

风化壳淋积型稀土矿 化工冶金

池汝安 田 君◇著



科学出版社

www.sciencep.com

风化壳淋积型稀土矿 化工冶金

池汝安 田 君著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书包括了作者在国家自然科学基金、国家杰出青年科学基金和江西自然科学基金以及稀土同仁的国家重点攻关项目资助下,多年从事风化壳淋积型稀土矿基础研究和生产实践取得的主要创新成果。

本书分上下两篇共12章。上篇主要论述了风化壳淋积型稀土矿的成因、稀土矿石性质、稀土在矿石中的赋存状态、稀土与黏土矿物的关系、稀土在风化壳中的迁移富集与分馏及稀土配分的变化规律;下篇着重讨论了风化壳淋积型稀土矿浸取稀土的三代浸取工艺的理论基础和生产实践、风化壳淋积型稀土矿的产品质量控制及绿色浸取工艺的发展。

本书可供从事稀土生产、设计、研究和管理的工程技术人员以及高等院校有关专业的师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

风化壳淋积型稀土矿化工冶金/池汝安,田君著. —北京:科学出版社, 2006

ISBN 7-03-017830-0

I. 风… II. ①池… ②田… III. 风化壳矿床-淋滤矿床-稀土元素矿床-研究 IV. ①P611.2 ②P618.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第094222号

责任编辑:谢洪源 刘卓澄 / 责任校对:李奕莹

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006年9月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2006年9月第一次印刷 印张:20 1/4 插页:2

印数:1—1 300 字数:458 000

定价:80.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)



池汝安 男,“湖北省楚天学者计划”特聘教授,1959年出生,福建三明人。

1991 年在中南工业大学获得工学博士,同年进入清华大学做博士后。1993 年博士后出站并留在清华大学工作,1998 年留学加拿大艾伯塔大学,2003 年被聘为武汉工程大学教授。

池汝安博士一直从事稀土矿物加工和分离科学与技术基础研究,先后在国内外刊物上发表研究论文 150 余篇,被 SCI 和 EI 等四大检索论文收录 38 篇。1996 年与导师王淀佐院士合作出版专著《稀土选矿与提取技术》。1997 年获得国家杰出青年科学基金,“风化型稀土矿稀土的赋存状态、配分及提取工艺研究”,1996、2004、2005 年主持国家自然科学基金项目 3 项:“胶态相稀土的赋存机理及浸出动力学(59725408)”,“稀土在黏土矿物上吸附动力学及迁移的分馏效应(50474022)”,“高独居石混合稀土矿浮选动力学(50574069)”。2004 年“风化壳淋积型稀土矿化工冶金研究”获湖北省自然科学三等奖。





田君男，1963年出生，江西省瑞昌市人。现为江西省科学院应用化学研究所研究员。

1984年毕业于江西大学化学系有机化学专业，1998~2000年在清华大学做访问学者，2004年在武汉工程大学做高级访问学者。

二十多年来，一直从事稀土湿法冶金和稀土化学方面的研究，主持国家自然科学基金项目“风化壳淋积型稀土矿贫矿浸取动力学及传质研究”；还先后主持省级以上有关稀土研究项目18项；发表学术论文80余篇，其中SCI收录7篇；获省级自然科学奖1项。

谨以此书献给

**为中国稀土事业
默默奉献的同仁！**

序

20 世纪 70 年代以来，稀土元素的国家战略地位与日俱增，已成为现代工业新型材料中不可缺少的元素，被世界各国广泛应用于传统产业和高新技术产业领域。在信息、生物、新材料、新能源、空间和海洋六大新科技群中，稀土元素发挥着非常重要的作用，需求量日益增长。

我国稀土资源储量位居世界第一位，分为北方轻稀土矿和南方中重稀土矿。北方轻稀土矿包括内蒙古白云鄂博混合稀土矿、四川攀西地区和山东微山氟碳铈矿；南方中重稀土矿主要指分布在江西、广东、广西、福建和湖南等省（区）的风化壳淋积型稀土矿（原称离子吸附型稀土矿）。风化壳淋积型稀土矿为 1969 年在我国江西首次发现的一种新型外生稀土矿床。该矿床具有分布广、储量丰富、放射性低、稀土配分齐全、富含中重稀土元素等特点，中重稀土占世界储量的 80% 以上，是我国特有的稀土矿产资源。风化壳淋积型稀土矿的发现和利用是我国科技工作者对世界新材料科学与技术发展的一项重大贡献。

