

摘 要

为解决传统稀土堆浸工艺堆体顶部注液造成堆浸场植被修复难的问题,创造性地提出了一种适应植被修复的新型稀土堆浸技术。采用这种新型堆浸技术时,稀土矿逐级水平堆置,浸矿液从稀土堆体端部横向注入堆体中,这为稀土堆体顶部的植被修复预留了空间,从而可以实现稀土浸取与堆浸场植被修复同步,减小堆浸场的生态破坏。稀土堆浸过程中一个重要问题是堆体中易形成优势渗流通道,这将对堆体的浸出效率和堆体的稳定性造成不利影响。因此,研究新型稀土堆体浸矿优势渗流通道的形成机理及其封堵方法对于新型稀土堆浸技术的推广应用具有重要意义。

本文针对新型稀土堆浸技术的横向注液方案,采用室内模型试验和数值模拟相结合的方法,研究了横向注液条件下离子吸附型稀土堆体优势渗流通道的形成机理,分析了横向注液条件下优势渗流通道的形成及分布对稀土堆体浸取效率的影响;提出并分析了采用稀土细颗粒封堵稀土堆体优势渗流通道的方法。主要取得如下研究成果:

(1) 开展小型室内试验,揭示了横向注液过程中优势渗流通道的形成。研究表明:横向注液条件下,离子吸附型稀土堆体内的细颗粒向远离注液端及堆体下部移动,细颗粒的迁移导致局部位置的粗颗粒骨架之间缺少细颗粒的填充,从而形成优势渗流通道;优势渗流通道主要出现在堆体下部靠注液端的位置,即水头压力大的位置,优势渗流通道的出现导致堆体下部的渗流速度明显快于堆体上部的渗流速度。

(2) 采用室内模型试验研究了横向注液条件下离子吸附型稀土堆体的颗粒运移规律及其渗透特性,分析了稀土颗粒不同粒径组合对堆体渗透性的影响。研究表明:随着浸矿液注液压力的逐渐增加,稀土细颗粒的运动过程分为稳定、启动运移、沉积、再运移四个阶段,造成稀土的渗透系数呈现出稳定、逐渐增大、再稳定和再次增大的变化过程,稀土细颗粒的迁移和渗出导致堆体内稀土的渗透系数呈现出“两端大、中间小”的空间分布不均匀性;不同粒径的稀土颗粒组合对横向注液条件下离子吸附型稀土堆体的渗透性具有显著的影响,粗-细颗粒组合情况下细颗粒易发生迁移且难以沉积,易形成优势渗流通道,细-中颗粒组合情况下细颗粒的迁移程度较低,渗透系数随进液水头的增加变化较为缓慢。

(3) 采用基于双渗透模型的 COMSOL 数值模拟方法,研究了优势渗流通道存在条件下稀土堆体内浸矿液的渗流特征,分析了优势渗流通道的形成及分布对堆体浸取效率的影响。研究表明:优势渗流通道发育区域、发育角度以及优

势渗流通道占比对堆体内浸矿液的渗流特性及堆体浸取效率影响较大,而基质域与优先流域的转换程度对其影响较小,优势渗流通道的存在加快了浸矿液向堆体底部的移动以及发育区域内湿润锋的前移速度,使得堆体顶部的区域的饱和度增加速度放缓,以至于难以完全饱和;当考虑优势渗流通道在堆体内部完全发育情况下,浸取面积减小最多;当优势渗流通道发育角度为 45° 时,优先流域向基质域的水交换程度最强,浸取效率降低最多,降低了 28.09%;随着优势渗流通道占比的增加,水交换发生的时间提前,浸取效率降低;随着基质域与优先流域转换系数的增加,优先流域向基质域的水交换程度增强,但对浸取效率影响较小。

(4) 针对横向注液条件下离子吸附型稀土堆体内优势渗流通道的形成机理,提出了向优势渗流通道内注入细颗粒浆液的封堵方法,并开展相应的模型试验对其进行了验证。研究表明:封堵浆液中稀土颗粒的粒径越小,浆液稳定性越好,颗粒越不容易沉积,使用 0.15 mm 的稀土颗粒作为封堵材料进行封堵是有效的,有效封堵区主要分布在浸矿液注入端附近;随着封堵浆液细颗粒质量占比的增加,封堵区的形成时间和位置将前移,封堵后堆体的渗流流量降低,其中采用稀土颗粒质量占比为 30%和 40%的浆液进行封堵时,封堵后的渗流流量最小。

关键词: 离子型稀土; 堆浸; 优势渗流通道; 颗粒运移; 封堵

ABSTRACT

In order to solve the problem of vegetation restoration in the traditional heap leaching of rare earths, a novel heap leaching technology suitable for vegetation restoration has been creatively proposed. In the novel technology, rare earth ore is horizontally stacked in stages, and the leaching liquid is laterally injected into the rare earth pile from the side end so that space is reserved for vegetation restoration on the top of the pile. This can achieve simultaneous rare earth leaching and vegetation restoration in the heap leaching field, reducing ecological damage to the field. However, a significant issue during the leaching process is the formation of the preferential flow paths in the heap, which negatively affects both the leaching efficiency and stability of the heap. Therefore, studying the formation mechanism and plug method of the preferential flow paths during leaching process is of great significance for the promotion and application of the novel heap leaching technology.

Aim at the lateral injection scheme of the novel heap leaching technology, this study employed the method of combining laboratory experiments and numerical simulation. The research aims to explore the formation mechanism of preferential flow paths in the ion-adsorbed rare earth heap under lateral injection, and assess the effect of the formation and distribution of preferential flow paths on leaching efficiency. A method for plugging preferential flow paths in the rare earth heap using rare earth fine particles was proposed and analyzed. The main conclusion are as follows:

(1) An indoor model experiment was carried out to reveal the formation of preferential flow paths under lateral injection. The results indicate that, under lateral injection conditions, rare earth fine particles move away from the injection end and migrate towards the lower part of the heap. The migration of fine particles led to the lack of filling between the coarse particle skeleton in local positions, thus forming preferential flow paths. Preferential flow paths mainly appear at the position near the injection end of the lower part of the heap, where the hydraulic pressure is higher. The appearance of preferential flow paths causes the permeability of the lower part of the heap to be significantly faster than that of the upper part.

(2) The particle migration rules and permeability characteristics of ion-adsorption rare earth heap under lateral injection conditions were studied by indoor model experiments. The effect of particle combinations at different particle sizes on the

permeability of the heap was analyzed, and the formation mechanism of preferential flow paths in the ion-adsorption rare earth heap under lateral injection conditions was revealed. The results indicate that, with an increase in the injection pressure of the leaching solution, the movement of rare earth fine particles can be divided into stable, mobilization, deposition, and re-mobilization stages, resulting in changes in permeability coefficients of rare earth, which presents a process of stable, gradually increasing, stable again, and increasing again. The migration and exudation of the fine rare earth particles result in uneven distribution of the permeability in the pile. Specifically, the permeability is higher at both ends and lower in the middle of the rare earth pile. The particle combinations at different particle sizes have an important effect on the permeability of the rare earth pile under lateral injection conditions. For soils with a coarse-fine particle combination, fine particles migrate more easily and difficult to deposition, leading to the formation of preferential flow paths. While for soils with a medium-fine particle combination, the degree of fine particle migration is relatively low, and the permeability coefficient changes more slowly with increasing pressure head.

(3) The numerical simulation based on the Dual-Permeability model in COMSOL was used. In this study, the seepage characteristics of leaching solution in rare earth pile with preferential flow paths were studied, and the influence of the formation and distribution of preferential flow paths on the leaching efficiency of heap was analyzed. The results indicate that, the development area, development angle, and proportion of preferential flow paths have a significant impact on the seepage characteristics and the leaching efficiency, while the transformation degree between the matrix domain and preferential flow domain has a minor effect. The existence of preferential flow paths accelerated the seepage of leaching solution to the bottom of the pile and the advance speed of the wetting front in the development area. This causes a slower increase in the saturation rate at the top of the heap, making it difficult to reach saturation. When the preferential flow paths are fully developed inside the heap, the leaching area decreases the most. When the development angle of preferential flow paths is 45° , the water exchange between the preferential flow domain and the matrix domain is the strongest, and the leaching efficiency is reduced the most, by 28.09%. As the proportion of preferential flow paths increases, the time of water exchange is advanced, and the leaching efficiency decreases. With the increase of the transition coefficient between the matrix domain and the preferential flow domain, the degree of water exchange

between the preferential flow domain and the matrix domain increases, but the impact on leaching efficiency is relatively small.

(4) Aiming at the formation mechanism of preferential flow paths in ion-adsorption rare earth heap under lateral injection conditions, a plugging technique of injecting fine particle slurry into the preferential flow paths was proposed. A model experiment was conducted to validate the effectiveness of the plugging technique. The results indicate that, the smaller the particle size of rare earth particles in the plugging slurry, the better the stability of the slurry, and the less likely the particles are to settle. Using 0.15 mm rare earth particles as the plugging material is effective. The effective plugging area is mainly distributed near the ore leaching inlet. As the proportion of fine particles in the plugging slurry increases, the formation time and position of the plugging area will shift forward. After plugging, the seepage flow decreases, among which the slurry with rare earth particle content of 30% and 40% has the smallest seepage flow.

Key Words: Ionic rare earth; Heap leaching; Preferential flow paths; Particle migration; Plugging

目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 选题背景与意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.2.1 优势渗流通道形成机理.....	3
1.2.2 优势通道对渗流的影响.....	4
1.2.3 优势渗流通道封堵技术.....	6
1.3 本文主要研究内容与技术路线.....	6
1.3.1 本文主要研究内容.....	6
1.3.2 技术路线.....	7
第 2 章 新型稀土堆体浸矿优势渗流通道形成机理.....	9
2.1 概述.....	9
2.2 新型稀土堆浸结构与注液方案.....	10
2.2.1 新型稀土堆浸结构.....	10
2.2.2 横向注液方案.....	11
2.3 横向注液条件下稀土堆体优势渗流通道的形成与分布.....	11
2.3.1 离子吸附型稀土堆浸模型试验.....	11
2.3.2 优势渗流通道的发育与分布.....	14
2.3.3 稀土颗粒运移现象.....	15
2.3.4 稀土颗粒含量的变化.....	16
2.4 不同粒径稀土颗粒组合对优势渗流通道形成的影响.....	19
2.4.1 稀土堆置过程中的颗粒偏析.....	19
2.4.2 模型试验.....	20
2.4.3 渗透系数随进液水头的变化规律.....	24
2.4.4 浸出液随进液水头的变化规律.....	29
2.4.5 浸矿前后稀土矿样的颗粒级配变化.....	32
2.5 本章小结.....	36
第 3 章 优势渗流通道对新型稀土堆体浸取效率的影响.....	38
3.1 概述.....	38
3.2 优势入渗模型与参数.....	39
3.2.1 非饱和渗流场控制方程.....	39
3.2.2 双渗透模型方程.....	40

3.2.3	离子型稀土矿的水力参数.....	42
3.2.4	双渗透模型适用性验证.....	47
3.3	优势渗流通道对稀土堆体渗流特征的影响.....	49
3.3.1	数值计算模型.....	49
3.3.2	优势渗流通道发育位置的影响.....	50
3.3.3	优势渗流通道发育角度的影响.....	52
3.3.4	优势渗流通道占比的影响.....	55
3.3.5	基质域与优先流域转换系数的影响.....	57
3.4	优势渗流通道对新型稀土堆体浸取面积的影响.....	59
3.4.1	优势渗流通道发育位置的影响.....	59
3.4.2	优势渗流通道发育角度的影响.....	60
3.4.3	优势渗流通道占比的影响.....	62
3.4.4	基质域与优先流域转换系数的影响.....	63
3.5	本章小结.....	64
第4章	新型稀土堆体优势渗流通道封堵方法.....	66
4.1	概述.....	66
4.2	稀土细颗粒浆液封堵方法.....	67
4.2.1	封堵材料的选择.....	67
4.2.2	封堵方法.....	68
4.3	稀土细颗粒浆液封堵效果评价.....	69
4.3.1	优势渗流通道封堵模型试验.....	69
4.3.2	稀土颗粒粒径对浆液稳定性的影响.....	70
4.3.3	稀土颗粒质量占比对封堵效果的影响.....	73
4.4	本章小结.....	78
第5章	结论与展望.....	79
5.1	本文主要结论.....	79
5.2	展望.....	80
	参考文献.....	81
	致谢.....	87
	攻读学位期间的研究成果.....	88

第1章 绪论

1.1 选题背景与意义

离子吸附型稀土是最早在江西发现的一类独特的在高新技术领域有重要作用的战略资源，是含稀土矿物的各种原岩在温暖湿润的气候下风化淋积而成，属次生矿种^[1,2]。该类资源具有表面展布、矿床小等特点，主要分布在我国的江西、广东、福建等省份发现了离子型稀土矿^[3]。近年来，在其他一些地方和国外也有发现^[4]。

在离子吸附型稀土的开采工艺中，经历了池浸、堆浸到原地浸矿的发展。由于池浸的浸取效率较低而被放弃使用^[5]。目前，离子吸附型稀土的浸矿方式主要有原地浸矿、堆浸^[6-8]，如图 1-1 所示。原地浸出是将浸矿液注入矿山山体上的注液井，通过自然渗流作用至山体内部进行浸矿。虽然此方法可以保护原地矿山的完整性，但因矿床不均匀，往往导致过量高浓度浸矿液的非预见性流失，造成严重的环境污染和资源浪费^[8]。堆浸工艺是将原矿运放在提前平整好的堆场上，并布置浸矿液在堆顶，通过自然渗透将稀土离子置换出来，浸出液从堆底的汇流渠汇集回收。相对于原地浸矿，堆浸的浸矿方式更为可控，能减少浸矿液对环境的污染，并且堆浸的浸取效率也更高^[9]。因此，在一些地质条件复杂、不满足原地浸矿要求的稀土矿中，可以使用堆浸的浸矿方式。传统堆浸方式在顶部覆盖浸矿液对稀土矿进行浸取，但这种方式拖延了顶部生态修复的时间，增加了后续生态修复的难度^[10,11]，因此，在国家重点研发计划项目的支持下，项目团队研发了一种适应植被修复的新型堆浸技术^[12]。



(a) 池浸



(b) 原地浸矿



(c) 堆浸

图 1-1 离子吸附型稀土的浸矿模式

矿堆浸出的一个重要问题是堆体中优势渗流通道的形成。优势渗流通道的形成为液体进入堆体内部提供了优势通道，导致浸矿液沿着渗透率高的优势通道流动。这对堆体的浸出效率和堆体的稳定性都有不利的影响。例如，在离子吸附型稀土矿的入渗试验中，浸矿液的不均匀性影响浸出速率，随着优先流比的增加，稀土矿体中的浸出率逐渐减小^[13]。在堆浸系统中，局部优势渗流通道的产生导致了浸矿液的不均匀流动，这减少了矿液接触，从而导致回收率降低^[14]。在石油开采领域中，由于注水过程中黏土矿物颗粒迁移并堵塞孔道，使得储层渗透性降低，而严重影响采收率效益^[15]；或是注水导致的局部渗透性增加，使得注入水沿着渗透性高的优势通道形成低效或者无效循环^[16]。在原地浸取尾矿实验中，渗透性好的区域，容易造成过度浸取；而在渗透性差的区域，容易产生浸矿液滞留和浸取不足^[17]。实际上，相互连接的孔隙空间网络和堆中优先流路径的分布往往是未知的。忽略优先流的影响会导致对浸出效率的高估，特别是在浸出的早期阶段^[14]。优势渗流通道所引发的优先流是地质灾害发生的主要原因之一。由于优先流动而导致的孔隙水压力的局部尺度增加，降低了边坡的稳定性^[18]。在稳定性的数值计算中，倘若不考虑优先流，将高估边坡稳定性^[19]。该新型稀土堆体结构的特点是在端部水平注入浸矿液，便于堆体顶部的生态恢复。因此，研究新型稀土堆体浸矿优势渗流通道形成机理及封堵方法具有重要意义。

为此，本文以新型稀土堆体结构为研究对象，基于新型堆体结构的浸矿方式，初步探索了浸矿过程中优势渗流通道的形成机理。通过自行设计的满足逐级加压的横向注液试验装置，研究了横向注液条件下不同粒径组合以及注液水头对优势渗流通道形成的影响，进一步揭示了优势渗流通道的形成机理。利用双渗透模型分析了横向注液条件下优势渗流通道的形成及分布对稀土堆体浸取效率的影响。提出并分析了采用稀土细颗粒封堵稀土堆体优势渗流通道的方法。研究结果可为离子吸附型稀土新型堆浸技术的高效浸取和堆体稳定控制提供参考依据，这对新

