



© 主 编：徐帮学

稀土分离、制取工艺

优化设计与稀土材料应用新技术

实用手册

吉林音像出版社

目 录

第一篇 稀土总论

第一章 绪论	(3)
第一节 稀土元素概述	(3)
第二节 稀土元素发现史及稀土冶金简史	(5)
一、稀土元素发现史	(5)
二、稀土元素发展史	(7)
三、稀土工业发展史	(10)
第三节 我国稀土工业及其发展	(17)
一、中国稀土工业史略	(17)
二、1978 年以来中国稀土工业的重大进展	(20)
第二章 稀土元素及其主要化合物的性质	(26)
第一节 稀土元素电子层结构	(26)
一、稀土元素的电子层结构	(26)
二、稀土元素的原子半径和离子半径	(27)
第二节 稀土元素的物理性质	(29)
一、晶体结构	(29)
二、热学性质	(30)
三、热力学性质	(33)
四、电学性质	(34)
五、磁性能	(35)
第三节 稀土元素的化学性质	(36)
第四节 稀土元素的力学性质	(37)
一、硬度	(37)

二、强度与塑性	(39)
第五节 稀土化合物的物理化学性质	(40)
一、氧化物	(40)
二、氢氧化物	(45)
三、卤化物	(47)
四、氢化物	(56)
五、硫酸盐	(58)
六、硝酸盐	(59)
七、草酸盐	(61)
第三章 稀土矿物的组成、分类与特征	(65)
第一节 稀土矿物组成	(65)
一、稀土矿物	(65)
二、稀土的工业矿物组成及性质	(67)
第二节 稀土矿物分类	(71)
一、稀土矿物的晶体化学及其类别	(71)
二、稀土矿物分类	(72)
第三节 稀土工业矿物	(74)
一、钽铌酸盐和偏钽钽铌酸盐类矿物	(74)
二、氟碳酸盐类矿物	(87)
三、磷酸盐类矿物	(93)
四、硅酸盐类矿物	(103)
第四节 中国稀土矿物的某些矿物学特征	(113)
一、钽铌酸盐类矿物学特征	(114)
二、复碳酸盐类矿物学特征	(114)
三、氟碳酸盐类矿物学特征	(115)
四、磷酸盐和砷酸盐类矿物学特征	(115)
五、硅酸盐类矿物硅铍钇矿及兴安矿的矿物学关系	(116)
六、钛硅酸盐和锆硅酸盐类矿物学特征	(116)
第五节 中国稀土矿物成因产状	(118)
一、与花岗岩或碱性花岗岩有关的产状	(119)

二、与碱性岩有关的产状	(119)
三、与火成碳酸岩有关的产状	(119)
四、与卡岩有关的产状	(119)
五、与伟晶岩有关的产状	(120)
六、各类变质岩中的稀土矿物产状	(120)
七、热液成因的稀土矿物产状	(120)
八、沉积岩中的稀土矿物产状	(120)
九、稀土矿物的砂矿产状	(120)
十、花岗岩风化壳中的稀土矿物产状	(120)
第四章 稀土矿床的分布、特征与地质	(122)
第一节 稀土矿床分布	(122)
一、稀土矿床的地理分布	(122)
二、稀土的工业品位要求和稀土储量	(126)
三、世界稀土供需简况	(128)
第二节 稀土矿床的特征	(130)
一、重要的稀土工业矿物	(130)
二、稀土矿床伴生的有用矿产	(130)
三、稀土矿床的形成时代	(133)
四、稀土矿床类型	(134)
五、稀土的找矿与评价方法	(137)
第三节 典型稀土矿床的地质	(143)
一、中国矿床	(143)
二、国外矿床	(155)
第五章 稀土矿选矿	(170)
第一节 稀土矿选矿概述	(170)
一、选矿一般原理	(170)
二、浮游选矿一般原理	(171)
三、磁力选矿一般原理	(173)
四、电选一般原理	(175)
第二节 内生稀土矿选矿工艺	(179)

