型的控制参数, 考虑到锌片主要受正应力作用而与阴极板分离, 本文控制参数选取经过 50 次电沉积的铝板的锌铝结合峰值 10.83 kg/cm^2 作为结合界面的粘结正应力值, 0.5 mm 作为粘结层拉伸开裂位移值。

2.3 接触及约束设置

在锌片剥离过程中, 锌片与阴极板的分离以法向分离为主, 只存在极少量的切向滑动, 接触区域的切向应力远远其超过法向应力, 所以设置锌片与阴极板接触类型为绑定接触; 相比于剥离载荷而言, 刀具与锌片、已剥离锌片与挡板之间的摩擦力的大小远远小于剥离载荷, 且在剥离过程中, 由于锌片两侧挡板的存在, 已剥离锌片受到挡板的阻挡, 与刀具始终保持着接触, 所以设置刀具与阴极板、刀具与锌片之间的接触类型为无摩擦接触; 在实际的剥离过程中, 刀具沿固定的直线轨迹运动, 且与阴极板之间存在极小的间隙, 接触类型设置为不分离接触是合适的。

对接触界面进行算法选择时, 为提高计算结果精确度, 锌片与刀具之间接触选择一般朗格朗日算法, 利用投影法探测触面和目标面的节点; 同时为缩短计算收敛时间, 将次要的锌片与挡板, 刀具与阴极板等接触算法设置为增广拉格朗日算法, 探测方法选择高斯积分点探测。如图 5 所示, 在阴极板左端面施加固定约束, 约束住左侧面所有节点的横向位移。对于锌片两侧挡板, 为避免刚体位移, 施加对地面的固定约束。

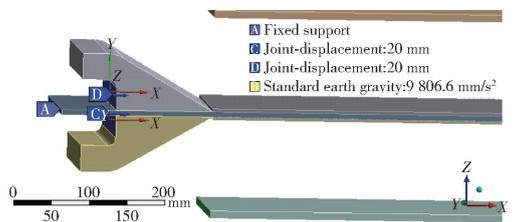


图4 约束及载荷设置

对于剥离刀具而言, 采用位移加载的方式, 对刀具左侧面所有节点施加均匀的 x 方向位移, 令其移动 1200 mm , 加载步数为 200 步。最后在 x 方向施加大小为 9806.6 mm/s^2 的重力载荷。为保证计算结果的收敛性, 将内聚力单元的网格粘性系数设置为 0.0005 。

3 锌片剥离过程瞬态动力学分析

3.1 单一正应力内聚模型剥离过程仿真

设置剥刀运行 3 s , 行程为 1200 mm , 并在这一过程中采取四种剥离速度, 其中 $0 \sim 20 \text{ mm}$ 速度为 0.2 m/s ; $20 \sim 300 \text{ mm}$ 速度为 0.28 m/s ; $300 \sim 900 \text{ mm}$ 速度为 0.6 m/s ; $900 \sim 1200 \text{ mm}$ 速度为 0.3 m/s 。求解剥离过程中刀具与锌片接触面(如图 5 所示)所承受载荷, 即剥离刀具在沿 x 方向移动过程中绿色部分的各支点力的向量和, 并绘制剥离载荷与剥刀位移之间的关系曲线。

经过处理后可以得到剥离载荷与刀具位移关系, 如图 6 所示。

可以看出剥离载荷在剥离起始阶段迅速增大, 在 0.5 mm 时达到峰值后开始迅速下降, 在运行 137.19 mm 后稳定。随后剥离速度增大, 在速度突变点剥离载荷显著增大, 稳定剥离时的高速时的剥

