

## 中国红柱石资源与选矿研究现状

刘宇墨<sup>1</sup>, 纳瑜<sup>1</sup>, 李钊<sup>1</sup>, 陈敏<sup>2</sup>, 黄俊玮<sup>3</sup>, 代淑娟<sup>1,2</sup>, 李鹏程<sup>1</sup>

(1. 辽宁科技大学矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114000; 2. 辽宁科技大学化学工程学院, 辽宁 鞍山 114000; 3. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所 河南 郑州 450006)

**摘要:** 红柱石是一种天然无水铝硅酸盐矿物, 具有良好的耐高温性能, 是制备高级耐火材料和铝硅合金的重要原料, 在建材、陶瓷、航空等行业具有广泛应用。中国红柱石资源分布广、储量大, 但大部分天然红柱石原矿品位低、嵌布粒度不均匀, 需经选别富集后方可利用。红柱石选矿流程, 根据其原矿嵌布粒度, 可划分为粗粒级选矿与细粒级选矿。粗粒级红柱石选矿, 主要采用选择碎磨-筛分或重介质选矿工艺; 细粒级红柱石选矿, 则主要采用酸性浮选-强磁选工艺。本文介绍了红柱石矿物的晶体结构与理化性质, 详细分析总结了我国红柱石矿产资源分布与选别工艺研究现状, 并对其未来发展方向进行了合理展望。

**关键词:** 红柱石; 资源概况; 耐火材料; 选矿工艺

doi:10.12476/kczhly.202411140301

中图分类号: TD97 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 04-0048-09

**引用格式:** 刘宇墨, 纳瑜, 李钊, 等. 中国红柱石资源与选矿研究现状[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(4): 48-56+75.

LIU Yumo, NA Yu, LI Zhao, et al. Research status of andalusite resources and its beneficiation in china[J].

Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(4): 48-56+75.

红柱石属于天然富铝硅酸盐矿物, 具有良好的耐火耐高温性, 且硬度高、强度大、热膨胀率低<sup>[1-3]</sup>。作为最重要的耐火工业原材料之一, 红柱石被广泛应用于多种高温耐火材料和部件的工业生产中。中国天然红柱石资源较丰富, 主要分布在辽宁、新疆、河南、陕西、吉林等省区, 但原矿品位普遍较低<sup>[4]</sup>, 杂质含量较高, 必须先经过选矿工艺红柱石进行提纯富集, 以充分发挥其理化特性。不同矿区的红柱石, 其共伴生矿物种类、嵌布粒度、解离度等特性普遍存在较大差异, 直接影响其选矿工艺流程的确定。此外, 由于红柱石与部分脉石矿物天然分选性质差别较小, 提高了分选富集的难度<sup>[5]</sup>。而近年来, 随着高级耐火材料工业的快速发展, 对原料红柱石的纯度、粒度等品质要求越来越高, 这也使得全面提高红柱石

矿物的选矿指标成为了重中之重。

对红柱石矿石性质、中国资源分布特点及选矿工艺进行了系统总结与归纳, 并对目前存在的问题和未来发展方向进行了合理分析与展望, 以期为中国耐火材料原料领域的发展提供参考。

## 1 红柱石矿石资源与应用研究现状

## 1.1 晶体结构与理化性质

红柱石, 化学式为  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ , 主要化学组成为  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$ , 其理论含量分别为 62.92% 和 37.08%<sup>[6]</sup>, 含有少量的 FeO 或 MnO, 是典型的岛状结构铝硅酸盐矿物, 属于斜方晶系<sup>[7]</sup>, 与蓝晶石和矽线石为同质多相变体<sup>[8]</sup>, 统称为蓝晶石族矿物。红柱石集合体呈放射状或粒状<sup>[9]</sup>, 具有玻璃光泽, 因其宏观呈淡粉色或淡褐色柱状而得名<sup>[10]</sup>。

收稿日期: 2024-11-14

基金项目: 辽宁省教育厅项目 (JYTQN2023240)

作者简介: 刘宇墨 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向为矿物加工工程。

通信作者: 李钊 (1991-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为矿物加工工程。

红柱石晶体不含结晶水，摩氏硬度约为 6.0~7.5<sup>[11]</sup>。根据测试方法的不同，天然红柱石矿物零电点为 pH=7.2（电泳法）或 pH=7.8（流动法）。由于不同地区的红柱石矿石晶体内部含有的杂质成分不同，其相对密度存在微小差异，如内部含有炭心的红柱石空晶石的相对密度（3.12 g/cm<sup>3</sup>）小于晶体发育完好的透明红柱石的相对密度（3.25 g/cm<sup>3</sup>）<sup>[12]</sup>。红柱石矿物属于二轴晶负光性类矿物，呈负延性，2V=73~86°。透明红柱石的最高折射率在 1.649~1.650 之间，最小折射率在 1.635~1.637 之间，双折率在 0.012~0.015 之间<sup>[13]</sup>。

天然红柱石理化性质稳定，在 1 350~1 500 °C 下煅烧加热时体积只膨胀 3%~6%，转化成莫来石相<sup>[13]</sup>，且在冷却后不收缩，具有高温一次膨胀的特点，是一种不可逆的晶型转化。由于莫来石具有化学性质稳定、抗磨、耐化学腐蚀（不溶于氢氟酸）、耐骤冷骤热、机械强度大、抗热、抗渣性强等特点<sup>[1]</sup>，显示出较好的耐高温耐火性能，以其为原料生产的不定型耐火材料可广泛应用于航天、高炉等高温作业领域<sup>[14]</sup>。红柱石晶体结构见图 1<sup>[15]</sup>。

