



杨柳华，博士，教授，河南理工大学尾矿库研究院副主任。从事膏体充填采矿和尾矿资源化利用研究工作，主持和参与国家自然科学基金项目3项、国家重点研发计划子课题、河南省科技攻关等纵向科研项目10余项，参与新疆自治区首套膏体充填系统、谦比希铜矿充填系统等多个工程设计与建设；近年来出版著作1部，发表学术论文50余篇，第一/通讯作者SCI、EI论文20篇；获协会一等奖4项、河南省科技进步二等奖1项，市厅级科技奖3项，2023年度中国冶金固废及尾矿综合利用先进个人。



金属矿膏体充填技术发展现状与工程应用

杨柳华

河南理工大学
北京科技大学
中国安全生产科学研究

目录

CONTENTS

01 国内外发展新进展

02 膏体充填研究进展

03 膏体充填技术工程实例

04 挑战与趋势

1

国内外发展新进展

1.1 什么是膏体

定性认识：多尺度散体材料与水复合而成的**牙膏状**、**无泌水结构流体**



浆体 (超饱和)



膏体 (略饱和)



散体 (不饱和)

定量 ▼ **描述**

- ◆ -20 μm 颗粒 15%~20%
- ◆ 5~10 mm颗粒 0~15%
- ◆ **饱和度** 101%~103%

- ◆ 泌水率 1.5%~3%
- ◆ 塌落度 180~250 mm
- ◆ 屈服应力 100~200 Pa

1.2 膏体的优势



膏体技术为解决传统采矿问题提供了新思路

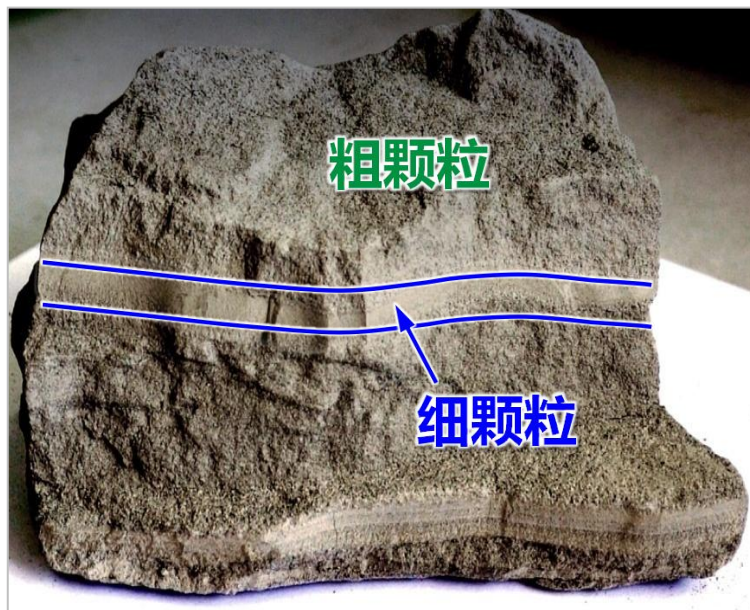


“四好”：安全、环保、经济、高效
“三不”：不分层、不离析、不脱水

1.2 膏体的优势

优势一：安全

(1) 膏体不离析，水泥分散均匀，整体强度高



低浓度充填体发生离析

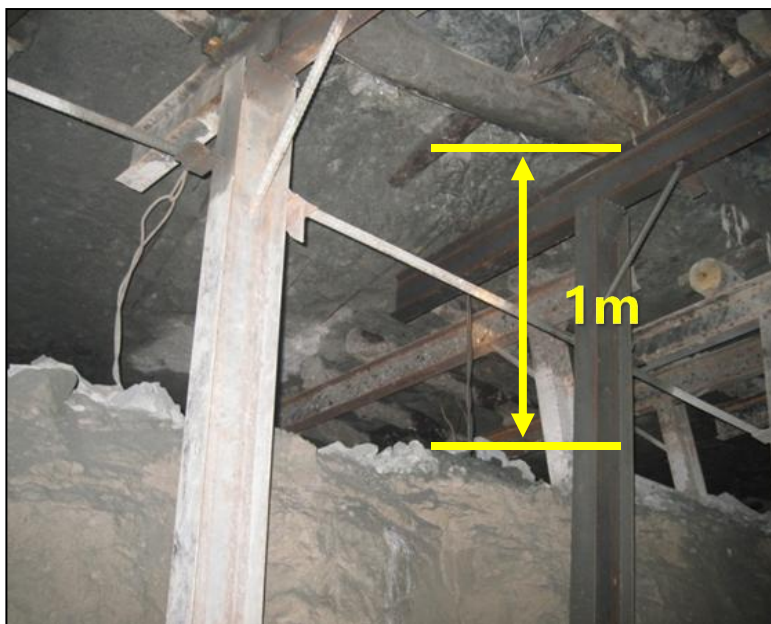


膏体充填体均质性好

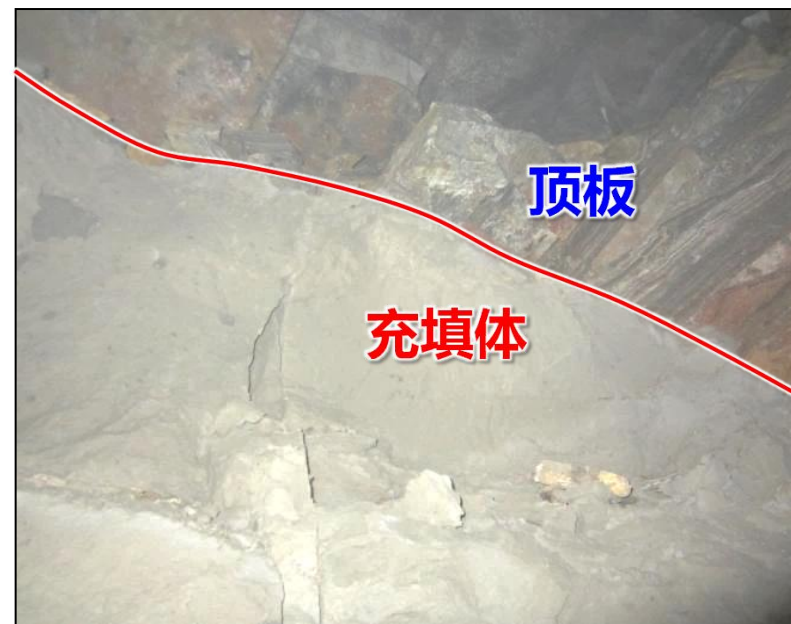
1.2 膏体的优势

优势一：安全

(2) 膏体**接顶率高**，可有效控制顶板围岩



传统充填不接顶



膏体充填接顶

1.2 膏体的优势



优势二：环保

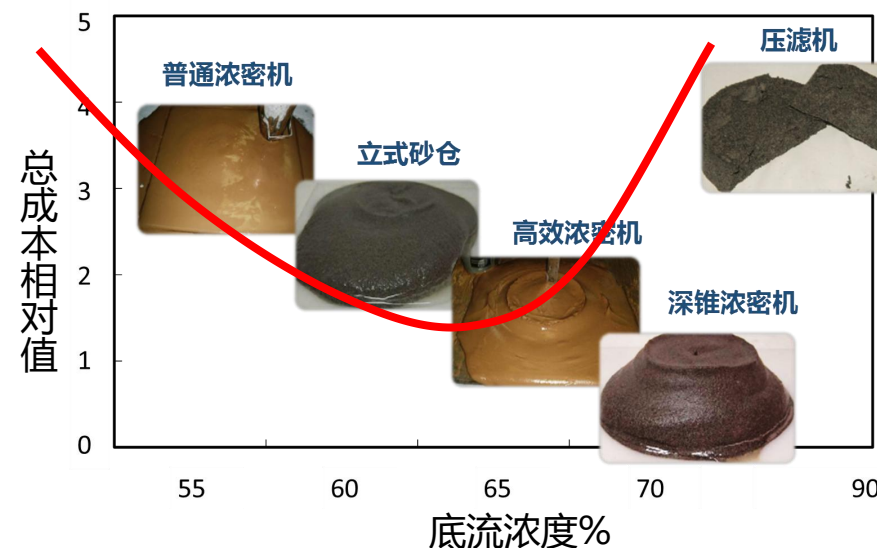
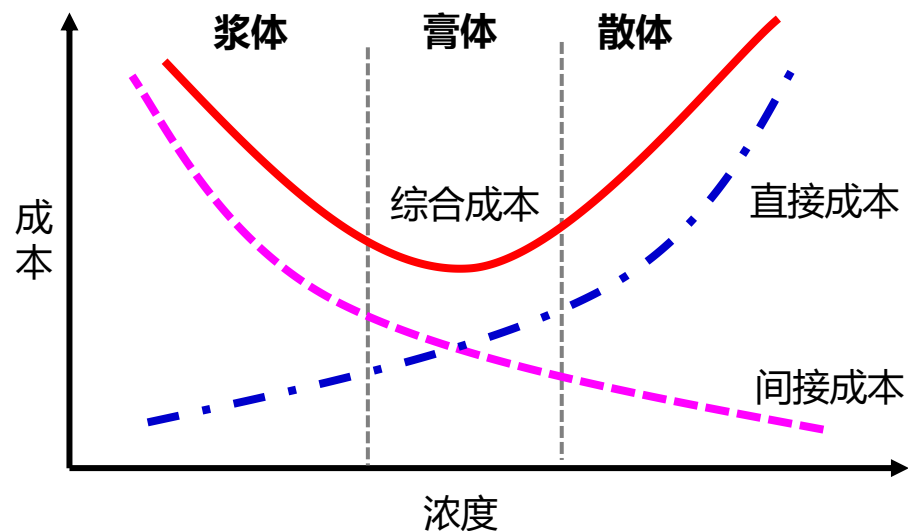


1.2 膏体的优势



优势三：经济

- **水泥耗量少**：水泥成本约占充填成本**70%**，有利于大幅减小充填成本
- **贫损指标小**：可实现两步骤**全面**回采，回采率大幅提升，降低贫损指标
- **综合成本低**：井下排泥**排水**费用低，**支护成本低**，**安全效益高**