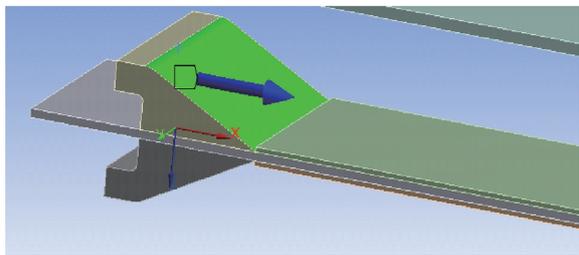


图5 刀具与锌片接触面示意图

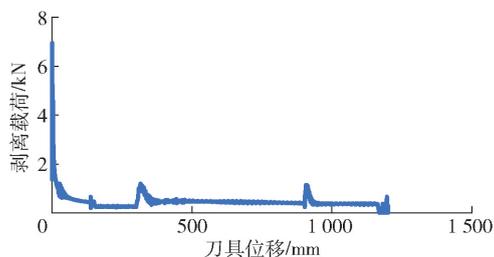


图6 剥离载荷与刀具位移关系

剥离载荷大小相比低速剥离时有所增大。刀具在运行 1 161 mm 后完成锌片的剥离。图中出现的几次载荷的突增分别对应刀具运动速度的突变点变位置, 匀速剥离阶段的剥离载荷比较稳定且远小于剥离载荷峰值。这一过程与实际剥锌作业中载荷的变化过程是相符合的。

3.2 混合内聚力模型剥离过程仿真

上述使用的内聚力模型是剥离界面承受单一法向拉力而分离的内聚力模型, 在实际的铝锌结合界面的剥离过程中, 由于电解工艺和锌板个体差异的影响, 剥离界面可能同时承受法向拉应力和切向剪切应力, 而剥离界面由于承受切向剪应力而引起结合界面发生切向滑移, 这可能会降低原有模型的准确性, 使数值计算的结果产生较大的误差, 为探索剥离过程中粘结界面的剪切滑移对剥离过程的影响, 在剥锌的内聚力模型中加入切向滑移量, 并进行了有限元计算, 对比研究不同的裂纹拓展方式对于剥锌载荷及剥离行程的影响。

混合模式的断裂起始准则一般使用幂次定律断裂准则, 它描述的是混合模式条件下, 粘结结构的断裂由各个单一模式上断裂所需能量共同控制^[11], 其控制方程如式(1)所示:

$$\left\{ \frac{G_n}{G_n^c} \right\}^\alpha + \left\{ \frac{G_s}{G_s^c} \right\}^\alpha + \left\{ \frac{G_t}{G_t^c} \right\}^\alpha = 1 \quad (1)$$

以上条件满足时, 混合模式的断裂能。式(1)

中, G_n 、 G_s 、 G_t 的值分别指三个方向上(法向、第一切向及第二切向)张力与相应位移所做的功。而我们可以分别定义 G_n^c 、 G_s^c 、 G_t^c 的值, 它们分别指三个方向上发生断裂时所需临界断裂能。

为探索剥离界面同时承受法向正应力和切向剪应力作用时的剥离效果, 比较混合模式与单一正应力模式对剥离效果的影响, 损伤演化模型仍然使用双线性模型^[12], 如图 8 所示。

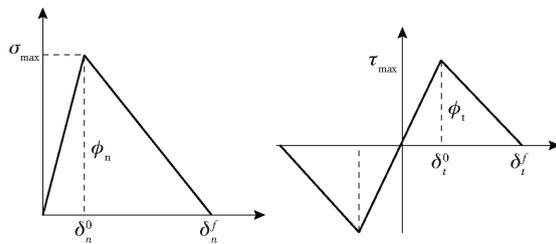


图7 双线性模型法向-切向力分离本构曲线图

图 7 是双线性模型的法向与切向应力-分离本构曲线。图中三角形所围成的面积代表该方向的断裂能 G 。由于实际中粘结层的许用拉应力数值远远超过粘结层的许用剪切应力, 对粘结层的等效剪切应力取极限值, 使其等于其等效正应力, 并设置 0.5 mm 的剪切滑移上限值, 在此条件下计算锌片剥离过程剥离载荷和刀具位移关系。模型相关参数如表 2 所示, 其中 0 ~ 20 mm 速度为 0.2 m/s; 20 ~ 250 mm 速度为 0.28 m/s; 300 ~ 900 mm 速度为 0.6 m/s; 900 ~ 1 200 mm 速度为 0.3 m/s。其余参数与单一正应力内聚力模型相同。