型稀土堆浸技术的推广应用具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 优势渗流通道形成机理

优势渗流通道是土壤中具有高渗透性的导水通道。这些通道的大小和形状有很大差异，有圆柱形的管道、不规则的孔隙、交错复杂的裂隙和显然可见的裂缝等。先前的学者对优势渗流通道进行了详细的形态分类。按照形态进行分类，可以将优势渗流通道划分为面状、管状及粒间优势渗流通道。不同形态的优势渗流通道形成机制也不同。

面状优势渗流通道以发育的结构面为主，包括节理、裂隙等等，如图 1-2(a)所示，其形成原因主要是因为土壤在含水量变化的干湿交替过程中发生胀缩。在干燥条件下，土壤含水量下降，引起土体收缩，最后形成裂隙；在湿润条件下，土壤含水量增加，引起土体膨胀，使得部分孔隙连通性减弱^[20]。在气候变化引起的冻融交替过程中，优势渗流通道也会形成，尤其在寒冷地区^[21]。气温越低，冻融裂隙的发育程度越大，深度也越大。当土壤遭受侵蚀或挖空而产生临空面时，随着应力释放会向临空方向产生变形或松动，形成卸荷裂隙^[22]。土壤越疏松，收缩能力越大，利于产生裂隙通道^[23]。

管状优势渗流通道以洞穴、根孔及虫洞为主，如图 1-2(b)、(c)所示。鼠类等动物、蚯蚓和蚂蚁在土壤内翻滚或挖掘洞穴等行为会形成孔隙和通道，且形成的通道大多数呈管状。其中鼠类等由于体型较大，容易形成洞穴，直径在十几厘米范围内^[24]。蚯蚓在土壤中形成的优势通道的直径通常在 2-11 mm^[25]。蚂蚁在土壤中形成的优势通道的直径通常在 2-50 mm^[26]。植物的根系也可以形成优势渗流通道，生长过程中对周围土体产生挤压作用而形成管状通道^[27]。除树木的根系之外，草的根系也同样可以形成优势通道。Strudley 等^[28]研究表明低矮的草本植物根系对管状通道的形成具有阻碍作用，减少管状通道的连通性。通过人为干扰导致优势通道形成的外部原因同样可以形成大孔隙。粗质土中的管状优势通道存在时间较短，而在细质土中管状通道能保存较长时间。

粒间优势渗流通道主要以多孔介质孔隙结构的变化为主，如图 1-2(d)所示，大颗粒之间形成土体骨架及孔隙，为液体入渗提供微观通道。土壤结构的变化是形成优势渗流通道的重要因素。孔隙结构的变化对应着渗透性的变化。由于孔隙中可运移颗粒的运动，使有效渗流孔径逐渐增大，进而使矿样连通性逐步增强。Liu 等^[29]通过柱浸实验研究了颗粒级配、颗粒迁移对原地浸矿过程中渗透系数的

影响，认为不均匀系数越大，颗粒骨架的稳定性越差，容易发生细颗粒运移。土体中原始的孔隙结构由于注入液体对孔隙、孔隙骨架和胶结物的渗流和化学作用，使得土壤孔隙中的矿物颗粒发生迁移，同时由于黏土颗粒遇水水化、分散运移、膨胀等。综上，使得土体中渗透性发生改变，造成渗透率差异性增大，部分区域的孔喉半径增大，从而形成优势渗流通道。Wang 等^[30]进行了室内渗流试验，研究发现，在清水通过矿体时，由于细颗粒的运移，孔隙率和渗透系数均先增大后趋于稳定。Wang 等^[31]利用核磁共振技术研究了浸矿过程中孔隙结构的演化特征，并分析了渗流离子交换反应对矿体微观结构的影响，结果表明离子交换引起了颗粒的运动和重组。土壤中的砾石广泛存在，不同的分布状态的砾石通过影响优势通道的形成，进而影响土壤的水的渗流特性，砾石粒径通常远大于黄土体的土粒粒径，在二者的接触面形成的砾-土间空隙就构成优势通道。

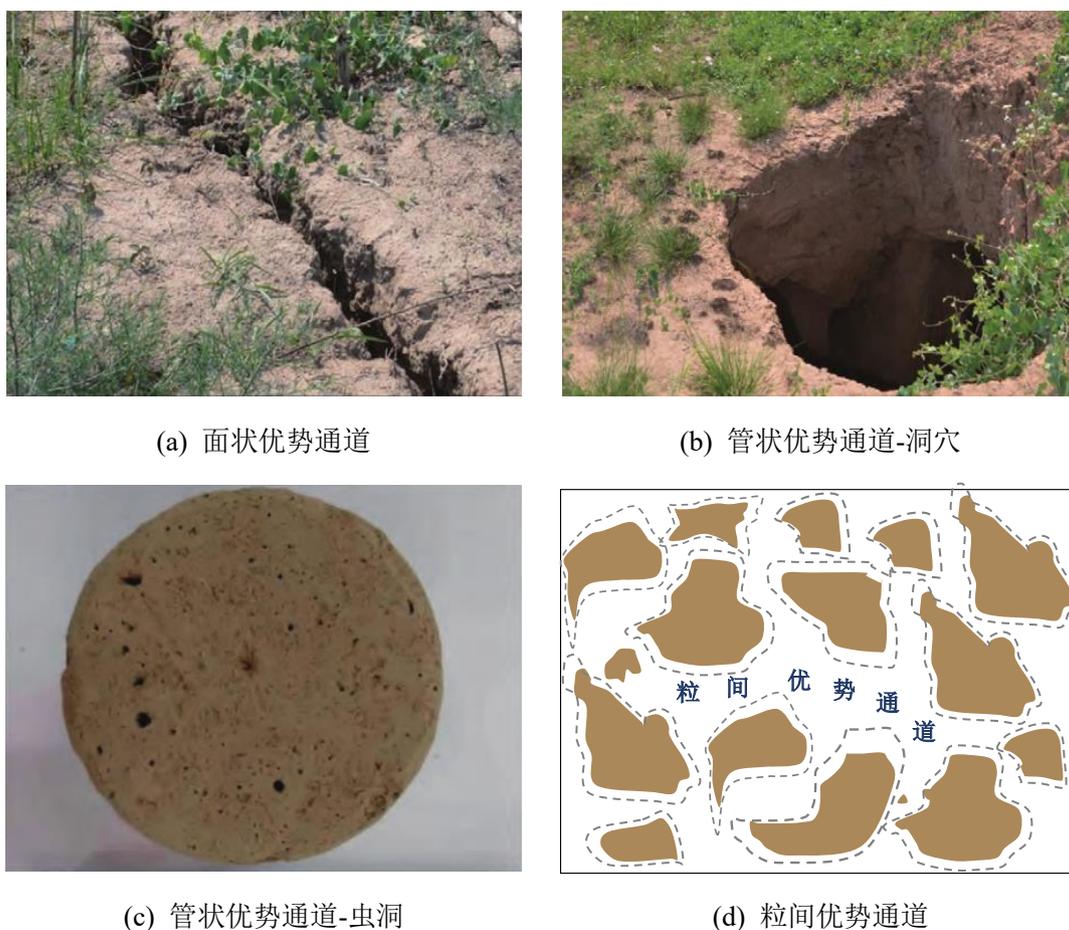


图 1-2 优势渗流通道分类模型图^[32]

1.2.2 优势通道对渗流的影响

在自然的地质条件下，存在大量不规则孔隙和裂隙等优势通道，这些通道在渗流分析当中均会被忽视^[33]。优势渗流通道的形成为液体进入堆体内部提供了

优势通道，而液体在通道中的流动方式称为优先流。具体来说，优先流指的是水流和溶质以违背达西定律为形式，沿着原生或次生的导水能力强的孔隙、裂隙等优势通道，快速到达土体深部和地下水的非平衡流现象。

由于优势通道所构成的裂隙网络极为复杂，为了深入了解优势通道对渗流特征的影响，国内外学者进行了大量研究。众多学者从简单到复杂的思路，首先对单一裂隙通道的渗流特征开展了研究，蒋宇静等^[34]指出单裂隙通道是研究裂隙岩体优势渗流的基础。在此基础上，一些学者研究了裂隙粗糙度对渗流特征的影响，表明裂隙通道的表面粗糙度可在不同程度上影响裂隙网络中的流动过程^[35-37]。此外，刘小军等^[38]指出节理对土壤内水分场影响较大，随着节理数量的增加，湿润区深度增大；随着节理间距的增大，入渗深度减小。赵涛等^[39]研究了暴雨情况下不同深度的裂隙对边坡渗流及稳定性的影响。Yin 等^[40]开展了各种角度的裂隙优势通道的加载卸载渗流试验，分析了优势通道夹角对临界水力梯度的影响。Dang 等^[41]研究表明剪切位移和粗糙度变形共同影响着剪切裂缝中的流动特性。Wang 等^[42]建立了不同孔隙大小和连通性的模型并模拟动态渗流过程，研究表明，孔隙大小的变化影响了裂隙中的渗流稳定速度。黄帆等^[43]指出开度较大的贯通裂隙通道对优势渗流起主导作用。

早些年，对非均匀渗流认识的不足以及 Richards 方程和活塞流理论一定程度上适用性，限制了优势通道对渗流影响的研究。然而，由于自然界优先流现象的普遍存在。因此，直到 20 世纪 80 年代，传统理论无法解释地下水中农药化肥等污染现象，才开始认真关注优先流^[44]。为了深入研究优势通道对渗流的影响，学者对优先流和基质流共同作用下渗流数值模拟进行了研究。建立了多个不同的入渗模型，其中常见的优先流模型有连续性模型、离散模型。连续性模型是基于均质介质假设建立的连续性模型理论，是目前描述均质土壤水分运移和土壤溶质运移的主要基础理论研究方法^[45, 46]。虽然连续性模型理论在均质介质中对水流运动问题有着很好的解决方案，但是由于流体运动具有尺度效应、各向异性和非线性特性，在非均质介质中仍有无法解决的问题^[47]。因此，为了解决连续性模型理论无法解决的问题，离散模型最近几年得到了广泛的应用。与连续性模型大不相同，离散模型将土壤中的水视为具有特定形状的“粒子”结构，并包含一些参数信息，应用简单的运动规律将这些“粒子”形成复杂的空间分布，而这种分布模式具有与非均匀水流运动模式在统计方面的相似性^[48, 49]。尽管模型已成功用于描述小尺度的试验结果，但由于其数学计算量和工作量较大，无法广泛应用于解决大尺度试验问题。

1.2.3 优势渗流通道封堵技术

优势渗流通道导致浸矿过程中浸取效率降低,因而对优势渗流通道进行有效封堵是提高浸取效率的方法之一^[50,51]。封堵技术目前主要在油田中广泛运用,封堵工艺可以分成两种类型,分别是物理封堵和化学封堵^[52]。目前封堵主要以机械封堵为主,化学封堵为辅,但目前由于物理封堵有效期短,以及封堵工作量大、时间集中,施工组织难度大,出现了许多问题。与物理封堵不同的是,化学封堵更为复杂,需要根据不同地质特征选择相应的堵剂和注入工艺。但由于化学封堵施工成本高、风险高、地层伤害大,在使用前仍需要谨慎考虑^[53]。

目前,许多学者调配封堵材料并进行试验研究。以阴离子聚丙烯酰胺和有机铝离子交联剂制备的胶态分散凝胶为例,经谢志海等^[54]的研究发现,pH 值在 5.5-7.5 之间,温度范围为 25-50°C 时,该体系的性能最优,并适用于低温、低渗透率地层的调剖堵水。孙晓军等^[55]研究发现,将 0.1% 的聚合物溶液与 6.0% 的粘土溶液混合配制可以产生最佳的絮凝效果,且可以有效改善非均质厚油层的开发效果。于宏宇等^[56]研究发现,在杏南开发区地层的孔径分布规律和储层性质适合开展粘土调剖,该调剖剂的最佳用量为空隙体积的 14%-18%。高超利等^[57]研制了三种含油污泥深部调驱剂体系进行试验,试验后发现采油厂的产量增加、含水量降低。王健等^[58]制备了高温堵剂,通过性能评价发现该堵剂耐盐性、耐温性和老化稳定性优异;在封堵试验中,该堵剂的封堵率高达 99%,证明其具有良好的封堵性能,能长期有效封堵水流通道。近些年来,采用含油污泥堵水调配技术对油田进行封堵研究,现场试验表明,含有污泥堵水调配技术能够有效封堵高渗透层^[59]。夏鹏^[60]采用纳米封堵材料进行试验研究,利用多级分布的固体颗粒架桥、堵塞裂隙,从而形成封堵层。

1.3 本文主要研究内容与技术路线

1.3.1 本文主要研究内容

针对新型稀土堆体结构浸矿中优势渗流通道问题,本课题进行如下研究:

(1) 第 1 章阐述选题的背景及其研究意义。详细介绍目前国内外的研究现状,并提出本文主要研究内容与思路。

(2) 第 2 章研究新型稀土堆体浸矿优势渗流通道形成机理。介绍了新型稀土堆浸结构与注液方案;分析了离子吸附型稀土矿的土样性质;进行模型试验,并通过试验研究,观察了优势通道的发育与分布,并通过颗粒级配分析,揭示了横

向注液过程中优势渗流通道的形成原因。进一步的，通过自行设计的一种可以满足逐级加压的横向注液试验装置，用以模拟新型稀土矿堆的浸矿方式。以原位离子型稀土矿的颗粒级配为基准，分成三种不同粒径组合并两两粒组之间进行组合，开展室内模型试验，结合渗透系数、浸出液和浸矿前后颗粒级配的变化，研究了不同粒径组合对堆体渗透性的影响，揭示了横向注液条件下离子吸附型稀土堆体优势渗流通道的形成机理。

(3) 第 3 章研究优势渗流通道对新型稀土堆体浸取效率的影响。利用 COMSOL 构建了双渗透模型；室内试验确定了离子吸附型稀土矿的水力参数；验证了基于双渗透模型的 COMSOL 数值模拟方法的适用性；通过对比传统单渗透模型和双渗透模型中浸矿液的渗流效果，研究了优势渗流通道存在条件下稀土堆体内浸矿液的渗流特征，分析了优势渗流通道发育区域、发育角度、占比以及两域转换系数对新型堆体结构浸取面积的影响。

(4) 第 4 章研究新型稀土堆体优势渗流通道封堵方法。针对横向注液条件下离子吸附型稀土堆体内优势渗流通道的形成机理，提出了向优势渗流通道内注入细颗粒浆液的封堵技术；通过对自行设计的横向注液试验装置加装注浆装置开展了封堵模型试验；以离子吸附型稀土细颗粒为主要封堵材料，通过分散性实验考察不同粒径和不同质量占比下封堵浆液的稳定性；通过封堵前后渗流流量和监测点孔隙水压力的变化，评价封堵浆液的封堵效果，揭示以离子吸附型稀土细颗粒为主要封堵材料的封堵机理。