一、氟碳铈矿-独居石混合稀土矿的选矿及其分选工艺	(179)
二、氟碳铈矿选矿	(207)
三、独居石的选矿	(218)
四、硅铍钇矿的选矿	(220)
五、磷钇矿的选矿	(226)
第三节 外生稀土矿选矿工艺	(229)
一、南山海稀土矿选矿	(229)
二、雪山磷钇矿选矿	(234)
三、北海海滨砂矿精选工艺	(235)
四、海南海滨砂矿选矿	(236)
五、褐钇铌矿风化壳矿石的选矿	(240)
六、印度富海滨砂矿精选工艺	(243)
七、美国爱达荷州砂矿选矿	(244)
八、西澳砂矿公司卡佩尔(Capel)海滨砂矿选矿	(246)
九、澳大利亚西部钛公司海滨砂矿选矿	(247)
第四节 稀土精矿质量标准及其主要化学成分	(251)
一、稀土精矿质量标准	(251)
二、稀土精矿的主要化学成分	(254)
附录	(257)
第二篇 稀土的分解与分离新工艺	
第一章 稀土精矿的分解新工艺	(285)
第一节 稀土精矿分解新工艺概述	(285)
一、硫酸焙烧法处理包头稀土精矿	(285)
二、烧碱法处理包头稀土精矿	(292)
三、高温氯化法处理包头稀土精矿	(295)
四、磷钇矿的分解工艺	(298)
五、烧碱法处理独居石精矿	(300)
六、电加热碱法分解稀土精矿	(302)
七、碳酸钠焙烧法处理包头稀土精矿及其它方法	(303)

第二节 独居石精矿分解新工艺	(307)
一、烧碱液常压分解法	(307)
二、其它分解方法	(314)
第三节 氟碳铈矿精矿分解新工艺	(317)
一、HCl - NaOH 分解法	(317)
二、氧化焙烧 - 酸浸 - 制取氧化铈	(319)
三、氧化焙烧 - 酸浸 - 制取氧化铈	(321)
四、其它分解方法	(327)
第四节 混合型精矿分解新工艺	(338)
一、浓硫酸分解	(340)
二、烧碱分解法	(361)
三、其它分解方法	(379)
第五节 其它稀土矿物的分解	(388)
一、磷钇矿及含钨磷钇矿的处理	(388)
二、含稀土、铈钼、钽等氧化物矿物精矿的处理	(391)
三、从磷灰石中回收稀土	(395)
四、硅酸盐矿物的处理	(398)
第二章 稀土溶剂萃取分离新工艺	(400)
第一节 溶剂萃取简述	(400)
一、概 述	(400)
二、萃取的基本原理和影响因素	(408)
三、萃取设备	(421)
四、液膜萃取	(432)
第二节 稀土的中性磷(膦)氧萃取新工艺	(438)
一、TBP、P350 萃取机理及萃取性能	(438)
二、TBP、P ₃₅₀ 萃取分离稀土元素工艺	(462)
第三节 胺和季铵盐萃取新工艺	(466)
一、概述	(466)
二、伯胺 N1923 萃取稀土元素的性能和萃取机理	(467)