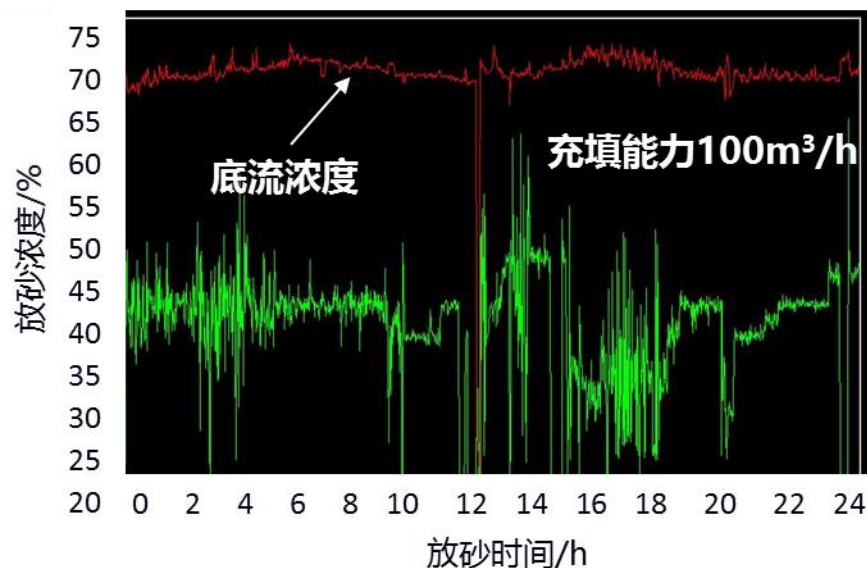


1.2 膏体的优势

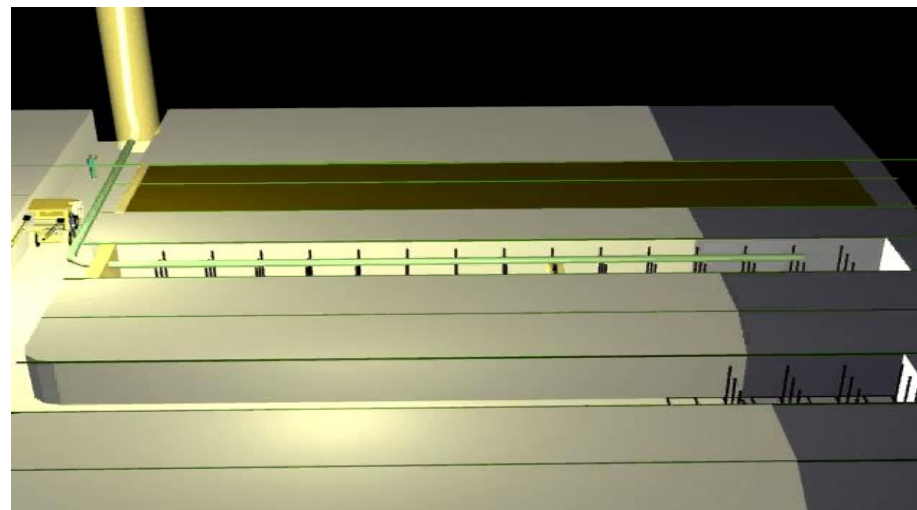


优势四：高效

- **24xN小时连续进料充填**：底流浓度高、波动范围小、泥层高度稳定
- **采场回采周期短**：膏体充填凝固时间短，可迅速对围岩和矿柱产生抗力



深锥浓密机底流浓度变化



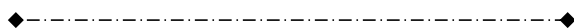
井下膏体充填过程

1.3 膏体充填的必要性

传统充填方式的问题

■ 尾砂浓缩

无法实现低浓度超细全尾砂浆的浓密，浓密机底流**浓度低、波动大**



■ 管道输送

高浓度料浆的**输送不稳定**，易出现**堵管、爆管**

超细颗粒深度固液分离

高浓度长距离稳定输送

**新技术下的
膏体充填**

1.4 国内发展现状



目前，金属矿**180+**

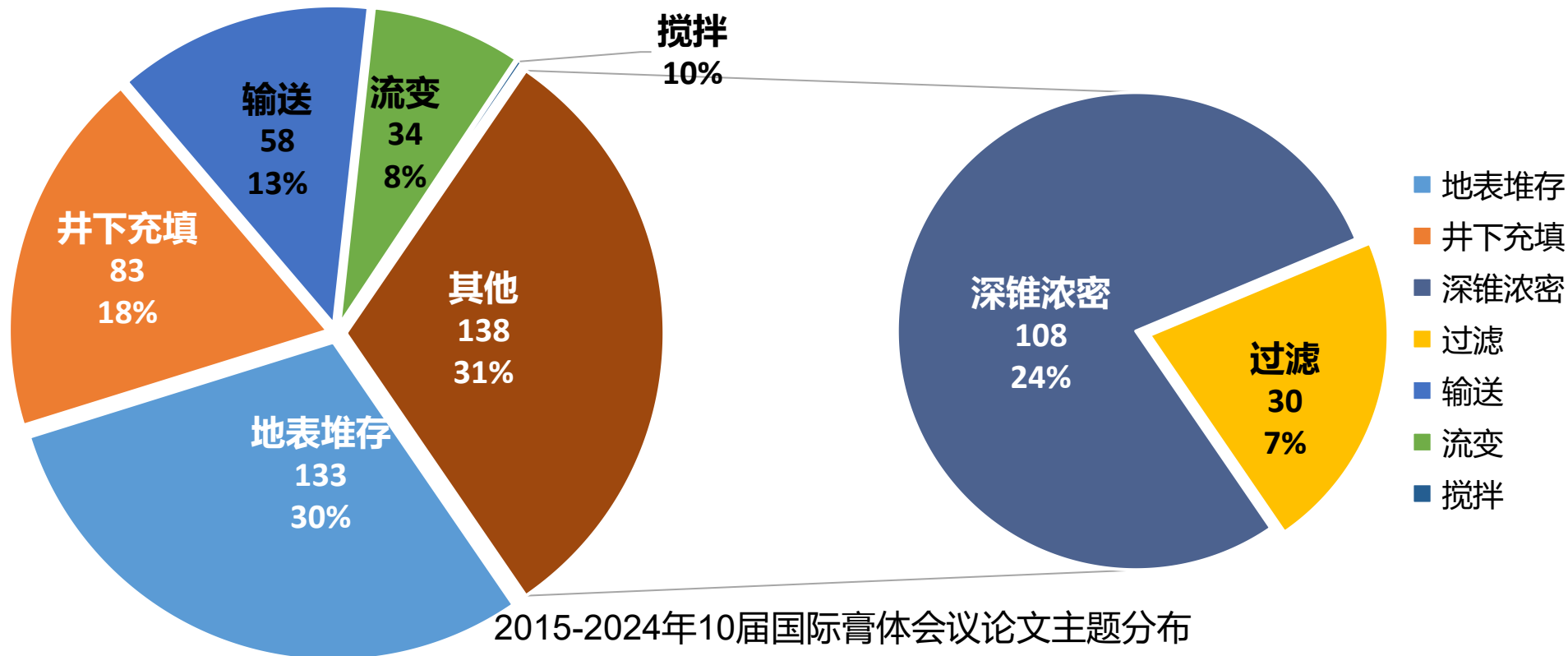
似雨后春笋.....

呈燎原之火.....