(5) 第 5 章为结论与展望。总结本文所做的研究工作，并对下一步的研究工作进行展望。

1.3.2 技术路线

本课题的研究技术路线如图 1-3 所示：

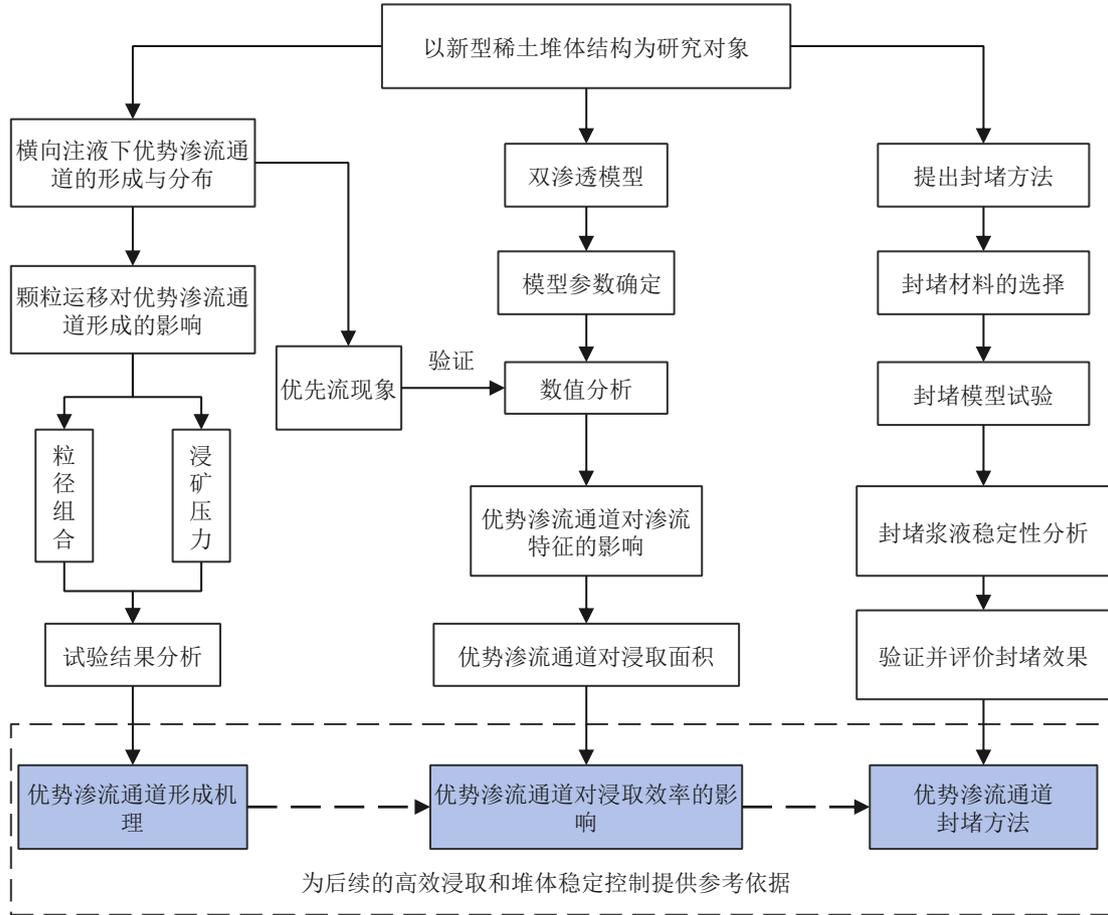


图 1-3 技术路线图

第2章 新型稀土堆体浸矿优势渗流通道形成机理

2.1 概述

优势渗流通道的形成为液体进入堆体内部提供了优势通道,浸矿液会随着沿着高渗透性的通道无效循环,造成减少浸矿液与稀土矿接触面积、浸取效率降低等问题。并且,优势渗流通道所引发的优先流是地质灾害发生的主要原因之一^[61, 62]。在浸取稀土矿的过程中,孔隙结构的变化主要是由于物理、化学作用下矿物颗粒的迁移和沉积造成的^[63]。由于稀土矿颗粒受到浸矿液的渗透力以及分散作用等,导致细小矿物颗粒在粗颗粒形成的孔隙结构中运移与沉积,使得矿堆中空间位置的渗透性发生改变,从而影响浸矿液在矿堆中的渗透效果。同时,浸矿液在矿堆中的渗透效果是决定浸取效率的重要因素^[14, 64],罗嗣海等^[13]在江西安远离子型稀土矿山开展原地浸矿实验中研究了渗透系数的非均匀性对浸取率的影响,发现在垂直入渗时优先流比越高,即非均匀系数越高,浸取率减低。因此,有必要研究离子吸附型稀土在浸矿过程中高渗透性的优势渗流通道形成机理。

目前的研究主要集中在浸矿液垂直入渗的柱浸试验,有关浸矿液横向注入稀土矿的试验研究很少,其中,极少开展不同粒径组合对优势渗流通道形成影响的试验研究。颗粒级配是影响矿体渗透性的重要因素之一^[65]。通过控制堆置过程中稀土矿的颗粒级配,可以达到改善浸矿液渗流效果的作用。尹升华等^[66]发现黏土颗粒的含量对离子型稀土矿样的渗透性有很大的影响。特别地,稀土矿堆置过程中由于偏析现象而导致不同粒径的颗粒分离^[67]。不同粒径颗粒之间会进行重新组合,这意味着稀土堆置后的颗粒级配并不是严格等同于原位开采的颗粒级配。新型稀土堆体结构注液方案的特点是端部横向注入浸矿液,并且这种形式有利于堆体顶部的生态恢复。因此研究横向注液条件下不同粒径组合对堆体内渗透性的影响,可以对后面实现高效浸取提供参考。

因此,本章在实验室针对横向注液条件下的新型稀土堆体进行了小型模型试验,通过试验研究,观察了优势通道的发育和分布,并通过颗粒级配分析,揭示了横向注液过程中优势渗流通道的形成。进一步地,通过自行设计的一种可以满足逐级加压的横向注液试验装置,用以模拟新型稀土矿堆的浸矿方式。以原位离子型稀土矿的颗粒级配为基准,分成三种不同粒径组合并两两粒组之间进行组合,开展室内模型试验,结合渗透系数、浸出液和浸矿前后颗粒级配的变化,分析了横向注液过程中颗粒迁移对堆体的渗透性的影响,研究了不同粒径组合对优势渗流通道形成的影响。

2.2 新型稀土堆浸结构与注液方案

2.2.1 新型稀土堆浸结构

为了解决传统稀土堆体浸出过程中的植被恢复问题,提出了一种新型稀土堆浸结构^[68]。该结构采用分级可生长式堆体,逐级进行堆置浸取,并且在已浸取过的堆体表面进行修复,来保证堆浸过程的有序性和有效性,其堆体结构和浸矿液注流方案如图 2-1 所示。首先,需要在矿山上选择一个端部及底部基岩性质较好的堆浸场地,在底层基岩顶部布置不透水的底垫。在端部基岩表面设置注液管网,通过端部注液的方式将浸矿液横向注入矿堆中。然后,将第 I 级堆体堆置在靠近端部的基岩旁边,同时保证矿堆土样的密实度和渗透系数均满足浸出效率和矿堆稳定性的要求。紧接着将浸矿液水平注入矿堆中,开始第 I 级堆体的浸出。第 I 级堆体浸取完成后,将第 II 级堆体堆置在第 I 级堆体旁边,同时,在第 I 级堆体的顶部进行植被恢复工作。按照同样的程序,稀土堆体继续生长,稀土浸取和植被恢复也在同步进行。在逐级堆放和浸取过程中,需要提高管网的注液压力,以保证后期堆体的正常浸出。当堆置到某一级的浸出效率显著降低时,堆置和浸取的过程在该级结束。

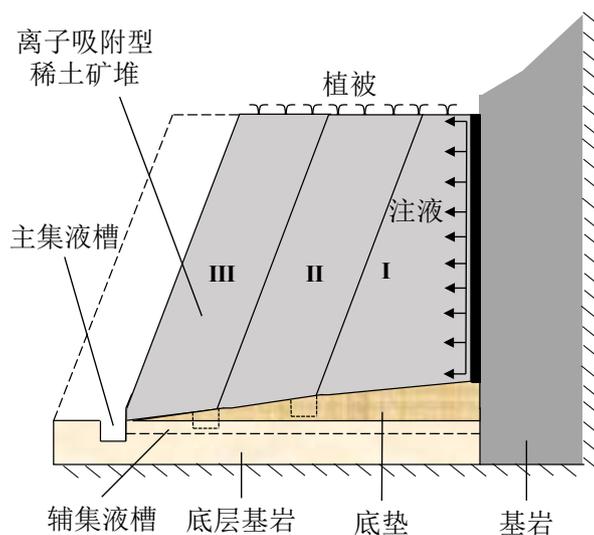


图 2-1 堆体结构和浸矿液注流方案

项目团队采用强度折减法研究了不同坡高、坡角和堆置长度条件下的矿堆稳定性。研究表明:堆置长度对堆体稳定性影响较小,而坡高和坡角对堆体稳定性影响较大。通过优化计算,得到了适宜的坡高和坡角选择范围,建议坡高选择在 10-15 m,相应的坡角范围宜选择在 57°-47°。在保证坡体稳定性的前提下,建议

横向堆置长度尽量小于 10 m。

2.2.2 横向注液方案

新型稀土堆浸结构的浸矿液横向注流方案，具体如下：

(1) 在稀土矿存放场地的端部基岩上设置注液管网，横向主管选用管径为 50 mm 的 PE 管，竖向分支管选用管径为 20 mm 的 PE 管。同时，在布置注液管网的基础上，铺设第 I 级坡体的不透水底垫，可选材料为高密度聚乙烯材料，底垫的角度应与横向堆置方向呈 3° - 5° 的倾斜角；

(2) 将坡体分为多级进行堆置，每级垂直于横向堆置方向的剖面应大致对称且呈梯形状，各级坡体高度一致，建议坡高在 10 m-15 m 之间，并调整各级坡体的坡角以确保其稳定性，在 50° - 60° 之间为宜。堆置完成后，在各级稳定坡体周围布置集液槽，向外堆置方向的一侧设置主集液槽，坡体两侧则设置辅集液槽。同时，在稀土存放场地预留出堆置场地，方便进行端部基岩注液管网的施工；

(3) 当集液槽部署完毕后，启动端部加压管，利用注液管网喷洒浸矿液。在坡体逐级堆浸的过程中，通过调节注液管网中浸矿液的注液压力，确保各级坡体正常地被浸取。在浸矿过程中，主集液槽和辅集液槽还需收集稀土母液。在后一级坡体堆浸时，对前一级坡体的顶部进行植被修复；

(4) 当最后一级坡体的浸取效率明显降低时，表明整个坡体本体的堆浸已结束。此时，在最后一级坡体的顶部进行植被修复。

横向注液过程中，需注意以下内容：

(1) 打开端部加压管，利用注液管网注入浸矿液进行浸取。第 I 级坡体的主集液槽和辅集液槽将稀土母液收集起来。收集完成后，将第 I 级坡体的主集液槽填满，辅集液槽不予处理，第 I 级坡体的主集液槽的填平后低于第 I 级坡体；

(2) 第 II 级坡体的不透水地垫与第一级坡体的底垫相连接。重复第 I 级坡体的步骤堆浸第 II 级坡体，同时第 I 级坡体的顶部进行植被修复；

(3) 第 III 级坡体的堆浸过程同第 II 级坡体，逐级进行堆浸，同时在前一级坡体的顶部进行植被修复。

2.3 横向注液条件下稀土堆体优势渗流通道的形成与分布

2.3.1 离子吸附型稀土堆浸模型试验

(1) 土样性质

土样取自中国江西省赣州市定南县岭北离子吸附型稀土矿，如图 2-2 所示。

土样中的主要矿物为高岭土类粘土矿物（15-40%）、石英（40-45%）、残余（钾）长石（10-25%）和云母（5%），三者占 94%左右。这些矿物的化学成分主要为 SiO_2 （67-78%）和 Al_2O_3 （5-19%）。紧接着为 K_2O （0.3-6%），其次是 Na_2O （0.1-5%）、 Fe_2O_3 （0.7-2.5%）。 Fe_3O_4 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O 和 K_2O 的含量均较低，仅占 8%。

依据《土工试验方法标准》对土样进行了比重测定以及颗粒级配分析试验。



(a) 江西省定南县岭北离子吸附型稀土矿

(b) 模型槽试验土样

图 2-2 离子吸附型稀土土样

采用比重瓶法测定离子吸附型稀土矿的比重。在试验开始前，首先将比重瓶烘干，随后将烘干好的土样装入比重瓶。为了将稀土矿颗粒之间的空气尽可能排出，将纯水加入装有土样的比重瓶中至一半，并摇动比重瓶，并砂浴加热至煮沸。最后，注入纯水，等待温度降至室温。在试验中，称量的结果准确至 0.001 g，按照以下公式进行计算：

$$G_s = \frac{m_d}{m_{bw} + m_d - m_{bws}} G_{wT} \quad (2.1)$$

其中， m_d 为干土的质量，g； m_{bw} 为比重瓶与水的总质量，g； m_{bws} 为水、比重瓶和干土的总质量，g； G_{wT} 为 $T^\circ\text{C}$ 下的纯水的比重； G_s 为试验土样的比重。如表 2-1 所示，通过比重试验可以得到稀土土样的比重为 2.587。

表 2-1 稀土土样的比重试验表

m_d/g	m_{bw}/g	m_{bws}/g	$T/^\circ\text{C}$	G_{wT}	G_s	平均
12.548	77.473	85.172	29	0.996	2.577	2.587
12.308	77.501	85.09	30	0.996	2.597	

如图 2-3，对稀土土样进行了室内筛分试验。试验前将稀土烘干，并称重筛子的质量。为了保证稀土颗粒被有效地筛分开来，其在振荡机中筛分的时间至少 10 min。最后测量每一筛网和稀土的总质量，计算得到不同粒径下的稀土的重量，如图 2-4 为颗粒级配试验结果。根据颗粒分析试验测试的结果，粒径小于 0.25 mm 范围的颗粒占 51.1%，粒径在 0.25-2 mm 范围的颗粒占 23.2%，粒径大于 2 mm 的颗粒占 25.7%。并且离子型稀土土样的 d_{10} 、 d_{30} 、 d_{60} 分别为 0.041 mm、0.09 mm 和 0.6 mm，得到稀土土样的不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 分别为 14.63, 0.33，

该离子吸附型稀土矿样的级配不良、土粒不均匀，属于粗颗粒中的粉土质砂。在不均匀的土体骨架中，在浸矿过程中可能会使细颗粒在孔隙中迁移，局部形成优势渗流通道。



图 2-3 室内筛分试验

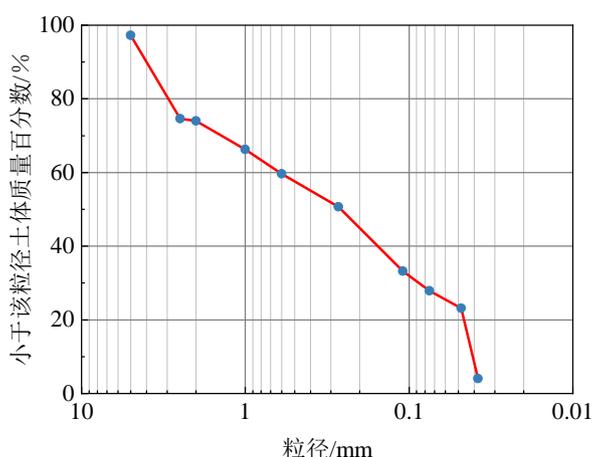


图 2-4 离子吸附型稀土的颗粒级配

(2) 试验方法

为了研究在横向液体注入条件下稀土堆体中优势渗流通道的形成，在透明玻璃槽中进行了小型模型试验，示意图如图 2-5(a)所示。试验前将土样进行烘干，随后将稀土土样分层堆积在玻璃槽中，如图 2-5(b)所示。在堆放过程中，矿堆分层压实，每层厚度为 2 cm。通过预先计算好的所需干土质量，将土样的孔隙比尽量控制在 1.0。小型稀土堆体的高度为 0.25 m，上部长度为 0.4 m，下部长度为 0.65 m，厚度为 0.28 m。在注液端安装供液箱，向小型堆体中注入液体。在堆体和供液箱之间，插入一个多孔的亚克力板进行分离。试验过程中，注液端的水头保持在 0.25 m，与堆体模型高度相同。通过饱和水位管 A-E 观察堆体内部饱和水位线的变化。