三、伯胺 N1923 萃取分离钍和提取混合稀土	(472)
四、季铵盐 N ₂₆₃ 萃取稀土元素的性能和机理	(476)
五、季铵盐萃取分离稀土元素	(479)
第四节 稀土的环烷酸及羧酸类萃取新工艺	(480)
一、环烷酸萃取体系	(480)
二、异构酸萃取体系	(492)
第五节 稀土的酸性磷(膦)萃取新工艺	(495)
一、P ₅₀₇ 的基本萃取参数和萃取机理	(495)
二、P ₅₀₇ 萃取分离稀土元素	(509)
第六节 稀土的络合剂萃取新工艺	(517)
一、络合剂存在下的萃取原理	(517)
二、络合剂存在下的稀土分离	(525)
第七节 稀土的酸性络合萃取新工艺	(530)
一、P ₂₀₄ 萃取机理和萃取性能	(530)
二、R ₂₀₄ 萃取分离单 - 稀土元素	(550)
第三章 离子交换分离新工艺	(554)
第一节 离子交换简述	(554)
一、概述	(554)
二、离子交换树脂结构、性质及常用树脂	(556)
三、离子交换平衡	(566)
四、淋洗剂与延缓离子	(569)
五、离子交换技术的应用	(572)
第二节 离子交换法分离稀土原理	(577)
一、交换反应	(577)
二、理论塔板当量高度的测定	(579)
三、影响分离的因素	(582)
四、产品回收率与交换床直径的关系及其换算表	(583)

第四章 稀土萃淋树脂色层分离新工艺	(587)
第一节 萃淋树脂的合成及种类	(587)
一、萃淋树脂的合成	(587)
二、萃淋树脂的种类	(587)
第二节 萃淋树脂色层法分离稀土原理	(588)
一、色层过程	(588)
二、保留值	(590)
三、谱带展宽	(592)
四、分离度与分离控制	(594)
第三节 萃淋树脂分离稀土操作技术	(596)
一、装柱方法和色层柱床的尺寸	(596)
二、柱参数的测定	(597)
三、分离程序	(598)
四、稀土元素的分离	(599)
第五章 稀土沉淀与结晶分离新工艺	(604)
第一节 沉淀过程	(604)
一、沉淀过程的热力学分析	(604)
二、沉淀物的形式与陈化	(614)
三、共沉淀机理及影响共沉淀的因素	(616)
四、分步沉淀法	(620)
第二节 结晶过程	(621)
一、过饱和溶液	(621)
二、成核	(623)
三、晶体的生长	(625)
四、分步结晶法	(626)
五、结晶设备	(629)
第三节 沉淀与结晶的物理化学性质	(630)
一、某些稀有金属盐类的溶解度	(631)
二、某些金属电极反应的标准电位	(632)
第四节 稀土的分步结晶法和分步沉淀法分离	(634)

一、分步结晶法	(634)
二、分步沉淀法	(635)
第六章 稀土液膜萃取分离新工艺	(636)
第一节 液膜分离技术的基本概念及原理	(636)
第二节 影响液膜萃取传质速率的因素	(639)
第三节 乳化液膜体系的技术操作	(639)
第七章 稀土的其它分离新工艺	(641)
第一节 稀土其它分离新工艺概述	(641)
第二节 铈的氧化法分离	(642)
一、空气氧化法	(643)
二、氯气氧化法	(646)
三、高锰酸钾氧化法	(647)
四、电解氧化法	(648)
五、双氧水氧化法	(654)
六、臭氧氧化法	(655)
七、硫酸钠法	(655)
第三节 铈的还原法分离	(655)
一、锌还原 - 硫酸钡共沉淀法	(657)
二、锌还原 - 碱度法	(658)
三、锌还原 - 离子交换法	(660)
四、锌还原 - 溶剂萃取法	(661)
五、光还原 - 沉淀法	(661)
六、电解还原	(662)
第四节 钐、铈、镨的汞齐还原分离	(666)
第五节 镨、铽氧化法分离	(669)
一、试剂氧化法分离富集镨、铽	(669)
二、电解氧化法分离镨铽	(670)
三、空气氧化法分离镨铽	(670)
第六节 铈的提取新工艺	(671)
一、铈的资源	(671)