风化壳淋积型稀土矿世界罕见，国际上没有同类矿物采选的理论和技术可以借鉴。由于稀土以水合离子或羟基水合离子吸附在黏土矿物上，无法采用常规的选矿方法富集稀土。我国稀土科技工作者长期深入南方稀土矿山，在极其艰苦的条件下完成了风化壳淋积型稀土矿的勘察、开采、选矿、提取、分离等各项研究任务，为风化壳淋积型稀土矿的开发做出了不可磨灭的贡献。

风化壳淋积型稀土矿的发现不仅丰富了稀土元素的风化成矿、地球化学、无机化学和湿法冶金学理论，而且也为我国稀土工业发展创造了得天独厚的资源条件。目前，我国已成为唯一大量供应各种不同品级和规格的稀土产品的国家，是世界上最大的稀土产品供应国。我国稀土产业在世界上已处于主导和支配地位。

根据风化壳淋积型稀土矿中的稀土元素主要以水合离子或羟基水合离子形态存在的特点，我国科技工作者对稀土矿种进行了长期的科学研究与生产实践，采用含电解质的溶液进行离子交换浸取稀土的方法，形成了三代稀土提取工艺，取得了举世瞩目的科学成就。但出于国家保密等诸多因素，一直没有一部系统的关于风化壳淋积型稀土矿化工冶金方面的专著，此专著的出版填补了这一空白。

池汝安博士师从我国著名矿物加工专家王淀佐院士，自 1986 年开始从事风化壳淋积型稀土矿的研究。他先后承担了有关稀土化工冶金方面的国家自然科学基金项目 1 项，其中 1 项为 1997 年度国家杰出青年科学基金项目。田君研究员长期以来从事风化壳淋积型稀土矿提取工艺研究，并主持了“风化壳淋积型稀土矿（50664004）”国家自然科学基金一项。他们长期合作，坚持不懈，在稀土化工冶金工作中取得了丰硕的成果，并从稀土地球化学和矿物学角度论述了风化壳淋积型稀土矿成矿机理及稀土在风化

壳中的迁移富集与分馏规律；从稀土湿法冶金学阐明了风化壳淋积型稀土矿选矿提取理论和技术，合作撰写了《风化壳淋积型稀土矿化工冶金》一书，以飨读者。这部专著的学术水平较高，其出版将对丰富稀土元素地球化学、无机化学和湿法冶金理论及综合利用稀土资源起到积极的推动作用。

稀土资源是我国的战略资源，稀土产业是我国的优势产业。对于风化壳淋积型稀土矿资源，关键在于如何进一步开发新的提取工艺和提高综合利用水平，这是我们稀土界同仁共同努力的方向和神圣的使命。借此机会，我们希望有更多的科技工作者继续总结经验，潜心钻研，勇于实践，开拓创新，为更合理地开发和利用风化壳淋积型稀土矿做出更大的贡献！

张国成 王彩凤

2006年5月25日

前 言

风化壳淋积型稀土矿（原称离子吸附型稀土矿）是 1969 年在我国江西首次发现的一种新型外生稀土矿。该矿具有分布广、储量丰富、放射性低、稀土配分齐全，富含中重稀土元素，其中的中稀土和重稀土占世界储量的 80% 以上，是我国特有的稀土矿产资源，也是世界上稀缺的矿种，广泛分布在我国南方的江西、福建、湖南、广东、广西等省（区）。

