

马海盐湖水平溶开采中固液转化机制及效率提升策略

何继辉

青海锦泰钾肥有限公司 青海 茫崖 816399

摘要: 马海盐湖是柴达木盆地重要钾资源基地,水溶开采是其低品位固体钾矿开发核心技术,固液转化效率关乎钾资源开发利用与生产效益。本文结合盐湖地质与资源特征,探究水溶开采固液转化机制,分析当前突出问题并提出效率提升策略。结果显示,马海盐湖固液转化分物理与化学溶解两类,受地质、工艺、环境因素影响,存在转化不均等问题。通过多策略结合可提升转化效率,减少浪费、降低成本。该研究完善理论体系,为同类低品位钾矿开发提供支撑。

关键词: 马海盐湖;水溶开采;固液转化机制;效率提升;钾资源开发

引言:钾资源是我国重要战略矿产,关乎国家粮食安全与农业发展。柴达木盆地是我国钾盐主要富集区,马海盐湖作为盆地六大干盐湖之一,低品位固体钾矿资源丰富,其开发对缓解我国钾资源短缺意义重大。水溶开采因成本低、环境影响小、适配低品位矿开发,成为马海盐湖固体钾矿开发主流技术。但随开采推进,浅部高品位矿匮乏,低品位矿开发难度增大,固液转化问题突出,制约高效开发。故本文研究其机制,提出提升策略,为盐湖开发提供借鉴。

1 马海盐湖地质与资源特征

1.1 盐湖地质条件

马海盐湖地处柴达木盆地中北部赛什腾凹陷,湖盆面积3700平方公里,盐坪长80-90公里、宽25-30公里,湖面海拔2742米,东部和南部边缘有德宗马海湖、巴龙马海湖两个小型卤水湖,共同构成盐湖区。此地属内陆干旱气候,降水少、蒸发强,利于盐类沉积富集。盐湖地层主要是第四系全新统沉积,岩性多样,形成完整含盐系沉积地层,有主、次级沉积中心。矿区以断裂构造为主,部分活动断裂利于卤水迁移储存,影响矿层分布与固液转化。矿层埋藏浅,多在0-3米,孔隙度与渗透率非均质性强,影响溶剂渗透与转化效率。

1.2 固体钾矿资源类型

马海盐湖固体钾矿资源以低品位为主,经过多年开发,浅部高品位矿已逐渐匮乏,目前开发重点集中在低品位固体钾矿,这些资源通过技术手段开发已具备经济价值,为企业10万吨/年的钾肥生产提供了资源保障。矿区主要钾盐矿物类型包括杂卤石、光卤石、钾石盐三种,其中杂卤石集中分布在70-79勘探线,以原生和后生交代成因赋存,且以前者为主,原生杂卤石呈片状、纤维状、粒状等集合体,后生交代成因的杂卤石呈浸染状和具石膏

假象的毛毡状。光卤石多分布在67-70勘探线,呈熔融状、他形粒状、裂纹状,与石盐、杂卤石、钾石盐等矿物共生。钾石盐仅在72勘探线集中分布,呈自形-半自形立方单体,与光卤石、杂卤石、水氯镁石等矿物共生。这些矿物的赋存特征与分布规律,直接决定了固液转化的难度与效率^[1]。

2 马海盐湖地质特征与水溶开采现状

2.1 马海盐湖区域地质概况

马海盐湖地处柴达木盆地北部,区域构造属于赛什腾凹陷次级构造单元,受区域构造运动影响,形成了独特的沉积环境与矿层分布特征。区域地层主要发育第四系全新统、更新统,其中全新统是钾盐矿物的主要赋存层位,沉积韵律明显,钾盐矿层多分布在IV₂韵律层顶部和IV₃-IV₄韵律层,产出形态在垂向上为层状、透镜状,平面上呈NE-SW向展布且连续性减弱。区域内地下水主要为盐湖卤水,卤水类型以硫酸镁亚型和高盐度氯化物型为主,东南部富K⁺、Mg²⁺的硫酸镁亚型卤水与牛郎织女湖富Ca²⁺的高盐度氯化物型卤水混合掺杂,为杂卤石等钾盐矿物形成提供了条件。矿区地形平坦,海拔较高,气候干旱少雨,蒸发强烈,这种自然条件既有利于盐类矿物沉积,也影响水溶开采过程中溶剂的稳定性与转化效率。

2.2 马海盐湖水平溶开采现状

马海盐湖水平溶开采始于21世纪初,经过近二十年发展,已形成规模化开采格局,北部矿段全新统固体钾矿大规模固液转化开采已稳定运行近十年,累计生产钾肥100多万吨,实现销售收入20多亿元。目前采用的水溶开采方式主要为沟渠式与井-渠结合式,核心流程是将低钾原卤作为溶剂,通过沟渠或钻井注入固体矿层,使固体钾矿溶解转化为含钾卤水,再通过太阳能蒸发等工艺