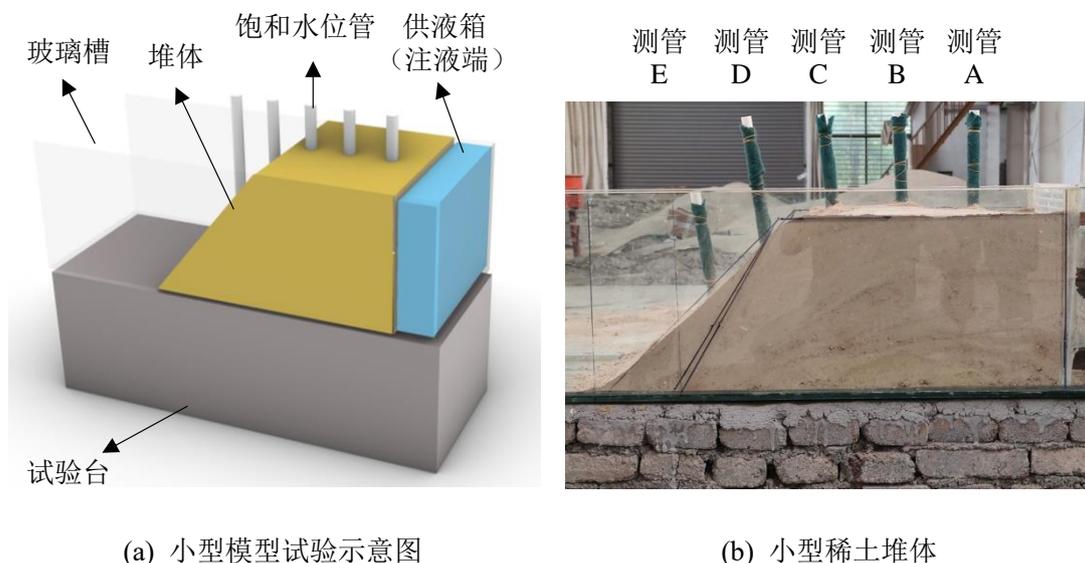


图 2-5 新型稀土堆浸模型试验

2.3.2 优势渗流通道的发育与分布

在横向注液的过程中，发现存在优势渗流通道。为便于分析，在堆体范围内的玻璃槽上绘制了水平、垂直网格线和 10 个观测点，如图 2-6 所示。网格间距为 0.05 m，液体注入开始后，在堆体下部 10 号观测点附近形成优势渗流通道 (Preferential flow path)，记为 PFP。两小时后，该通道延伸到距离液体注入端 0.15 m 的位置，如图 2-6(a)。在液体注入 20 小时后，通道继续发育到 9 号观察点附近，该通道延伸到距离液体注入端 0.25 m 的位置，如图 2-6(b)所示。此后，该优势渗流通道停止了它的发育，如图 2-6(c)。在后期的浸出过程中，没有出现新的优势渗流通道。在横向注液条件下，优势渗流通道主要发育在靠近注液端、偏堆体下部的位

置。从图 2-6 可以看出，堆体下部的湿润锋快于顶部的湿润锋。这部分是因为在横向注液下，注液压力从上到下线性增加。在 $T=2\text{ h}$ 时，底部的润湿前锋已经领先顶部湿润锋 0.15 m。在 $T=20\text{ h}$ 时，优势渗流通道延伸 9 号观测点，底部的湿润前锋已经领先顶部湿润锋 0.20 m。优势渗流通道的形成和增长也会使底部的液体流动得更快。这种由于优势渗流通道导致的快速液体移动会减少浸矿液与稀土颗粒之间的接触时间，导致局部浸出的化学反应不足，从而降低了堆体的浸出效率。因此，研究稀土堆体中优势渗流通道的形成机理具有重要意义。

值得注意的是，在模型试验过程中，当 $T=20\text{ h}$ 后停止生长时，底部润湿前锋的前移速度放缓。但是，不难从图中看出，优势渗流通道的发育加速了堆体底部的液体流动，改变了横向注液下液体在堆体中的渗流效果，出现液体渗流速度“下部快于上部”的非均匀现象，这种液体非均匀流动现象称为优先流。这使得

堆体的上部浸润区域面积减小，从而影响离子吸附型稀土的浸取。

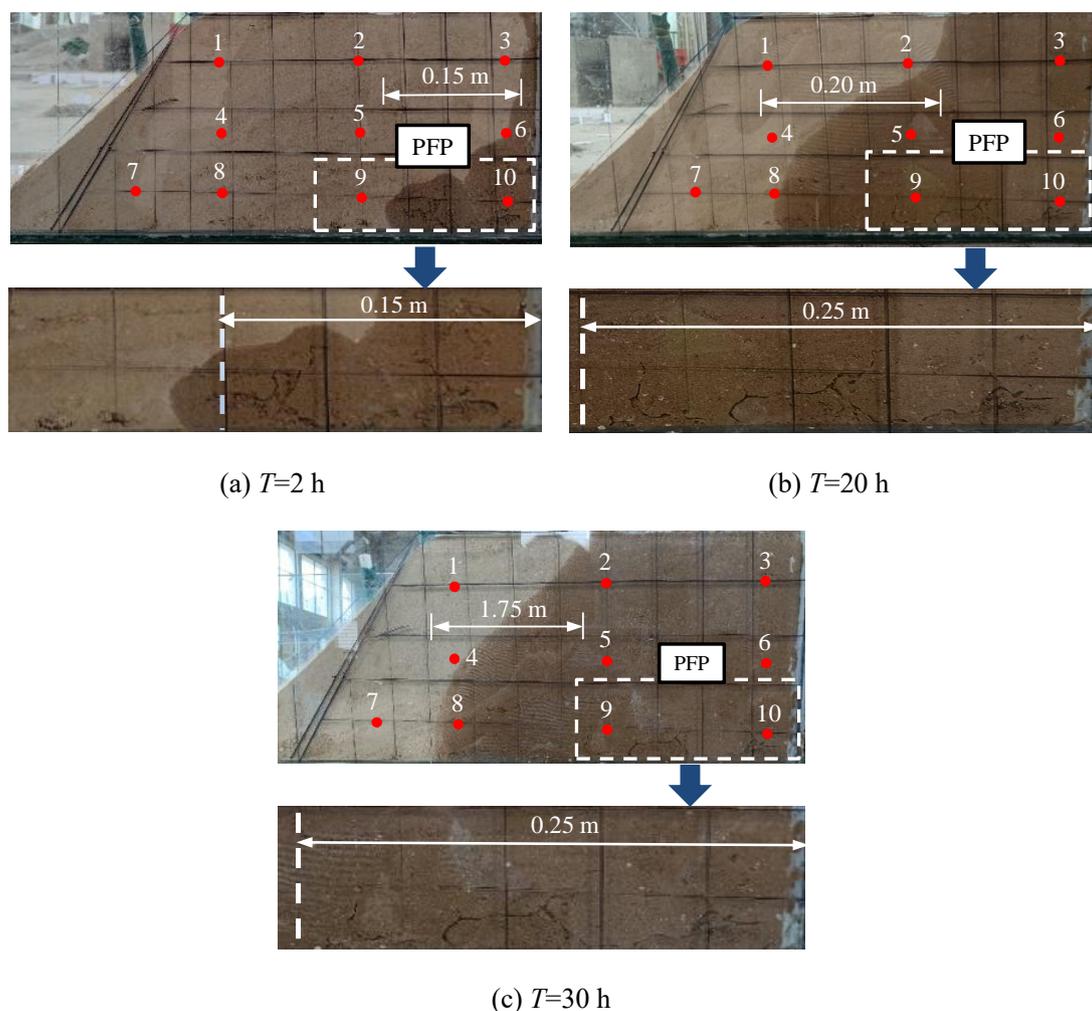


图 2-6 优势渗流通道的发育与分布

2.3.3 稀土颗粒运移现象

在优势渗流通道发育区（测点 9、10 位置处），拍摄并记录到了边壁处稀土颗粒运移现象，取拍摄过程中的一个循环作分析，如图 2-7 所示，图片按照时间顺序排列，时间间隔约为 0.5 s。从图中可以很清晰的发现优势渗流通道有明显的明暗交替变化，通过图中画出的三个虚线位置处，颜色较暗且与周围区域形成鲜明对比，通道的轮廓清晰，如图 2-7(a)所示的三个虚线位置处的通道轮廓的颜色较深，表示此时未有稀土颗粒填充；而颜色较浅且与周围区域无法形成鲜明对比，通道的轮廓模糊，如图 2-7(d)所示的三个虚线位置处的通道轮廓的颜色较浅，说明此时有稀土颗粒填充。在一个循环中，以图 2-7(a)作为起始时间，在第 0.5 s 时(图 2-7b)靠近注液端的位置(最右侧的虚线位置处)率先由清晰变为模糊，此时稀土颗粒开始向着远离注液端的位置进行迁移；在第 1.0 s 时(图 2-7c)中间位置处

的优势通道的轮廓也开始变得模糊,此时稀土颗粒迁移至由注液端迁移至该位置;在第 1.5 s 时(图 2-7d),左侧的虚线位置处的优势通道的轮廓也开始变得模糊,此时稀土颗粒迁移至优势渗流通道的末端;在第 2.0 s 时(图 2-7e),右侧的虚线位置处的优势通道的轮廓由模糊变为清晰,此时边壁处的稀土颗粒停止向远离注液端的位置迁移;在第 2.5 s 时(图 2-7f),优势渗流通道的轮廓变得清晰,此时一轮颗粒运移结束。通过图中三个虚线位置处的明暗交替变化,能够直观地看出颗粒运移的现象。

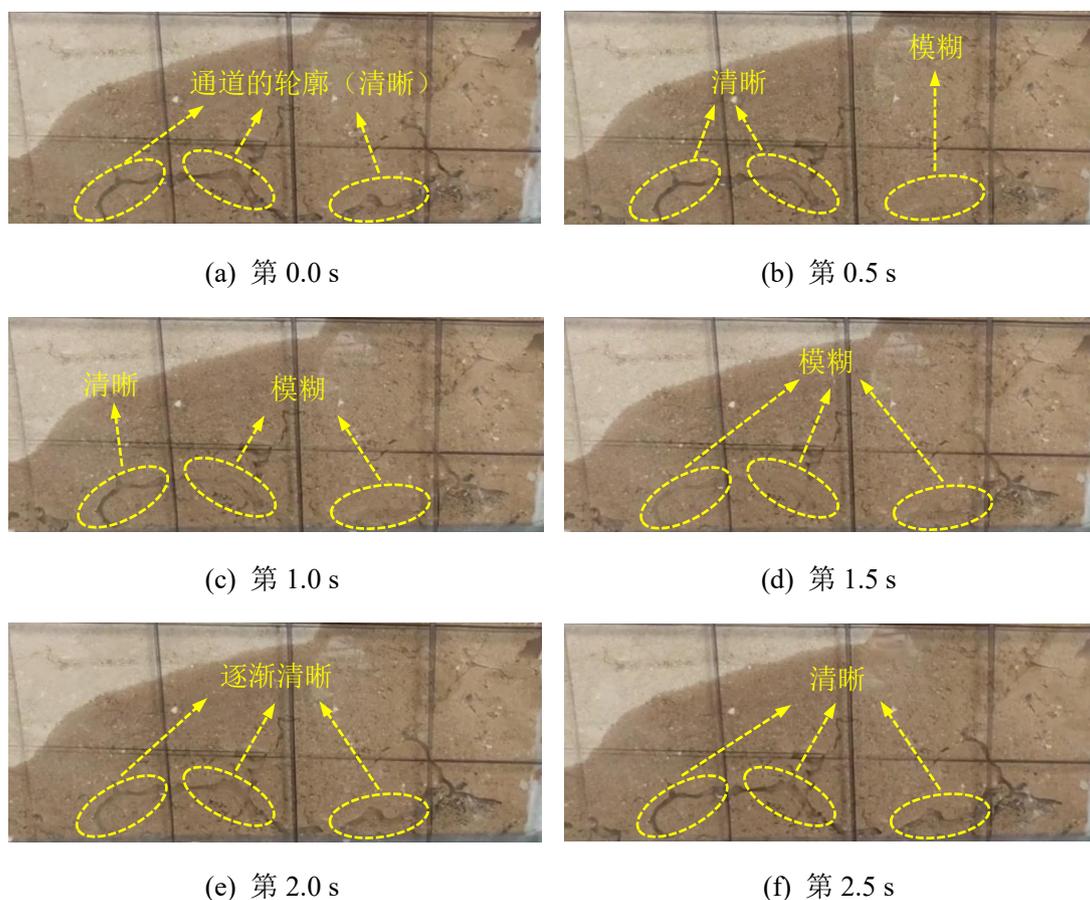


图 2-7 优势通道中的颗粒运移

2.3.4 稀土颗粒含量的变化

注液 2 d 后,通过饱和水位管 A-E 发现堆体内的饱和水位线保持稳定,说明此时堆体的浸取面积已达到最大值。然后停止液体注入,分别在 10 个观测点(1-10 号观测点),利用环形刀在每个点剖取一定质量的稀土。将剖取后的稀土进行烘干,进行筛分试验,得到浸出后各点稀土颗粒的颗粒级配,如表 2-2 所示。

表 2-2 浸矿后各观测点处稀土的颗粒级配

观测点	质量百分数/%				>0.25 mm
	>2 mm	1-2 mm	0.5-1 mm	0.25-0.5 mm	
1	25.39	12.78	15.88	14.63	68.70
2	22.91	12.52	18.91	15.70	70.04
3	25.09	13.42	17.33	16.44	72.28
4	21.01	8.68	12.24	10.75	52.69
5	20.57	9.30	13.29	12.19	55.35
6	22.29	9.83	14.25	13.40	59.77
7	21.53	9.23	14.47	14.08	59.31
8	21.89	10.32	15.37	11.91	59.48
9	23.56	14.22	17.14	16.15	71.07
10	20.42	12.12	17.71	15.33	65.58

观测点	质量百分数/%				<0.25 mm
	0.075-0.25 mm	0.058-0.075 mm	0.038-0.058 mm	<0.038 mm	
1	26.94	0.17	0.00	4.19	31.30
2	28.24	0.13	0.00	1.59	29.96
3	23.25	0.10	0.00	4.37	27.72
4	43.66	3.22	0.15	0.28	47.31
5	41.62	2.34	0.04	0.65	44.65
6	38.04	1.50	0.00	0.69	40.23
7	38.53	2.07	0.09	0.00	40.69
8	38.2	2.18	0.11	0.00	40.52
9	26.92	0.31	0.00	1.70	28.93
10	32.68	0.43	0.04	1.26	34.42

在本章研究中，将粒径小于 0.25 mm 的稀土颗粒作为细颗粒，各观测点的细颗粒所占总颗粒重量的百分比，如图 2-8 所示。为了方便分析细颗粒的质量分数的变化，以距离注液端的水平距离为横轴，细颗粒质量分数为纵轴，分成了顶部测点 1-3 号、中部测点 4-6 号以及底部测点 7-10 号，如图 2-9 所示。在 1-6 号观测点（没有明显优势渗流通道的区域），浸矿后细颗粒的质量分数随着距离液体注入端距离的增加而逐渐增加。然而，在浸出之前，每个点上的颗粒级配大致上是相同的。图 2-9 的结果表明，在横向注液条件下的浸矿过程中，由于渗流作用，细颗粒以水平向迁移的方式，向着远离注液端的方向迁移。对比竖直方向上细颗粒所占总质量的比例，可以发现，中层的观测点 4-6 的细颗粒的质量分数高于相同水平距离的上层的观测点 1-3。这意味着细颗粒水平向迁移外，细粒子也会迁移到位置势能较低的区域。然而，下层的第 7、8 号观测点的细颗粒质量分数均低于中层 4 号观测点，这是因为测点 7、8 位于坡脚附近，这两个观测点处的细

颗粒向堆体外部流出，如图 2-10 所示。这导致了在这两个观测点上的细颗粒的质量分数降低。浸出前，粒径小于 0.25 mm 的细颗粒所占重量为 51.1%。浸出后，不同点处粒径小于 0.25 mm 的细颗粒的质量分数均小于 51.1%。这表明，在浸出过程中，稀土细颗粒会迁移并渗出至堆体外部。

在 9、10 号观测点（有明显优势渗流通道的区域），这两点的细颗粒的质量分数分别为 28.93%和 34.42%，远低于周围其它观测点。这也表明，最初位于优势渗流通道中的细颗粒被部分带走并沉积在周围的位置。当粗颗粒之间的间隙在一定程度上被细颗粒填充时，连通孔隙的减少，阻止了优势渗流通道的进一步发育。此外，随着离注液端距离的增加，液体的动能由于能量的损失而逐渐减小。因此，对稀土颗粒的作用也相应地减少了。因此，在堆体中没有形成贯穿的优势渗流通道。

通过上述颗粒级配分析可知，在横向注液条件下，稀土细颗粒向远离注液端和堆体下部的方向迁移。细颗粒的迁移导致在局部位置的粗颗粒骨架之间缺乏填充，导致未填充的孔隙连接起来，形成优势渗流通道。这些细小的稀土颗粒迁移到周围的其他位置，细颗粒加强了该位置处粗颗粒之间的间隙的填充，从而防止了优势渗流通道进一步发育。

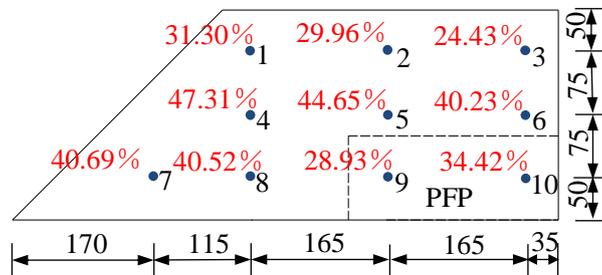


图 2-8 各观测点细颗粒的质量分数(长度单位: mm)