1.5 国外研究现状

连续10届
Paste会议

- 处置方式：地表堆存多于井下充填
- 工艺环节：**深锥浓密**是主旋律，**搅拌**是盲点，**流变**是基础方向

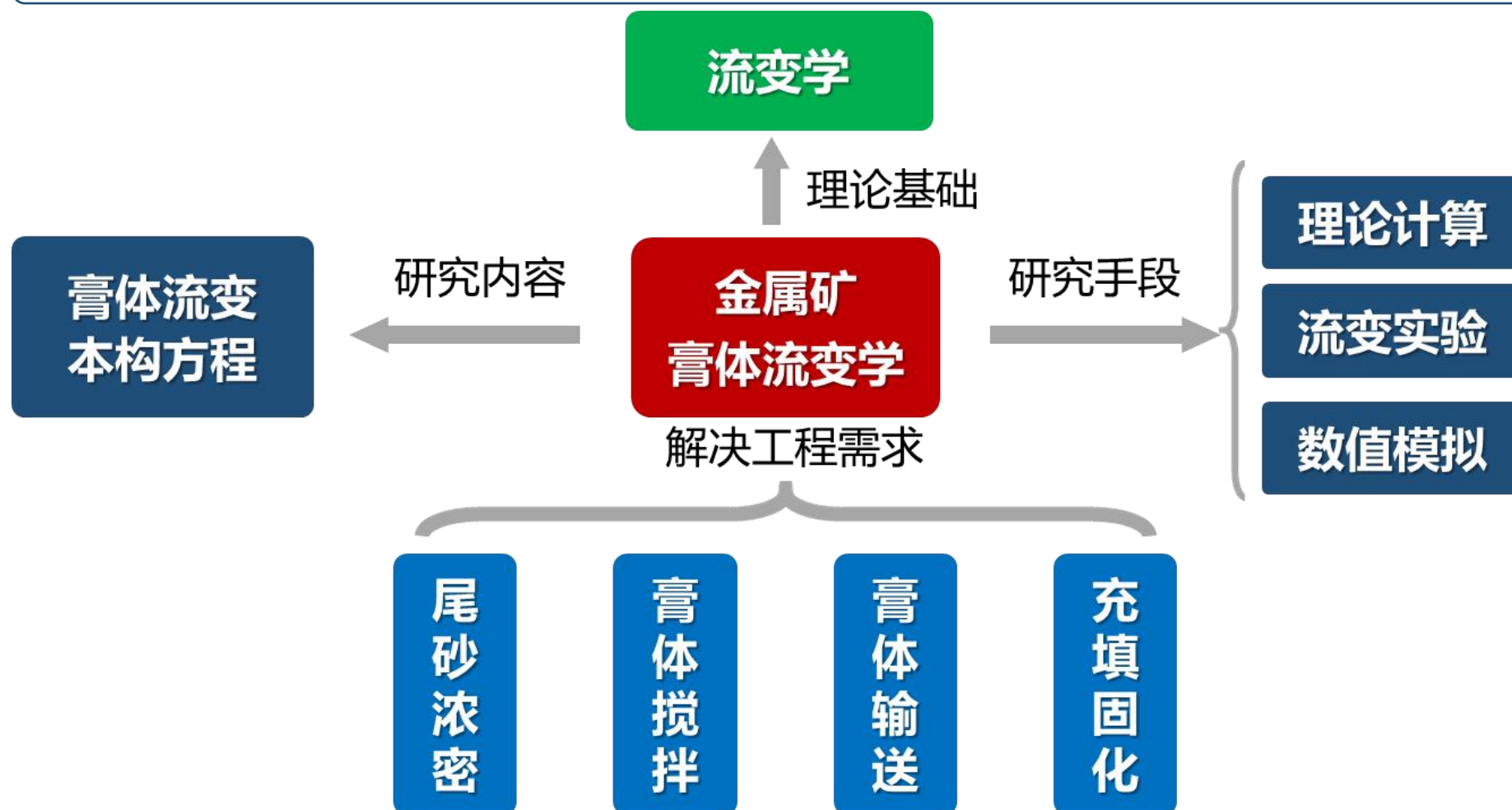


2

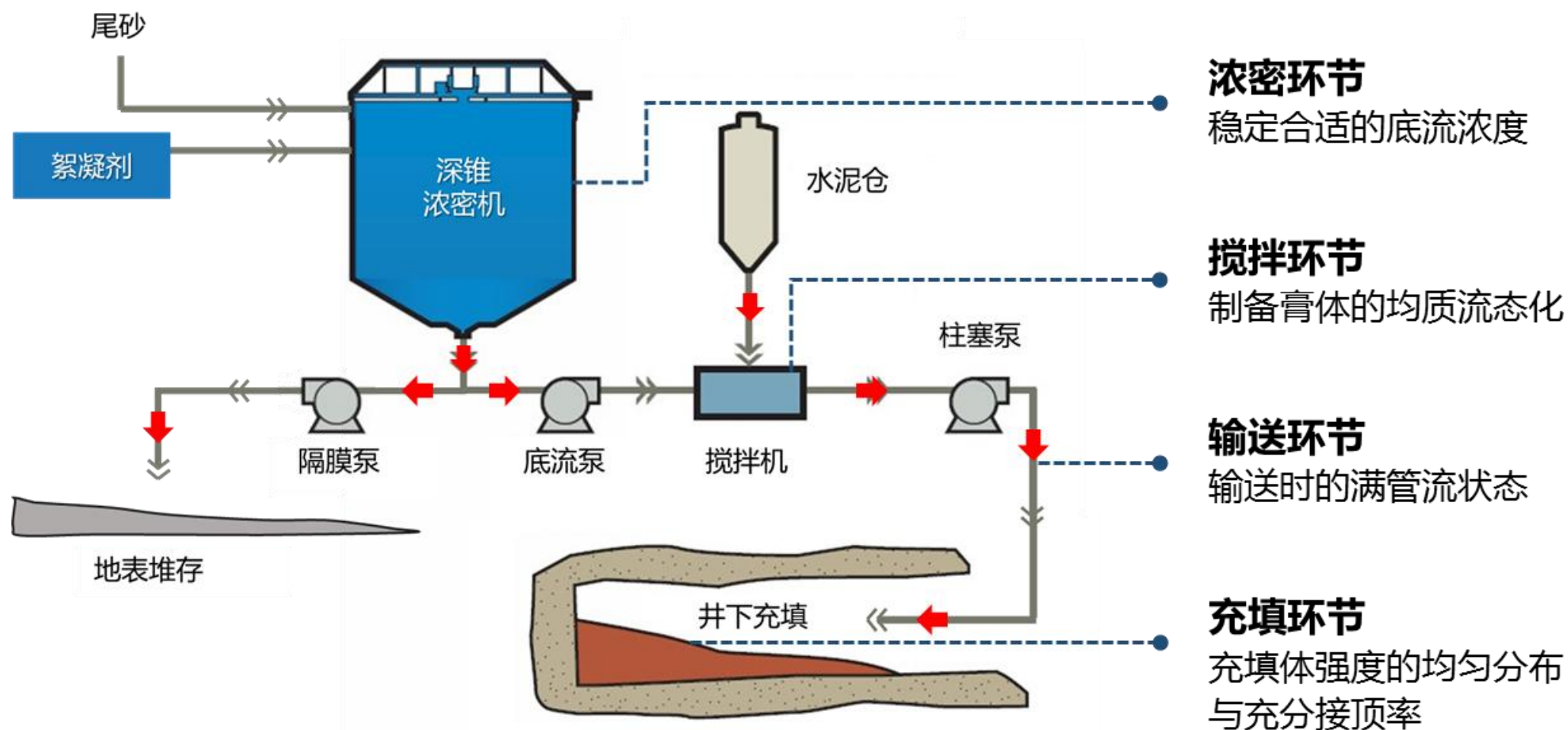
膏体充填研究进展

2.1 什么是膏体流变学

- 一门研究膏体充填各工艺环节中**膏体**料浆或充填体的**流动**与**变形**的科学
- 是具有高度行业特殊性与复杂性的**流变学分支**

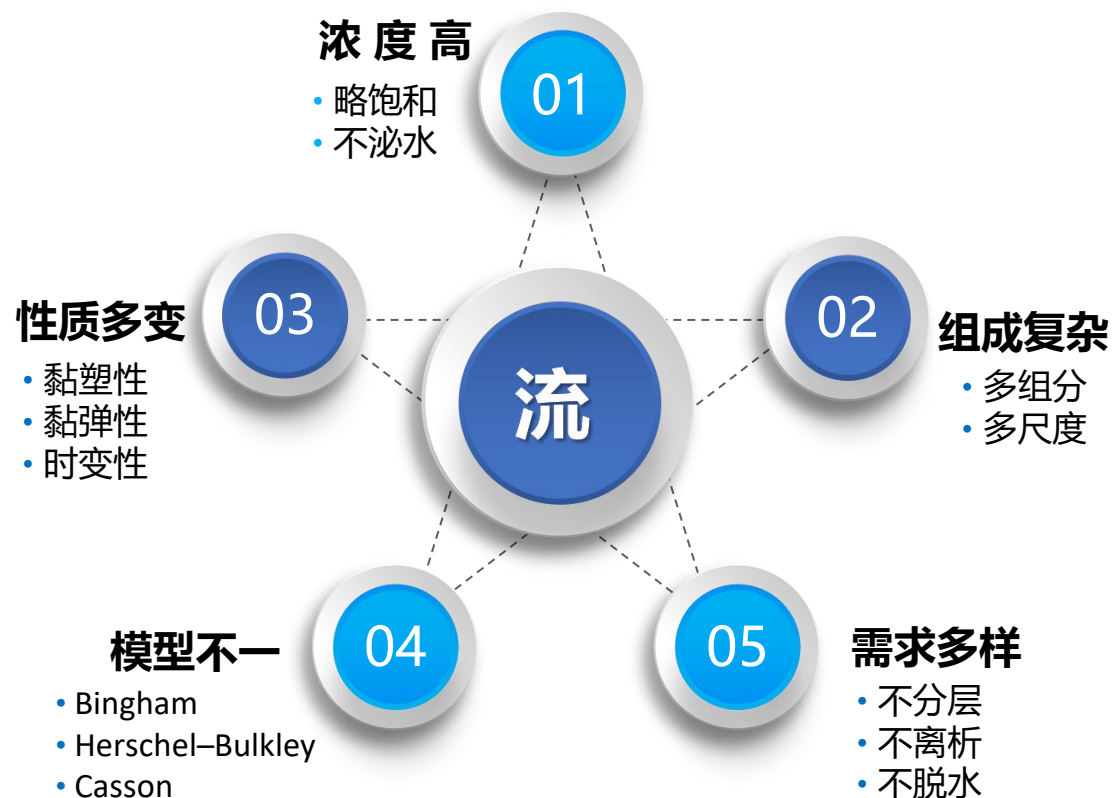


2.2 为什么研究膏体流变学



整个工艺流程的工程需求响应均以料浆的**流动与变形**（**流变**）为基础

2.3 膏体流变学的难点



传统两相流理论
固-液两相流 (**固少液多**)

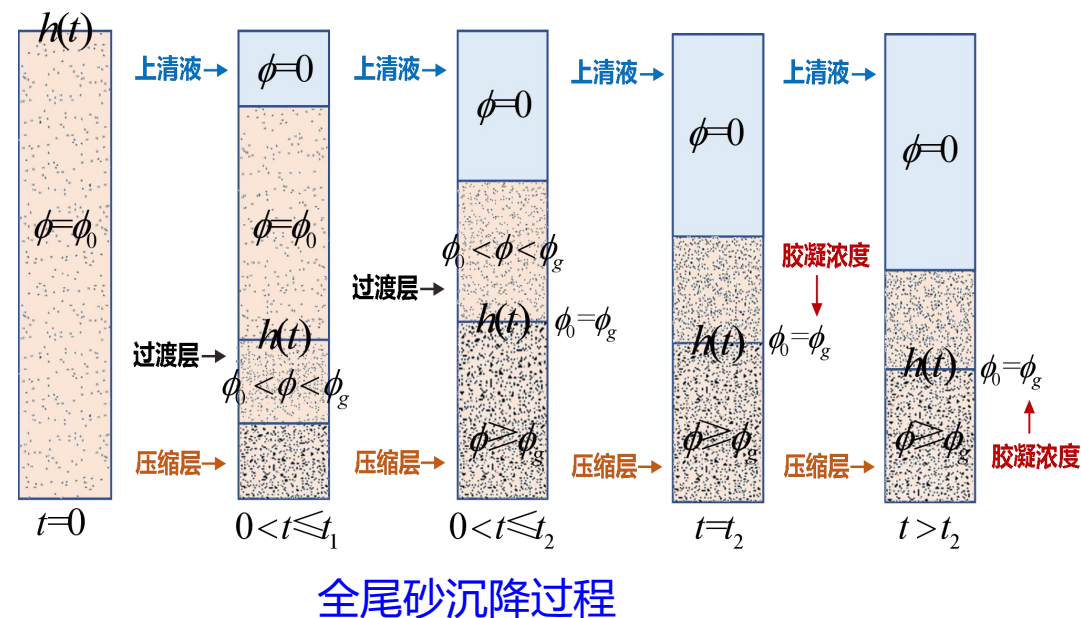


膏体流变学
液-固两相流 (**固多液少**)

传统**两相流模型**不适合描述材料复杂、浓度高的膏体

2.4 进展 I — 基于流变特性的连续稳态浓密模型

- 连续浓密过程包括**沉降**和**压密**两个子过程
- 剪切应力与塑性黏度等**无法系统描述**该过程料浆的流变行为



浓密过程流特性变表征

压缩屈服应力

$$P_y(\phi) = \left(\frac{a(\phi_{cp} - \phi)(b + \phi - \phi_g)}{(\phi - \phi_g)} \right)^{-k}$$

干涉沉降系数

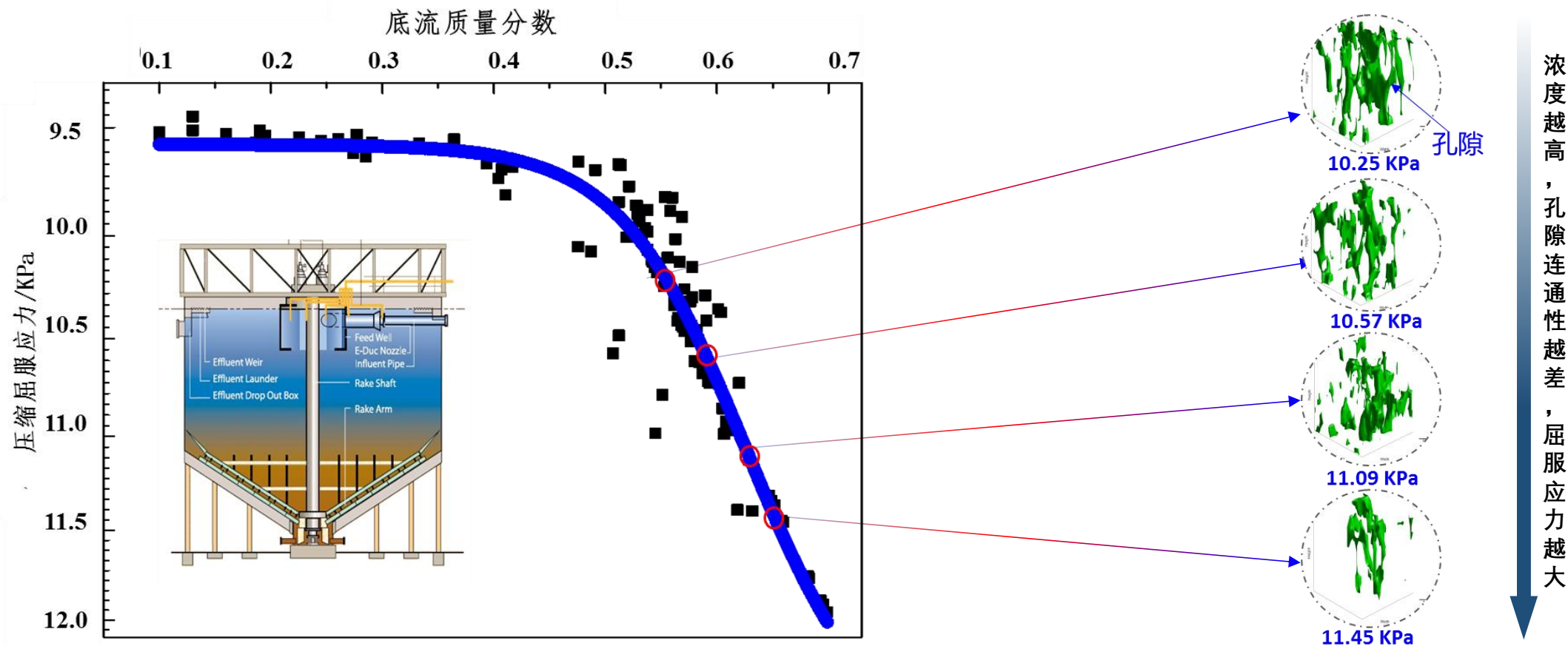
$$R = r_a(\phi - r_g)^{r_n} + r_b$$

建立了深度浓密**全过程流变特性**表征体系

2.4 进展 I — 基于流变特性的连续稳态浓密模型



- 传统**非剪切**条件下泥层渗透性差，絮团内包裹水无法排除，**浓度低**



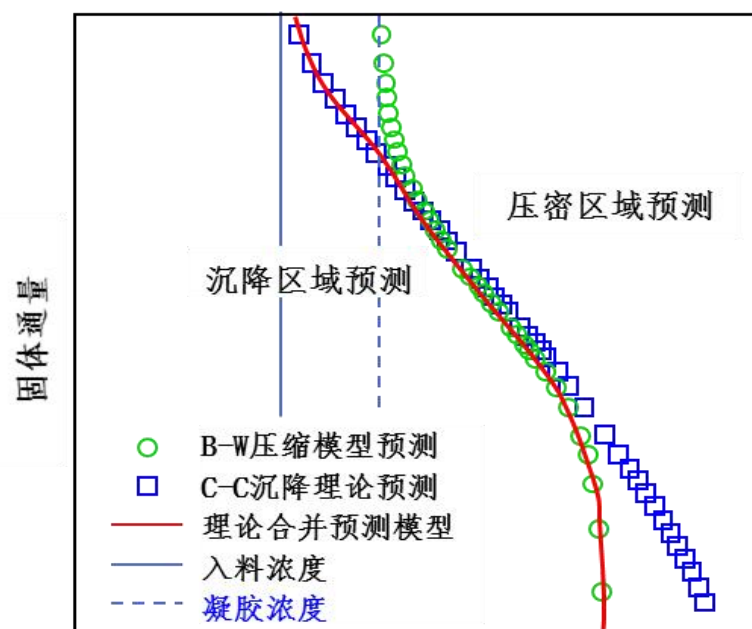
探明了**剪切**作用下絮团**微观结构**、底流**浓度**与**流变特性**相互影响机理

2.4 进展 I — 基于流变特性的连续稳态浓密模型

传统沉降 浓密模型

- C-C理论：只适用于**自由沉降**区域，不考虑絮团群作用力
- B-W理论：考虑絮团网状结构，只适用于**压密区域**

C-C理论与B-W理论合并



底流浓度

考虑
剪切作用

$$\frac{df(z)}{dz} = \frac{[R(f(z)) / (1 - f(z))^2] \times [q / \alpha(z)] \times [1 - f(z)/f_u] - \Delta p g f(z)}{dP_y(f(z)) / df(z)}$$