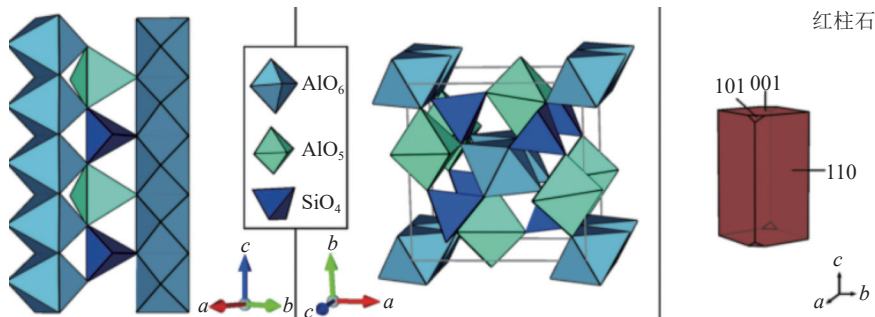


图 1 红柱石晶体结构  
Fig.1 Crystal structure of rhodochrosite

1.2 矿产资源分布概况

红柱石是变质作用的产物，其具有中高级区域变质的相关特点，大多分布于变质程度较高的地层中，产于变质高峰期，在稳压较高时形成。红柱石族矿床大多是原始富铝的泥质、粉砂质岩和中酸性凝灰岩经不同温度、压力下形成的矿床<sup>[16]</sup>，主要包括片岩型红柱石矿床、冲积型红柱石矿床、接触变质的角岩、板岩或片岩型红柱石矿床、粒岩型和硬绿泥石型红柱石矿床、热液蚀变次生石英岩型红柱石-刚玉矿床。中国目前已知的红柱石矿床类型以区域变质型和接触变质型为主，主要产于片岩和角岩中<sup>[17]</sup>。

全球红柱石矿物主要分布在南非、俄罗斯、法国、中国、加纳和美国等国家和地区<sup>[18]</sup>。据不

完全统计，截至目前，中国已探明的红柱石储量约为 3 350 ×10<sup>4</sup> t，居世界第三。按照矿物含量 12% 计算，中国红柱石矿物储量约为 360 ×10<sup>4</sup> t，属于相对稀缺的重要非金属矿产资源<sup>[17]</sup>。

中国最早在吉林省珲春市勘测到红柱石矿，随后在山西、北京等地也相继发现红柱石资源。20 世纪 80 年代初，因宝钢建设的需求，中国加大了对红柱石矿产资源的勘探开发力度<sup>[18]</sup>，目前已在河南、陕西、新疆、辽宁、吉林、四川、甘肃、青海等十余个省区发现红柱石矿区 50 余处。其中，河南西峡、陕西眉县、吉林珲春、新疆库尔勒、辽宁岫岩等地红柱石矿石品位较高，已形成规模化生产（表 1）。

表 1 中国主要的红柱石矿区及其矿源主要伴生矿物及其特点

| Table 1 China's major rhodochrosite mining areas and their sources of the main associated minerals and their characteristics |                     |                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------|
| 国内主要矿区                                                                                                                       | 主要成分                | 红柱石晶体形态                       |
| 河南西峡 <sup>[19]</sup>                                                                                                         | 红柱石变斑状黑云母、石英片岩、磁铁矿等 | 晶形较大且完好，斑晶内有黑色泥碳              |
| 陕西眉县 <sup>[20]</sup>                                                                                                         | 红柱石黑云母角岩、赤铁矿等       | 粗粒的斑晶状、雏晶状，石英、绢云母、钦铁矿等包裹在晶体内部 |
| 新疆霍拉沟 <sup>[21]</sup>                                                                                                        | 红柱石、石英、黑云母、铁矿物      | 呈自形-半自形柱状，存在云母包裹体             |
| 辽宁 <sup>[18]</sup>                                                                                                           | 红柱石、石英、黑云母、铁矿物      | 结晶体粒度较粗，含有碳质包裹体               |
| 内蒙古 <sup>[22]</sup>                                                                                                          | 红柱石、云母、石英、铁矿物       | 部分呈柱状，有少量碳质，较多石英              |

中国红柱石大多为致密原生矿，贫矿较多，杂质矿物主要以微粒包裹形式分布在红柱石晶体中<sup>[23]</sup>。根据原矿中红柱石嵌布粒度的不同，可将其分为粗粒级与细粒级两类：①粗粒级红柱石，主要产于河南西峡与陕西眉县，其嵌布粒度大都分布在 0~3 mm 范围内；②细粒级红柱石，主要产于新疆和东北等地，其嵌布粒度大都≤0.5 mm<sup>[24]</sup>。粗粒级红柱石普遍单体解离度较低，杂质含量偏高，易导致精矿品位降低；而细粒级红柱石虽然单体解离较高，但其精矿粒度普遍过低，难以满足高级耐火材料工业生产要求（1~3 mm 或更大的粒度）。

总体来看，中国红柱石矿产资源分布广泛，但富矿占比小，大多数原矿品位较低且嵌布粒度

细或粗细不均匀，这也导致目前大多红柱石精矿质量无法达到市场要求，难以直接应用于耐火材料领域<sup>[25]</sup>。因此，必须根据天然红柱石的特性选择适宜的选矿工艺和流程，以提高其精矿产品质量。

### 1.3 应用概况

红柱石应用普遍以耐火耐高温材料为主，这就要求其具有足够的耐火度。耐火度是指材料在高温作用下达到特定软化程度时的温度，表征了耐火材料抵抗高温作用的性能。根据耐火材料的耐火度可将耐火材料分为：普通耐火制品，耐火度 1 580~1 770 ℃；该级耐火制品，耐火度 1 770~2 000 ℃；特级耐火制品，耐火度在 2 000 ℃ 以上。而耐火度测定实验结果表明（表 2），红柱石选精矿可达到高级耐火材料的指标要求<sup>[26]</sup>。

表 2 红柱石精矿耐火性能测定结果

Table 2 Determination results of the refractory property of rhodochrosite concentrate

| 温度/℃  | 50     | 100   | 150   | 200   | 250   | 300   | 400   | 500  | 600   | 700   | 800   | 900   | 1 000 | 1 100 | 1 200 | 1 300 |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 线膨胀系数 | +0.02  | -0.06 | -0.03 | +0.01 | +0.05 | -0.03 | -0.04 | +0.1 | +0.19 | +0.27 | +0.36 | +0.44 | +0.53 | +0.63 | +0.73 | +0.83 |
| 耐火度/℃ | >1 790 |       |       |       |       |       |       |      |       |       |       |       |       |       |       |       |