二、钪的提取	(672)
附录	(677)
第三篇 稀土的制取与提纯新工艺	
第一章 稀土卤化物的制备	(703)
第一节 无水稀土氯化物的制备	(703)
一、含水稀土氯化物的真空脱水	(704)
二、无水稀土氯化物的制备	(719)
第二章 稀土熔盐电解制取新工艺	(724)
第一节 稀土熔盐电解制取概述	(724)
一、熔盐电解概述	(724)
二、熔盐的物理化学性质	(726)
三、熔盐参比电极	(756)
四、熔盐电极过程基础	(759)
五、熔盐电解	(768)
第二节 稀土熔盐的物理化学性质	(782)
一、稀土金属、氧化物和卤化物的热化学性质	(782)
二、常用的稀土熔盐相图	(784)
三、稀土熔盐密度	(791)
四、稀土熔盐电导率	(794)
五、稀土熔盐粘度	(797)
六、稀土熔盐蒸气压	(799)
七、稀土熔盐表面张力	(800)
八、稀土熔盐系中络离子	(802)
第三节 稀土熔盐电化学	(803)
一、稀土熔盐电池	(803)
二、稀土平衡电极电位、分解电压和析出电位	(804)
三、熔盐中稀土的扩散系数	(811)
四、稀土金属的电化学当量	(815)
五、稀土电解电流效率	(816)

六、稀土熔盐电解中电极过程研究方法	(817)
第四节 稀土氯化物熔盐体系的电解	(821)
一、电极过程及影响因素	(821)
二、电解工艺、设备和产品	(824)
三、影响电流效率的主要因素	(831)
四、稀土在氯化物熔盐中的溶解	(837)
第五节 稀土氧化物在氟化物熔盐体系中的电解	(840)
一、电极过程及影响因素	(840)
二、电解工艺、设备和产品	(843)
三、稀土氯化物电解与稀土氧化物-氟化物电解制取稀土金属工艺的比较	(852)
第三章 稀金属热还原制取新工艺	(855)
第一节 金属热还原概述	(855)
一、金属热还原过程的化学热力学原理	(855)
二、金属热还原法制备稀土金属的工艺特点	(857)
第二节 钙热还原法制取稀土金属	(861)
一、钙热还原稀土氯化物	(861)
二、钙热还原稀土氯化物	(866)
第三节 锂热还原法制取稀土金属	(868)
一、锂热还原稀土氯化物化学反应及工艺的优点	(868)
二、锂热还原氯化钇工艺和设备	(868)
第四节 还原-蒸馏法制备稀土金属	(870)
一、还原-蒸馏化学反应和方法的优点	(870)
二、还原-蒸馏工艺及设备	(872)
三、还原-蒸馏产品	(874)
第五节 中间合金法制备稀土金属	(875)
一、中间合金法化学反应和工艺特点	(875)
二、中间合金法工艺和设备	(876)
三、中间合金法产品纯度	(878)
第六节 稀土金属粉末的制取	(879)

一、概述	(879)
二、氢化-脱氢法制取稀土金属粉末	(880)
第四章 稀土中间合金制取新工艺	(885)
第一节 热还原法制取稀土中间合金概述	(885)
第二节 硅热还原法制取稀土硅铁合金的原理	(886)
一、硅热还原法制取稀土硅铁合金的反应热力学	(886)
二、硅热还原法制取稀土硅铁合金的反应机理	(893)
第三节 硅热还原法制取稀土硅铁合金的工艺	(895)
一、原料制备	(895)
二、冶炼设备与维护	(916)
三、生产工艺	(920)
四、硅热还原法制取稀土硅铁合金工艺的趋向	(927)
第四节 金属或碳热还原法制取稀土中间合金	(929)
一、铝及硅铝还原法	(929)
二、钙及碳化钙还原法	(935)
三、碳热还原法	(938)
四、稀土中间合金的粉化及防治措施	(949)
第五章 稀土金属提纯新工艺	(954)
第一节 真空熔炼法提纯稀土金属	(955)
第二节 真空蒸馏法提纯稀土金属	(956)
一、基本原理	(956)
二、真空蒸馏法提纯稀土金属	(959)
第三节 电迁移法提纯稀土金属	(965)
一、电迁移法基本原理	(966)
二、电迁移法提纯的设备	(967)
第四节 区域熔炼提纯稀土金属	(968)
第五节 熔盐电解精炼稀土金属	(970)
一、钇的电解精炼	(970)
二、钆的电解精炼	(971)
第六节 稀土单晶的制备	(971)