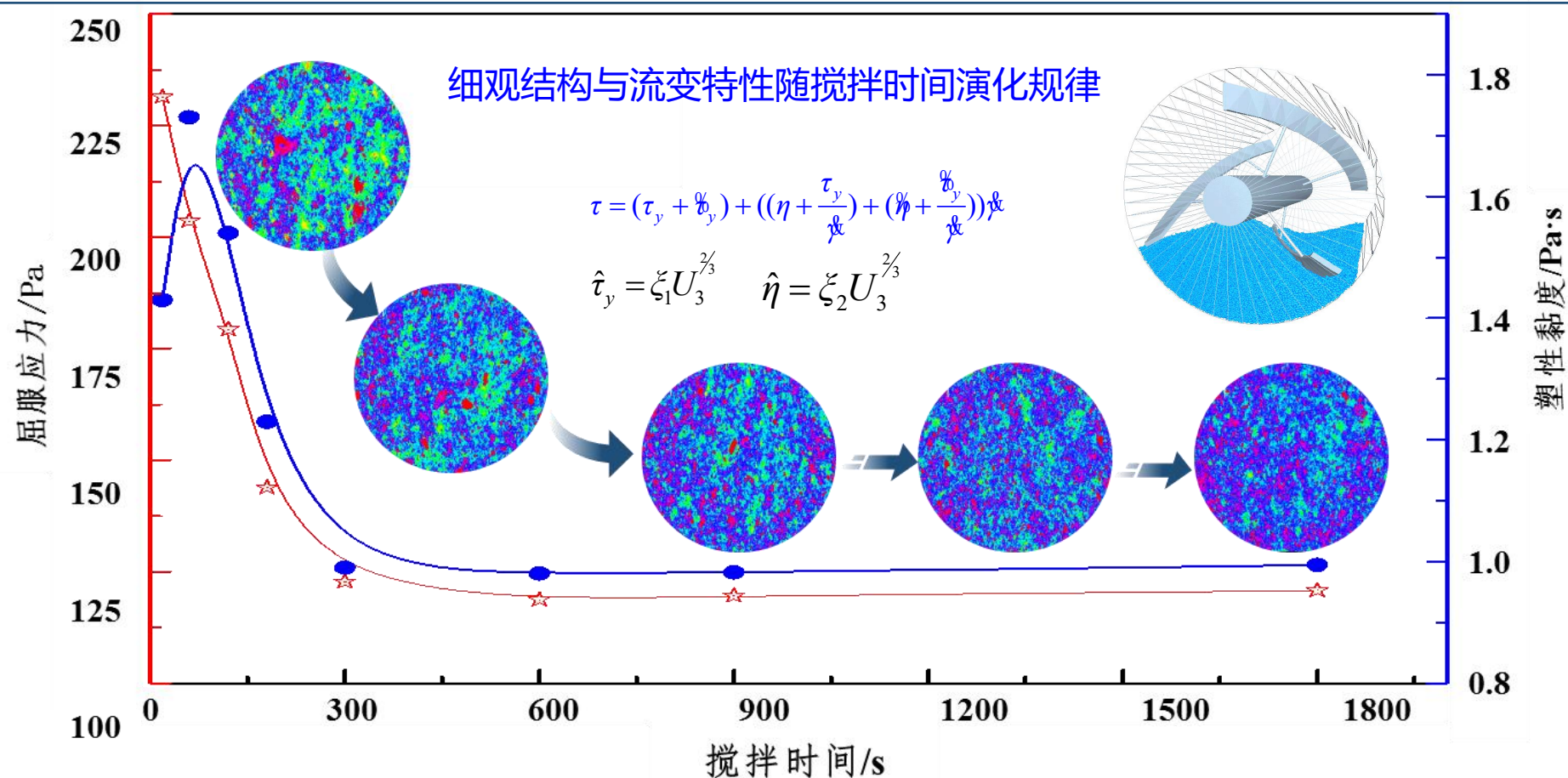
参数	实际值	预测值	相对误差
底流浓度 /%	71.04	71.0	-0.05%
底流排放量 /m ³ ·h ⁻¹	75.1	78.2	4.13%
处理能力 /t·h ⁻¹	102.0	99.25	-2.69%

建立剪切作用下基于流变学的连续稳态浓密模型，实现**浓密机性能精准预测**

2.4 进展 II — 膏体搅拌过程流变特性演化机理



■ 传统借助混凝土搅拌理论，导致膏体物料**分散不均**、膏体**流动性差**



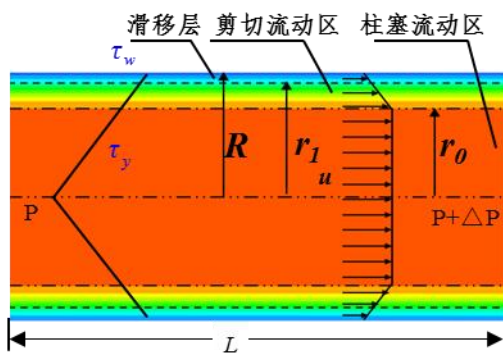
建立搅拌过程膏体流变本构方程，物料**均质分散**、屈服应力**降低**、塑性黏度**降低**

2.4 进展 III — 考虑“三大效应”的管阻模型

- 常用阻力计算公式基于**两相流理论**
- 本构方程**未考虑**管壁滑移、触变效应、时-温效应影响

管阻预测
误差大

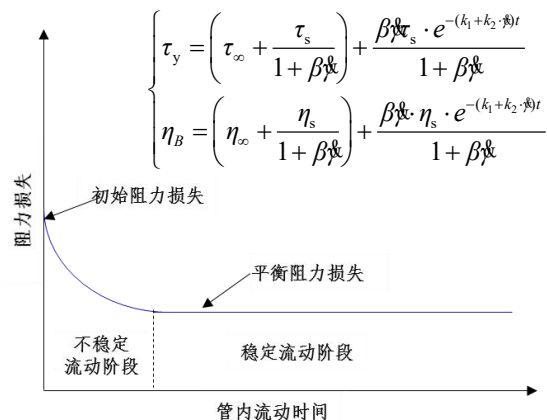
管壁滑移



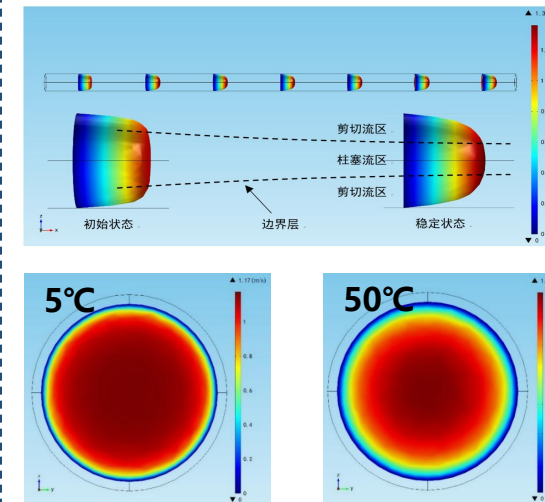
$$i = \frac{\Delta P}{L} = f_{\text{slip}} \cdot \frac{\rho_m v^2}{2D}$$

触变效应

$$i = \left[\frac{16}{3D} \cdot a + \frac{32v}{D^2} \cdot m \right] + \left[\frac{16}{3D} \cdot b + \frac{32v}{D^2} \cdot n \right] \cdot \text{EXP}(-c \cdot t)$$



