

微细与超细难选矿泥 射流流膜离心分选法

吕永信 著



冶金工业出版社

微细与超细难选矿泥 射流流膜离心分选法

吕永信 著

冶金工业出版社

序 言

针对国内外重选厂大量 $-19\mu\text{m}$ 难选矿泥和 $-10\mu\text{m}$ 废弃矿泥大量流失金属而亟待回收的迫切要求出发,作者于1971年开创了微细和超细物料连续排矿射流流膜离心分选这一崭新研究领域。二十多年来,作者一直致力于这一领域的研究和探索,突破几十年来传统的通过附加各种剪切强化拜格诺(Bagnold)效应以强化粒群垂向分选富集作用的方法的局限性,引入高压水射流逆流冲击产生具有流膜跳汰分选功能的法向脉动力组成全新的复合力场,排矿射流流膜离心分选过程(Injection-Flowing Film Centrifugation for Separating Minerals of Fine and Ultrafine Sizes, IFFC),成功建立了射流流膜离心分选理论,独创发明了用于射流流膜离心分选的新设备——SL型连续排矿射流离心选矿机,并做了大量的实践检验工作。射流流膜离心分选理论1987年通过部级评审,被誉为流膜分选理论上的新创举。SL型连续排矿射流离心选矿机1989年通过部级技术鉴定,被誉为重选技术的一项重大突破,处于国际领先水平,获得国家发明专利。

实践表明,射流流膜离心分选适于 $-74\mu\text{m}$ 粗粒、细粒及超细粒(下限 $1\mu\text{m}$)矿泥分级入选或直接混合入选,并能获得令人满意的选别指标,对国内外广为流失及废弃的微细与超细难选矿泥中金属资源有效再利用具有重大经济意义和普遍推广应用价值,目前正在推广应用之中。让广大选矿工作者认识和了解这项新的科学技术成果,作者特撰此书作系统全面介绍。

在作者进行射流流膜离心分选这项课题的长期研究过程

中，得到了有色金属工业总公司科技局、北京矿冶研究总院及大厂矿务局领导的热情关怀和大力支持；邵玉珍同志由始至终地协助作者进行了科研试验；选矿机械专家杜懋德同志由始至终密切合作完成了机械设计；选矿专家罗醒民同志及以他为首的大厂矿务局专家由始至终密切合作完成了机组工业实验，特别是大厂有色金属研究设计院选矿室主任黎全同志作为得力的合作助手，由始至终地坚持了全部现场实验工作；北京矿冶研究总院选矿室副主任任翔同志由始至终地参加了SL-1200型射流离心选矿机的研制设计及其工业应用工作。

所有合作者的智慧和劳动结晶都是组成本书的宝贵源泉。作者以深切感激之情将这本小书献给亲密合作的战友们，并感谢所有热情关怀、大力支持和参与工作的同志们。

作者

于北京矿冶研究总院

1994年7月

目 录

第一篇 绪 论	(1)
第二篇 分选理论	(8)
一、离心流膜选矿的发展	(8)
(一) 复合力场发展的必然性	(8)
(二) 重选过程离心化的发展局限性	(9)
(三) 小结	(21)
二、射流流膜离心选矿过程分选原理	(21)
(一) 射流逆坡逆流冲击粒群动平衡方程	(22)
(二) 射流逆流冲击粒群的松散与悬浮	(26)
(三) 沉积粒群瞬时脉动松散度的控制	(29)
(四) 强化微粒回收的动态水力堰效应	(31)
(五) 流膜跳汰与流膜分选联合富集规律	(34)
(六) 重矿物逆坡上行全过程连续排矿	(42)
(七) 小结	(47)
第三篇 分选设备	(48)
一、设计概论	(48)
(一) 命名依据	(48)
(二) 主体结构	(43)
(三) 设计准则	(49)
二、回转机构	(50)
(一) 转鼓系列	(50)
(二) 转鼓结构	(52)
(三) 主电机功率	(55)