风化壳淋积型稀土矿发现三十多年来，国家投入了大量的人力和物力进行了成矿和找矿规律的基础研究和生产工艺的开发。我国许多科技工作者注入了大量的心血和付出了辛勤的劳动，对这种新稀土矿进行了长期的科学研究和生产实践，得出了在风化壳淋积型稀土矿中稀土元素主要以水合或羟基水合离子的形式吸附在黏土矿物上，可借助离子交换的理论和方法来浸取稀土，并相继开发出氯化钠池浸、硫酸铵池浸和硫酸铵原地浸取的三代浸取工艺，为工业利用风化壳淋积型稀土矿做出了巨大的贡献。但在过去由于国家保密等诸多因素，一直没有一部系统的关于风化壳淋积型稀土矿的专著，这与风化壳淋积型稀土矿的发展很不协调，为此我们想尽自己的一份力量，本着抛砖引玉的想法，把风化壳淋积型稀土矿的成矿理论和开采技术加以总结并介绍给读者。

全书分上下两篇共 12 章。上篇主要论述了风化壳淋积型稀土矿的成因、稀土矿石性质、稀土在矿石中的赋存状态、稀土与黏土矿物的关系、稀土在风化壳中的迁移富集与分馏及稀土配分的变化规律；下篇着重讨论了风化壳淋积型稀土矿浸取稀土的三代浸取工艺的理论基础和生产实践、风化壳淋积型稀土矿的产品质量控制及绿色浸取工艺的发展。本书的出版，无疑对丰富稀土元素地球化学、稀土元素无机化学和稀土湿法冶金理论与技术，以及提高风化壳淋积型稀土矿合理开发和综合利用水平都将起到非常积极的作用，而且也为稀土元素地球化学、稀土元素矿物矿床学、稀土矿物加工、稀土湿法冶金科技工作者和研究生及从事稀土生产的企业家提供了一本有价值的参考书。

本书在五项国家自然科学基金、其中一项国家杰出青年科学基金和两项江西自然科学基金以及两项国家重点攻关项目资助下，作者多年从事风化壳淋积型稀土矿研究取得的主要成果，同时也参考了大量同仁的研究成果。因此，本书的出版是全体风化壳淋积型稀土矿工作者集体智慧的结晶，因为这些研究成果浸透着几代稀土科技工作者辛勤劳动的汗水，在此向他们表示崇高的敬意和真诚的谢意！

本书的出版得益于国家发展和改革委员会工业司稀土处、武汉工程大学和江西省科学院的大力资助，并得到了科学出版社的大力支持，在此表示由衷的感谢！本书在撰写过程中得到了张国成院士、王彩凤处长、柯家骏研究员、何鸣鸿研究员、朱旺熹研究员等的热情鼓励和亲切关怀，并对全书提出了许多宝贵建议，在此对他们表示衷心感谢！此外，课题组的李中军、徐志高、刘敏、周芳、彭翠、黄凌云、徐源来、任娟、黄晓慧

和黄少伟研究生，对书稿的绘图和清样的校对做了大量而细致的工作，在此作者同样表示衷心的感谢。由于作者水平有限，虽然力求完美，但不妥和错误之处仍在所难免，恳请专家、读者批评指正。

池汝安 田 君

2006年5月

目 录

序 前言

上 篇

第 1 章 风化壳淋积型稀土矿概述	3
§ 1.1 风化壳淋积型稀土矿的发现	4
§ 1.2 风化壳淋积型稀土矿的命名	5
§ 1.3 风化壳淋积型稀土矿的分类	6
§ 1.3.1 风化壳淋积型稀土矿矿床特征	6
§ 1.3.2 风化壳淋积型稀土矿配分类型	7
§ 1.4 风化壳淋积型稀土矿分布	8
§ 1.5 风化壳淋积型稀土矿地位.....	11
§ 1.6 风化壳淋积型稀土矿保护.....	13
第 2 章 风化过程稀土元素地球化学	16
§ 2.1 原岩的风化作用.....	16
§ 2.2 风化过程中黏土矿物的生成和热力学解释.....	17
§ 2.3 稀土元素在风化壳体系中的迁移.....	18
§ 2.3.1 稀土元素在风化壳中的迁移形式	18
§ 2.3.2 影响迁移富集的因素	18
§ 2.4 稀土元素在风化壳淋积型稀土矿中的赋存状态.....	21
§ 2.5 铝在风化壳淋积型稀土矿中的赋存状态.....	25
§ 2.6 稀土风化壳成矿机理.....	28
§ 2.7 稀土风化壳生物成矿机理.....	30
§ 2.8 稀土风化壳形成的理论分析.....	31
第 3 章 风化壳淋积型稀土矿的矿床学	34
§ 3.1 风化壳淋积型稀土矿的矿床学.....	34
§ 3.1.1 风化壳淋积型稀土矿床的成矿原因	34
§ 3.1.2 风化壳淋积型稀土矿的矿床学属性	38
§ 3.1.3 风化壳淋积型稀土矿的矿床学分类	39
§ 3.1.4 风化壳淋积型稀土矿的矿床特征	42
§ 3.1.5 风化壳淋积型稀土矿的矿体特征	43
§ 3.2 风化壳淋积型稀土矿的矿石学.....	45