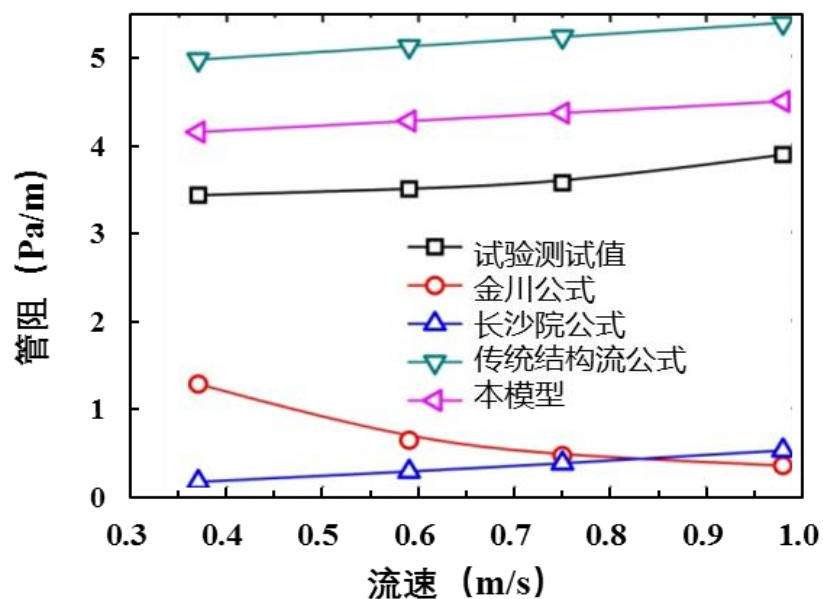
时-温效应



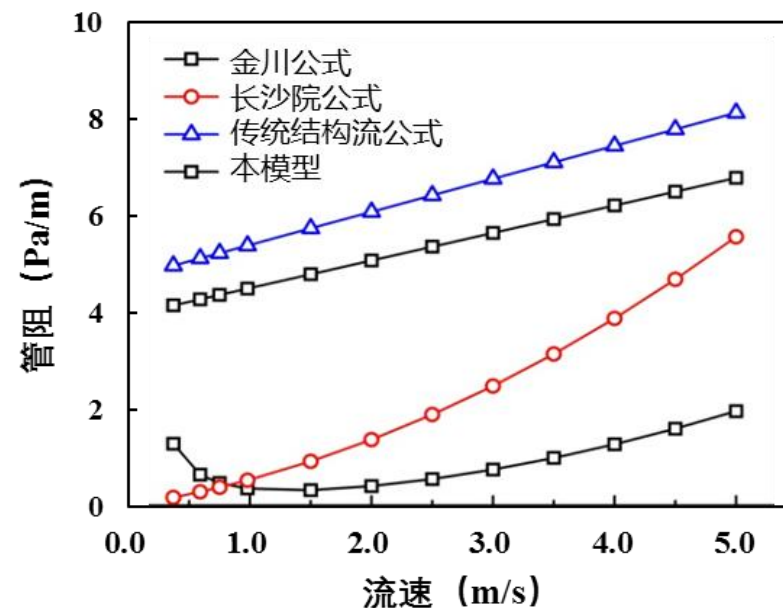
2.4 进展 III — 考虑“三大效应”的管阻模型

- 常用阻力计算公式基于**两相流理论**
- 本构方程**未考虑**管壁滑移、触变效应、时-温效应影响

管阻预测
误差大



低流速下计算结果比较



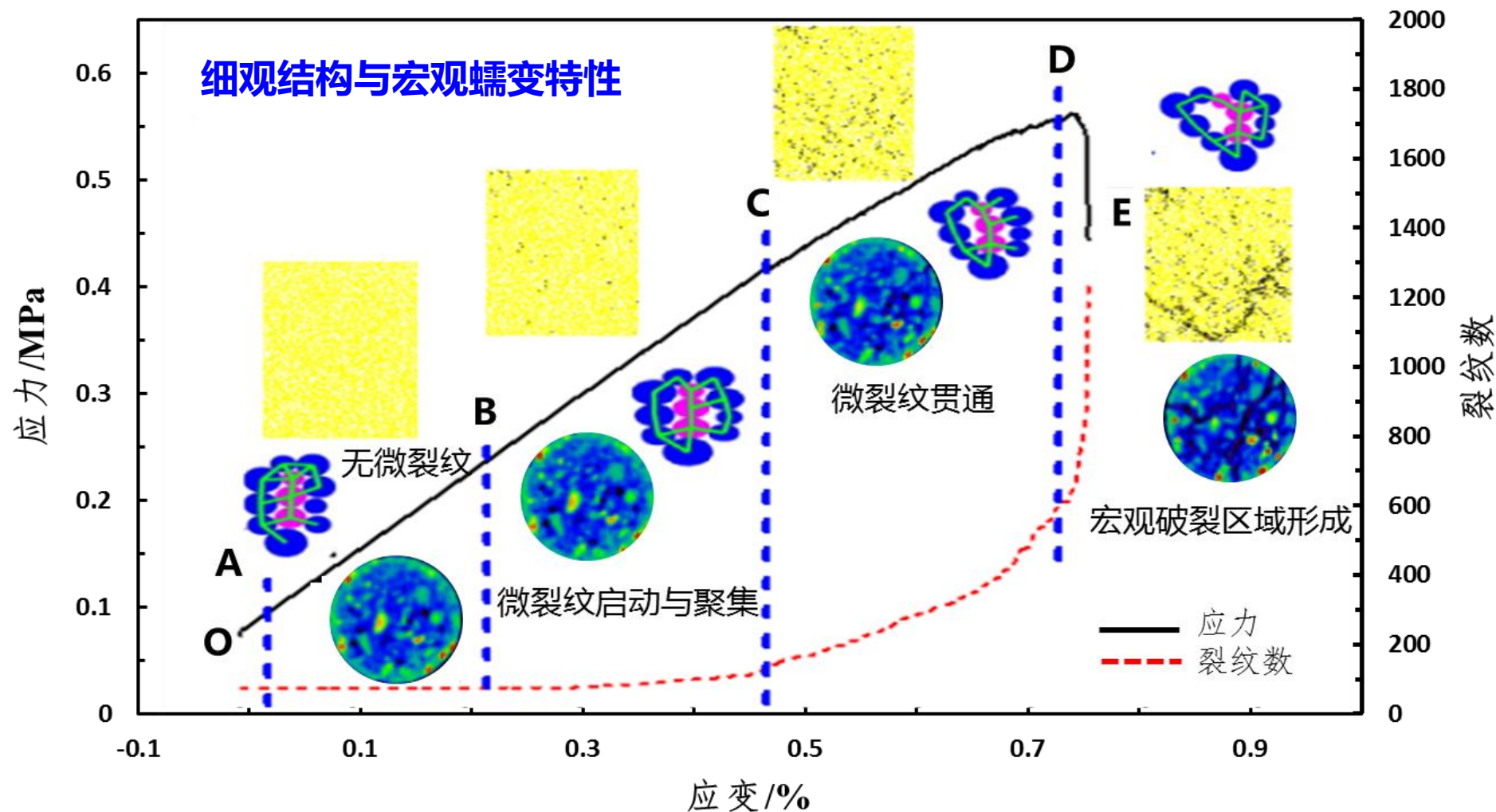
高流速下计算结果比较

误差范围为**10%**左右，实现管阻**精准预测**

2.4 进展 IV — 考虑损伤的充填体蠕变本构方程



■ 充填体流变行为主要集中于充填体蠕变



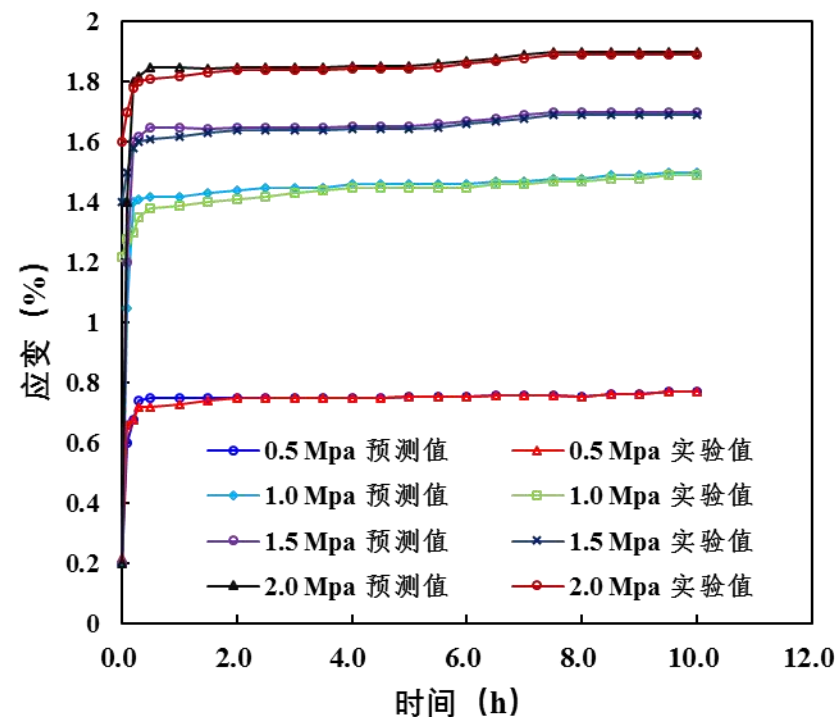
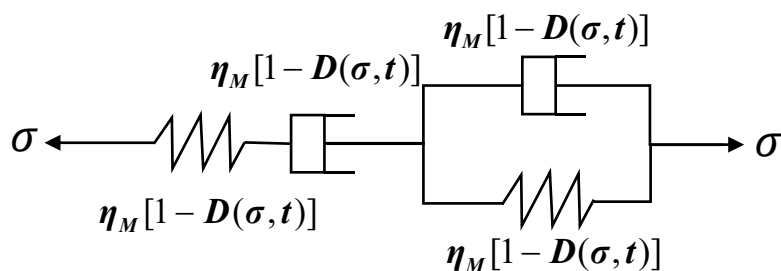
2.4 进展 IV —考虑损伤的充填体蠕变本构方程

■ 充填体流变行为主要集中于充填体蠕变

引入损伤变量的本构方程

损伤变量 $D(t) = 1 - \frac{1}{E_0} [E_\infty + (E_0 - E_\infty)e^{-at}]$

本构方程 $\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{1 - D(\sigma, t)} \left[\frac{1}{E_M} + \frac{1}{\eta_M} t + \frac{1}{E_K} (1 - e^{-\frac{E_K t}{\eta_K}}) \right]$



误差大部分小于1%，**精确反映**充填体失稳破坏前的蠕变变形规律

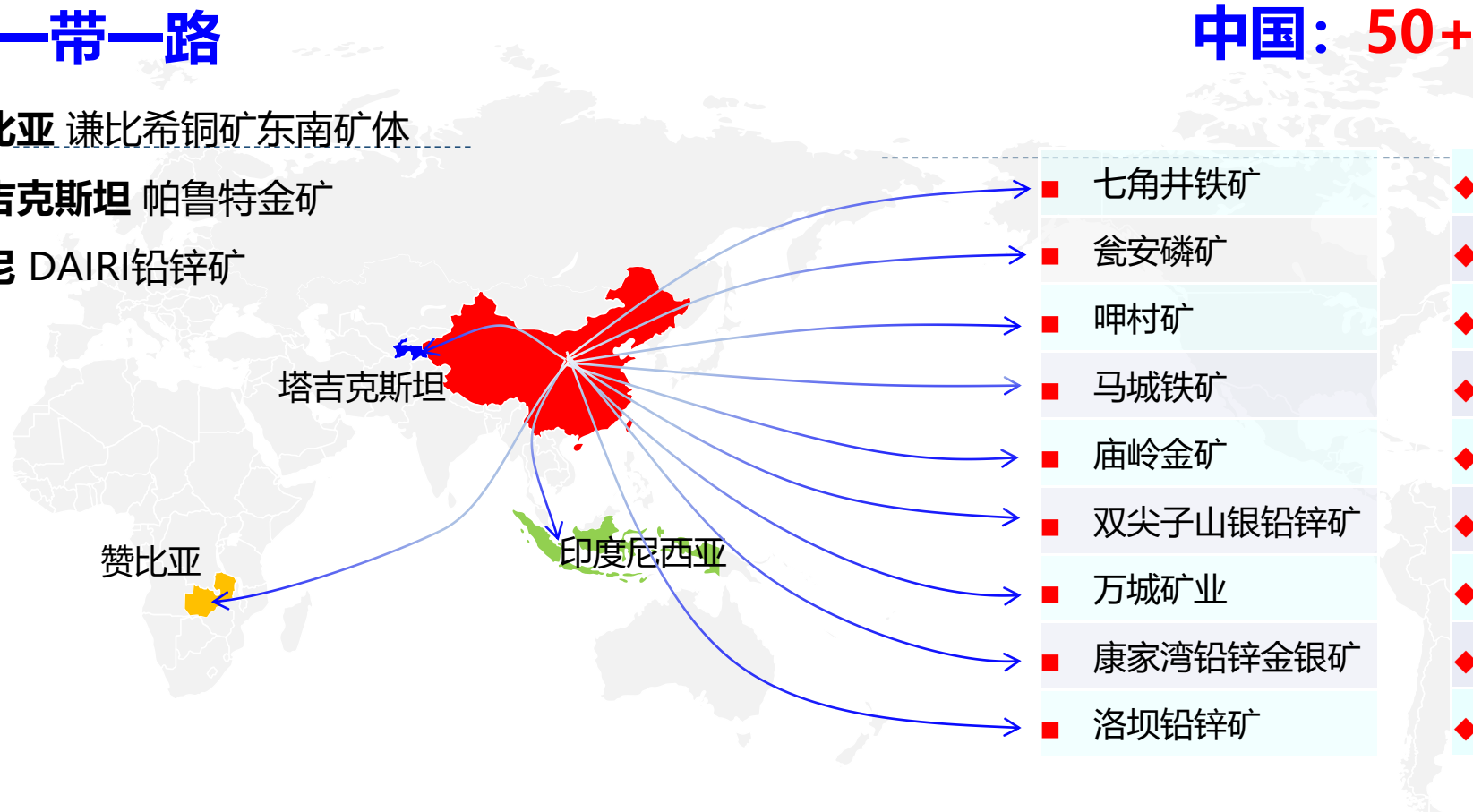
33

膏体充填技术工程实例

3.1 近两年膏体充填技术应用现状

一带一路

- 赞比亚 谦比希铜矿东南矿体
- 塔吉克斯坦 帕鲁特金矿
- 印尼 DAIRI铅锌矿



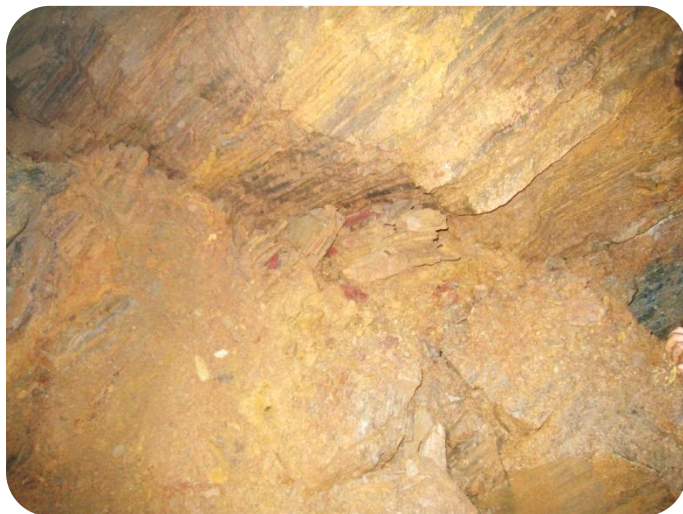
中国: 50+

3.2 实例 I —— 伽师铜矿膏体充填



建设背景

- 尾矿颗粒较细，不能得到足够量的分级尾砂；
- 设计充填强度条件下水泥单耗较大，充填成本极高；
- 围岩遇水泥化，采场泄水困难；
- 采场脱水现象较严重。



遇水泥化



泄水困难

3.2 实例 I — 伽师铜矿膏体充填

建设情况



进口深锥浓密机



BASF絮凝剂



泵送剂添加系统



国产柱塞泵



两级卧式搅拌机



自动化控制室

3.2 实例 I — 伽师铜矿膏体充填



河南理工大学
HENAN POLYTECHNIC UNIVERSITY

建设效果

尾矿浓密



搅拌制备



管道输送



底流膏体



制备效果



输送效果

3.2 实例 II — 谦比希铜矿东南矿体



谦比希东南矿体

- 隶属中色非洲矿业有限公司
- 位于非洲赞比亚铜矿带的中部
- Cu平均品位: **2.06%**
- Cu金属量: **约123.7万t**

3.2 实例 II — 谦比希铜矿东南矿体

矿山现有问题

- **“三下” 矿山：**
地表有公路、农场及矿山地面工业场地
- **靠近含水层：**
需要保护含水层以减少井下排水量
- **水泥价格高：**
100美元/t，充填成本大
- **软弱矿岩：**
采场脱水严重，矿岩**遇水泥化**，泄水困难

