

## 案例 5

### 案例名称：井矿盐开采与溶腔储能关键技术

案例版权：重庆大学

应用场景：项目结题与奖项申报

教学目标与知识点：掌握课题结题要点的检索与查证。

### 案例正文

#### 1. 项目的背景与技术要点

##### （1）揭示了循环荷载下盐岩损伤演化及盐岩自愈合机制

结合井矿盐开采期间压力波动及溶腔储能期注采运行的特点，探究了盐岩在非连续循环荷载下的变形与破损机制，建立了相应条件下盐岩疲劳寿命预测模型；考虑到溶腔储存天然气或压缩空气期的循环注采气作业，揭示了盐岩蠕变损伤与疲劳损伤机理，建立了低频循环荷载下考虑蠕变—疲劳耦合作用的盐岩非线性蠕变本构模型，并实现了其程序化；从细微观层面揭示了不同介质对盐岩损伤自愈合的影响规律，拓展了盐岩损伤自愈合的发生机制及其本构模型。

##### （2）提出了井矿盐高效采卤及溶腔形态模拟与控制技术

基于相似理论与量纲分析，结合大尺寸盐岩实现了可视化的双直井与水平井采卤过程模拟研究，揭示了溶腔内部流场运移规律、溶腔形态扩展特征及形态调控工艺；建立了井矿盐采卤造腔过程中腔体边界动态网格移动的控制方程并开发了相应程序，实现了薄盐层采卤造腔的精准模拟与井下灾害的提前识别与防控。

##### （3）形成了井矿盐溶腔空间储能稳定性评价与安全防护技术

通过数值模拟分析了影响溶腔稳定性的因素，建立了不规则溶腔稳定性的综合评价方法、提出了溶腔分类利用及形态改造工艺技术；结合实验与数值模拟，研究了不同类型溶腔在储能期的地表沉降发展规律，并基于此确定了确保地下储能安全-地表沉降可控的溶腔储能的运行参数；探明了盐腔顶板垮塌及漏失演化机理，提出了井矿盐开采期及溶腔储能期的顶板优化设计参数与保护手段。

项目课题组成员：略

#### 2. 项目结题与报奖比对要点

##### （1）循环荷载下盐岩损伤演化及盐岩自愈合机制

开展非连续循环荷载下的盐岩蠕变与疲劳损伤研究，建立盐岩疲劳寿命预测模型、低频循环荷载下考虑蠕变—疲劳耦合作用的盐岩非线性蠕变本构模型及其程序化、细微观层面不同介质对盐岩损伤自愈合的影响规律。

##### （2）井矿盐高效采卤及溶腔形态模拟与控制技术

利用大尺寸盐岩实现可视化的双直井与水平井采卤过程模拟研究；建立井矿盐采卤造腔过程中腔体边界动态网格移动的控制方程并开发相应程序，实现薄盐层采卤造腔的精准模拟与井下灾害的提前识别与防控。

### （3）井矿盐溶腔空间储能稳定性评价与安全防护技术

不规则溶腔稳定性评价方法、溶腔分类利用及形态改造工艺技术，确保地下储能安全-地表沉降可控的溶腔储能的运行参数；井矿盐开采期及溶腔储能期的顶板优化设计参数与保护手段。

## 3. 比对要求

对项目进行国内外文献的对比分析，证明在国内外有无与项目相同或类似的报道。

## 4. 检索范围

### （一）国内数据库检索范围

中国学术期刊网络出版总库；中国博士学位论文全文数据库；中国优秀硕士学位论文全文数据库；中国重要会议论文全文数据库；中国重要报纸全文数据库；国家科技成果数据库；维普期刊资源整合服务平台；国家科技图书文献中心；中国科技论文在线；万方数据知识服务平台；国家知识产权局专利检索数据库；搜索引擎（百度学术等）

### （二）国外数据库检索范围

EI Compendex(Engineering Village)；ISI Web of knowledge ；Elsevier SDOS ；PQDD 博硕论文数据库；Springer Link；Inspec；Derwent 专利文献数据库 ；USPTO 美国专利数据库；、ProQuest 学位论文数据库 ；欧洲专利局(EPO) 专利检索系统

## 5. 检索词与检索策略

### （1）检索词

循环载荷/ cyclic loading  
蠕变特性/ creep properties  
盐岩储层/salt rock storage  
薄岩层/thinly bedded salt formations  
模拟研究/Simulation study  
盐穴/盐岩溶腔/ salt caverns  
地表沉陷/surface subsidence  
预测模型/prediction model  
地表沉陷/ surface subsidence  
稳定性/stability

### （2）检索策略：

ttl-abs-key (1 AND 2) AND ttl-abs-key (3 OR 4)

ttl-abs-key (3 OR 4) AND T ttl-abs-key (5) AND ttl-abs-key (6)

ttl-abs-key (7 and 8 and 9 and 10)

## 6. 检索结果（略）

## 7. 检索结果对比与分析

依据上述文献检索范围和检索策略，共检索相关文献 295 篇，经合并同一作者发表的相似文献后，筛选出密切相关文献 35 篇，其中文献[4-16]，文献[21-26]，文献[29-33]为本项目课题组成员发表。