§ 3.2.1 矿石的物理性质	45
§ 3.2.2 矿石的物相组成和化学分析	47
§ 3.2.3 原矿矿石的稀土品位	49
§ 3.2.4 矿石的谱学特征和表面性质	49
§ 3.2.5 矿石的化学性质	55
§ 3.3 风化壳中稀土元素分布	57
§ 3.3.1 各类风化壳中的稀土元素分布	57
§ 3.3.2 风化过程中的稀土元素分异	61
§ 3.4 风化壳淋积型稀土矿典型矿床	65
§ 3.4.1 龙南重稀土矿床	65
§ 3.4.2 寻乌轻稀土矿床	66
§ 3.4.3 中钇富铈稀土矿床	67
第4章 稀土在黏土矿物中的吸附和迁移理论基础	70
§ 4.1 黏土矿物	70
§ 4.1.1 黏土矿物的分类	70
§ 4.1.2 黏土矿物结构——层状硅酸盐	71
§ 4.1.3 黏土矿物的提纯	72
§ 4.1.4 黏土矿物的性质	75
§ 4.1.5 稀土在黏土矿物上的吸附	81
§ 4.2 黏土矿物吸附稀土的量子化学理论计算	83
§ 4.2.1 量子化学计算	83
§ 4.2.2 量子化学计算结构模型	85
§ 4.2.3 黏土矿物对常见阳离子和稀土离子的吸附能力	87
§ 4.2.4 计算结果的应用	88
§ 4.3 黏土矿物吸附稀土离子的热力学和动力学分析	90
§ 4.3.1 稀土在黏土矿物上的吸附平衡热力学	90
§ 4.3.2 稀土在黏土矿物上的吸附平衡动力学	91
§ 4.3.3 基本物料的平衡	91
§ 4.3.4 稀土在黏土矿物上迁移富集的分馏效应	93
第5章 风化壳淋积型稀土矿的稀土元素配分特征	96
§ 5.1 风化壳与原岩稀土配分之间的关系	96
§ 5.2 风化壳稀土与离子相稀土配分之间的关系	97
§ 5.3 稀土配分随矿体深度的变化规律	97
§ 5.4 风化壳重稀土矿的形成	98
§ 5.4.1 重稀土母岩风化产出重稀土矿床	99
§ 5.4.2 轻稀土配分型母岩形成重稀土矿床	99
§ 5.4.3 重稀土元素富集的过程	100
§ 5.5 离子相稀土配分的相关关系	100

§ 5.5.1 稀土配分相关分析数学模型	101
§ 5.5.2 稀土配分相关分析结果与讨论	102
§ 5.6 稀土矿稀土配分分类	105
§ 5.7 稀土配分计算混合稀土化合物的化学式量	106
§ 5.8 风化壳淋积型稀土矿中离子相稀土配分的四大效应	108
§ 5.8.1 稀土配分的铈亏效应	108
§ 5.8.2 稀土配分的富铈效应	110
§ 5.8.3 稀土配分的分馏效应	110
§ 5.8.4 稀土配分的钇断效应	111