(四) 主轴直径	(56)
三、射流机构	(57)
(一) 喷嘴	(58)
(二) 凸轮	(61)
(三) 二次净化器	(64)
(四) 稳压包	(66)
四、高压供水系统	(66)
(一) 一次净化器	(66)
(二) 气水分离器	(67)
(三) 升压泵	(68)
五、给矿给水系统	(68)
(一) 给矿	(68)
(二) 清洗水	(70)
(三) 时空关系	(70)
六、超前自控系统	(70)
(一) ZNCK-1型重量式浓度检测器	(71)
(二) 给矿负荷超前控制器	(74)
(三) 关键设备联锁	(76)
(四) 自控系统方框图	(77)
七、SL 型射流离心选矿机外貌图	(77)
第四篇 实践检验	(81)
一、初步测定	(81)
(一) 纵向流雷诺数 Re	(81)
(二) 纵向流膜厚度 H	(81)
(三) 动态水力堰流态	(82)
(四) 分选过程的动力学	(82)
二、 $-10\mu\text{m}$ 云南超细锡石氧化矿泥分选	(84)

(一) 分选对象	(84)
(二) 实验结果	(86)
三、 $-10\mu\text{m}$ 大厂超细锡石硫化矿泥分选	(90)
(一) 分选对象	(90)
(二) 小型试验结果	(91)
(三) 工业试验结果	(92)
(四) 综合分选曲线	(96)
(五) 小结	(97)
四、 $-74\mu\text{m}$ 云锡细粒锡石氧化矿泥分选	(98)
(一) $-30\mu\text{m}$ 黄茅山老尾矿锡石氧化矿泥分选 ...	(98)
(二) $-74\mu\text{m}$ 黄茅山老尾矿锡石氧化矿泥分选	(100)
五、 $-74\mu\text{m}$ 大厂细粒锡石硫化矿泥分选	(104)
(一) $-74\mu\text{m}$ 长坡锡石硫化矿泥分选	(104)
(二) $-74+10\mu\text{m}$ 长坡锡石硫化矿泥分选	(107)
(三) $-74+10\mu\text{m}$ 车河锡石硫化矿泥分选	(108)
六、 $-74\mu\text{m}$ 西华山细粒钨矿泥分选	(110)
(一) 分选对象	(110)
(二) 分选结果	(111)
七、焦家金矿浮选尾矿泥分选	(113)
(一) 分选对象	(113)
(二) 分选结果	(114)
八、包钢选厂稀土摇床尾矿泥分选	(114)
九、铌钽矿泥分选	(116)
十、其他矿泥分选	(117)
结语	(118)
参考文献	(121)

第一篇 绪 论

流膜分选虽是古老的矿物重选工艺,但是,由于其简便、低耗和无环境污染的特点,它仍是现代选矿工业中一种重要的细泥选别方法,并获得了不断发展,尤其在应用复合力场方面。

一般重选厂 $-19\mu\text{m}$ 粒级属于难选矿泥,而 $-10\mu\text{m}$ 粒级则脱泥废弃^[1,2]。据估计^[3]世界生产中以难选矿泥流失的锡占总量三分之一,而钨占五分之一,是扩大金属回收的潜在资源。

从发展历史上看,流膜重选的发展过程主要是在限定的纵向流雷诺数小于500条件下探求强化流膜拜格诺(Bagonld)效应(法向剪切分散压)新方法的过程。长期以来,国内外所采用的附加单向、往复、振摆^[31]及轨道剪切^[29,30],都是通过强化流膜的上述效应来提高粒群的垂向分层富集效果。尽管有人^[32]提出,改进摇床床面也是提高细粒回收的一种有效途径,但据计算^[26],翻床在正常情况下锡石回收粒度下限只为 $4.8\mu\text{m}$ 。

显然,对微细与超细难选矿泥流膜分选而言,建立有效的复合力场,强化分选过程,提高分选效能,降低矿物回收粒度下限和改善连续排矿效能是基本研究方向。作为复合力场的一种有效作用力,应用离心力越来越被认为是一种重要发展途径,甚至认为^[33]离心选矿机将是下一代有效的重选设备。实际上近三十年来,中国在发展和应用离心力流膜分选技术上早已起步在前。云南锡业公司于六十年代研制成功的间断排矿作业卧式离心选矿机,实质上是离心溜槽^[4](参见图