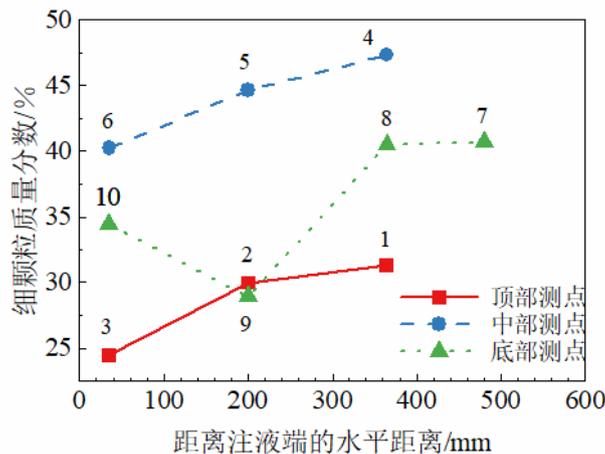


图 2-9 各观测点细颗粒的质量分数变化图

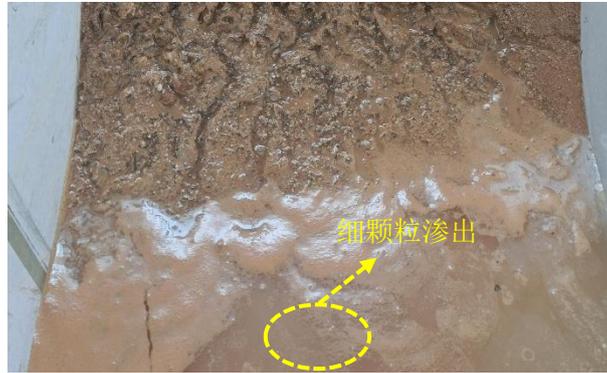


图 2-10 细颗粒向堆体外部渗出

2.4 不同粒径稀土颗粒组合对优势渗流通道形成的影响

2.4.1 稀土堆置过程中的颗粒偏析

在堆置过程中，颗粒偏析是导致堆体内结构不均匀性的主要因素之一。在堆浸技术中，需要将稀土矿运输至堆体顶部并自上而下倾倒。众多学者对倾倒过程进行了研究，Allam 等^[69]在研石从上到下的倾倒过程中，坡面处大颗粒的研石滚落速度最快。这些大粒径的颗粒在构成废石堆的过程中存在明显的分层现象^[70]。由于重力的作用，较大矿颗粒在倾倒过程中会迅速从堆体顶部滚落到坡面下方，形成底部颗粒大、顶部颗粒较小的分层现象^[71]。图 2-11 展示了堆置过程中的矿粒偏析现象示意图。在倾倒过程中由于偏析现象而导致不同粒径的矿粒分离^[72]，不同粒径颗粒之间会进行重新组合，意味着稀土堆置后的颗粒级配并不是严格等同于原位开采的颗粒级配。因此，为了进一步地研究浸矿过程中优势渗流通道的形成机理，后续研究中将不同粒径颗粒组合作为实验变量进行研究。

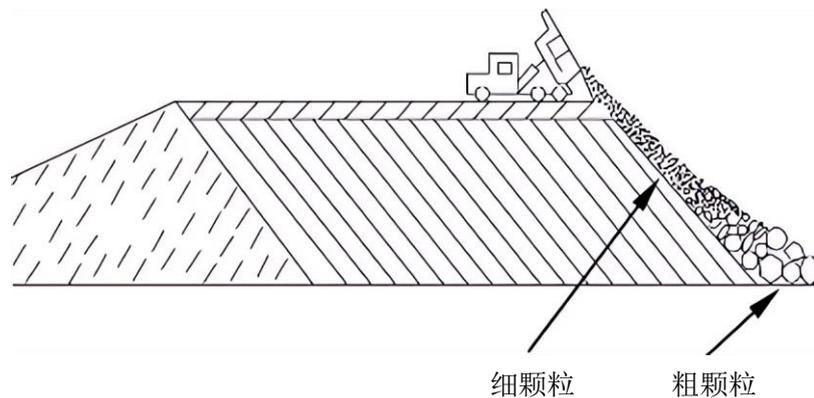


图 2-11 堆置过程中的颗粒偏析

2.4.2 模型试验

(1) 试验装置

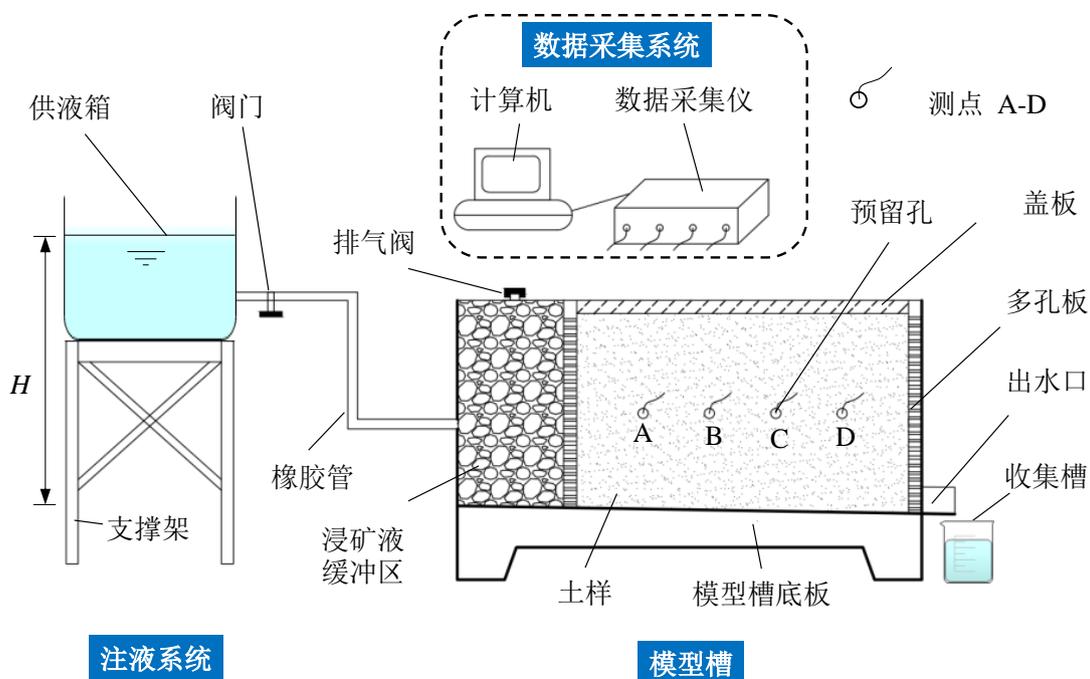
利用自行设计的装置进行了横向注液条件下稀土堆浸模型试验，如图 2-12 所示。该试验装置示意图见图 2-12(a)所示，试验装置由注液系统、模型槽、数据采集系统三部分组成，如图 2-12(b)、(c)。

注液系统由支撑架和带有阀门的供液箱组成。供液箱通过橡胶管与模型槽相连。

模型槽由透明亚克力板组成，并通过孔径为 0.4 cm 的多孔板分隔成三个区域。左侧区域为浸矿液缓冲区，内部放置玻璃弹珠为浸矿液流入堆体提供缓冲作用，缓冲区左侧设置直径为 0.8 cm 的进液口；为了能够在试验过程中排出多余空气，防止空气进入中间区域，在该区域的顶部设置排气阀，当浸矿液未装满缓冲区时，排气阀则打开，当缓冲区的浸矿液溢出时，则关闭。中间区域作为试验土样的堆放区，用于堆置试验土样，并且内部尺寸为 25 cm×15 cm×10 cm。在实际的稀土堆浸中，堆体底部会以 1-3%的坡度倾斜，以便浸出液可以从底部自由排出，为了接近新型稀土堆体结构的布置，中间区域底部设置为 2%的坡度。在中间区域的一侧预留了四个间距为 5 cm 的孔洞，用于连接放置在试验土样内部的孔隙水压力传感器和模型槽外部的数据采集仪。该区域的顶部设置盖板，在试验过程中严格密封，防止液体从顶部溢出，同时满足实验逐级加压的要求。右侧区域为收集槽，用于收集渗出的浸出液和泥砂。

数据采集系统由 CYY2 型孔隙水压力传感器、数据采集仪和计算机组成，用于接收预留在试验土样内部孔隙水压力传感器的信号。

试验采用国安集团生产的硫酸铵作为浸矿液的溶质，如图 2-13 所示，蒸馏水作为浸矿液的溶剂，配置浓度为 2%的硫酸铵作为浸矿液。并定义供液箱内浸矿液水位到模型槽槽底的距离作为进液水头 H 。



(a) 示意图



(b) 数据采集系统

(c) 模型槽及注液装置

图 2-12 模型试验装置



图 2-13 硫酸铵晶体

(2) 试验土样的备样与装样

试验土样来源于江西赣州定南岭北的离子型稀土矿。首先对离子型稀土矿进行烘干和筛分，得到七组不同粒径的组别，分别为粒径 $<0.15\text{ mm}$ 、粒径 $0.15\text{-}0.25$

mm、粒径 0.25-0.60 mm、粒径 0.60-1.18 mm、粒径 1.18-2.35 mm、粒径 2.35-5.00 mm、粒径 >5.00 mm，然后基于这七组不同粒径配置试验土样，如图 2-14 所示。配置与原位离子型稀土矿相同颗粒级配的土样，作为本次试验的标准土样 S1。为了方便后文论述，本文将粒径大于 2.35 mm 的粒组归为粗颗粒类；粒径在 0.25-2.35 mm 范围的粒组归为中颗粒类；粒径小于 0.25 mm 的粒组归为细颗粒类。以标准土样 S1 的七组粒径的粒组含量为依据，将缺失粗粒组的稀土矿样作为中-细颗粒组合土样 S2；将缺失细粒组的稀土矿样作为粗-中颗粒组合土样 S3；将缺失中粒组的稀土矿样作为粗-细颗粒组合土样 S4。土样 S1-S4 的各粒级质量分数，见表 2-3。各组土样的颗粒级配曲线，如图 2-15 所示。

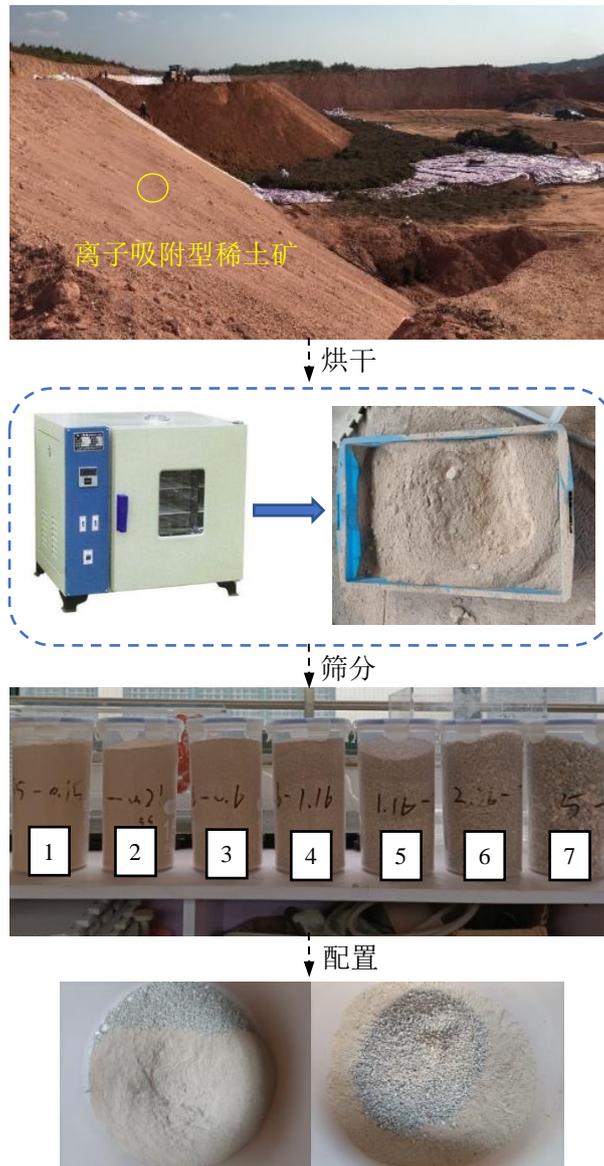


图 2-14 试验土样的筛分及配置

1—粒径<0.15 mm；2—粒径为 0.15-0.25 mm；3—粒径为 0.25-0.60 mm；4—粒径为 0.60-1.18 mm；5—粒径为 1.18-2.35 mm；6—粒径为 2.35-5 mm；7—粒径>5 mm

表 2-3 四种试验土样的各粒级质量分数

颗粒类别	粒径/mm	颗粒含量/%			
		土样 S1	土样 S2	土样 S3	土样 S4
细颗粒	<0.15	37.70	50.54	0	50.73
	0.15-0.25	11.21	15.04	0	15.08
中颗粒	0.25-0.60	11.13	14.92	21.79	0
	0.60-1.18	8.11	10.87	15.87	0
	1.18-2.35	6.44	8.63	12.61	0
粗颗粒	2.35-5.00	22.72	0	44.47	30.57
	>5.00	2.69	0	5.27	3.62

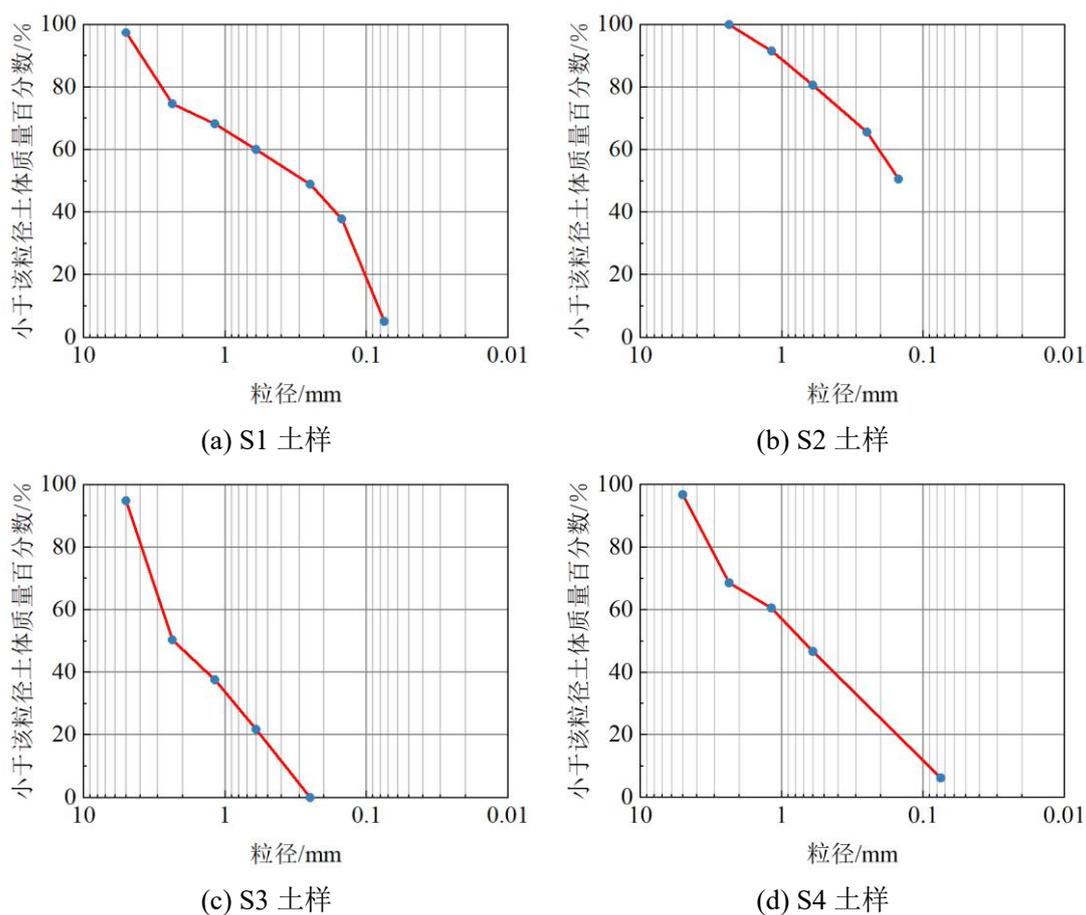


图 2-15 各组土样的颗粒级配曲线

按照表 2-3 的各粒级质量分数进行计算称重并配置，将配好的土样分成若干份，依次均匀装填，每次装填厚度控制在 2 cm，为避免土样出现分界面，在两层交界处进行刨毛处理。