红柱石在高温下独特的相变及显微结构变化，赋予了其较高的热机械性能、较好的抗蠕变性能以及良好的抗化学侵蚀性能等<sup>[26]</sup>。目前其主要作为耐火耐高温原料<sup>[27]</sup>，应用于金属冶金、玻璃工业、陶瓷、船舰、锅炉、石油加工以及化工等领域<sup>[22]</sup>，用以提高相关制品的使用寿命<sup>[22]</sup>。例如，在钢铁工业中，红柱石可作为高炉炉顶、热风炉中的炉墙、格子砖、炉顶、燃烧室<sup>[28]</sup>；作为移动式混铁炉中衬砌永久层和工作层的烧制品和不烧制品，以保证 SiO<sub>2</sub>-C 综合体的工作层获得良好效果；作为铁水罐车中的衬砌永久衬和工作衬；作为加热炉中炉墙和炉顶的可塑料和捣打料；在浇钢水口底座砖、喷吹塞头砖、搅拌风口砖和加热炉用砖烧嘴中作为防护耐火涂料和底水泥注料等<sup>[29-30]</sup>。由于红柱石在耐火耐高温性、抗化学侵蚀性和技术经济上的不可替代性，钢铁工业对其的需求量以每年 10% 的速度持续增长<sup>[31]</sup>。

硅铝合金的生产过程中必须使用硅酸铝团块，其主要由氧化铝原料制得。据统计，中国已探明的用以制备氧化铝的铝土矿储量仅占世界储量的 2.8%，氧化铝原料需要大量进口<sup>[32]</sup>。而红柱石矿物由于含铝量较高，以其为原料直接制备轻质硅铝合金<sup>[33-34]</sup>，能够大大缓解中国氧化铝供应紧

张的状况，且该种硅铝合金与其他种类相比，质量更轻、强度更高，可用来制作轻质型高温部件。

近年来，根据国家打造绿色矿山的相关政策要求，红柱石尾矿因其相对较高的含铝量且价格低廉，被开发并广泛应用于水泥铝质矫正，并取得了一定成果。同时由于其中含有大量石英，可用于制备陶瓷和蒸压灰砖<sup>[35-36]</sup>，有效提高材料强度的同时充分消耗矿山固废，降低环境污染隐患<sup>[2,37-38]</sup>。此外，红柱石还在珠宝<sup>[39-41]</sup>、涂料<sup>[42-43]</sup>等领域有所应用。

## 2 红柱石选矿研究现状

红柱石与脉石矿物的嵌布关系及解离程度是影响其选矿工艺的关键因素，可将其选矿流程划分为粗粒级选矿与细粒级选矿两大类，其中粗粒级选矿主要采用选择性碎磨-筛分工艺和重介质选矿工艺，细粒级选矿则主要采用酸性浮选-强磁选工艺。

### 2.1 粗粒级红柱石选矿

中国红柱石矿石多为斑状变晶结构，嵌布粒度粗、硬度较大、密度较高，而伴生矿物云母、石英、绿泥石、碳物质等则相对硬度小、性质脆。粗粒级红柱石，嵌布粒度一般为 1~3 mm，

主要产区为河南西峡、新疆库尔勒。

### 2.1.1 选择性碎磨-筛分

相比于伴生矿物，粗粒级红柱石硬度更大，且在脆性、嵌布粒度和形状等物理性质上均有明显差异，这使得在磨矿过程中，红柱石的粒度可基本保持不变，而绝大多数硬度较小的伴生矿物会碎解为细粒级，通过后续分级作业实现分离。因此，选择性碎磨-筛分是目前可较好实现粗粒级红柱石与细粒级脉石分选的选矿工艺流程

曾惠明<sup>[41]</sup>采用选择性磨矿-浮选-磁选的原则工艺流程处理某红柱石矿，在磨矿细度为-0.074 mm 72%时，进行筛分分析，发现 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 质量分数随原矿粒度的下降而下降，-0.084+0.059 mm粒级中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 占43.79%，而-0.025 mm粒级中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 仅占15.25%，说明红柱石由于其本身硬度较比其他伴生矿物大，集中在粗粒级的红柱石可以通过分级而富集出来。卢佳、任子杰等<sup>[42]</sup>为确定磨矿时间对预富集效果的影响，对比了某红柱石矿在碎磨2、4、6、8 min条件下的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 品位与回收率。结果表明，磨矿时间为4 min时，+0.063 mm粒级 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 回收率为40%左右，品位为34.50%左右；-0.074 mm粒级 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 回收率为19.50%左右，品位为19.70%左右，证明选择性碎磨可为后续筛分作业提供良好的条件，提高了预富集效果。为确定磨矿产品中红柱石和主要脉石矿物的分布情况，纪振明<sup>[44]</sup>对不同粒度红柱石矿中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2$ 的含量进行研究。结果表明，-0.038 5 mm粒度样品中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量 $\leq 20\%$ ，而 $\text{SiO}_2$ 含量 $\geq 55\%$ ，且-0.015 mm粒级的产率高达37.56%，采用筛分分级-预先脱泥的方法可去除 $\text{SiO}_2$ 含量高的脉石矿物从而提高后续选别流程的给矿品位。姚建云<sup>[12]</sup>在磨矿细度校核实验中，分别对不同磨矿时间条件下某红柱石粗选精矿中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的品位与回收率进行测定，发现随着磨矿细度的增加，粗选精矿中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的品位先升高后降低，回收率先增加后平缓。当磨矿细度在-0.074 mm 79.89%时， $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的品位和回收率均达到最高，分别为43.56%和20.04%。说明在一定范围内，随着磨矿细度的增加，磨矿后脱泥流程中去除的细粒级矿石中红柱石矿逐渐减少，从而使粗选精矿中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的品位和回收率逐渐升高，选择性碎磨-筛分（即脱泥过程）可以有效富集红柱石矿物。

目前，选择性碎磨-筛分工艺可以较好地将粗粒红柱石与细粒脉石矿物初步分离，实现红柱石预富集，保证后续选别流程中更高的给矿品位和产品粒度，但目前该工艺仍存在处理粒度较窄、碎磨效果难以把控等问题。

### 2.1.2 重介质选矿

重介质选矿，是指在密度大于 $1\,000\text{ kg/m}^3$ 的介质中进行矿物分选的过程。相比于传统浮选工艺，重介质选矿的入选粒度范围更粗，普遍在3~30 mm左右<sup>[43]</sup>。利用粗粒级红柱石与伴生脉石矿物的粒度和密度差异，采用重介质选矿与浮选、磁选联合应用，可较为经济有效地实现预先抛尾并得到粗精矿，提高入选品位，获得较高的红柱石分选指标，其中重介质旋流器是最常用的设备。