2), 是最先用于生产上的薄流膜离心分选设备, 广泛用于锡钨铋钽铁矿等选厂细泥处理上。但据实际生产的查定^[5], 其对 $-19\mu\text{m}$ 矿泥分选效果较差, 锡回收率只有 $10\sim 30\%$, 大部分金属流失于尾矿中。二十多年来, 各高等院校、科研和生产部门曾对上述离心分选过程进行了比较系统的理论研究^[6~9], 并进行了多锥度、多转鼓和大型化结构设计, 使其单机处理效能有较大提高。然而, 由于对其分选过程没有进行根本性改造和创新, 因此, 有关其一切改型设计仍然存在 $-19\mu\text{m}$ 粒级矿物分选效率低、富集比不高和不能连续排矿等固有问题。该机即使作为一种脱泥设备, 由于脱去的细泥中含锡品位仍高达 $0.06\sim 0.08\%\text{Sn}^{[10]}$, 损失也较大。其中大部分锡石呈单体解离状态存在, 技术上仍有再回收的可能。不难推断, 欲使最终尾矿含锡降到 $0.01\sim 0.02\%\text{Sn}$ 水平, 则必须更多地回收 $-5\mu\text{m}$ 粒级中的锡石。这就必须大幅度提高离心转鼓转数或离心力强度。由于存在增加离心力强度同加重其精矿排矿难度之间的矛盾, 因此, 利用上述现有的间断作业离心溜槽实现上述目的, 实际上是不可能的; 必须组建全新的复合力场流膜离心分选过程。

然而作者认为, 解决微细与超细难选矿泥重选, 采用一般重选过程离心化并非可取的技术发展路线。例如, 在离心选矿机发展中, 固定溜槽离心化所产生的简单流膜离心分选过程(拟英文命名为 Flowing Film Centrifugaion, FFC)及离心溜槽, 由于难以分选超细矿粒和不能连续排矿等严重缺欠, 已妨碍其继续发展。在旋转轴方向上附加摇动剪切(包括差动摇动及正弦摇动), 借以强化拜格诺效应并实现摇动或刮取连续排矿的方案, 似乎比离心溜槽有所发展, 但是, 由摇床离心化所产生的摇动流膜离心分选过程(拟英文命名为

Shaking-Flowing Film Centrifugation, SFFC) 及离心摇床, 包括中国 SLY 型离心摇床^[11] (参见图 5) 及英国 MGS 复合重力分选机^[12] (参见图 6), 也只能适用于低离心力场 (6~10 倍重力场) 工作, 所以很难达到分选超细矿粒的预期目的。显然, 象强化重力场重选设备那样, 向转轴方向上附加多向剪切或轨道剪切来强化离心场中粒群垂向分层则更是很难实现的方案, 从而决定了近四十年来强化拜格诺效应的经典作法有相当的发展局限性。

因此, 作者从 1971 年开始, 全然放弃了历来通过附加各种剪切作用强化流膜拜格诺效应以强化重选粒群垂向分层的经典方法, 采用了直接向流膜引入垂向力 (法向脉动力) 的独特方案, 率先将高压水射流作为分选力引入流膜分选过程, 在理论上突破了“不允许对流膜进行强烈扰动”的旧概念, 改变了高压水射流冲击力单纯作为流膜破坏力的旧观点并首次用作为流膜分选的有效作用力, 巧妙地组建了高压水射流逆流强冲击力、离心沉降力和原流膜拜格诺力复合力场, 提出了新的射流流膜离心分选过程 (拟英文命名为 Injection-Flowing Film Centrifugation, IFFC), 发明了 SL 型微细物料连续排矿射流离心选矿机 (授权发明专利 CN85 1 02837B)^[13]; 在实践上排除了一切难题, 使高压水射流逆流逆坡冲击纵向流膜产生一系列特殊作用和功能: 射流冲击所产生的瞬时法向反作用力 (反冲力法向分力) 有效地强化粒群在强离心力场中的松散与悬浮, 而控制这一作用力的强度及作用时间又有效地控制沉积粒群的松散度; 其对纵向流的逆向推力, 首先在横向上形成水力堰, 在纵向上形成水力堰流态并产生动态水力堰效应, 使通常条件下难以回收的一些超细矿粒也得以沉积、选别和回收; 同时, 利用逆向推力沿纵

向流的逆坡移动又能在不影响流膜连续给矿和分选情况下将流膜底部堰内沉积的精矿逆坡排出机外，实现精矿与尾矿同时反方向连续排矿；特别是射流冲击的反冲力法向分力在沿纵向流逆坡移动时其在流膜中的瞬时冲击（脉动）作用又使全部分选表面产生一种特有的流膜跳汰功能，突出地改善了矿泥分选，从而，射流冲击力的引入在流膜三个空间方向上强化了离心分选过程^[14,15]。