(3) 试验步骤

本文试验需要逐渐增加进液装置的水头并监测在每个水头 H 稳定下渗流变化，因此在数据开始采集之前，先要对试验土样进行饱和处理。在试验过程中，

进液水头 H 首先保持在一个较小值，待稀土土样完全饱和后，逐级增加进液水头 H 。观察并记录测点 A-D 处的孔隙水压力以及渗流流量随进液水头 H 的变化规律。选取四个测点 A-D 进行观测记录，如图 2-16 所示，四个测点位于同一水平线上，距稀土堆体顶部 7.5 cm，相邻测点之间的间距为 5 cm，两端测点距离堆体两端的距离也为 5 cm。数据采集系统每 1 min 采集一次测点 A-D 的孔隙水压力数据，当连续 5 次采集的孔压数据基本不变时，说明在该进液水头 H 下土样的渗流达到稳定状态，然后记录此时测点 A-D 的孔隙水压力数据及渗流流量；而后增加 2 cm 的进液水头。重复以上试验步骤，直至浸出液的渗流流量突然增大且伴有大量泥浆渗出时，终止试验。

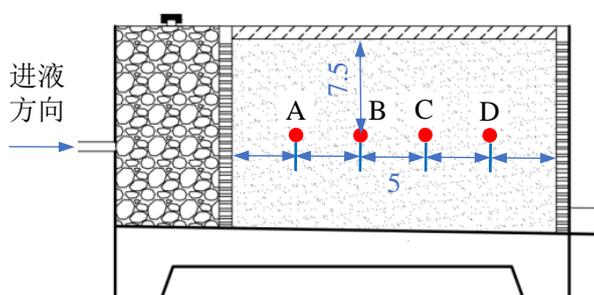


图 2-16 测点布置图(单位: cm)

2.4.3 渗透系数随进液水头的变化规律

微观上的孔隙结构变化也许很难通过眼睛去辨别，但是在宏观上，孔隙结构的变化会引起渗透性的改变。相邻测点之间（A-B 段、B-C 段、C-D 段）的渗透系数随时间的变化通过单位时间渗流流量和相邻测点之间的水头差来计算。经过土样渗流长度 L 后，相邻测点间的水头差 Δh （单位为 cm）为：

$$\begin{aligned}\Delta h_{AB} &= h_A - h_B \\ \Delta h_{BC} &= h_B - h_C \\ \Delta h_{CD} &= h_C - h_D\end{aligned}\quad (2.2)$$

如图 2-16 所示，已知相邻测点（A-B 段、B-C 段、C-D 段）之间的距离 L 为 5 cm，断面面积取相邻测点中间处的断面面积 A （单位为 cm^2 ），并通过测得的各个进液水头 H 作用下达到相对稳定阶段时的单位时间渗流流量 Q （单位为 cm^3/min ）和相邻测点间的水头差 Δh （单位为 cm）代入达西定律公式 $K=QL/A\Delta h$ 中：

$$K_{AB} = \frac{QL}{A_{AB}\Delta h_{AB}}$$

$$K_{BC} = \frac{QL}{A_{BC}\Delta h_{BC}} \quad (2.3)$$

$$K_{CD} = \frac{QL}{A_{CD}\Delta h_{CD}}$$

通过计算得到 AB 段、BC 段、CD 段的渗透系数 K_{AB} 、 K_{BC} 、 K_{CD} (单位为 cm/min)，进而分析了在浸矿过程中渗透系数变化规律。

四种土样相邻测点之间的渗透系数随进液水头 H 的变化规律，相邻测点之间的渗透系数分别用 K_{AB} 、 K_{BC} 和 K_{CD} 表示，如图 2-19 所示。从图可以看出，四种土样的靠近注液端的渗透系数 K_{AB} 不同于另外两段 K_{BC} 和 K_{CD} ，该曲线有明显的变化趋势。有研究表明，在浸出过程中，孔隙中颗粒的运移改变了孔隙结构，进而影响渗透系数^[73]。图 2-17 展示了渗流作用下稀土矿孔隙结构变化，在浸矿前，稀土矿的孔隙结构主要由粗颗粒作为骨架，中、细颗粒作为填充而组成，而浸矿时，由于渗透力的作用，稀土颗粒发生了迁移，部分粗颗粒的空间位置发生变化，中、细颗粒在粗颗粒之间所形成的孔道内发生规模性迁移，造成孔隙结构的变化，进而影响渗透性。

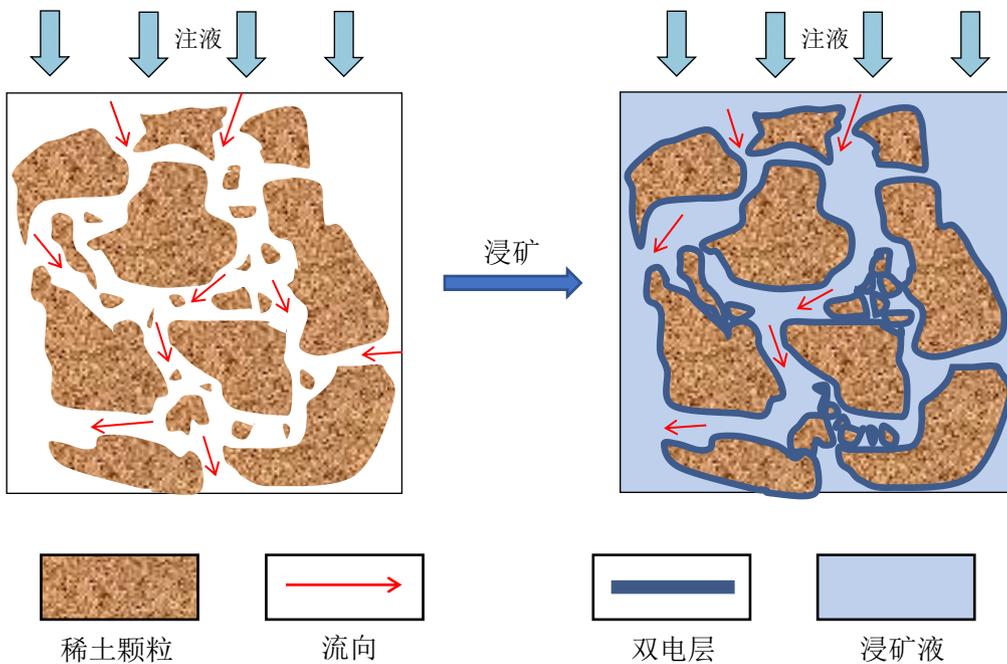


图 2-17 渗流作用下稀土矿孔隙结构变化

将曲线的趋势分成 ef, fg, gh, hi 四个阶段。ef 段近似水平，渗透系数较小且变化稳定，说明开始阶段随着进液水头 H 的增加，土样的渗透系数稳定不变，处于渗流稳定状态，渗透性不变，此阶段为稳定阶段；fg 段变陡，渗透系数随进液水头增大，这是因为随着进液水头增大，由于渗透力的不断增大，细颗粒在其

作用下开始在孔隙中移动,增大了孔隙之间的连通性^[74],相应地,试样的渗透系数增加,此阶段为细颗粒的启动阶段;gh段再次趋于水平,渗透系数再次趋于稳定,这是因为在增大进液水头的过程中,越来越多各种粒径的颗粒受浸矿液横向驱动的影响而参与运移,不同粒径的颗粒在移动过程中易堵塞孔隙^[75],从而阻止了孔隙的连通和渗透系数的增加,此时为沉积阶段;hi段渗透系数突增,这是因为当进液水头 H 增大到一定程度后,堵塞孔隙的颗粒在更大的渗透力驱动下再次运移,进一步增大了孔隙的连通性,此时为优势通道发育阶段。

对于粗-细颗粒组合土样 S4,粗颗粒与细颗粒之间的粒径存在显著的差异,细颗粒在运移的过程中不足以堵塞粗颗粒之间的孔隙。一旦达到细颗粒运移的启动阶段后,渗透系数便一直增加。因此,S4土样的渗透系数变化不存在二次稳定阶段,即gh段。此外,S4土样进入启动阶段的进液水头在四种土样中最小(其值为 22 cm),这表明在横向注液条件下,中颗粒类的缺失使得稀土细颗粒的迁移更容易发生,难以堵塞孔隙通道,易形成优势渗流通道。对于中-细颗粒组合土样 S2,随着进液水头的增加,不同测点的渗透系数变化相对缓慢,这意味着在中-细粒组合土样中,细颗粒的迁移程度较低。在稀土浸矿过程中,稳定的渗透系数有利于浸矿液的均匀渗流和稀土离子的浸取^[13]。

对于 S1、S2、S3 土样,测点 B、C 之间渗透系数 K_{BC} 随着进液水头 H 的增大而增长的幅度最小,这是由于细颗粒从注液端迁移至土样的 BC 段并在此处沉积,从而抑制了连通孔隙的形成。此外,浸矿过程中,稀土矿体内部的微观孔隙结构除了受到渗流作用的影响以外,还受到化学作用的影响。孔隙的微观结构受控于溶液渗流和离子交换的耦合影响^[76]。渗流作用引起孔隙内部连通孔隙的增多,微观结构趋于松散;而化学作用则相反,离子交换反应后,在离子吸附型稀土表面所形成双电层,减小渗流截面面积,微观结构趋向紧密^[30]。这可能会抑制孔隙的连通性,影响优势渗流通道的发育。浸矿液的阴离子被吸附在沉积的细颗粒表面,形成双电层,如图 2-18 所示。由于双电层的作用减小了浸矿液在孔隙间流动的截面积,进一步阻碍了浸矿液在土样中的渗流^[77]。对于粗-细颗粒组合土样 S4,虽然细颗粒也在浸矿过程中发生沉积,但是由于缺乏中颗粒类,在以粗颗粒作为骨架的孔隙结构中,沉积状态难以维持。以至于,当进液水头从 24 cm 增加至 26 cm 时,S4 土样的渗透系数 K_{BC} 发生突变。

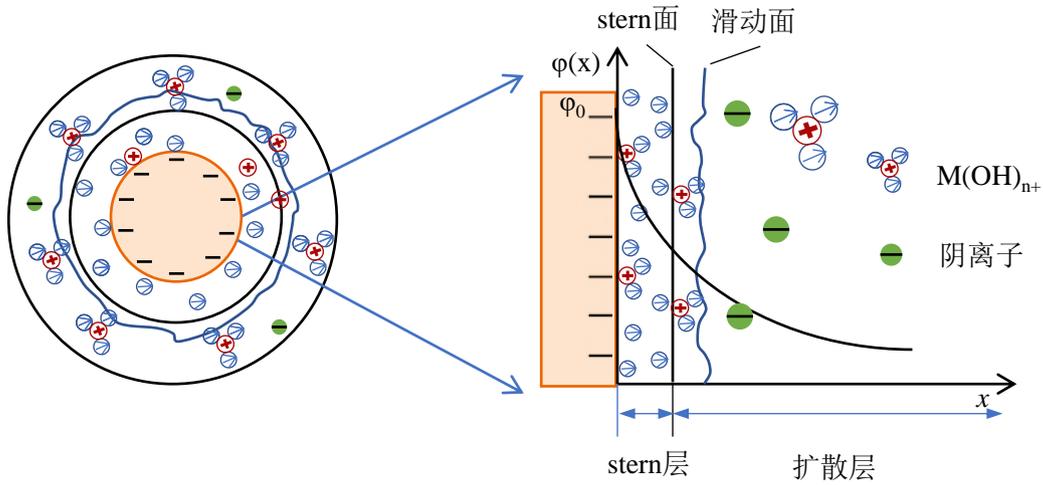
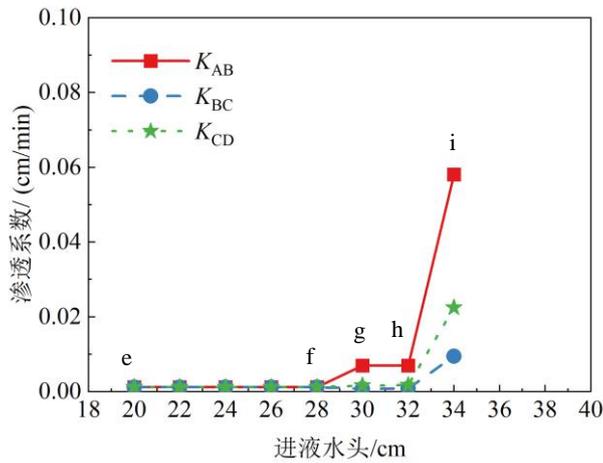
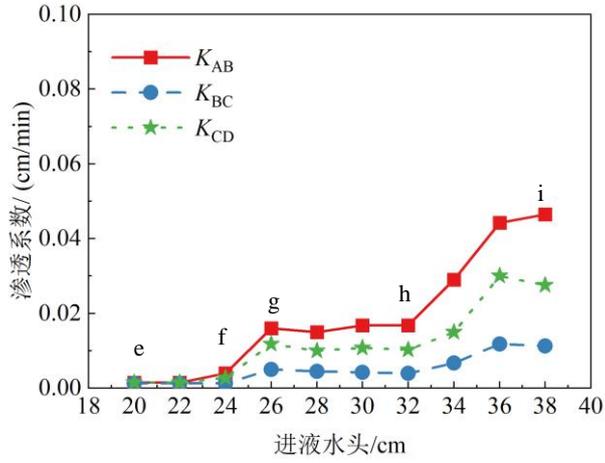


图 2-18 Stern 双电层模型示意图^[78]

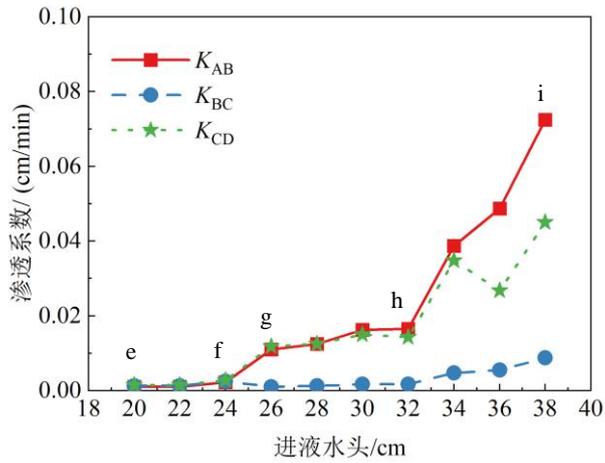
与渗透系数 K_{BC} 相比，测点 C 和 D 之间的渗透系数 K_{CD} 随进液水头 H 的增大变化更为明显。由于 CD 段靠近出液端，出液端细颗粒的渗出导致孔隙的连通性增强，渗透系数增大。细颗粒大量地从出液端渗出而形成优势渗流通道，并且优势渗流通道快速地向注液端扩展，因此，CD 段的渗透系数变化程度与 BC 段相同。与标准土样 S1、中-细颗粒组合土样 S2 相比，粗-中颗粒组合土样 S3 的颗粒间空隙较大，孔隙连通性较好，因此，土样 S3 的渗透系数 K_{CD} 随进液水头的增加变化更为显著。



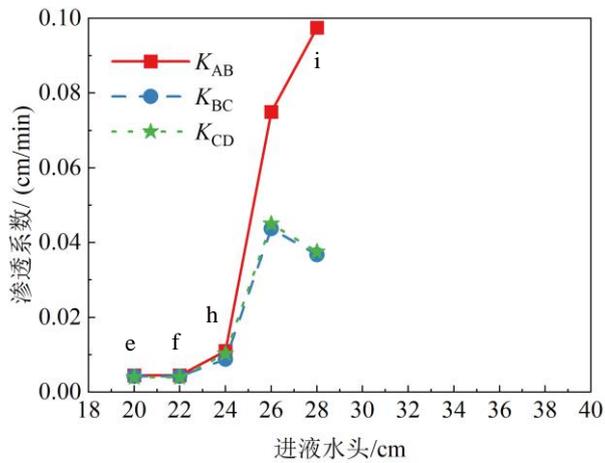
(a) S1 土样



(b) S2 土样



(c) S3 土样



(d) S4 土样

图 2-19 渗透系数随进液水头 H 的变化曲线

图 2-20 为土样 S1、S2、S3 在进液水头 $H=30\text{ cm}$ 时不同位置处的渗透系数。从图中可以看出，在横向注液条件下，稀土矿堆的渗透系数在空间上呈现“两端大、中间小”的空间分布不均匀性，具体来说，土样两端的渗透系数大于中间部