赵醒民<sup>[5]</sup>在西峡年产3 000 t红柱石精矿选矿厂可行性研究总结中表明，利用重介质旋流器进行预先抛尾，可将近80%的原料预先丢弃，不仅大大减少了后续作业的费用，而且粗、细粒级精矿中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的品位分别达到了58.07%和55.29%。李九鸣和谭玉芝<sup>[44]</sup>对西峡县杨乃沟伟晶状难选红柱石矿进行了选矿工艺研究，发现其脉石密度大，比磁化系数低。矿石经过预选、重选（摇床）、强磁选作业，可以生产出3.2~1.6、1.6~0.5、0.5~0 mm等三个符合粒度标准要求的红柱石精矿，证实了重介质预抛尾工艺能够有效提升粗粒级红柱石选别效果并节约选矿成本。

张成强等<sup>[45]</sup>对河南某红柱石矿进行了选矿工艺研究，实验以-0.074 mm 90%的硅铁微粉作为重介质，采用中国矿业大学（徐州）研制的三产品无压给料重介质旋流器对+0.5 mm粒级的粗精矿进行一粗一扫分选，最终确定的选矿原则流程为“干式强磁选抛尾-重介质粗选-分级-干式强磁精选-摇床-湿式强磁选”，可以获得作为耐火制品骨料使用的优质颗粒状红柱石精矿，其总产率为5.46%，总纯度为97.17%，红柱石总回收率为65.95%。

利用粗粒级红柱石与脉石矿物的粒度和密度差异，采用重介质选矿工艺，可实现预先抛尾，提高后续选别作业的处理效率和技术指标。但目前该方法对红柱石原料的粒度要求较高，过细的原矿由于筛分面积较大、颗粒表面附着的介质需要大量水冲洗导致操作和分离困难等原因，难以

实现重介质分选。

## 2.2 细粒级红柱石选矿

红柱石的粗粒级选矿具有可预先抛尾、工艺环境污染小等优点,但精矿品位往往无法满足耐火材料的生产要求,必须进一步细磨以提高单体解离度,并在细粒级范围内进行选矿,保证红柱石的精矿品位。细粒级红柱石,嵌布粒度普遍为 0~1 mm,单体解离度较高,目前普遍采用脱泥-酸性浮选-强磁选流程,并积极开发新型高效浮选药剂,以提高分选指标。

### 2.2.1 酸性浮选-强磁选

酸性浮选的基本原理,是在酸性 pH 值条件下,利用药剂条件加大红柱石与脉石矿物可浮性差异,从而实现选择性分选的过程。

红柱石浮选工艺中,主要采用石油磺酸钠、十二烷基硫酸钠、十二烷基磺酸钠等阴离子捕收剂,因此需要红柱石矿物在矿浆中显正电以保证捕收效果。红柱石的零电点为  $\text{pH}=5.2^{[46]}$ ,李浩杰使用十二烷基磺酸钠作为捕收剂,研究矿物表面电性变化对其可浮性的影响,发现在  $\text{pH}=3.5$  左右时,红柱石的回收率可达 90% 左右,而在  $\text{pH}=10$  左右时,红柱石的回收率不到 10%。矿浆 pH 越高,红柱石回收率越低,证实了磺酸盐的作用效果取决于红柱石表面的电荷符号,药剂必须在 Zeta 电位为正值的情况下(即酸性条件下)才可以有效捕收。同时,酸性浮选对长石、石英等硅质脉石矿物有较好的抑制作用。张成强、李洪潮等<sup>[47]</sup>对甘肃某地红柱石进行浮选优化实验,研究发现磨矿细度在 -0.074 mm 70%,矿浆 pH 值在 3~4,使用石油磺酸钠+羟肟酸的复配捕收剂,可得到红柱石品位 91.07%、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量 55.72%、红柱石矿物回收率 58.86% 的良好指标。胡志刚、代淑娟<sup>[48]</sup>对辽宁某红柱石矿进行了浮选实验,当磨矿细度 -0.074 mm 70%、预先脱泥效率控制在 25% 左右、矿浆  $\text{pH}=2\sim 3$  时,利用 M50 和 S79 为捕收剂, MCA 为脉石矿物抑制剂,采用了一粗四精选别流程,最终得到红柱石含量 91.02%、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量 58.60%、回收率为 72.42% 的精矿指标。结果表明:在酸性条件下,红柱石表面电位为正值,可与阴离子捕收剂 M50 和 S79 高效结合。

秦煦坤、钱玉鹏等<sup>[49]</sup>针对甘肃某  $\text{Al}_2\text{O}_3$  品位为 16.68% 的红柱石选矿微细粒矿泥进行剪切絮凝浮选实验,测量了红柱石和石英纯矿物在一定浓

度的烷基芳基磺酸钠溶液中的电动电位,结果表明:在  $\text{pH}=3$  时,烷基芳基磺酸钠在红柱石表面的化学吸附量最大,而烷基芳基磺酸钠在石英表面只存在很少的物理吸附。说明了在酸性条件下,相比于硅质脉石,阴离子捕收剂可以更具选择性作用在红柱石表面。

天然红柱石矿中,常常含有赤铁矿等磁性脉石矿物,如何高效磁选除铁是提高红柱石选精矿品位的重要问题。王乃玲、王露等<sup>[21]</sup>针对新疆某难选红柱石,对浮选精矿在磁场强度为 800 kA/m 的条件下进行强磁选,可得到  $\text{Al}_2\text{O}_3$  品位 53.35%、回收率 30.21%、红柱石回收率为 50.09% 的磁精矿,磁性脉石矿物含量较之磁选前明显降低,有效改善了红柱石矿中磁性脉石的夹杂问题。高军辉等<sup>[50]</sup>为去除陕西某红柱石矿石中赤铁矿等磁性矿物,采用细磨-磁选流程,将矿石碎磨至 -0.074 mm 70% 后进入永磁机除铁,得到红柱石精矿产率 22%、回收率 65%,品位 95% 的良好结果。金俊勋<sup>[51]</sup>为研究磁场强度与矿浆流速对红柱石磁选精矿指标的影响,采用 Slon100 周期式脉动高梯度磁选机,对甘肃细粒级红柱石进行磁选实验,证实在磁场强度为 1.0 T、矿浆流速为 1.3 cm/s 时,精矿全铁含量较低,除铁率超过 60%。