表2 混合模式内聚力模型参数

参数	数值
拉伸断裂位移上限值/mm	0.5
剪切滑移位移上限值/mm	0.5
最大正应力/MPa	1.083
最大剪切应力/MPa	1.083
人工阻尼系数	0.001

剥离载荷与刀具行程关系的有限元计算结果如图 8 所示。

对比图 6 和图 8 可以看出混合模式的剥离载荷峰值大小与单一正应力剥离模式的剥离载荷峰值大小基本一致。刀具运动行程要略超过单一正应力剥离模式的行程。稳定剥离状态下, 混合模式下的剥

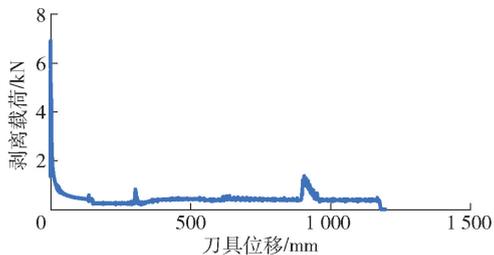


图8 混合模式下刀具行程与剥离载荷变化规律

锌力略低于单一模式下的剥锌力。

对比两种不同模式的内聚力模型可以看出,在混合模式下,粘结层剪切应力取极值时,模型的仿真计算结果与单一正应力模式时的结果相近,在实际的粘结结构中,剪切应力将远大于该极小值,粘结层裂纹的拓展方式将以拉伸断裂形式为主,且从模型控制参数的获取难度来看,剥离能量释放率是基于能量守恒定律,难以通过实验测量直接获取较为准确的数据,一般通过测量粘结层的拉应力和剪切应力理论计算得到,而粘结层的拉应力可通过拉伸断裂实验直接测得。综合考虑,在智能剥锌机锌片剥离过程优化和智能控制研究过程中,可以选取单一正应力内聚力模型对锌片剥离过程进行模拟仿真研究。

4 结论

(1)提出了一种基于锌铝粘结结构内聚力等效模型的锌片剥离过程建模方法,并对锌片剥离过程进行了瞬态动力学仿真。

(2)仿真结果可以看出:剥离载荷在剥离开始后迅速增大到峰值后急剧减小,在刀具移动 137.19 mm 后达到稳定,稳定剥离时的剥离载荷远小于峰值;随着剥离速度增加,速度突变点处剥离载荷显著增大,稳定剥离时,高速剥离相比低速剥离时载荷有所增大;刀具运行 1 161 mm 后完成锌片的剥离,远小于锌片的实际长度。

(3)分别对单一主应力内聚模型和混合内聚模型的锌片剥离过程进行仿真对比,结果表明:两种模

型的载荷计算结果较为接近,但混合模型的剥离行程稍高于单一主应力模型;稳定剥离状态下,混合模式下的剥锌力略低于单一模式下的剥锌力。综合考虑,在智能剥锌机锌片剥离过程优化和智能控制研究过程中,可以选取单一正应力内聚力模型对锌片剥离过程进行模拟仿真研究。

[参考文献]