具有上述射流流膜离心分选过程(IFFC)的SL型连续排矿射流离心选矿机可以在任何离心力强度条件下连续工作，并适用于 $-74\mu\text{m}$ 粗粒、细粒及超细粒矿泥分级入选或直接混合入选。在精矿富集比较高的情况下分选回收锡石粒度下限可达 $1\mu\text{m}$ 。

理论研究^[14]表明，在给定条件下，射流流膜离心分选过程中射流冲击区的临界悬浮锡石粒径 d'_{α} 为 $15\mu\text{m}$ ，“水力堰”高度上最小可回收的极限悬浮锡石粒径 d'_b 为 $1.81\mu\text{m}$ ，亦即本过程的流膜跳汰粒级有效范围为 $-15+1.81\mu\text{m}$ ，锡石回收粒度下限为 $1.81\mu\text{m}$ 。应用作者所设计的SL300型连续排矿射流离心选矿机分选废弃的云锡 $-10\mu\text{m}$ 锡石氧化铁锰-硅酸盐矿泥（品位 $0.082\%\text{Sn}$ ，处理量为 110kg/h ）^[16]及大厂 $-10\mu\text{m}$ 锡石硫化铁-碳酸盐矿泥（品位 $0.41\%\text{Sn}$ ，处理量为 72kg/h ）^[17]试验结果表明，在精矿富集比 $12\sim 20$ 条件下各粒级锡石回收率为：

$-17+5\mu\text{m}$	$-5+3\mu\text{m}$	$-3+0.5\mu\text{m}$
84~92%	66~75%	12~29%

显然，这些实测数值与理论值基本吻合，回收锡石粒度下限可达 $1\mu\text{m}$ 。

1987年上半年，在部级指定的“射流流膜离心分选原

理”理论评审会^[18]上，与会专家一致认为，上述理论突破了 $-10\mu\text{m}$ 矿泥不能重选的“禁区”，是一项新创举，在重选技术上是一项重大突破，处于国际领先水平，具有重要理论意义和推广应用价值。同时，有色金属工业总公司推荐授予这项理论成果以国家自然科学奖。

1988~1989 年对放大的 SL-600 型机种，同广西大厂矿务局专家合作，在长坡选厂进行了分选 $-10\mu\text{m}$ 废弃锡石矿泥的工业试验^[19]及配套机组试生产调试^[20]，并包括自行研制的 ZNCK-1 型重量式矿浆浓度及负荷超前自控系统^[21,22]（申请专利号：89101648），均取得了满意成功^[23,24]，全部通过了部级技术鉴定^[25]。鉴定认为，SL 型射流离心选矿机分选回收 $-10\mu\text{m}$ 超细粒锡石是一项重大突破，处于国际领先地位。其生产及控制的配套系统已具备投产条件。唯对转鼓耐磨情况需长期考查。

1990~1992 年继续同大厂矿务局专家密切合作，对六种不同材质转鼓包括合金铝、铸钢与超高分子量聚乙烯改性工程塑料等三种转鼓，以及三种内表面处理转鼓进行了工业试验又得出了耐磨试验结论：轻质（ $1\text{g}/\text{cm}^3$ ）超高分子量聚乙烯（分子量 300 万以上摩尔）改性工程塑料（宜兴塑料设备厂，标号 FUH）最为耐磨，可用两年，能耗最小；铸钢次之，也能用一年左右，但其密度（ $7.9\text{g}/\text{cm}^3$ ）较大，能耗偏高。至于合金铝或铸钢转鼓内面热喷涂合金粉（碳化钨）的方案，由于其粘接性不佳而被否定。采用轻性转鼓外加可拆卸有机物如聚胺脂耐磨衬套的方案较为可取。

SL-600 型配套机组生产系统亦适于直接分选 $-74\mu\text{m}$ 较粗粒级矿泥并取得良好结果^[13,14]，尤其是分选处理 $-74+10\mu\text{m}$ 浮锡给矿的结果更好，因而确定，1994 年在车河选厂推

广应用 SL-1200 型大型射流离心选矿机^[50]。

所设计的 SL 型微细物料连续排矿射流离心选矿机结构简图如图 1，全部系列产品技术性能如表 1。唯 SL1800 型及 SL2400 型两种大型工业规格属于远期发展机型，将随工业应用需要而逐步发展。