综上,细粒级红柱石主要采用浮选-强磁选联合工艺进行选别,由于红柱石在酸性条件下能更高效的与阴离子捕收剂吸附,同时,酸性条件下能更好的抑制硅酸盐类脉石矿物,红柱石矿可以得到良好的分离与富集效果。而为进一步提高红柱石精矿品位,采用强磁选工艺可有效去除夹杂伴生的赤铁矿等磁性脉石,有效提高精矿质量。但目前,细粒级红柱石由于精矿产品粒度过细,整体市场价格较粗粒级产品更低,在耐火材料生产中的技术经济指标也较弱。

### 2.2.2 浮选药剂研发

细粒级红柱石,普遍采用浮选工艺进行富集提纯,而高效浮选药剂,特别是新型捕收剂的研发使用也成为了提高红柱石资源开发利用水平的关键。目前,红柱石浮选捕收剂主要以石油磺酸钠<sup>[51]</sup>、十二烷基硫酸钠、十二烷基磺酸钠、十二胺、羟肟酸<sup>[52-53]</sup>等药剂的复配为主。

李浩杰<sup>[46]</sup>对比了十二烷基磺酸钠、多胺和二者复配捕收剂对红柱石的浮选效果。发现在  $\text{pH}=2\sim 2.5$  时,红柱石表面带正电,多胺也以铵正

离子的形式存在，但此时多胺仍可以吸附在红柱石表面，推断是由于电子向胺基团上氮原子与红柱石表面上的铝氧之间的强氢键转移<sup>[52]</sup>，形成了胺基团  $\text{RNH}_3^+$ ，结果胺分子和胺离子在矿物表面上达到了平衡， $\text{RNH}_3^+$ 中的 H 原子与红柱石 ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ) 中的既与 Si 相连又与 Al 相连的 O 原子形成了氢键。结果发现在  $\text{pH}=2\sim 2.5$ ，捕收剂用量为 1.5 mg/g 时，单独使用多胺作为捕收剂效果较佳，红柱石的浮选回收率接近 90%。

邱仙辉等<sup>[1]</sup>为探究石油磺酸钠和十二烷基硫酸钠组合捕收剂对红柱石浮选效果的影响，在磨矿细度-0.074 mm 70%、 $\text{pH}=3.5$ ，磨矿后脱除-0.025 mm 细泥条件下进行浮选实验。结果表明，采用一粗

一扫四精、中矿集中再磨再选的浮选工艺流程，当石油磺酸钠用量 1 500 g/t、十二烷基硫酸钠用量 200 g/t 时，可以获得  $\text{Al}_2\text{O}_3$  品位为 56.29%、回收率为 28.35% 的红柱石精矿。张成强、李洪潮<sup>[53]</sup>则针对甘肃某红柱石，对比了石油磺酸钠、羟肟酸、石油磺酸钠+十二胺组合等不同捕收剂对浮选指标的影响，结果发现石油磺酸钠+十二胺组合捕收剂效果较佳：在磨矿细度为-0.074 mm 70%、 $\text{pH}=3\sim 4$ 、脱泥粒度为-0.023 mm 条件下，组合捕收剂用量 1 500 g/t 时，红柱石精矿  $\text{Al}_2\text{O}_3$  品位可达 41% 左右， $\text{Al}_2\text{O}_3$  回收率可达 40% 左右。综上，红柱石酸性浮选常用的捕收剂的种类及优缺点见表 3。

表 3 常用红柱石酸性浮选捕收剂种类及优缺点  
Table 3 Types of commonly used erythrite acidic flotation traps and their advantages and disadvantages

| 捕收剂种类                        | 优点                                                  | 缺点                                |
|------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 多胺 <sup>[46]</sup>           | 多胺表面形成的氨基团中的H原子与红柱石表面的O原子形成氢键，结构稳定，捕收效果较好，回收率可达近90% | 需在 $\text{pH}=2\sim 2.5$ 的强酸条件下实现 |
| 石油磺酸钠、十二烷基硫酸钠 <sup>[1]</sup> | 浮选精矿品位较高，可达56.29%                                   | 回收率较低                             |
| 石油磺酸钠、十二胺 <sup>[53]</sup>    | 可平衡精矿回收率与品位保持都保持在40%左右                              |                                   |
| 羟肟酸 <sup>[47]</sup>          | 精矿品位较高                                              | 回收率较低                             |
| M50、S79 <sup>[48]</sup>      | 可得到红柱石精矿红柱石含量91.02%、回收率为72.42%                      | 需在 $\text{pH}=2\sim 3$ 的强酸条件下实现   |

目前，在强酸性浮选条件下，使用单一或复配的多胺类、石油磺酸盐、石油硫酸盐类捕收剂，均能够实现与脉石矿物的有效分离。但强酸性环境对设备具有较重的腐蚀，且存在人员健康和环境污染风险；此外矿浆中难免离子的活化作用也可能降低药剂的选择性<sup>[4]</sup>，因此在未来应着力研发可在中性  $\text{pH}$  值条件下具有良好分选效果的红柱石选择性浮选药剂。

3 结论及展望

红柱石具有优异的高温物理化学性能，是生产高级耐火材料的主要原料，在冶金、钢铁、能源、建材和航空航天等重大工程领域必不可少。目前，在耐火材料原料市场上，粗粒级红柱石的价格普遍更高，需求量也更大。中国高品质粗粒级红柱石赋存量较少，经选择性碎磨-筛分分级和重介质选矿后的粗粒级红柱石精矿往往品位难以达到耐火应用要求，普遍还需要在预先抛尾后进行再磨再选以提高品质，目前中国大部分红柱石选厂的磨矿粒度均达到-0.074 mm 70% 以上。而大量使用低品位细粒级红柱石，普遍采用高效捕收

效果的酸性浮选与强磁选联合工艺进行富集提纯，选矿指标较好，可满足耐火材料的品位要求，但细粒精矿售价较低，技术经济指标较差，且酸性浮选工艺存在一定的安全和污染隐患，亟待提高其资源利用率，完善高效成熟的选矿富集技术。针对中国红柱石矿产资源分布范围广、矿石形式复杂的问题，目前对其选矿提质研究已经取得了阶段性的进展，但是在生产和应用过程中仍存在产品粒度过细、精矿品位不高、能耗大、污染高等问题。因此，未来中国红柱石选矿领域的研究应重点关注于：