下 篇

第 6 章 风化壳淋积型稀土矿的稀土浸取理论基础	115
§ 6.1 风化壳淋积型稀土矿浸取化学基础	115
§ 6.1.1 风化壳淋积型稀土矿浸取化学反应	115
§ 6.1.2 浸取剂类别对稀土矿浸取的影响	117
§ 6.1.3 浸取剂溶液 pH 值对稀土矿浸取的影响	117
§ 6.1.4 浸取剂浓度对稀土矿浸取的影响	118
§ 6.1.5 浸取方式对稀土矿浸取的影响	120
§ 6.1.6 风化壳淋积型稀土矿浸取化学反应可逆性	120
§ 6.2 风化壳淋积型稀土矿浸取水动力学	121
§ 6.2.1 不同稀土矿类型的渗透率与孔隙率关系	121
§ 6.2.2 不同矿石粒径的渗透率与孔隙率关系	122
§ 6.2.3 渗透率与矿石平均粒径关系	123
§ 6.2.4 浸取剂浓度对渗透率的影响	124
§ 6.2.5 浸取剂种类对渗透率的影响	124
§ 6.3 风化壳淋积型稀土矿浸取动力学	125
§ 6.3.1 风化壳淋积型稀土矿浸取过程及数学模型	125
§ 6.3.2 风化壳淋积型稀土矿浸取动力学实验装置及实验方法	127
§ 6.3.3 温度对稀土浸取的影响	127
§ 6.3.4 稀土浸取动力学方程	128
§ 6.3.5 稀土浸取表观活化能	128
§ 6.3.6 浸取剂浓度对稀土浸取动力学的影响	129
§ 6.3.7 搅拌强度对稀土浸取动力学的影响	130
§ 6.3.8 矿石粒度对稀土浸取动力学的影响	130
§ 6.4 风化壳淋积型稀土矿浸取传质过程	132
§ 6.4.1 浸取流速与理论塔板高度的关系	132
§ 6.4.2 浸取剂浓度对理论塔板高度的影响	134
§ 6.4.3 矿石粒度对理论塔板高度的影响	135

§ 6.5 风化壳淋积型稀土矿浸取选择性	137
§ 6.5.1 杂质浸取行为	137
§ 6.5.2 抑杂浸取	138
第7章 风化壳淋积型稀土矿的稀土浸取工艺 (一)	142
§ 7.1 第一代浸取工艺	142
§ 7.1.1 风化壳淋积型稀土矿氯化钠桶浸工艺	142
§ 7.1.2 风化壳淋积型稀土矿氯化钠池浸工艺	143
§ 7.2 第二代浸取工艺	146
§ 7.2.1 风化壳淋积型稀土矿硫酸铵池浸工艺	147
§ 7.2.2 风化壳淋积型稀土矿连续水平真空带式过滤机浸取工艺	148
§ 7.2.3 风化壳淋积型稀土矿螺旋压滤机浸取工艺	152
§ 7.2.4 风化壳淋积型稀土矿田菁胶强化浸取工艺	152
§ 7.2.5 风化壳淋积型稀土矿采冶机械化	154
第8章 风化壳淋积型稀土矿的稀土浸取工艺 (二)	157
§ 8.1 第三代浸取工艺——原地浸取工艺	157
§ 8.1.1 风化壳淋积型稀土矿原地浸取的理论基础	158
§ 8.1.2 风化壳淋积型稀土矿原地浸取技术	160
§ 8.1.3 风化壳淋积型稀土矿原地浸取数学模型	169
§ 8.1.4 风化壳淋积型稀土矿原地浸取工艺和工程	174
§ 8.1.5 风化壳淋积型稀土矿原地浸矿实践	175
§ 8.2 风化壳淋积型稀土矿的其他浸取工艺	177
§ 8.2.1 风化壳淋积型稀土矿控速淋浸新工艺	177
§ 8.2.2 风化壳淋积型稀土矿堆浸新工艺	178
§ 8.2.3 风化壳淋积型稀土矿多级搅拌浸取-洗涤塔新工艺	180
§ 8.2.4 风化壳淋积型稀土矿柱浸新工艺	182
§ 8.2.5 风化壳淋积型稀土矿磁化浸取新工艺	183
§ 8.3 浸取工艺的发展趋势	184
第9章 浸取液沉淀法提取稀土工艺	185
§ 9.1 风化壳淋积型稀土矿浸取液特性	185
§ 9.2 浸取液的主要杂质	185
§ 9.3 风化壳淋积型稀土矿浸取液净化	186
§ 9.3.1 中和水解除杂	187
§ 9.3.2 硫化物沉淀除杂	190
§ 9.3.3 环烷酸萃取除杂	193
§ 9.4 浸取液沉淀稀土工艺	193
§ 9.4.1 浸取液草酸沉淀稀土工艺	193
§ 9.4.2 浸取液碳酸沉淀稀土工艺	212
§ 9.4.3 沉淀-浮选法从浸取液提取稀土工艺	220