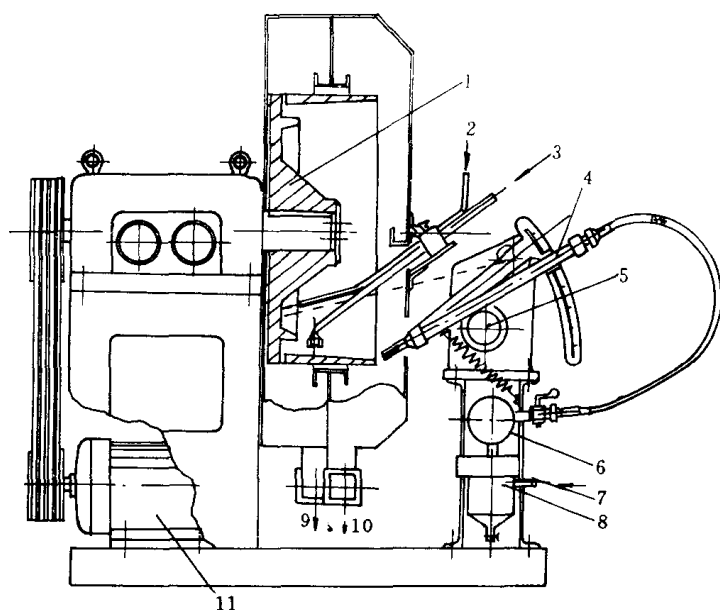


图 1 SL 型连续排矿射流离心选矿机结构简图

1—转鼓；2—低压水；3—给矿；4—射流喷管；5—低速电机轴心；
6—稳压包；7—高压水；8—二次净化器；9—精矿；10—尾矿；11—主电动机

表 1 表明，SL 型微细物料连续排矿射流离心选矿机具有大型化的经济性和发展前途；其合理放大显示有降低水电能耗和提高单机效能的内在规律。如果使用密度为 $1\text{g}/\text{cm}^3$ 左右的轻质耐磨粒磨损的超高分子量 (300 万以上摩尔) 聚乙烯

改性工程塑料作为转鼓或其内衬，则可成倍地降低该机的单位吨矿泥的水电消耗指标，使其可能成为最经济有效的难选矿泥离心分选设备。再加上该机又是一种可经粗精选简易流程即可得出所需产品的设备，可推广应用于当前重选生产中大量堆积和流失的各种金属矿物微细及超细难选矿泥的二次资源再分选利用的工业上，为企业大幅度提高经济效益。

表 1 SL 型射流离心选矿机

规 格		SL-300	SL-600	SL-1200 I	SL-1200 II	SL-1800	SL-2400
转鼓内径	mm	300	600	1200	1200	1800	2400
转鼓有效长度	mm	150	260	330	520	800	1050
离心力强度(可调)		-1500	-660	-330	-187	-111	-83
射流因素(可调):							
水 压	MPa	-1.5	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0
倾 角	°	-37	-37	-37	-37	-37	-37
摆 次	cps	0~2	0~2	0~2	0~2	0~2	0~2
电机功率(2台)	kW	1.5	4.75	11.75	19.25	37.75	55.75
-10 μ m 泥处理量	t/h	0.11	0.43	1~2	2~4	6~8	10~12

微细及超细难选矿泥的射流流膜离心分选方法是中国独创的一种复合力场流膜连续离心分选方法，是一种开拓性科研成果，有关所建立的分选理论和分选技术尚需不断深化和发展。

第二篇 分选理论

一、离心流膜选矿的发展

(一) 复合力场发展的必然性

众所周知, 在流膜分选过程中, 为保证细粒矿物的有效回收, 其纵向流的雷诺数 Re 不能过大, 必须限定^[26]在 500 以下, 即

$$Re = \rho \bar{U}_x H / \mu < 500 \quad (1)$$

式中 ρ ——介质密度;

$\bar{U}_x$ ——平均纵向流速;

H ——流膜厚度;

μ ——介质动力粘度。

从而, 由纵向流剪切 (dU_x/dh) 所产生的同重力方向相反并垂直于上述剪切的拜格诺力^[27]也被限定在较低的水平上。因此, 单靠纵向流液流剪切 (拜格诺效应) 所产生的垂向力 (法向脉动力) 十分有限。这不仅不能满足非均匀相粒群的流膜分选要求, 而且还存在不能连续排矿问题, 影响其进一步发展。也有人认为 $Re < 1000$ 仍属层流区域^[28], 可应用于流膜分选。作者认为, 尽管细粒矿物分选时流膜纵向流雷诺数可在 500~1000 范围内应用^[9], 但对超细粒矿物而言以取值低于 300~500 为宜^[14, 24]。