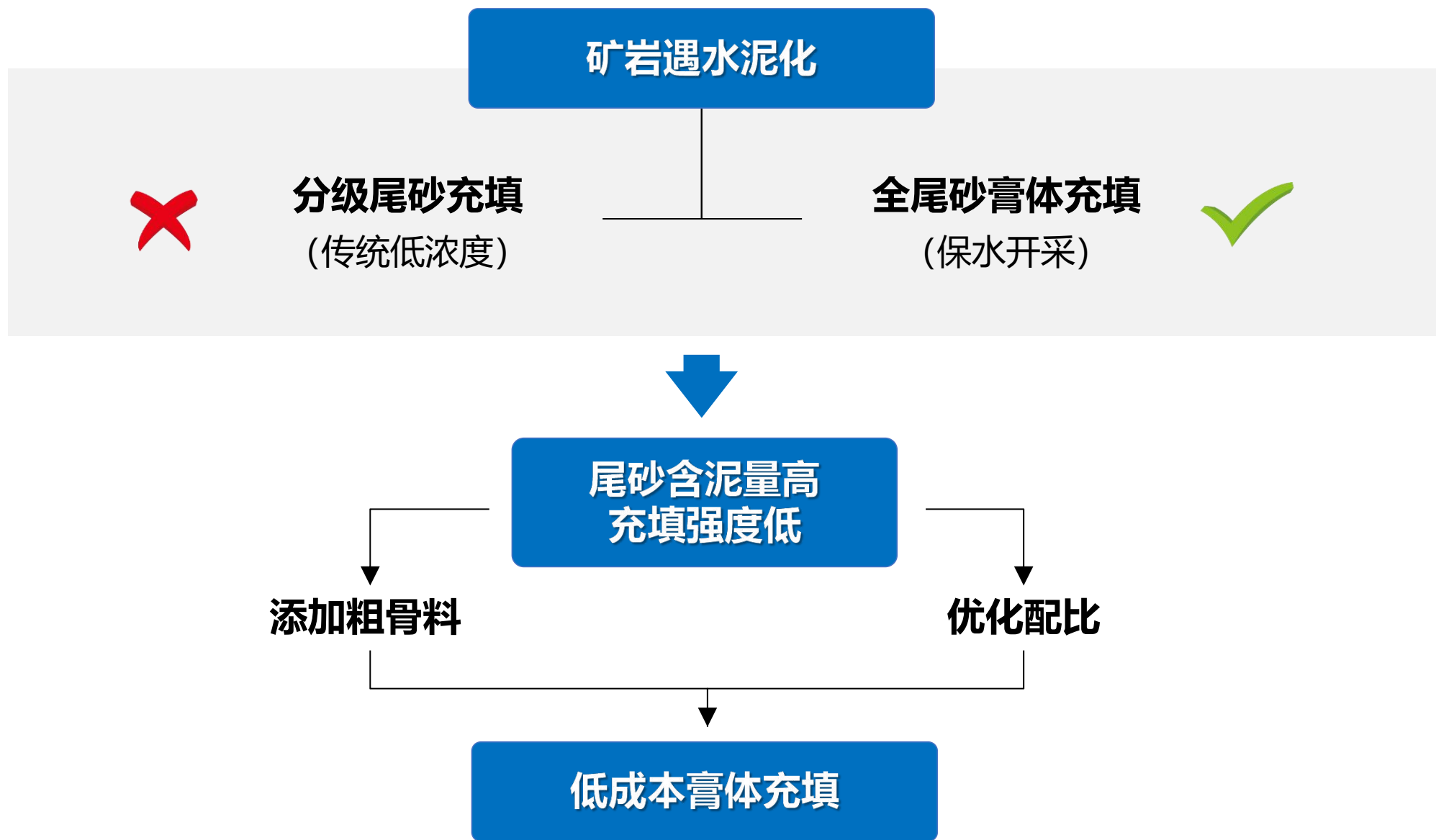


遇水泥化

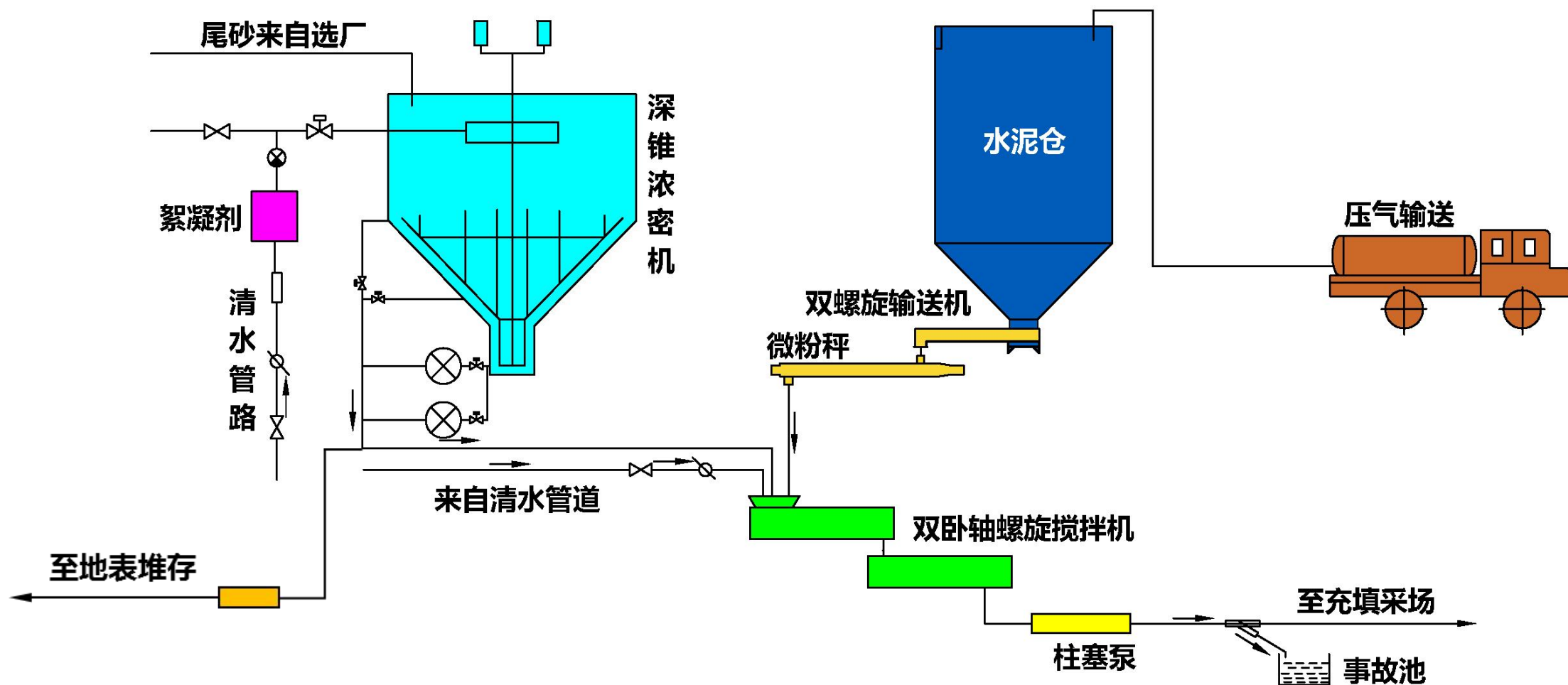


泄水困难

3.2 实例 II — 谦比希铜矿东南矿体



3.2 实例 II — 谦比希铜矿东南矿体



谦比希东南矿体膏体充填与堆存联合处置系统

3.2 实例 II — 谦比希铜矿东南矿体

充填系统设计

- ▶ 2台 $\Phi 18\text{m}$ 深锥浓密机

底流浓度73%~75%，处理能力9210 t/d

- ▶ 两段卧式搅拌机

设备最大处理能力160 m³/h，处理浓度70~80%

- ▶ 3台隔膜泵（尾矿库）+2台柱塞泵（井下）

泵压5MPa，管径 $\Phi 175\text{mm}$ ，流量140-160m³/h



深锥浓密机



三台隔膜泵

3.2 实例 III — 贵州川恒瓮安磷矿



瓮安磷矿

- 隶属贵州川恒化工
- 位于贵州省黔南州

矿山现有问题

- **磷石膏产量大，占据大量土地：**
90万吨/年，堆存在地表渣场
- **磷石膏组成复杂，利用率低：**
含磷、氟、有机物等杂质，制约应用范围，增加利用成本，抵用率不足20%
- **大量采空区和露天坑，危害重：**
遗留下大量地下采空区和地表露天坑，造成地表塌陷、山体开裂、滑坡等



磷石膏地表堆存

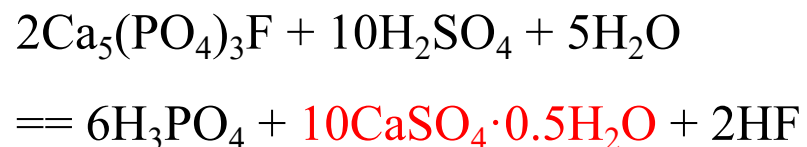


露天坑

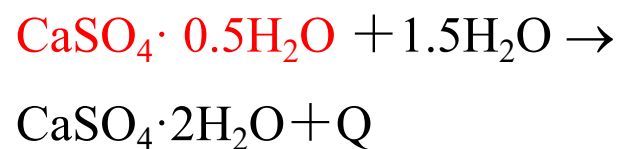
3.2 实例 III — 贵州川恒瓮安磷矿

川恒磷石膏**自胶凝**特性

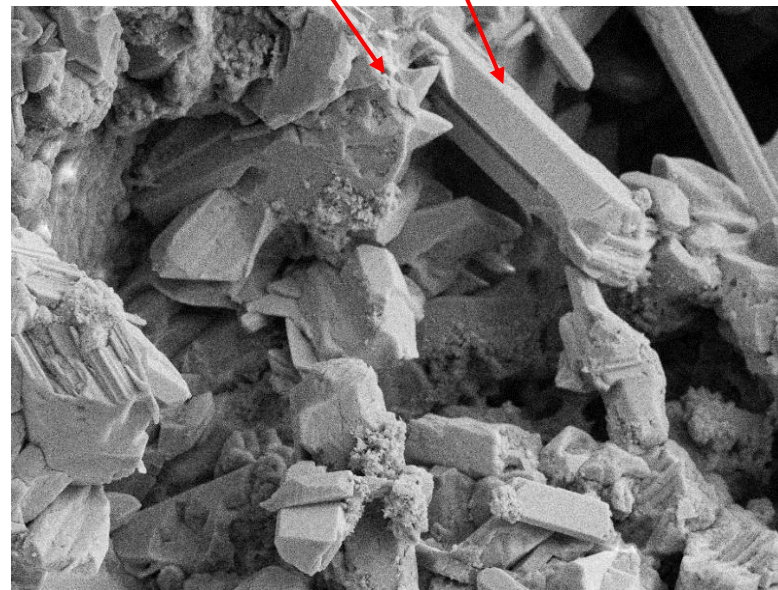
■ 半水磷石膏:



■ 自胶凝:



二水石膏晶体



磷石膏膏体充填

- ✓ 解决磷石膏**堆存**处置问题
- ✓ 解决**井下空区**充填问题

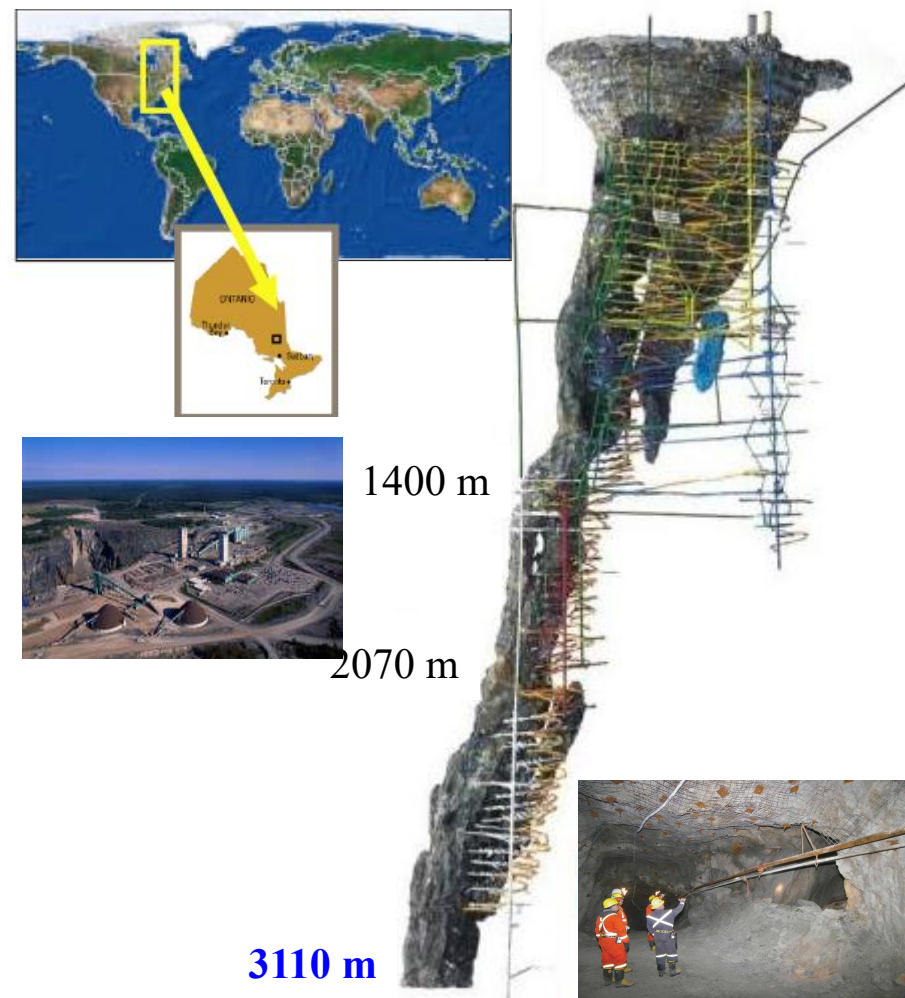
充填站自动控制系统

3.3 国外应用现状

■ 工程应用：井下充填-加拿大基德克里克铜锌矿

基德克里克铜锌矿

- 隶属瑞士嘉能可 (Glencore) 公司
- 位于加拿大安大略省
- 开拓深度3110m
- 铅锌储量**952万t**
- Pb+Zn平均品位**6.42%**