分的渗透系数。对于标准土样 S1，两端的渗透系数比中间位置大 89.3%，而对于中-细颗粒组合土样 S2 和粗-中颗粒组合土样 S3 而言，两端与中间渗透系数分别最大相差 74.6%和 89.2%，标准土样 S1 和粗-中颗粒组合土样 S3 的渗透性空间分布更加不均匀。

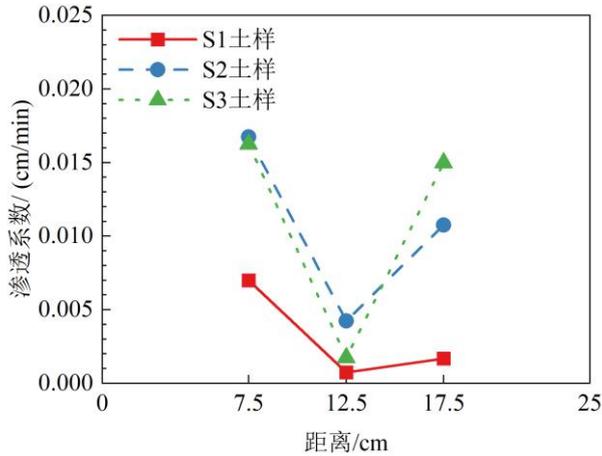


图 2-20 稀土堆体不同位置处的渗透系数

2.4.4 浸出液随进液水头的变化规律

当进液水头 H 达到某一临界位置时浸出液由清澈变为浑浊，其中 S4 土样最为明显，以 S4 土样为例，如图 2-21 所示。从图中可以反映出靠近出液端位置处颗粒运移的表现形式，在达到临界位置之前为稳定阶段，该阶段的表现形式为无泥砂颗粒的渗出；在逐渐增加进液水头而达到临界位置期间为细颗粒启动阶段，该阶段的表现形式为少量泥砂颗粒的缓慢渗出；在达到临界位置之后为优势通道发育阶段，该阶段的表现形式为大量泥砂颗粒的渗出。

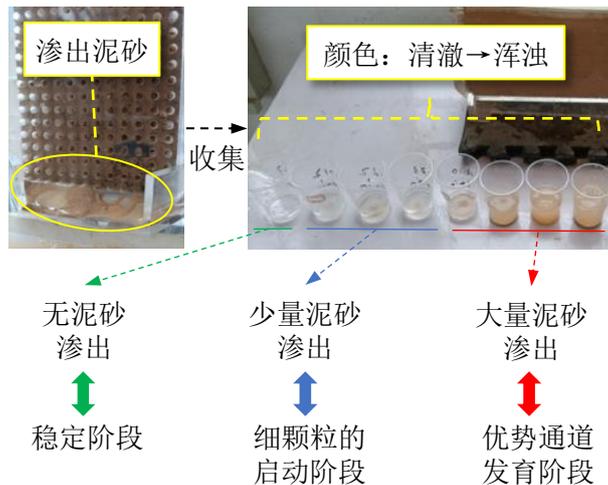


图 2-21 临界位置前后收集得到的浸出液图

图 2-22 为四种土样渗流流量随进液水头 H 的变化规律，可以看出，在进液

水头 H 为 22 cm 之前的初始阶段中四种土样的渗流流量的变化趋势平稳，而后渗流流量增加，再次稳定，最后，再次增大。这一过程与前文描述的渗透系数变化规律一致，与细颗粒的迁移、孔隙堵塞、颗粒再运移有关。其中 S4 土样的渗流流量变化幅度最大，其次是 S2、S1、S3 土样。随后四种土样的渗流流量稳定下来。除了 S1 与 S4 土样的渗流流量分别在 $H=32$ cm 和 26 cm 出现渗流流量突增情况外，S2 和 S3 土样的渗流流量都是缓慢增加，这说明中颗粒类含量的增加可以对渗流起到缓冲作用。一方面，当水头较小时，阻碍了大量细颗粒的迁移，这是通过对照粗-细颗粒组合土样 S4 得出的；另一方面，缓解了诸如标准土样 S1 中出现的当水头较大时堵塞孔隙的细颗粒的再次迁移。总体而言，中-细颗粒组合土样 S2 的渗流流量变化在四种土样中最为平稳，再次说明了中颗粒类的组合有利于稀土离子的浸取。

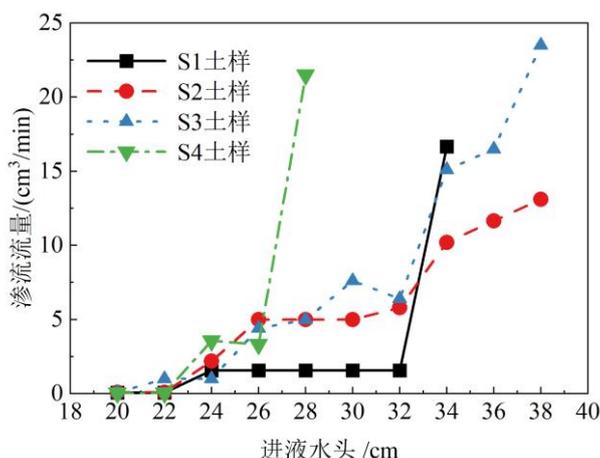


图 2-22 渗流流量随进液水头的变化曲线

四种土样试验终止后，通过对收集槽收集得到的浸出液进行静置沉淀，并将沉淀后分离的泥砂烘干，如图 2-23 所示。将分离并烘干后的泥砂称重，得到四种土样出泥率随进液水头 H 的变化规律，如图 2-24 所示。将开始渗出泥砂时的进液水头 H 作为临界进液水头 H_c ，通过观察图中的数据，可以发现四种土样的 H_c 的大小关系： $H_c(S4) < H_c(S2) = H_c(S1) < H_c(S3)$ 。这是因为 S4 土样具有粗、细粒组粒径差异过大的特点，导致细颗粒易在孔隙间运移并渗出；S3 土样为粗-中颗粒组合土样，在相同注液压力条件下，浸矿液不足以驱动粒径较大的稀土矿颗粒，因此，颗粒难以从出液端渗出；缺少粗颗粒类的 S2 土样与标准土样 S1 的临界进液水头 H_c 一致，均为 32 cm，说明与中颗粒组相比，粗粒组对细颗粒运移的约束作用较小。



图 2-23 收集得到的浸出液中稀土矿颗粒

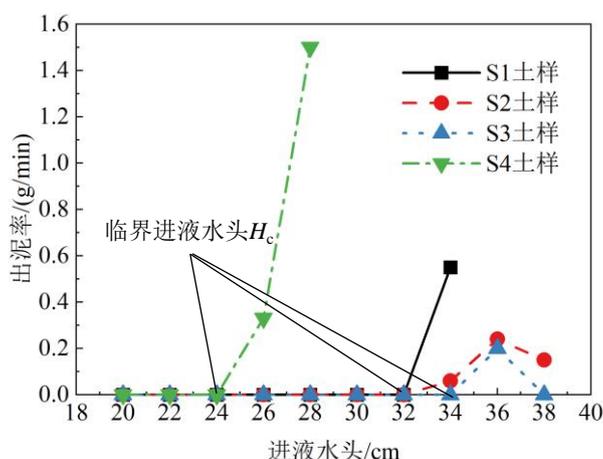


图 2-24 出泥率随进液水头的变化曲线

结合图 2-19 与图 2-24 的变化规律，可以看出，大量泥砂的渗出的同时，渗透系数 K_{CD} 突增。四种土样的 AB 段和 CD 段的渗透系数变化相较于 BC 段较为明显（见图 2-19）。说明了渗透系数 K_{AB} 增大是因为 AB 段靠近注液端，稀土矿颗粒主要受到渗透力作用的影响而在孔隙中迁移；而渗透系数 K_{CD} 增大则是因为 CD 段靠近出液端，细颗粒的缓慢渗出而导致孔隙的连通性增强。

对烘干后的稀土颗粒进行颗粒级配分析，如图 2-25 所示。从图中看出，在标准土样 S1 的分析结果中，粒径大于 2.35 mm 的粗颗粒没有渗出，渗出的主要是粒径小于 0.15 mm 的细颗粒，其质量占渗出颗粒总质量的 64.7%；在中-细颗粒组合土样 S2 的分析结果中，全部渗出颗粒均为小于 0.15 mm 的细颗粒；在粗-中颗粒组合土样 S3 的分析结果中，渗出的主要是粒径在 0.25-0.60 mm 的中颗粒（该组土样的细颗粒部分），其质量占到了 57.1%；在粗-细颗粒组合土样 S4 的分析结果中，渗出的颗粒中，粒径 > 2.35 mm 范围的颗粒有渗出，但仅占渗出泥砂总质量的 8.75%，渗出泥砂的粒径主要集中在 < 0.15 mm 范围，其质量占渗出泥砂总质量的 78.75%。综上，四种土样渗出泥砂的颗粒主要为该组土样中的细颗粒部分。

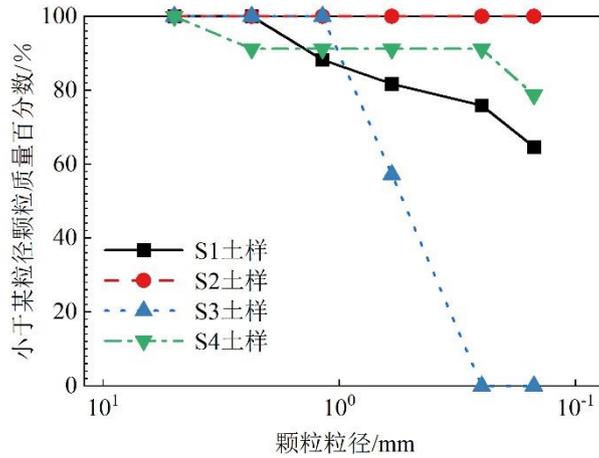


图 2-25 渗出的稀土颗粒的级配

2.4.5 浸矿前后稀土矿样的颗粒级配变化

试验结束后，用环刀剖取的测点 A-D 的土样并烘干筛分，然后进行颗粒级配分析，得到浸矿后各个测点的颗粒级配数据。将浸矿后各个测点的颗粒级配数据与配置土样时的各粒级质量分数（见表 2-3）作比较，得到浸矿前后各个粒度区间的质量变化率。数据处理如下：

$$M_j = \frac{W_j - W_j^b}{W_j^b} \times 100\% \quad (2.4)$$

其中， j 表示粒度组成区间； M_j 表示为浸矿前后在粒度组成区间 j 范围内的颗粒质量的变化率，%； W_j 表示浸矿后粒度组成区间 j 范围的颗粒质量所占总质量的质量百分数，%； W_j^b 表示配置土样时粒度组成区间 j 范围的颗粒质量所占总质量的质量百分数，%。

四种土样各个测点浸矿前后的粒度区间变化率 M_j ，如图 2-26 至图 2-29 所示。从图中可看出，各个测点的浸矿后的颗粒级配均发生不同程度的变化，说明稀土矿颗粒的运移贯穿在整个试验的过程当中。下面就各组土样浸矿前后的颗粒级配变化进行分析。

S1 土样的试验结束后，利用环刀剖取测点 A-D 位置的土样进行颗粒级配分析，结果如表 2-4 所示。S1 土样各个测点浸矿前后的粒度区间变化率 M_j ，如图 2-26 所示。随着远离注液端（从测点 A 至测点 D）的方向，浸矿后 S1 土样中粒径小于 0.15 mm 范围的质量变化率成递增趋势，粗、中粒组（分别为粒径大于 2.35 mm；粒径在 0.25-2.35 mm）所占比例逐渐减小，说明细颗粒从靠近注液端的位置迁移至远端并沉积，且靠近注液端无稀土矿颗粒的补充，而造成进液端位置的土体骨架结构主要以粗、中颗粒作为骨架，同时，解释了靠近注液端渗透系

数变化大的原因主要是细颗粒的流失且无补充颗粒。

粒径小于 0.15 mm 的细颗粒的质量变化率从观察点 A 向观察点 D 单调增加，即在横向注液条件下，细颗粒从注液端迁移到出液端，最终在出液端的附近沉降。值得注意的是，在注液端附近，当细颗粒移出时，没有细颗粒需要补充。因此，注液端附近的土样以粗颗粒和中颗粒为主要组成成分。这也解释了注液端附近的渗透系数 K_{AB} 大于其它位置的原因。

表 2-4 浸矿后 S1 土样测点 A-D 的颗粒级配

粒径/mm	测点 A	测点 B	测点 C	测点 D
>5.00	2.10%	2.69%	3.02%	2.03%
2.35-5.00	26.17%	26.39%	19.73%	19.28%
1.18-2.35	9.31%	7.85%	9.11%	8.17%
0.60-1.18	9.60%	8.78%	9.70%	7.32%
0.25-0.60	11.89%	11.75%	11.95%	9.56%
0.15-0.25	14.37%	12.53%	12.27%	10.20%
<0.15	26.55%	30.02%	34.23%	43.43%

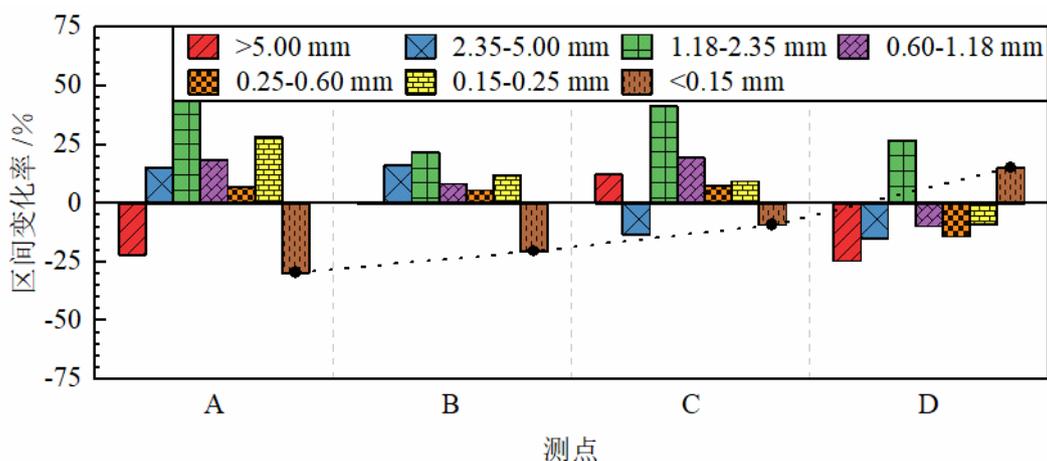


图 2-26 S1 土样浸矿前后颗粒级配的变化率

S2 土样的试验结束后，利用环刀剖取测点 A-D 位置的土样进行颗粒级配分析，结果如表 2-5 所示。S2 土样各个测点浸矿前后的粒度区间变化率 M_j ，如图 2-27 所示。S2 土样的浸矿前后颗粒级配变化较其它三种土样不明显，说明稀土矿颗粒之间的间隙越小，细颗粒越不容易发生迁移。同时，结合图 2-19 渗透系数的变化规律，S2 土样各个测段的透系数变化相对稳定，说明细颗粒迁移程度越低，其渗透系数变化越稳定。中-细颗粒组合的稀土矿样的渗透系数以及颗粒级配变化最稳定，在浸矿过程中渗透系数保持稳定是有利于浸矿液的均匀渗流和稀土离子的浸取^[64]。

表 2-5 浸矿后 S2 样测点 A-D 的颗粒级配

粒径/mm	测点 A	测点 B	测点 C	测点 D
>5.00	0%	0%	0%	0%
2.35-5.00	0%	0%	0%	0%
1.18-2.35	9.02%	8.75%	8.59%	8.53%
0.60-1.18	11.69%	11.13%	11.53%	10.65%
0.25-0.60	16.44%	15.45%	13.37%	13.27%
0.15-0.25	19.55%	17.04%	14.43%	16.13%
<0.15	43.30%	47.62%	52.08%	51.42%