第 10 章 浸取液无沉淀法提取稀土工艺	230
§ 10.1 浸取液萃取稀土工艺	230
§ 10.1.1 萃取剂	230
§ 10.1.2 萃取器	233
§ 10.1.3 串级萃取提取工艺	236
§ 10.1.4 萃取分组工艺	238
§ 10.1.5 离心萃取工艺	241
§ 10.2 浸取液离子交换法富集稀土	245
§ 10.2.1 用离子交换树脂从矿石浸取液中吸附稀土	245
§ 10.2.2 阳离子交换纤维直接分组分分离稀土工艺	248
§ 10.2.3 用蛭石从低浓度稀土浸取液中吸附稀土离子	248
§ 10.3 浸取液液膜富集稀土工艺	250
§ 10.3.1 乳状液膜法	251
§ 10.3.2 支撑液膜萃取法	254
§ 10.3.3 静电式准液膜法	257
§ 10.3.4 内耦合萃反交替法	259
§ 10.4 浸取液提取工艺发展趋势	261
第 11 章 风化壳淋积型稀土矿产品质量控制	262
§ 11.1 风化壳淋积型稀土矿产品质量	262
§ 11.2 风化壳淋积型稀土矿产品化学成分控制	263
§ 11.2.1 生产操作对风化壳淋积型稀土矿产品质量控制	263
§ 11.2.2 浸取剂对风化壳淋积型稀土矿产品中稀土纯度的影响	263
§ 11.2.3 浸取剂溶液 pH 值对风化壳淋积型稀土矿产品中稀土纯度的影响	266
§ 11.2.4 抑杂剂对风化壳淋积型稀土矿产品中稀土纯度的影响	266
§ 11.2.5 浸取液净化与风化壳淋积型稀土矿产品中稀土纯度关系	267
§ 11.2.6 浸取液沉淀控制与风化壳淋积型稀土矿产品中稀土纯度	267
§ 11.2.7 风化壳淋积型稀土矿氯化稀土产品化学成分控制	269
§ 11.3 风化壳淋积型稀土矿产品物性控制	269
§ 11.3.1 风化壳淋积型稀土矿氧化稀土产品物性控制	270
§ 11.3.2 风化壳淋积型稀土矿碳酸稀土产品物性控制	271
§ 11.3.3 风化壳淋积型稀土矿氯化稀土产品物性控制	271
§ 11.3.4 风化壳淋积型稀土矿产品放射性监测	272
第 12 章 风化壳淋积型稀土矿的绿色工艺发展	275
§ 12.1 风化壳淋积型稀土矿提取工艺现状	275
§ 12.1.1 风化壳淋积型稀土矿提取现行工艺	275
§ 12.1.2 风化壳淋积型稀土矿提取矿山现状	275
§ 12.1.3 风化壳淋积型稀土矿提取环境问题	276
§ 12.1.4 风化壳淋积型稀土矿开采措施	277

§ 12.2 风化壳淋积型稀土矿矿藏现状·····	277
§ 12.3 风化壳淋积型稀土矿的绿色工艺发展·····	278
§ 12.3.1 浸取剂和沉淀剂的无毒与无害化·····	278
§ 12.3.2 高效浸取技术的探索·····	279
§ 12.3.3 无沉淀提取工艺的开发·····	280
§ 12.3.4 尾矿的综合利用·····	281
§ 12.3.5 沉淀滤液或萃余液返回复浸·····	284
§ 12.3.6 被采区植被的保护与再造·····	285
§ 12.4 提取工艺绿色化学发展趋势·····	287
参考文献·····	288
附录·····	300
附录 1 稀土元素的原子量和部分化合物化学式量·····	300
附录 2 稀土分析常用标准一览表·····	301
附录 3 汉英稀土矿物词汇对照·····	303

上 篇