White, 2013; Counter, 2014; McGuinness, 2019

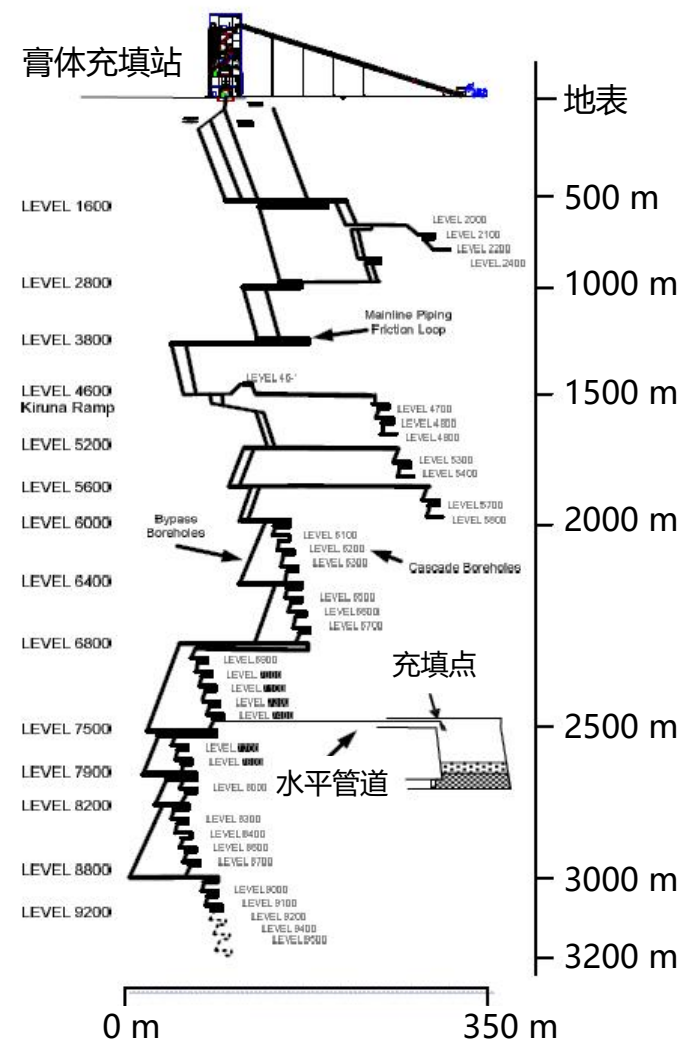
3.3 国外应用现状



■ 工程应用：井下充填-加拿大基德克里克铜锌矿

膏体充填系统

- 2004年投产
- 生产能力400 t/h, 130 万t/年
- 管径 203mm
- 充填深度**3000米** (40个钻孔, 40~530m)
- 膏体管输时间: **0.5~2 小时**



3.3 国外应用现状

- 工程应用：井下充填-加拿大基德克里克铜锌矿

问题：管道严重磨损

- 管壁变薄，降低管道压力等级
- 管径变大，摩阻损失减小，非满管流
- 安装维修困难
- 套管脱落导致充填钻孔堵塞

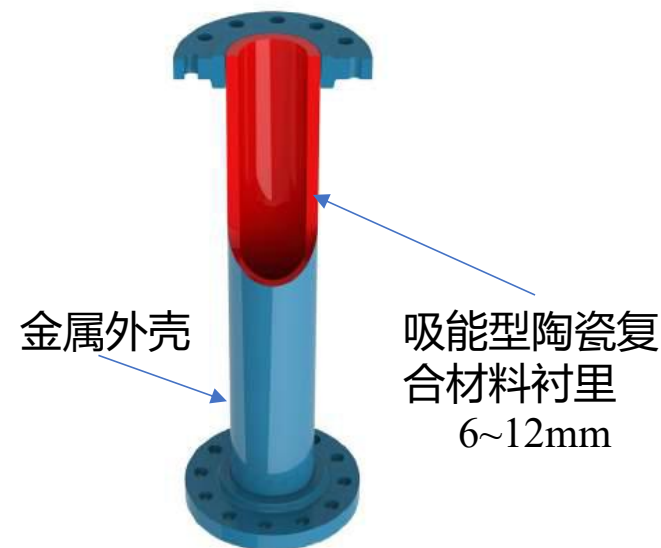


3.3 国外应用现状

- 工程应用：井下充填-加拿大基德克里克铜锌矿

解决措施：吸能型陶瓷复合管

- 高硬度陶瓷增强材料，耐磨性好
- 吸能专用基体，可抵抗热机械冲击
- 粘合强度高，消除膜下腐蚀
- 衬里易维修、套管可回收



ArmorPIPE™ 7500 Series

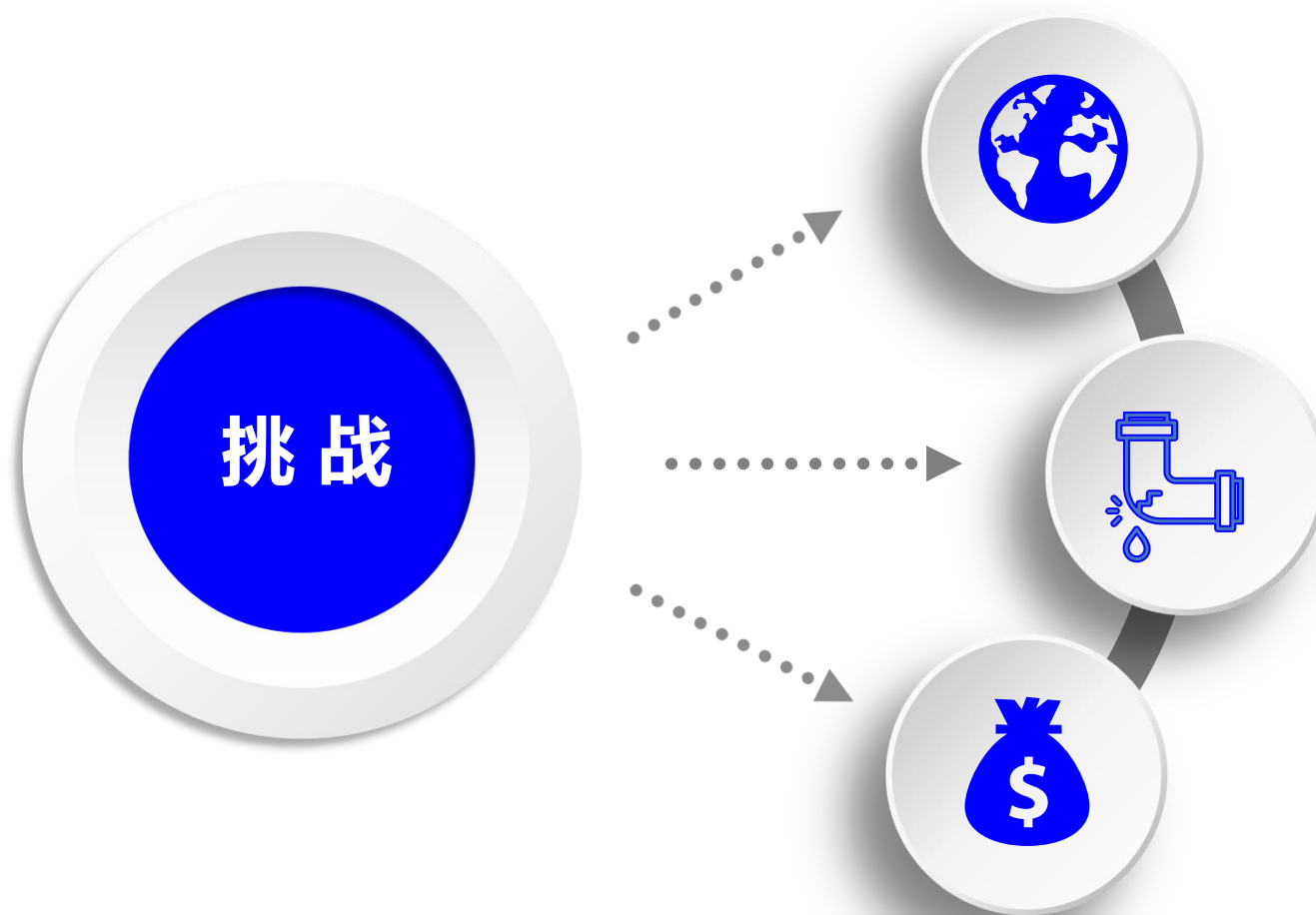
最长钻孔磨损率 < 设计标准 (1.1 mm/百万吨)

深度 (m)	30-80	80-130	130-180	180-230	230-280	280-330	330-380	380-430	430-480
衬里磨损率 (mm/百万吨)	1.01	0.80	0.85	0.85	0.92	0.91	0.92	0.92	0.95

4

挑战与趋势

4.1 面临的挑战



深地膏体充填

- 温度高
- 应力大
- 钻孔深

大流量膏体充填

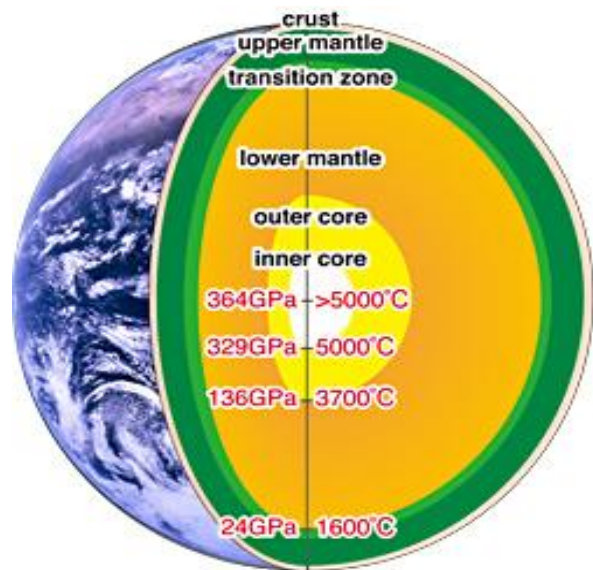
- 大型设备
- 集成系统

低成本膏体充填

- 胶凝材料
- 设备能耗

4.1 挑战 I — 深地膏体充填

- **应力大**: 40~120 MPa → **充填体强度**新挑战
- **温度高**: 35~60°C → **膏体流动与固结**新挑战
- **钻孔深**: 1000~5000 m → **充填管网**新挑战



地球内部温度、压力分布



深井管道震动、磨损

4.1 挑战 II — 大流量膏体充填



- 大型装备 → 装备控制新挑战
- 集成系统 → 系统复杂，可靠性差，调控新挑战



FLSmith 深锥浓密机
直径40 m (内蒙乌山)