附录	(973)
第四篇 稀土的生产与环境保护	
第一章 稀土金属的加工	(995)
第一节 概述	(995)
一、稀土金属加工的方法	(995)
二、稀土金属加工的发展	(995)
第二节 稀土金属的晶体结构与机械性能	(996)
一、稀土金属的晶体结构	(996)
二、稀土金属的机械性能	(999)
第三节 稀土金属的加工方法	(1012)
一、挤压	(1012)
二、轧制	(1016)
三、拉伸	(1017)
四、热处理	(1018)
第四节 稀土金属的加工产品及生产工艺	(1020)
一、稀土金属的加工产品与用途	(1020)
二、稀土金属的加工特点与原则工艺流程	(1021)
三、稀土金属加工工艺实例	(1023)
第二章 稀土的成分分析	(1026)
第一节 稀土冶金中的化学分析方法	(1026)
一、稀土矿物原料的化学分析方法	(1026)
二、稀土冶金中间产品的分析方法	(1030)
第二节 X射线荧光光谱法分析稀土元素	(1034)
第三章 稀土生产中的职业卫生	(1042)
第一节 稀土毒性和卫生标准	(1042)
一、稀土的生产环境与卫生概述	(1042)
二、稀土的毒性	(1047)
三、稀土的职业危害和预防对策	(1052)
四、稀土的卫生标准	(1056)

第二节 稀土生产中的放射防护	(1057)
一、概述	(1057)
二、放射防护标准	(1058)
三、放射防护监测	(1061)
四、天然辐射源产生的照射	(1063)
五、稀土生产中的放射性分布	(1067)
六、稀土生产场所及环境的放射性水平	(1071)
第三节 稀土生产中的职业卫生	(1074)
一、概述	(1074)
二、稀土生产中职业卫生	(1075)
三、稀土生产企业的厂址选择、总图布置与厂房建筑的卫生要求	(1077)
四、稀土生产中的卫生防护措施	(1079)
第四章 稀土生产中的环境保护	(1085)
第一节 废渣的处置	(1085)
一、废渣的来源及种类	(1085)
二、废渣的特点	(1086)
三、废渣处置的卫生标准	(1086)
四、废渣的处置方法	(1087)
第二节 废水的处理	(1089)
一、废水的来源及种类	(1089)
二、废水排放的卫生标准	(1089)
三、废水处理方法及要求	(1090)
四、不同废水的处理	(1091)
第三节 废气的净化	(1095)
一、废气的来源及种类	(1095)
二、废气排放的卫生标准	(1095)
三、含尘废气的净化	(1097)
四、有害废气的净化	(1099)
附录	(1102)

第五篇 稀土新材料

第一章 稀土永磁材料	(1133)
第一节 稀土永磁材料概述	(1133)
一、稀土永磁材料的种类及性能	(1134)
二、稀土永磁材料的磁性起源与特征	(1140)
三、稀土永磁材料的特点及发展概况	(1141)
第二节 稀土永磁材料的结构	(1148)
一、稀土永磁材料的结构	(1148)
二、稀土永磁材料的晶体结构	(1149)
第三节 稀土钴永磁材料	(1152)
一、1:5 型稀土钴永磁材料	(1152)
二、2:17 型稀土钴永磁材料	(1153)
三、沉淀硬化 2:17 型永磁合金的矫顽力机理	(1157)
四、稀土元素对 RE-Co 永磁合金磁性的影响	(1158)
五、稀土钴粘结永磁体	(1158)
第四节 RE-Fe-B 系永磁材料	(1159)
一、Nd-Fe-B 系的相结构与磁特性	(1159)
二、RE-Fe-B 系多元合金	(1161)
三、Nd-Fe-B 系烧结永磁合金	(1163)
四、快淬 Nd-Fe-B 磁体	(1164)
五、粘结 Nd-Fe-B 永磁合金	(1165)
六、Pr-Fe-B 系永磁合金	(1166)
七、HDDR 工艺及其粉末的磁性	(1167)
八、Nd-Fe-B 永磁材料的研发趋势	(1169)
第五节 RE-Fe-N 系永磁材料	(1171)
一、N 对 $sm_2(Fe, M)_{17N_x}$ 稀土化合物的影响	(1171)
二、 $sm_2(Fe, M)_{17N_x}$ 稀土永磁的磁性能及磁化本质	(1172)
三、Sm-Fe-N 稀土永磁材料发展趋势	(1173)
第六节 纳米晶稀土永磁材料	(1174)