提取钾肥。随着开采进程推进,浅部低品位矿开发逐渐深入,矿层品位进一步降低,给固液转化与盐田生产带来极大挑战。当前开采规模已能满足企业钾肥生产需求,但固液转化效率仍有较大提升空间,溶剂利用率、钾离子溶出率等指标尚未达到最优水平,技术升级与工艺优化需求迫切。

2.3 水溶开采中固液转化存在的突出问题

当前马海盐湖湖水溶开采固液转化过程中,存在四大突出问题,严重制约转化效率与资源利用率。一是转化不均匀,受矿层非均质性影响,溶剂在高渗区优先渗透,形成优势渗流通道,导致部分矿层无法被溶剂充分接触,出现“过溶”与“未溶”并存现象,钾盐矿物溶出不充分。二是溶剂利用率低,溶剂参数适配性不足,部分溶剂波美度与离子浓度不合理,且补给方式缺乏精准调控,导致大量溶剂未参与有效转化,造成浪费,同时溶剂中 Na^+ 浓度过高易结盐,过低则破坏盐层骨架^[2]。三是盐层骨架破坏,部分区域溶剂注入量过大、速度过快,加上盐层骨架稳定性较差,导致盐层坍塌、渗漏,不仅影响固液转化连续性,还可能引发安全隐患。四是资源浪费严重,转化过程中部分钾盐未充分溶出,卤水组分变化影响后续盐田生产,进一步降低资源利用效率,随着矿层品位降低,这一问题愈发突出。

3 水溶开采固液转化机制

3.1 固液转化理论基础

马海盐湖湖水溶开采固液转化的核心理论基础是矿物溶解理论与溶液平衡理论,同时受渗流力学理论支撑。矿物溶解理论指出,固体钾盐矿物在溶剂中会发生相态转变,分为物理溶解与化学溶解两种类型,物理溶解仅发生矿物晶体结构破坏与离子解离,无明显化学反应,化学溶解则伴随离子交换与矿物相转移。溶液平衡理论表明,固液转化过程中,卤水中 K^+ 、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 等离子浓度会动态变化,最终达到溶解-沉淀平衡,平衡状态直接决定钾离子溶出率与转化效率。渗流力学理论则揭示了溶剂在矿层中的渗透、扩散规律,渗透速率与矿层孔隙度、渗透率密切相关,非均质矿层会导致溶剂渗透不均匀,形成优势渗流通道,影响转化效果,这一理论为后续工艺优化提供了重要依据。

3.2 马海盐湖固液转化过程

马海盐湖湖水溶开采固液转化过程主要分为四个连续阶段,形成完整的转化体系。第一阶段为溶剂渗透阶段,低钾原卤等溶剂通过沟渠或钻井注入固体矿层,在重力与压力作用下,逐渐渗透、扩散至矿层孔隙中,渗透速率受矿层孔隙度、渗透率与溶剂粘度影响,高渗区渗透

速度明显快于低渗区。第二阶段为矿物溶解阶段,溶剂与固体钾盐矿物接触后,光卤石、钾石盐等矿物发生物理溶解,晶体结构破坏, K^+ 等离子解离并溶出;杂卤石等矿物发生化学溶解,与溶剂发生化学反应,生成可溶钾盐组分,实现相态转化。第三阶段为离子迁移与平衡阶段,溶出的 K^+ 、 Na^+ 等离子在卤水中迁移、扩散,卤水组分动态调整,逐渐达到溶解-沉淀平衡,此时钾离子溶出速率趋于稳定。第四阶段为副反应阶段,转化过程中会伴随石盐析出、盐层骨架溶解等副反应,石盐析出会降低溶剂活性,盐层骨架溶解则影响矿层稳定性,二者均会对固液转化产生不利影响。

3.3 关键影响因素分析

马海盐湖湖水溶开采固液转化效率受地质、工艺、环境三类因素共同影响,其中地质因素是基础,工艺因素是关键,环境因素是辅助。地质因素方面,矿层品位、厚度与埋藏深度直接影响转化难度,品位越高、厚度越大,转化效率越高;矿层孔隙度、渗透率的非均质性导致溶剂渗透不均匀,是转化不均匀的主要原因;沉积韵律与矿物分布决定了转化的空间分布特征,钾盐矿层的层状、透镜状分布导致转化呈现垂向分层、平面分带特点。工艺因素方面,溶剂类型、波美度与离子浓度直接影响矿物溶解速率, Na^+ 浓度过高或过低均会影响转化效果;溶矿方式与溶剂补给速度、用量决定了溶剂与矿层的接触程度;开采工艺参数设置不合理会加剧转化不均匀与资源浪费。环境因素方面,区域温度、湿度影响溶剂性质与矿物溶解速率,温度越高,溶解速率越快;地下水动态变化会影响卤水组分平衡,进而影响转化效率^[3]。