- (1) 中国粗粒级红柱石资源相对匮乏，但其高效提纯和开发利用技术仍是实现红柱石产业升级的关键，针对“选择性碎磨-筛分分级”工艺，应在保证红柱石嵌布粒度的前提下强化提质除杂，而“重介质选矿”则有望成为红柱石提纯技术革新的突破口。
- (2) 针对细粒级红柱石资源，目前浮选工艺中主要采用单一或混合阴离子捕收剂，必须维持酸性条件以控制红柱石表面电位，未来应开拓新的表面电性调控方法，跳出矿浆酸碱性条件的限

制,并积极开发新型浮选药剂,特别是针对弱酸性或中性条件下的高选择性红柱石捕收剂。

## 参考文献:

- [1] 邱仙辉,邓冲,邱廷省,等. 组合捕收剂强化红柱石浮选回收试验研究[J]. 非金属矿, 2016, 39(2):79-81.
- QIU X H, DENG C, QIU T S, et al. Research on strengthen the flotation recovery of andalusite by collector combination[J]. Non-Metallic Mines, 2016, 39(2):79-81.
- [2] FANG Y, GU Y, KANG Q, et al. Utilization of copper tailing for autoclaved sand-lime brick[J]. *Construction and Building Materials*, 2011, 25(2):867-872.
- [3] 张新爱,田文杰,袁媛,等. 黄河泥砂-粉煤灰蒸压砖的研制[J]. 新型建筑材料, 2009, 36(5):47-49.
- ZHANG X A, TIAN W J, YUAN Y, et al. Development of autoclaved brick with Yellow River silt and fly ash[J]. *New Building Materials*, 2009, 36(5):47-49.
- [4] 朱海玲. 红柱石与石英正浮选分离机理及工艺研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.
- ZHU H L. Study on the mechanism and the process of the separation between andalusite and quartz by direct flotation[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [5] 赵醒民. 西峡年产 3000 吨红柱石精矿选矿厂可行性研究总结[J]. 河南冶金, 1995(2):2-4+58.
- ZHAO X M. Feasibility study summary of Xixia andalusite concentrate concentrator with an annual output of 3000 tons[J]. *Henan Metallurgy*, 1995(2):2-4+58.
- [6] 张格. 新疆难选红柱石选矿试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2016.
- ZHANG G. Experimental research of mineral processing on Xinjiang refractory andalusite[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [7] 卢佳,高惠民,金俊勋,等. 钙离子对红柱石浮选的影响及作用机理[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(6):1311-1315.
- LU J, GAO H M, JIN J X, et al. Effect and mechanism of calcium ion on flotation of andalusite[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(6):1311-1315.
- [8] 罗大芳,叶叶顺,车晓艳,等. 云南盈江地区红柱石分析[J]. 冶金管理, 2021(17):116-117.
- LUO D F, YE Y S, CHE X Y, et al. Analysis of andalusite in Yingjiang area of Yunnan province[J]. *China Steel Focus*, 2021(17):116-117.
- [9] 印万忠,孙传尧. 硅酸盐矿物浮选原理研究现状[J]. 矿产保护与利用, 2001(3):17-22.
- YIN W Z, SUN C Y. Review on research status on flotation principles of silicate minerals[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2001(3):17-22.
- [10] 许光,杨大兵. 内蒙古某红柱石矿选矿试验[J]. 金属矿山, 2013(1):83-85.
- XU G, YANG D B. Beneficiation test on an andalusite ore of Inner Mongolia[J]. *Metal Mine*, 2013(1):83-85.
- [11] 卢佳. 蓝晶石浮选行为与机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2017.
- LU J. Study on flotation behavior and mechanism of kyanite[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2017.
- [12] 姚建云. 石油磺酸盐体系中红柱石粒径对其浮选性能的影响研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2016.
- YAO J Y. Research on performance of particle size of andalusite in the petroleum sulfonate system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [13] 张军杰,钱晶. 红柱石细粉添加量对刚玉-莫来石材料性能的影响[J]. 耐火材料, 2022(5):431-434.
- ZHANG J J, QIAN J. Influence of andalusite fine powder addition on properties of corundum-mullite materials[J]. *Refractories*, 2022(5):431-434.
- [14] 纪振明,印万忠,冀秀荣,等. 中国红柱石矿选矿现状及展望[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2010(3):46-49.
- JI Z M, YIN W Z, JI X R, et al. The mineral processing status and prospect of China's andalusite[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2010(3):46-49.
- [15] 李媛媛,徐海军. 红柱石、蓝晶石和夕线石的相变与变形[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2023, 42(2):402-419.
- LI Y Y, XU H J. Polymorphism and deformation of andalusite, kyanite and sillimanite[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemist*, 2023, 42(2):402-419.
- [16] 段绍辉. 中国蓝晶石矿床地质特征与成矿规律研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2019.
- DUAN S H. Geological characteristics and metallogenic regularities of the kyanite deposits in China[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [17] 金俊勋. 红柱石族同质多象体矿物浮选行为与机理研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2016.
- JIN J X. The Flotation behavior and mechanism of aluminosilicate polymorphic minerals[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [18] YB/T 4032-2010, 蓝晶石 红柱石 硅线石[S].
- YB/T 4032-2010, Kyanite andalusite sillimanite[S].
- [19] 章柯宁,翁达,曾兰芷,等. 西峡红柱石原生矿选矿流程的选择[J]. 矿产综合利用, 1996(1):7-12.
- ZHANG K N, WENG D, ZENG Z L, et al. Selection of beneficiation flowsheet for Xixia andalusite primary ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 1996(1):7-12.
- [20] 姚燕燕,谢建宏,张治元. 陕西眉县红柱石选矿试验研究[J]. 金属矿山, 2003(11):30-31+48.