一、微磁学的理论研究	(1175)
二、双相纳米晶 NdFeB 磁体的相组成和磁性能	(1175)
三、熔体快淬制备技术	(1177)
四、纳米晶永磁合金的特点及性能	(1178)
第七节 稀土永磁材料的应用	(1180)
一、稀土永磁材料的应用领域及实例	(1180)
二、永磁磁路设计的基础	(1196)
第二章 稀土磁光材料	(1202)
第一节 稀土磁光材料的发展	(1202)
一、稀土磁光的来源和作用	(1202)
二、稀土磁光材料发展概况	(1203)
第二节 稀土石榴石磁光材料	(1207)
一、稀土石榴石的晶体结构和元素替代	(1207)
二、稀土石榴石单晶磁光材料	(1209)
三、稀土石榴石单晶薄膜磁光材料	(1213)
第三节 稀土-铁族金属非晶薄膜磁光材料	(1217)
一、稀土-铁族金属非晶薄膜的制备	(1218)
二、稀土-铁族金属非晶薄膜的磁性能	(1220)
三、稀土-铁族金属非晶薄膜的磁光和霍耳效应	(1221)
第四节 稀土磁光材料的应用和发展	(1222)
一、磁光器件发展概述	(1222)
二、磁光调制器	(1224)
三、磁光传感器	(1225)
四、磁光隔离器	(1226)
五、磁光光盘	(1227)
第三章 稀土磁致冷材料和磁泡材料	(1229)
第一节 磁致冷材料	(1229)
第二节 磁泡材料	(1235)
一、磁泡的构成	(1236)
二、磁泡材料的特性	(1236)

三、磁泡膜的制备	(1238)
四、稀土石榴石磁泡材料及器件	(1240)
第四章 稀土超磁致伸缩材料	(1242)
第一节 磁致伸缩的起源及唯象表述	(1242)
一、磁致伸缩机理简介	(1242)
二、稀土离子大磁致伸缩的起源	(1243)
三、磁致伸缩的唯象表述	(1244)
第二节 稀土超磁致伸缩材料的发展概况	(1245)
第三节 超磁致伸缩材料的性能	(1249)
一、晶体结构	(1249)
二、易磁化方向	(1249)
三、磁致伸缩	(1250)
四、磁化强度	(1253)
五、弹性和磁弹性能	(1253)
六、其它特性	(1256)
第四节 材料的制备和组织结构	(1256)
第五节 磁致伸缩器件的设计与应用	(1259)
第五章 稀土发光材料和激光材料	(1263)
第一节 稀土发光材料	(1263)
一、稀土发光材料的发展历史	(1264)
二、稀土发光材料发光的基本原理	(1265)
三、稀土阴极射线发光材料	(1272)
四、稀土光致发光材料	(1278)
五、电(场)致发光材料	(1286)
六、X射线稀土发光材料	(1288)
七、稀土闪烁体	(1292)
八、稀土上转换发光材料	(1296)
九、其他稀土功能发光材料	(1297)
十、稀土纳米发光材料	(1299)
十一、稀土发光材料的合成方法	(1301)