- [1] 伍文丙. 锌电极大板板和自动化剥锌的应用实践[J]. 中国有色冶金, 2013, 42(6): 32-34.
- [2] 赵继平, 战凯, 郭鑫, 等. 基于 Pro/E 和 ANSYS 的大板板预剥离机设计与应用[J]. 机械制造, 2016, 54(8): 76-78.
- [3] 赵继平. 大板板剥锌机预剥离技术研究[D]. 北京: 北京矿冶研究总院, 2016.
- [4] 李恒通, 郭鑫, 姜勇, 等. 电沉积金属的剥离系统: 201520266366. 3[P]. 2015-10-07.
- [5] 赵继平, 郭鑫, 姜勇, 等. 电沉积金属预剥离装置 201520265271X [P]. 2015-10-07.
- [6] 石峰, 冯孝华, 顾洪枢, 等. 阴极板锌片冲击式预开口装置: CN202595302U [P]. 2012-12-12.
- [7] 马玉娟, 吉卫宋, 宋丽娟, 等. 基于 ANSYS Workbench 的 ZC1 型蜗杆副瞬态动力学分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(3): 114-117.
- [8] 王凯, 姚进, 邓星桥, 等. 无侧隙端面啮合蜗杆副瞬态动力学分析[J]. 工程科学与技术, 2017(1): 86-94.
- [9] 周彬彬, 邱伟光, 张伯君, 等. 基于内聚力模型的铝-钛-钢复合板剪切试验模拟[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(4): 1137-1142.
- [10] 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.
- [11] Haiyang Yu, Jim Stian Olsen, Vigdis Olden, et al. Viscous regularization for cohesive zone modeling under constant displacement: An application to drogeem brittlement simulation[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2016, 166: 23-42.
- [12] Meitl M A, Zhu Z T, Kumar V, et al. Transfer printing by kinetic control of adhesion to an elastomeric stamp. Nature Materials, 2006, (5): 338.

(下转第 40 页)

- [5] 宫敏利. 单叉剪式升降台结构相关参数计算公式的确定[J]. 机械管理开发, 2018, 33(11): 26 - 28.
- [6] 王铎, 王尚斌, 李超, 等. 基于虚功原理剪叉机构驱动力计算[J]. 锻压装备与制造技术, 2020, 55(2): 36 - 38.
- [7] 朱建国. 横向往滚珠丝杠驱动升降平台设计要点分析[J]. 现代制造技术与装备, 2020(6): 110 - 113.
- [8] 吴慧君, 蒋庆磊. 一种用于机床上下料的工业机器人行走机构设计[J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 18(9): 72 - 73.
- [9] 胡艳凯. 单驱动平板小车行走机构设计[J]. 武汉职业技术学院学报, 2020, 19(2): 115 - 117.
- [10] 裴宝仁, 朱昌彪. 轮胎式集装箱起重机轮边驱动机构设计[J]. 起重运输机械, 2020(11): 47 - 51.

Design of Structure and Operation Principle of Cathode Plate Transfer Trolley

ZHONG Guo-wei, LIU Bao-song, WANG Yong, SHI Feng, JIANG Yong

Abstract: Through the design of structure and operation principle of the cathode plate transfer trolley, the scissors mechanism is combined with the screw lifting transmission for the first time to realize the stable lifting of the cathode plate; the transfer trolley automatically transfers the cathode plate on the plate rack to the zinc stripper in the side-bay for zinc stripping and brushing operation in three times; after that, the transfer trolley automatically transfers the cathode plate to the plate rack butted with the crane in three times, so as to realize the automatic transfer of the cathode plate of the zinc stripping system and the flexible connection between the side-bay zinc stripping system and the cathode plate crane. The transfer trolley has been put into production and application in the side-bay zinc stripping production line, and achieved good application results.

Key words: cathode plate; transfer equipment; zinc stripper



(上接第 32 页)

Modeling and Transient Dynamics Analysis of Zinc Stripping Process of Intelligent Zinc Stripping Machine

ZHANG Zhi-guo, JIANG Zhi, WANG Yong, JIANG Yong, GUO Xin

Abstract: This paper takes the intelligent zinc stripping machine developed by Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy as the research object, analyzes the basic structure and stripping process of zinc slab, establishes the simulation model of zinc stripping process, as well as simulates and analyzes its transient dynamic characteristics. The variation laws of stripping load and tool stroke of single principal stress cohesion model and mixed cohesion model are obtained respectively, which provides theoretical reference and technical support for the optimization and intelligent control of zinc stripping process of the intelligent zinc stripping machine. This method has broad application prospects in engineering practice.

Key words: intelligent zinc stripping machine; stripping of zinc slab; transient dynamics