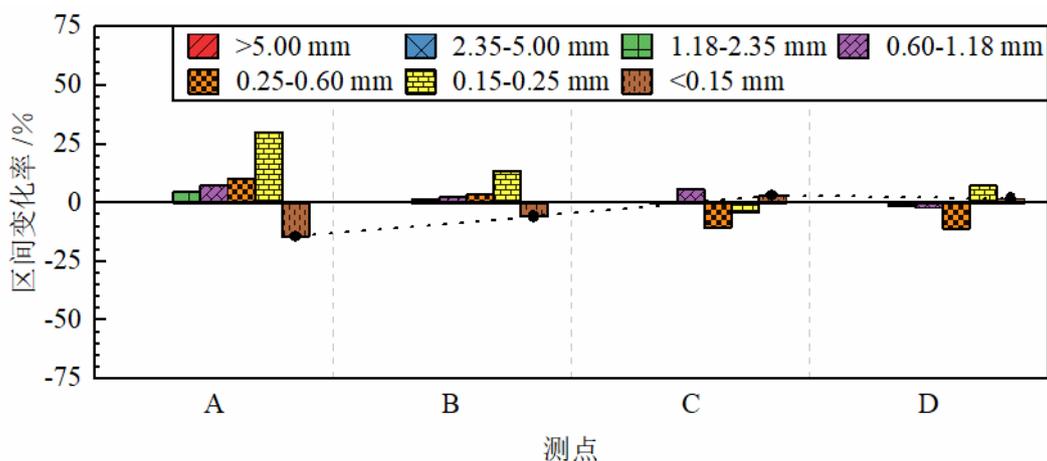


图 2-27 S2 土样浸矿前后颗粒级配的变化率

S3 土样的试验结束后，利用环刀剖取测点 A-D 位置的土样进行颗粒级配分析，结果见表 2-6。S3 土样各个测点浸矿前后的粒度区间变化率 M_j ，如图 2-28 所示。S3 土样的浸矿前后颗粒级配变化幅度较大，这是因为粒径大的颗粒的质量也愈大，使得浸矿前后的粒度区间的质量变化幅度愈大。但是，从趋势中仍然可以看出，浸矿后的较细颗粒（粒径在 0.25-0.6 mm）随远离注液端的方向成递增趋势，这与 S1 土样的情况一致。由于 S3 土样是粗、中粒组稀土矿颗粒的组合，S3 的稀土矿颗粒之间的孔隙间隙较 S2 大，使得稀土矿颗粒更容易在孔隙间发生迁移，因此，相较于 S2 土样，S3 土样渗透性对水头的变化更敏感，颗粒迁移也要更明显。

在 4 种土样中，中-细颗粒组合土样 S2 的颗粒质量变化率最小（见图 2-27）。这说明在该土壤样品中，稀土颗粒之间的间隙较小，细颗粒难以迁移。对应图 2-19 所示的土样 S2 渗透系数的变化较慢，而粗-中颗粒组合土样 S3 浸出前后的变化较为明显（见图 2-28）。与土样 S1 相似，在 0.25-0.60 mm 范围内的中粒组的质量变化率从注液端到出液端单调增加。结果表明，在该土样中，由于稀土颗粒间的间隙较大，中粒组在横向液体注入下容易迁移。因此，土样 S3 的渗透系数对

进液水头的增加比土样 S2 的渗透系数更敏感。

表 2-6 浸矿后 S3 测点 A-D 的颗粒级配

粒径/mm	测点 A	测点 B	测点 C	测点 D
>5.00	7.41%	6.57%	5.20%	4.90%
2.35-5.00	51.60%	39.67%	39.18%	38.45%
1.18-2.35	15.46%	14.24%	13.50%	14.01%
0.60-1.18	11.24%	13.61%	13.85%	13.80%
0.25-0.60	14.30%	25.92%	28.27%	28.85%
0.15-0.25	0%	0%	0%	0%
<0.15	0%	0%	0%	0%

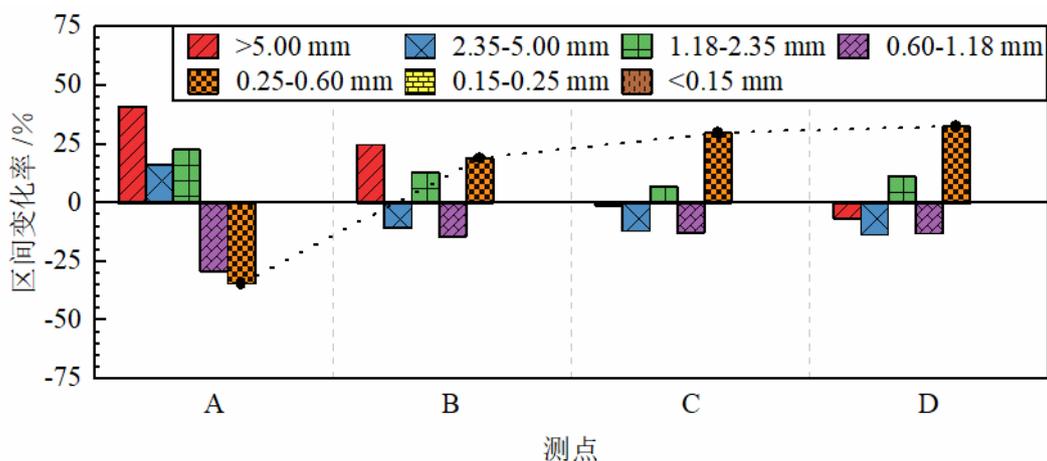


图 2-28 S3 土样浸矿前后颗粒级配的变化率

S4 土样的试验结束后，利用环刀剖取测点 A-D 位置的土样进行颗粒级配分析，结果如表 2-7 所示。S4 土样各个测点浸矿前后的粒度区间变化率 M_j ，如图 2-29 所示。尽管 S4 土样渗透系数变化幅度是四种土样中最明显的（见图 2-19），但是粒度区间变化率的幅度不大（见图 2-29），这是因为单个粗颗粒与细颗粒之间的质量有一定差距，使得细颗粒区间的变化幅度不如粗颗粒区间大。从图 2-29 可以看出，粒径小于 0.15 mm 的区间变化率是从测点 A 至测点 C 呈递增趋势，随后呈下降趋势。因为 S4 土样渗出的泥砂粒径主要集中在小于 0.15 mm 的区间上（见图 2-25），导致测点 D 的该粒度区间的颗粒质量减小，从而导致粒径 <0.15 mm 的区间变化率呈现先增长后下降的趋势。

对于粗-细颗粒组合土样 S4，浸出后细颗粒质量的相对变化率不显著，但其渗透系数在 4 个土样中变化最显著。这是因为在浸出前土样 S4 细粒组的颗粒质量最大。与其他土样不同，在土样 S4 中，小于 0.15 mm 的细颗粒的质量变化率先从测点 A 上升到测点 B，然后从测点 C 下降到测点 D。这是因为在该土样中，浸出期间从出液端流出大量细颗粒（见图 2-24），导致出液端附近的细颗粒含量下降。从以上分析可以看出，浸出后颗粒级配的变化可以很好地解释在横向注液

条件下堆体的渗透系数变化。结果表明，堆体的渗透率受细颗粒运移的影响。

表 2-7 浸矿后 S4 测点 A-D 的颗粒级配

粒径/mm	测点 A	测点 B	测点 C	测点 D
>5.00	4.01%	4.44%	3.10%	3.81%
2.35-5.00	32.00%	29.92%	26.18%	31.29%
1.18-2.35	0%	0%	0%	0%
0.60-1.18	0%	0%	0%	0%
0.25-0.60	9.28%	8.95%	8.50%	10.29%
0.15-0.25	13.79%	13.18%	14.03%	11.96%
<0.15	42.42%	43.51%	48.19%	42.65%

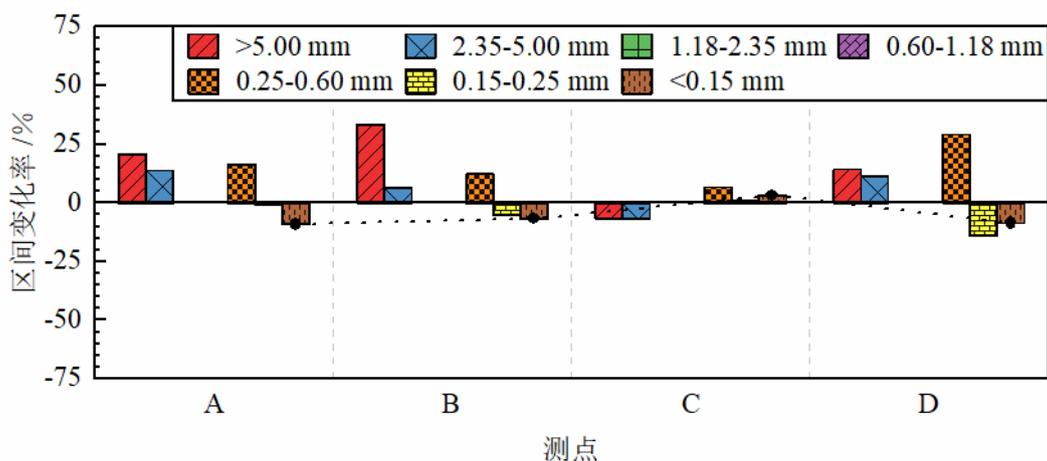


图 2-29 S4 土样浸矿前后颗粒级配的变化率

2.5 本章小结

本章针对新型稀土堆体进行试验研究。通过室内试验，得到了离子吸附型稀土矿的土样性质；通过小型模型试验，观察了优势通道的发育和分布，并通过颗粒级配分析，揭示了横向注液过程中优势渗流通道的形成原因。进一步的，针对离子型稀土矿的不同粒径组合情况，通过开展逐级加压横向注入浸矿液的模型试验，研究了颗粒运移对不同粒径组合的矿样渗透性的影响。得到了如下结论：

(1) 通过室内试验测定了定南岭北离子型稀土矿的土样性质，发现该离子吸附型稀土矿样的级配不良、土粒不均匀，属于粗颗粒中的粉土质砂；

(2) 通过小型模型试验，发现在横向注液条件下，稀土细颗粒远离注液端并向堆体下部移动。细颗粒的迁移是导致在稀土堆体下部靠近液体注入端处形成优势渗流通道的原因，细颗粒的迁移导致局部位置的粗颗粒骨架之间缺少细颗粒的填充，从而形成优势渗流通道；

(3) 优势渗流通道主要出现在堆体下部靠注液端的位置，即水头压力大的位

置,使得堆体的下部的流体渗流速度明显快于堆体的上部。并且,缩短了堆体空间位置上浸矿液与稀土的接触时间,可能导致稀土堆体的浸出不足;

(4) 在横向注液条件下,离子吸附稀土堆体的渗透性受细颗粒运移的影响。随着进液水头的逐渐增加,细颗粒的运移过程分为稳定、启动运移、沉积、再运移 4 个阶段,对应的稀土矿堆的渗透系数变化则分为稳定、逐渐增大、再稳定和再次增大 4 个阶段;在横向注液条件下离子吸附型稀土堆体的渗透性在空间上不均匀,呈现出“两端大、中间小”的空间分布不均匀性。这种不均匀性是由于浸矿液渗透压力作用下细颗粒的迁移和渗出所致;

(5) 不同粒径颗粒组合对横向注液条件下离子吸附型稀土堆体的渗透性具有显著的影响,对缺少中颗粒的粗-细颗粒组合土,细颗粒在渗透压力作用下更易发生迁移且难以沉积,易形成优势渗流通道;对缺少粗颗粒的中-细颗粒组合土,细颗粒迁移程度较低,渗透系数随进液水头的增加变化较为缓慢。

第3章 优势渗流通道对新型稀土堆体浸取效率的影响

3.1 概述

经过第2章的试验研究可以发现,横向浸矿下稀土颗粒在新型堆体内的运移会造成稀土矿堆渗透性的改变。浸矿液在堆体中的渗流效果是决定浸取效率的一项重要因素^[64],如在江西安远离子型稀土矿山开展原地浸矿实验中研究了渗透系数的非均匀性对浸取率的影响,发现在垂直入渗时优先流比越高,即非均匀系数越高,浸取率减低^[13]。从原地浸取尾矿实验中得出,在渗透性好的区域,容易造成过度浸取,而在渗透性差的区域,容易产生浸矿液滞留和浸取不足^[17]。因此,有必要研究优势渗流通道对新型稀土堆体浸取效率的影响。

优势渗流通道的形成极为复杂,目前在该领域仍然没有一个合适的理论模型。尽管如此,优势渗流通道对浸矿液迁移的过程的影响可以通过构建机理模型进行判断,并且经过证明后可以用于预测,其中,机理模型中双渗透模型(Dual-Permeability model)应用最为普遍。阙云等^[79-81]利用双渗透模型分析了降雨强度、持时、冰雪消融等因素对水分非平衡渗流的影响。双渗透模型尽管无法描述裂隙的局部的快速渗流行为,但对宏观渗流特征具有较强的描述能力,且满足大型工程计算的需求,因而在大型的渗流分析中得到广泛的运用^[82]。

浸取液在堆体内部并非均匀的流动,主要有两种:一是基质域中的非线性流动,这是由于非饱和土壤的特性所导致的;二是优先流域(即优势渗流通道),其中少量水分和溶质绕过了土壤基质域,从而形成了快速迁移。优势渗流通道的形成会导致浸矿液在堆体内部非均匀的渗流,即所谓的优势入渗现象,这种液体运动方式称为优先流。然而,传统的Richards方程来反映这一非均匀流动现象变得局限,而双渗透模型通过基质域与优先流域的耦合来描述含优势渗流通道下的渗流特征。

本章验证了利用COMSOL建立的含二阶水交换项的双渗透模型的可行性,并试验确定了离子型稀土矿的水力特性。通过对比传统Richards方程(单渗透模型)和双渗透模型中浸矿液的渗流效果,研究了优势渗流通道存在条件下稀土堆体内浸矿液的渗流特征,分析了优势渗流通道发育区域、发育角度、占比以及两域转换系数对新型堆体结构浸取面积的影响。本章研究可以弥补传统意义上Richards方程未考虑堆体的非均匀性的问题,丰富优势渗流通道的水交换机理,对新型稀土堆体结构内“不均匀”渗流分析具有一定的指导意义。

3.2 优势入渗模型与参数

3.2.1 非饱和渗流场控制方程

对于液体流入非饱和土中,土壤中液体流动和含水量随着时间和空间的改变而发生变化。土壤的储水能力对含水量重新分布可以通过流体控制方程来获取。通过质量守恒定律可得瞬态水流的控制方程^[83,84]。对于一个给定的土体单元,水的损失或补给率等于水流入与流出土体单元的净流量,这个原则称为质量守恒原理,也称为连续性原理,如图 3-1 所示。

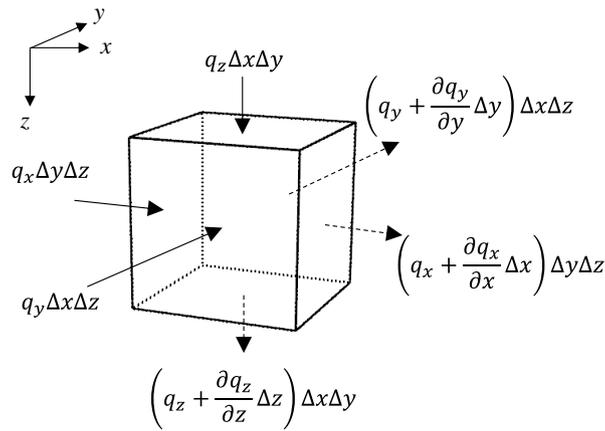


图 3-1 土体单元液体流动连续性原理示意图

对于一个土体单元,其沿着坐标正方向的总水流量为:

$$q_{in} = \rho(q_x \Delta y \Delta z + q_y \Delta x \Delta z + q_z \Delta x \Delta y) \quad (3.1)$$

同时,从土体单元流出的总水流量为:

$$q_{out} = \rho[(q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x) \Delta y \Delta z + (q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} \Delta y) \Delta x \Delta z + (q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} \Delta z) \Delta x \Delta y] \quad (3.2)$$

其中, ρ 为液体的密度, kg/m^3 ; q_x 、 q_y 与 q_z 分别为 x 、 y 和 z 方向的流量, m/s 。

根据质量守恒原理,一个土体单元,在瞬态流动的过程中储存的水量须等于净流量,因此:

$$-\rho(\frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z + \frac{\partial q_y}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z + \frac{\partial q_z}{\partial z} \Delta x \Delta y \Delta z) = \frac{\partial(\rho\theta)}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.3)$$

上式为土壤中液体瞬态流的控制方程,适用于饱和与非饱和条件。在实际的工程问题中,渗透系数和基质吸力水头之间有以下关系:

$$q_x = -k_x(h_s) \frac{\partial h}{\partial x}$$

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/007200054010006033>