飞翼、Schwing、Putzmeister充填工业泵
最大能力400 m³/h

4.1 挑战 III — 低成本膏体充填

- 胶凝材料贵（水泥占充填成本**70%**）→ 新型充填材料新挑战
- 装备能耗高（某柱塞泵功率**1260 KW**）→ 低能耗高效装备新挑战

流动度大于20 cm



3天UCS为0.5~5 MPa



CH半水磷石膏胶凝材料流动性好、强度高

双电机设计

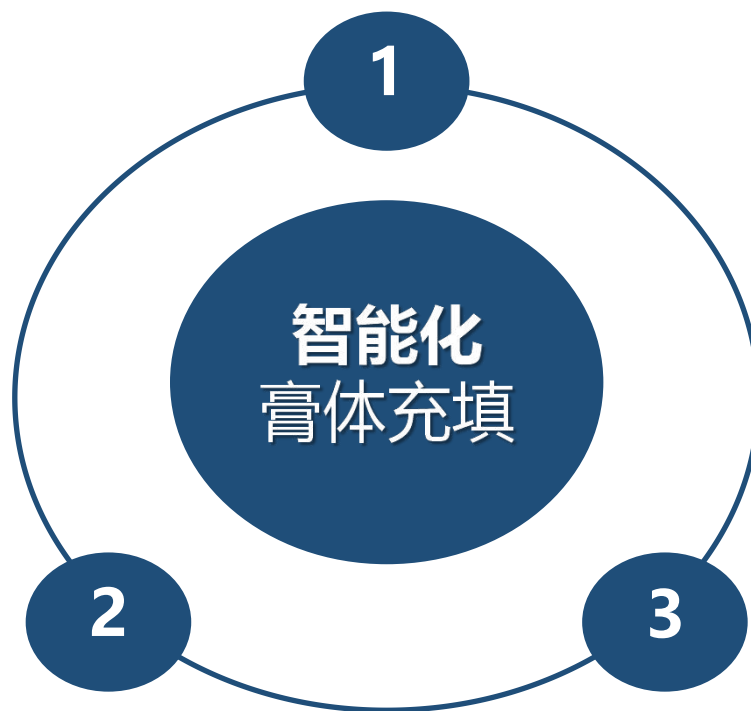


回油过滤与
冷却装置

双电机设计降低设备能耗

4.2 发展趋势

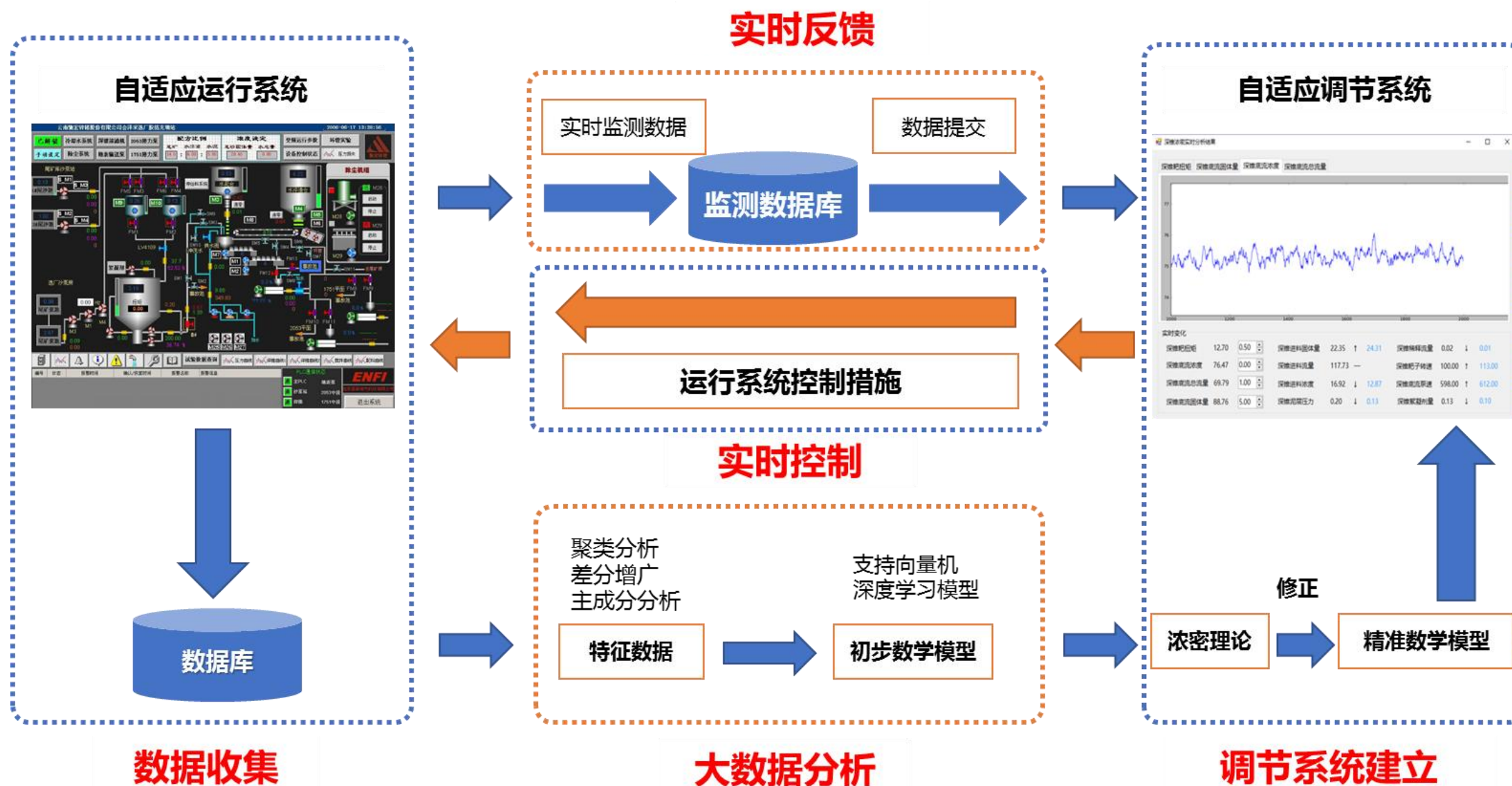
浓度自适应调控



膏体精细化制备

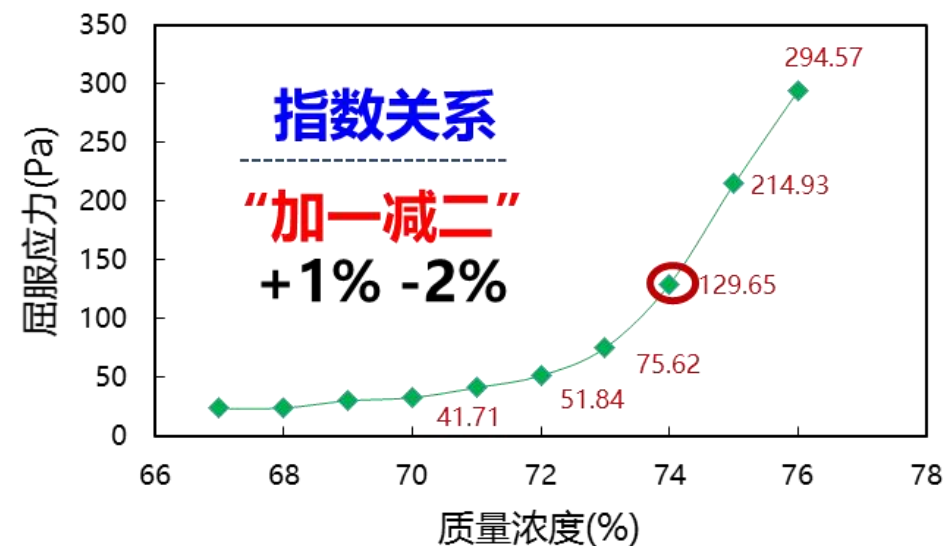
充填体固碳

4.2 趋势 I — 浓度自适应调控

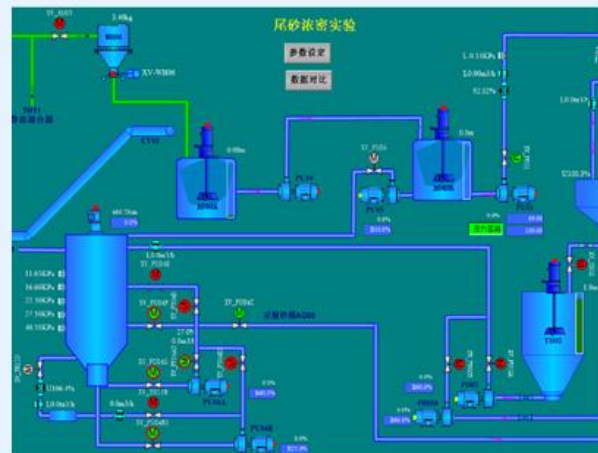


4.2 趋势 II — 膏体精细化制备

- 改变粗放型集料控制方式
- 加强**非对称精准控制**理念
- 提升设备精准化控制能力



集料控制



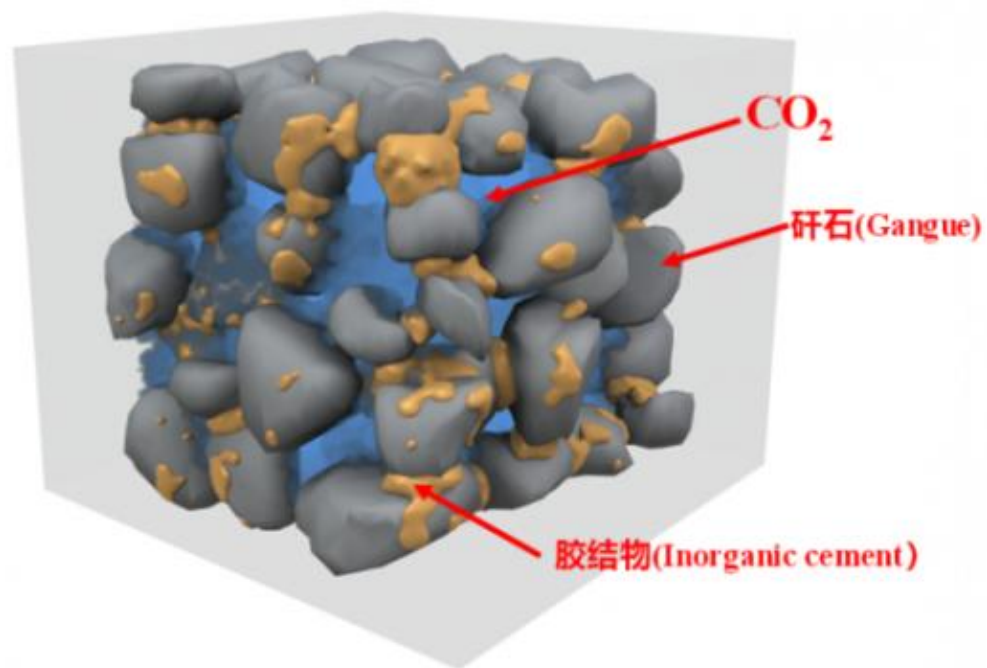
工艺控制



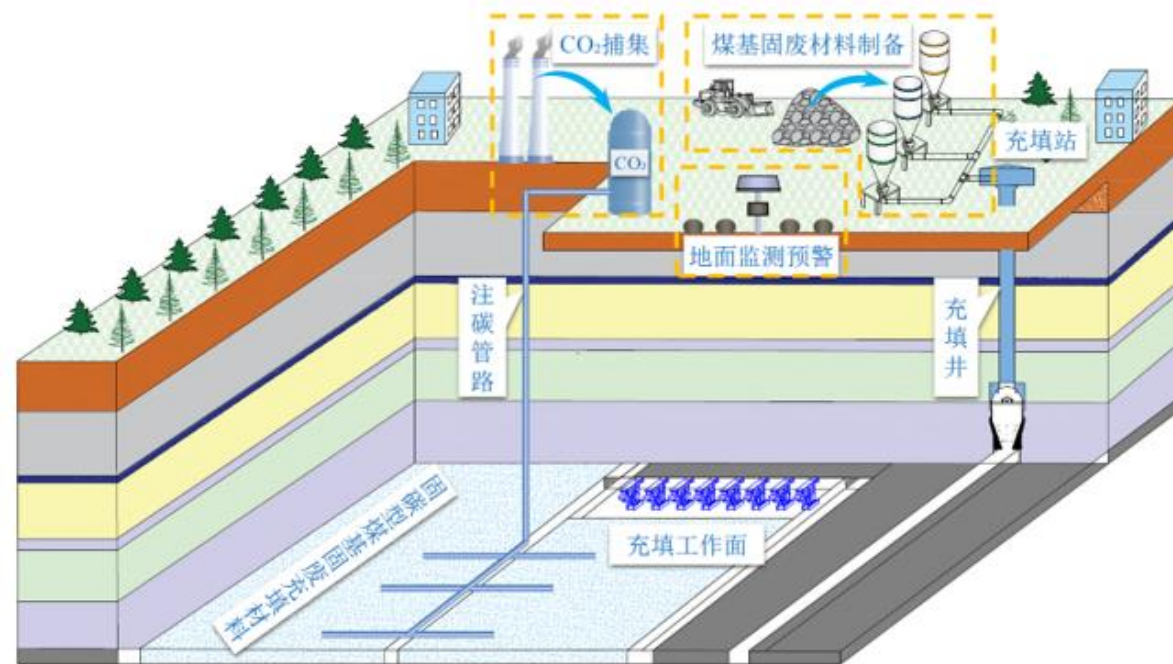
设备控制

4.2 趋势 III — 充填体固碳

- 实现途径**固碳**：二氧化碳气泡、充填体注碳；
- 形成高空隙结构的 “**富碳充填体**” 。



高孔隙 “富碳” 充填体

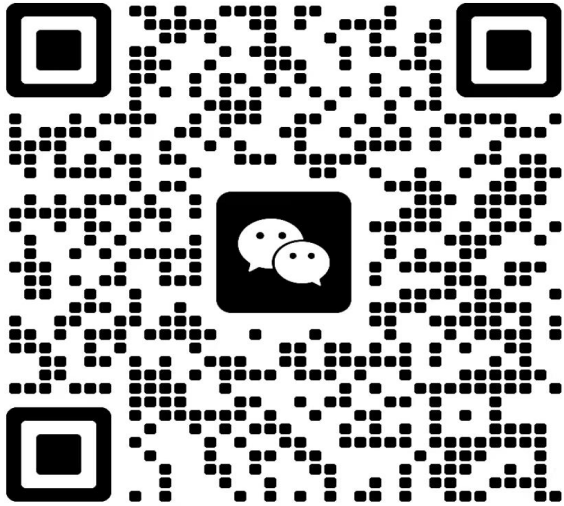


“负碳” 充填构想

谢和平院士提出负碳充填开采新理念与技术构想

Thank You

Thank You



谢谢!

汇报人：杨柳华
联系方式：18811770735