4 马海盐湖湖水溶开采固液转化效率提升策略

4.1 工艺优化策略:提升转化均匀性与溶剂利用率

工艺优化是提升固液转化效率的核心手段,重点围绕溶剂优化、溶矿方式优化与工艺参数优化展开。溶剂优化方面,根据矿层品位与矿物特征,精准调整溶剂波美度与离子浓度,避免 Na^+ 浓度过高导致结盐或过低破坏盐层骨架,优先采用低钾原卤作为溶剂,提升 K^+ 溶出率并保护盐层骨架,在固体钾盐 KCl 品位较低时,适当提高溶剂波美度,有利于 K^+ 溶出。溶矿方式优化方面,结合矿层厚度、分布与非均质性,优化沟渠式、井-渠结合式溶矿方案,合理布置沟渠与钻井,缩小布设间距,提升溶剂渗透均匀性,针对不同沉积韵律矿层,采用差异化溶矿方式。工艺参数优化方面,通过试验确定最优溶剂补给速度、用量与温度,控制转化时间,减少石盐析出等副反应发生,采用分段补给、动态调控的方式,确保溶剂与矿层充分接触,最大限度提升溶剂利用率,减少

资源浪费。

4.2 技术创新策略：突破转化效率瓶颈

技术创新是突破固液转化效率瓶颈的关键路径，重点聚焦新型溶矿技术、智能化监测与调控技术、数值模拟技术的研发与应用。新型溶矿技术研发方面，针对低品位矿开发难度大的问题，研发低品位矿高效溶矿技术，结合物理、化学方法，强化固体矿溶解与 K^+ 溶出，提升低品位矿转化效率。智能化监测与调控技术方面，引入物联网、大数据技术，实时监测固液转化过程中卤水组分、矿层孔隙度、渗透率变化，以及溶剂渗透速度与转化进度，建立动态调控系统，根据监测数据实时调整工艺参数，实现精准调控。数值模拟技术应用方面，基于马海盐湖实际地质与开采参数，采用MODFLOW6和PhreeqcRM耦合的数值模拟工具，构建固液转化数值模型，模拟不同条件下的转化过程，预判转化效果，提前规避结盐、盐层破坏等问题，优化开采方案。

4.3 地质适配策略：结合地质特征提升转化效率

地质适配策略核心是结合马海盐湖地质特征与矿层分布规律，实现固液转化与地质条件的精准匹配，提升转化效率与稳定性。基于沉积韵律与矿层分布特征，分区制定固液转化方案，对不同品位、厚度、孔隙度的矿层采用差异化开采与转化策略，对高渗区适当控制溶剂补给速度，对低渗区采用增渗处理，提升溶剂渗透能力。优化矿层预处理技术，通过物理手段改善矿层孔隙度与渗透率，打破低渗隔挡，减少优势渗流通道形成，促进溶剂均匀渗透^[4]。结合活动断裂分布特征，合理布置溶矿设施，利用断裂带的渗透优势，提升溶剂迁移效率，同时加强断裂带周边盐层稳定性监测，避免盐层坍塌，确保固液转化连续高效进行，充分利用地质条件提升转化效率。

4.4 管理与保障策略：确保策略落地实施

管理与保障策略是确保效率提升策略落地实施的重要支撑，重点构建完善的管理制度、技术培训体系与成

本管控机制。建立完善的开采管理制度，规范工艺流程，明确各环节操作标准，加强转化过程中的质量管控与安全监测，定期对溶矿设施、监测设备进行检修维护，及时发现并解决转化过程中出现的问题。加强技术培训，定期组织操作人员开展专业技能培训，重点培训工艺参数调控、设备操作、监测数据分析等内容，提升操作人员专业能力，确保效率提升策略的有效执行。建立成本管控机制，在提升转化效率的同时，合理控制溶剂用量、设备运维等成本，优化资源配置，避免浪费，实现经济效益与资源效益的双重提升，为策略长期落地提供保障。

结束语

本文围绕马海盐湖，结合其地质与资源特点，对水溶开采固液转化机制展开系统研究，剖析了转化中存在的转化不均、溶剂利用率低、盐层骨架破坏等突出问题。提出以工艺优化、技术创新、地质适配与管理保障相结合的策略提升效率。未来要深入研究深层低品位矿机制，优化策略，研发应用新技术，助力盐湖钾资源可持续开发及同类盐湖借鉴。

参考文献

- [1]龙鹏宇,赵艳军,胡宇飞,等.马海盐湖北部矿段低品位固体钾矿中钾盐矿物的赋存特征及成因探讨[J].地球学报,2022,43(3):338-346.
- [2]王朝旭,赵艳军,赵宪福,等.沉积特征对低品位钾矿水溶开采的影响——以柴达木盆地马海盐湖北部矿段全新统为例[J].岩石矿物学杂志,2022,41(5):929-940.
- [3]贺荟文,赵艳军,阮壮,等.柴达木盆地马海盐湖厚层芒硝沉积特征及其成因[J].岩石矿物学杂志,2025,44(2):311-324.
- [4]赵全升,孔智涵,胡舒娅,等.柴达木盆地马海盐湖地下卤水地球物理探测及应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(5):1560-1572.