早期, 一般溜槽及皮带溜槽上非光面槽底的铺设, 摇床上来复条的应用, 以及近 25 年来在皮带溜槽上附加轨道剪切^[29, 30]及振摆作用^[31], 都是通过强化流膜深部涡流作用或附加瞬时剪切来提高粒群的垂向分层富集效果。尽管有人提出, 改进摇床床面也是提高细粒回收的一种有效途径^[32], 但据计

算^[26]，翻床在正常情况下锡石回收粒度下限只为 $4.8\mu\text{m}$ 。同时，其设备的单位面积处理能力将随给矿粒度变细而迅速降低。至于设备多层化设计，也只是在原有分选水平上的量的发展，不具质的飞跃。显然，建立有效的复合力场，强化分选过程，提高分选效能，降低矿物回收粒度下限和改善连续排矿效能是流膜分选研究的基本方向。应用离心力越来越被认为是一种重要发展途径，甚至认为离心选矿机将是下一代有效的重选设备^[33]。实际上近三十年来，中国在发展和应用离心力流膜分选技术上早已起步在前，主要有三项发展成果：（1）六十年代初出现的离心溜槽^[4]，属于简单流膜离心分选过程（Flowing Film Centrifugation, FFC），其生产中一直存在分选富集比低和不能连续排出精矿问题；（2）六十年代末出现的离心摇床^[11]，是附加轴向差动摇动作用强化粒群分层及连续排出精矿的一种新发展，属于摇动流膜离心分选过程（Shaking-Flowing Film Centrifugation, SFFC）。但存在增加离心力强度同加重连续排矿难度之间的矛盾，以及与此有关的机件结构问题；（3）八十年代初出现的射流离心选矿机^[13,14]，是直接引入高压水射流逆流冲击力（法向脉动力）强化粒群垂向分层及实现连续排出精矿的全新发展，即作者将讨论的新过程，属于射流流膜离心分选过程（Injection-Flowing Film Centrifugation, IFFC），具有由水力与机械力有效结合所特有的流膜跳汰及淘洗联合分选功能^[15]，能够实现微细及超细粒矿物的有效分选。

八十年代后期，英国推出的复合重力分选机（MGS）^[12]，实质上是类似中国 SLY 型离心摇床的一种设备，二者处于同等的技术水平，但它比 SLY 型晚了二十年。

（二）重选过程离心化的发展局限性

迄今,重选过程离心化发展成果主要有两种流膜分选过程:一为中国云南锡业公司于六十年代初研制的间断排矿卧式离心选矿机——离心溜槽,是固定溜槽离心化的发展结果,属于简单流膜离心分选设备(FFC),存在分选效率低及不能连续排矿问题;另一为六十年代末中国长沙矿冶研究所研制的离心摇床以及八十年代末英国沃伦-斯普林实验室(Warren Spring Laboratory)同理查德-莫兹莱公司(Richard Mozley Limited)合作发展的复合重力分选机(MGS)。二者都是摇床离心化的发展结果,属于摇动流膜离心分选设备(SFFC)。都存在离心力强度过低及不能选别超细矿粒的问题。

1. 固定溜槽离心化发展

固定溜槽是一种最原始的重选工具,原本就存在分选效能低和间断作业的问题。将这一工具离心化发展为离心溜槽,必然带来其在重力场中所存在的固有问题。这种间断排矿作业离心溜槽—— $\phi 800 \times 600$ 卧式离心选矿机构造图如图 2^[4]。

尽管该设备已广泛用于我国锡钨铁矿细泥工业分选的脱泥作业上,但其单机间断作业同全系统表观连续条件在模拟实验上存在问题,使两者指标差距甚大^[34]。这主要表现在, $-19\mu\text{m}$ 矿泥中的锡石回收效果较差,回收率只有 10~30%,大部金属损失于尾矿中^[5],这已成为妨碍其继续发展的根本原因。

二十多年来,各高等院校、科研及生产部门曾对上述间断作业离心选矿机进行了比较系统的理论研究^[6~11],并进行了多锥度、多转鼓和大型化的结构改进设计^[35],使其单机处理能力有较大的提高。然而,由于对其分选过程没有根本性改造和创新,因此,其一切改进设计仍然存在原有问题。即