- YAO Y Y, XIE J H, ZHANG Z Y. Study on the beneficiability of andalusite Ore of Mei County, Shannxi Province[J]. Metal Mine, 2003(11):30-31+48.
- [21] 王乃玲,王露,李浩,等. 新疆某难选红柱石选矿试验研究[J]. 矿冶, 2016, 25(3):11-16.
- WANG N L, WANG L, LI H, et al. A study on mineral processing of a refractory andalusite ore in Xinjiang[J]. Mining and Metallurgy, 2016, 25(3):11-16.
- [22] 张军杰,钱晶. Sialon 结合红柱石-碳化硅耐火材料研究[J]. 耐火与石灰, 2022, 47(6):1-4.
- ZHANG J J, QIAN J. Study on Sialon bonded andalusite-silicon carbide refractories[J]. Refractory and Lime, 2022, 47(6):1-4.
- [23] 夏绍柱,冯起贵,候若洲,等. 红柱石、硅线石、蓝晶石矿物资源及其选矿[J]. 金属矿山, 1994(2):37-44.
- XIA S Z, FENG Q G, HOU R Z, et al. Mineral resources of andalusite, sillimanite and cyanite and beneficiation[J]. Metal Mine, 1994(2):37-44.
- [24] 靳爱国,李静,刘炎军. 中国红柱石的资源状况、生产和应用[J]. 耐火材料, 2002(5):284-286+289.
- JIN Q G, LI J, LIU Y J. Status of deposits, production and application of China's andalusite[J]. Refractories, 2002(5):284-286+289.
- [25] 李从典. 中国蒸压砖发展现状和前景[J]. 墙材革新与建筑节能, 2010(1):38-41+4-5.
- LI C D. Autoclaved brick of China's development situation and future prospects[J]. Wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings, 2010(1):38-41+4-5.
- [26] 张惠敏,汪立今,贾殿赠. 红柱石材料领域的应用及其研究新进展[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2006(1):53-57.
- ZHANG H M, WANG L J, JIA D Z. Application and progress of researches on andalusite material field[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition), 2006(1):53-57.
- [27] 廖桂华,徐国辉,李柳生,等. 锆英石细粉对红柱石基耐火材料性能的影响[J]. 非金属矿, 2004(4):6-8.
- LIAO G H, XU G H, LI L S, et al. Influences of fine zircon powder on properties of andalusite-based refractory[J]. Non-metallic Mines, 2004(4):6-8.
- [28] 卢正东,向武国,顾华志,等. 武钢高炉炉缸耐火材料结构创新[J]. 耐火材料, 2019, 53(6):468-471.
- LU Z D, XIANG W G, GU H Z, et al. Structural innovation of refractory materials for blast furnace hearth of WISCO[J]. Refractories, 2019, 53(6):468-471.
- [29] LASSETTER L W. Kyanite, andalusite and sillimanite[J]. Mining Engineering, 2022, 74(7):58-61.
- [30] 卢惠民,陈明法,徐昕,等. 一种用红柱石为原料生产铝硅合金的组合还原剂[P]. 北京:CN1605644,2005-04-13.
- LU H M, CHEN M F, XU X, et al. Combined reducing agent for producing aluminum-silicon alloy with andalusite as raw material[P]. Beijing: CN1605644, 2005-04-13.
- [31] 张巍. 红柱石材料的研究及应用进展[J]. 中国陶瓷, 2012, 48(6):1-5+8.
- ZHANG W. Application and progress of research on andalusite material[J]. China Ceramics, 2012, 48(6):1-5+8.
- [32] 许峰农. 河南省低温拜耳法氧化铝生产工艺应用研究[D]. 郑州:郑州大学,2011.
- XU F N. Low-temperature-Bayer-process alumina application research[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2011.
- [33] 曾令可,任雪潭,贺海洋,等. 掺杂红柱石对堇青石质窑具抗热震性的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2001(6):60-63.
- ZENG L K, REN X T, HE H Y, et al. Effects of adulterated andalusite on the thermal shock resistance of cordierite kiln furniture[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2001(6):60-63.
- [34] 朱兴月,高惠民,任子杰,等. 甘肃某红柱石尾矿制备蒸压灰砂砖试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(1):299-303.
- ZHU X Y, GAO H M, REN Z J, et al. Experimental study on autoclaved lime-sand brick prepared by andalusite tailings in Gansu province[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(1):299-303.
- [35] 石振武,薛群虎. 国内铅锌尾矿建材化研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(2):508-512.
- SHI Z W, XUE Q H. Progress on domestic investigation of building materials conversion from lead-zinc tailing[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(2):508-512.
- [36] 李娅莉,杨晶. 红柱石的宝石学特征研究[J]. 超硬材料工程, 2006(6):55-58.
- LI Y L, YANG J. Gemological characteristics of andalusite[J]. Superhard Material Engineering, 2006(6):55-58.
- [37] 高雪,付浩. 三种典型“玫瑰石”玉石鉴定特征对比研究[J]. 四川地质学报, 2022, 42(2):346-352.
- GAO X, FU H. Comparative study on identification characteristics of three typical "rose stone" jade[J]. Acta Geologica Sichuan, 2022, 42(2):346-352.
- [38] 周世全,赵梅红. 秦岭东段的伟晶红柱石[J]. 珠宝科技, 2003(2):70.
- ZHOU S Q, ZHAO M H. Megacryst andalusite in the eastern Qinling mountains[J]. Jewellery Science and Technology, 2003(2):70.
- [39] 张巍,戴文勇,孟千. 不同粒度红柱石对矾土基喷涂料性能的影响[J]. 陶瓷学报, 2011, 32(2):243-248.
- ZHANG W, DAI W Y, MENG Q. Effect of different particle sizes of andalusite on properties of bauxite based gunning

refractory[J]. Journal of Ceramics, 2011, 32(2):243-248.

[40] 张巍,戴文勇,李雪东. 热处理对矾土-红柱石-腊石喷涂耐材性能的影响[J]. 世界钢铁, 2010, 10(5):67-70.

ZHANG W, DAI W Y, LI X D. Effect of heat treatment on properties of bauxite-andalusite-pyrophyllite gunning refractory[J]. World Iron & Steel, 2010, 10(5):67-70.

[41] 曾惠明. 选择性磨矿-浮选-磁选联合工艺处理某红柱石矿的试验研究[J]. 化工矿物与加工, 2017, 46(9):27-30.

ZENG H M. Experimental study on andalusite ore disposed by combined process of selective grinding-flotation-magnetic separation[J]. Chemical Minerals and Processing, 2017, 46(9):27-30.

[42] 卢佳,任子杰,高惠民,等. 新疆某红柱石矿预富集试验研究[J]. 非金属矿, 2016, 39(5):69-72.

LU J, REN Z J, GAO H M, et al. Experimental research on preconcentration of an andalusite ore in Xinjiang[J]. Non-metallic Mines, 2016, 39(5):69-72.

[43] 魏德洲.新编选矿概论(第二版)[M].2019.