综合分析检索到的国内外相关文献，并与委托项目的对比要点进行对比分析，得出以下结论：

关于循环荷载下盐岩损伤演化及盐岩自愈合机制，检索到的文献报道了围压对损伤盐岩自愈合特性的影响<sup>[见密切相关文献 1]</sup>，建立了一种考虑恢复的盐岩流变-损伤本构模型<sup>[见密切相关文献 2]</sup>；对微物理模型与单裂纹愈合实验进行了比较<sup>[见密切相关文献 3]</sup>；结合井矿盐开采期间压力波动及溶腔储能期注采运行的特点，探究了盐岩在非连续循环荷载下的变形与破损机制，建立了相应条件下盐岩疲劳寿命预测模型<sup>[见密切相关文献 4-6]</sup>。考虑到溶腔储存天然气或压缩空气期的循环注采气作业，揭示了盐岩蠕变损伤与疲劳损伤机理，建立了低频循环荷载下考虑蠕变-疲劳耦合作用的盐岩非线性蠕变本构模型，并实现了其程序化；从细微观层面揭示了不同介质对盐岩损伤自愈合的影响规律，拓展了盐岩损伤自愈合的发生机制及其本构模型<sup>[见密切相关文献 7-10]</sup>。从上述文献来看，已有文献对循环荷载下盐岩损伤演化及盐岩自愈合机制有一定的研究，但除本委托项目组成员发表的公开文献以外，未见本委托项目提出的：开展非连续循环荷载下的盐岩蠕变与疲劳损伤研究，建立盐岩疲劳寿命预测模型、低频循环荷载下考虑蠕变-疲劳耦合作用的盐岩非线性蠕变本构模型及其程序化、细微观层面不同介质对盐岩损伤自愈合的影响规律。

关于井矿盐高效采卤及溶腔形态模拟与控制技术，检出文献基于相似理论与量纲分析，结合大尺寸盐岩实现了可视化的双直井与水平井采卤过程模拟研究，揭示了溶腔内部流场运移规律、溶腔形态扩展特征及形态调控工艺<sup>[见密切相关文献 11-12]</sup>；建立了井矿盐采卤造腔过程中腔体边界动态网格移动的控制方程和薄盐层采卤造腔的精准模拟与井下灾害的提前识别与防控<sup>[见密切相关文献 13-16]</sup>；研究了新旧洞室间距对洞室周围岩体安全性的影响。选择变形、塑性面积和体积、有效应变、安全系数和体积收缩作为评估洞室安全性的指标<sup>[见密切相关文献 17]</sup>。从上述文献来看，已有文献对井矿盐高效采卤及溶腔形态模拟与控制技术有一定的研究，但除本委托项

目组成员发表的公开文献以外，未见本委托项目提出的：利用大尺寸盐岩实现可视化的双直井与水平井采卤过程模拟研究；建立井矿盐采卤造腔过程中腔体边界动态网格移动的控制方程并开发相应程序，实现薄盐层采卤造腔的精准模拟与井下灾害的提前识别与防控。

关于井矿盐溶腔空间储能稳定性评价与安全防护技术，检出文献研究了盐穴压缩空气储能库建设现状及工程难点<sup>[见密切相关文献 18]</sup>，；夹层盐穴建腔期围岩损伤灾变诱发机理及减灾原理<sup>[见密切相关文献 19]</sup>，对岩盐水溶开采溶腔形态及其影响因素浅析<sup>[见密切相关文献 20]</sup>，通过数值模拟分析了影响溶腔稳定性的因素，建立了不规则溶腔稳定性的综合评价方法、提出了溶腔分类利用及形态改造工艺技术<sup>[见密切相关文献 21,23,27]</sup>；并基于此确定了确保地下储能安全-地表沉降可控的溶腔储能的运行参数<sup>[见密切相关文献 22,24-26]</sup>；对盐穴不规则形状的洞室的安全距离进行了研究<sup>[见密切相关文献 28]</sup>；结合实验与数值模拟，研究了不同类型溶腔在储能期的地表沉降发展规律<sup>[见密切相关文献 33]</sup>，探明了盐腔顶板垮塌及漏失演化机理，提出了井矿盐开采期及溶腔储能期的顶板优化设计参数与保护手段<sup>[见密切相关文献 29-32]</sup>；相关研究还对不同地区的溶腔的不稳定性进行了研究<sup>[见密切相关文献 33-35]</sup>。从上述文献来看，已有文献对井矿盐溶腔空间储能稳定性评价与安全防护技术有一定的研究，但除本委托项目组成员发表的公开文献以外，未见本委托项目提出的：不规则溶腔稳定性评价方法、溶腔分类利用及形态改造工艺技术，确保地下储能安全-地表沉降可控的溶腔储能的运行参数；井矿盐开采期及溶腔储能期的顶板优化设计参数与保护手段。

本项目的技术特点在于：（1）循环荷载下盐岩损伤演化及盐岩自愈合机制。开展非连续循环荷载下的盐岩蠕变与疲劳损伤研究，建立盐岩疲劳寿命预测模型、低频循环荷载下考虑蠕变-疲劳耦合作用的盐岩非线性蠕变本构模型及其程序化、细微观层面不同介质对盐岩损伤自愈合的影响规律。（2）井矿盐高效采卤及溶腔形态模拟与控制技术。利用大尺寸盐岩实现可视化的双直井与水平井采卤过程模拟研究；建立井矿盐采卤造腔过程中腔体边界动态网格移动的控制方程并开发相应程序，实现薄盐层采卤造腔的精准模拟与井下灾害的提前识别与防控。（3）井矿盐溶腔空间储能稳定性评价与安全防护技术。不规则溶腔稳定性评价方法、溶腔分类利用及形态改造工艺技术，确保地下储能安全-地表沉降可控的溶腔储能的运行参数；井矿盐开采期及溶腔储能期的顶板优化设计参数与保护手段。

综上所述，在国内外公开发表的文献中，关于井矿盐开采与溶腔储能关键技术的研究，除本项目项目组成员公开发布文献以外，未见具有与本项目要点完全相同的公开文献报道。