WEI D Z. New introduction to mineral processing (second edition)[M]. 2019.

[44] 李九鸣,谭玉芝. 伟晶状红柱石选矿工艺试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 1994(2):17-19+10.

LI J M, TAN Y Z. Experimental study on mineral processing technology of pegmatite andalusite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 1994(2):17-19+10.

[45] 张成强,李洪潮,张颖新,等. 河南某红柱石矿选矿工艺研究[J]. 金属矿山, 2009(8):60-61+65.

ZHANG C Q, LI H C, ZHANG Y X, et al. Research on the beneficiation process of a Henan andalusite ore[J]. Metal Mine, 2009(8):60-61+65.

[46] 李浩杰. 红柱石矿组合捕收剂浮选性能与机制研究[D]. 沈阳:辽宁大学,2023.

LI H J. Study on floatation performance and mechanism of combined collector in andalusite Ore[D]. Shengyang: Liaoning University, 2023.

[47] 张成强,李洪潮,张红新,等. 甘肃某红柱石矿选矿试验研究[J]. 非金属矿, 2013, 36(5):53-54+75.

ZHANG C Q, LI H C, ZHANG H X, et al. A study of mineral processing for a andalusite ore from Gansu[J]. Non-Metallic Mines, 2013, 36(5):53-54+75.

[48] 胡志刚,代淑娟. 辽宁某红柱石矿工艺矿物学特征及选矿流程选择[J]. 有色金属(选矿部分), 2004(6):29-31.

HU Z G, DAI S J. Studies on the technological mineralogy characteristics and ore-dressing process for and andalusite ore in Liaoning[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing), 2004(6):29-31.

[49] 秦煦坤,钱玉鹏,高惠民,等. 剪切絮凝强化浮选微细粒红柱石试验[J]. 金属矿山, 2017(9):115-119.

QIN X K, QIAN Y P, GAO H M, et al. Enhancing flotation effect of fine grained andalusite by shear flocculation[J]. Metal Mine, 2017(9):115-119.

[50] 高军辉,赵启海,张选固. 陕西某次生岩型红柱石矿的生产流程及产品品质[J]. 甘肃冶金, 2017, 39(3):87-91.

GAO J H, ZHAO Q H, ZHANG X G. Production process and product quality of a secondary rock andalusite mine in Shaanxi province[J]. Gansu Metallurgy, 2017, 39(3):87-91.

[51] 金俊勋,高惠民,冯晓菲,等. 甘肃某难选红柱石矿选矿试验研究[J]. 非金属矿, 2014, 37(5):40-42.

JIN J X, GAO H M, FENG X F, et al. Mineral processing of a refractory andalusite ore in Gansu[J]. Non-Metallic Mines, 2014, 37(5):40-42.

[52] A·A·阿布拉莫夫,李长根,崔洪山. 矿物浮选中阳离子捕收剂作用机理的理论基础和规律性[J]. 国外金属矿选矿, 2007(8):9-13.

A A ABRAMOV LI C G, CUI H S. Theoretical basis and regularity of action mechanism of cationic collectors in mineral flotation[J]. Mineral Processing of Foreign Metal Ores, 2007(8):9-13.

[53] 张成强,李洪潮,张红新,等. 某含炭难选红柱石矿选矿试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2013(1):14-18.

ZHANG C Q, LI H C, ZHANG H X, et al. Experimental study on beneficiation of a refractory andalusite ore containing carbon[J]. Protection and Utilization of Minerals, 2013(1):14-18.

(下转第 75 页)

## Potential Analysis of Rare Earth Resources in Greenland

YE Yakang<sup>1,2</sup>, CHEN Wei<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Technology Innovation Center of Rare Earth Resources Development and Utilization, China Geological Survey, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** Greenland has now discovered 14 rare earth deposits, including Kvanefjeld, the world's second largest rare earth deposit. The geological settings of the deposits vary and the metallogenic ages span widely. According to the genetic of the deposit, it can be divided into 5 types: those related to alkaline rocks, carbonate type, iron oxide copper-gold (IOCG) type, pegmatites and placer ores. The metallogenic conditions of 40 potential rare earth resource areas in Greenland were analyzed, and the value assignment evaluation of the potential areas was carried out. Summarizing the radioactivity, geochemistry, remote sensing thermal infrared, placer and other comprehensive anomaly information of the Kvanefjeld rare earth deposit, and 4 rare earth metallogenic prospect areas are delineated in Garder province of alkaline. The alkaline province in southern Greenland is the most promising area for the discovery of rare earth deposits, and the carbonate area in western Greenland and the alkaline area in eastern Greenland are also prospective for rare earth prospecting.

**Keywords:** Greenland; rare-earth element; resource potential; alkaline rock type; carbonate rock type

////////////////////////////////////  
(上接第 56 页)

## Research Status of Andalusite Resources and its Beneficiation in China

LIU Yumo<sup>1</sup>, NA Yu<sup>1</sup>, LI Zhao<sup>1</sup>, CHEN Min<sup>2</sup>, HUANG Junwei<sup>3</sup>, DAI Shujuan<sup>1,2</sup>, LI Pengcheng<sup>1</sup>

(1. School of Mining Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan, Liaoning 114000, China; 2. School of Chemical Engineering, Liaoning University of Science and Technology, Anshan, Liaoning 114000, China; 3. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Zhengzhou, Henan 450006, China)

**Abstract:** Andalusite is a natural anhydrous aluminosilicate mineral with high temperature resistance. As an important raw material for preparing high-grade refractory materials and aluminum-silicon alloys, it is widely utilized in building materials, ceramics, aviation and other industries. The andalusite resources in China are widely distributed and abundant, but most of the raw andalusite are within low grade and fine grain distribution, needing obligatory beneficiation. The beneficiation process of andalusite can be divided into coarse-grained beneficiation and fine-grained beneficiation according to its raw distribution size. The processing of coarse-grained andalusite mainly adopts selective grinding-screening or heavy medium beneficiation technology. Fine-grained andalusite is mainly beneficiated through acid flotation as well as high intensity magnetic separation. In this paper, the crystal structure as well as the physical and chemical properties of andalusite were introduced, the present situation of mineral resource distribution and beneficiation technology of andalusite in China were analyzed in detail. The reasonable prospects of the future development of andalusite were also provided.

**Keywords:** andalusite; resources survey; refractories; beneficiation technology