重大科研成果转化本科生实验项目教学案例-面间煤柱掘充一体化模拟实验

一、基本信息介绍

（一）科研项目基本信息

1.科研项目名称及项目编号

项目类别：陕西省 2023 年重点研发计划-企业院所联合重点专项（项目单位）-工业领域

专项名称：富油煤绿色低碳开发关键技术研究-面间煤柱掘采与矸石材料充填一体化关键技术研究

项目名称：面间煤柱掘采与矸石材料充填一体化关键技术研究

项目编号：2023-LL-QY－02

2.负责人简介

赵兵朝，男，1978 年生，工学博士，教授，博士生导师，全国煤炭教学名师、陕西省教学名师，全国煤炭教育先进个人、中国煤炭学会煤矿开采损害技术鉴定委员会委员、煤炭工业技术委员会井工开采与设计专家委员会委员、中国岩石力学学会采矿岩石力学分会常务理事、中国高等教育学会碳中和与清洁能源教育专业委员会委员、陕西省应急管理厅煤矿专业组专家、山西省煤炭学会千人智库高级专家。现任西安科技大学能源学院党委副书记、院长，采矿工程国家级实验教学示范中心主任。主要从事采动损害与环境保护的教学与科研工作，先后主持国家自然科学基金面上项目 2 项、陕西省科技厅企业联合重点专项 1 项、主持企业委托横向科研项目 30 余项；获省部级科学技术特等奖 1 项、一等奖 2 项、二等奖 4 项，出版专著 1 部，发表学术论文 50 余篇，获批发明专利 6 项、实用新型 5 项、软件著作权 4 项；国家级一流本科课程负责人，主持陕西省教育教学改革项目 2 项、虚拟仿真项目 1 项、课程思政示范课程 1 门；主编煤炭高等教育“十二五”“十三五”规划教材 2 部；获陕西省教学成果特等奖 1 项、一等奖 1 项、二等奖 2 项，获第四届全国高校教师教学创新大赛二等奖 1 项，陕西本科高校教师教学创新大赛一等奖 1 项。

（二）实验项目基本信息

1.实验项目名称

实验项目名称：重大科研成果转化本科生实验项目教学案例-面间煤柱掘充一体化模拟实验

2.参与项目的学生姓名、学号、所在学院、专业、角色等信息

重大科研成果转化本科生实验项目教学案例-面间煤柱掘充一体化模拟实验项目参与学生的相关信息见表 1-1。

表 1-1 参与学生信息表

序号	姓名	学号	所在学院	专业	角色
1	郭宇丰	20403020232	能源学院	采矿工程	实验方案实施
2	袁文硕	20403020218	能源学院	采矿工程	实验方案实施
3	任晋	20403020216	能源学院	采矿工程	实验方案实施
4	陈浩楠	22203077026	能源学院	矿业工程	实验方案实施
5	杨忠浩	22203226067	能源学院	资源与环境	实验方案实施
6	温婕	22203226095	能源学院	资源与环境	实验方案实施
7	王瑞峰	22203226105	能源学院	资源与环境	实验方案实施

3.参与教师的姓名、所在学院、职称、角色等信息

重大科研成果转化本科生实验项目教学案例-面间煤柱掘充一体化模拟实验项目参与教师的相关信息见表 1-2。

表 1-2 参与教师信息表

序号	姓名	所在学院	职称	角色
1	赵兵朝	能源学院	教授	负责人
2	唐仁龙	能源学院	工程师	实验方案制定及实施
3	王伟	能源学院	讲师	方案实施

二、科研转化本科生实验项目

（一）实验项目概述

1.实验项目的内容、目标、方法

（1）超大断面巷道围岩应力数值模拟实验

① 实验内容

a）巷道宽度对超大断面矩形巷道的影响

为研究超大断面巷道宽度对围岩变形破坏的影响，设计不同巷道宽度模型，分析在给定巷道高度、侧压系数、巷道埋深条件下，巷道开挖以后的围岩应力分布、塑性区分布及围岩变形破坏规律。

b）巷道高度对超大断面矩形巷道的影响

为研究超大断面巷道高度对围岩变形破坏的影响，设计不同巷道高度，分析在给定巷道宽度、侧压系数、巷道埋深条件下，巷道开挖以后的围岩应力分布、塑性区分布及围岩变形破坏规律。

c）侧压系数对超大断面矩形巷道的影响

为研究超大断面巷道侧压系数对围岩变形破坏的影响，设计不同巷道侧压系数模型，分析在给定巷道宽度、巷道高度、巷道埋深条件下，巷道开挖以后的围岩应力分布、塑性区分布及围岩变形破坏规律。

② 实验目标

通过 FLAC3D 数值模拟软件，建立巷道模型，分析不同条件下超大断面矩形巷道围岩应力分布规律、变形及塑性区分布规律。对超大断面矩形巷道在掘进时所受破坏的特征进行分析，对超大断面巷道进行一个定义，为针对超大断面巷道采取相应措施控制巷道围岩有害变形提供基础。

③ 实验方法

a）模型的建立

建立如图 2-1 所示的数值模拟三维模型，通过 FLAC3D 数值计算软件研究无支护状态下超大断面矩形巷道掘进的围岩应力分布规律及围岩变形破坏特征。考虑计算精度的要求，对面间煤柱掘进区附近围岩进行网格加密。

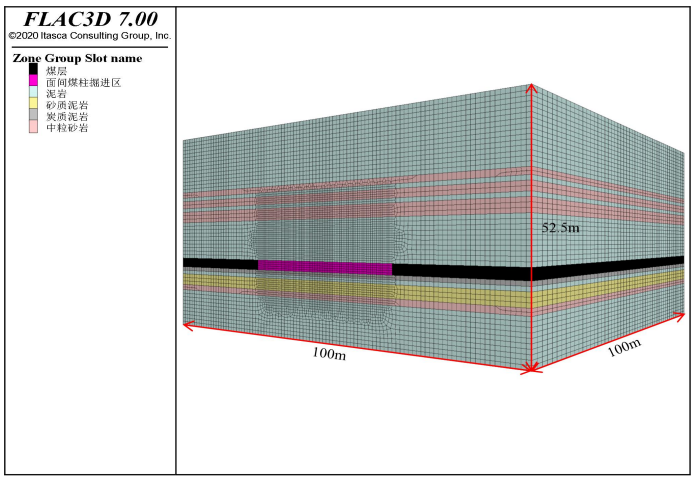


图 2-1 数值模拟三维模型

b）模型的开挖与监测

考虑巷道宽高比、构造引起的侧压以及巷道埋深对超大断面矩形巷道稳定的影响等，设置多种数值计算方案：在巷道顶底板每隔 0.5m 布置一个测点，沿水平方向各布置一条测线，监测巷道顶底板变形量；在巷道两帮每隔 0.5m 布置一个测点，沿垂直方向各布置一条测线，监测巷道两帮变形量；在巷道左帮，每隔 0.5m 布置一个测点，共布置 21 个测点，布置 10m 的测线，监测巷道帮部垂直应力值。

（2）超大断面巷道围岩应力相似模拟实验

① 实验内容

a）巷道掘进过程中覆岩变形破坏特征

b）巷道加压过程中覆岩变形破坏特征

② 实验目标

以某煤矿实际工程地质为研究背景，采用双向可加压实验架，通过相似模拟试验搭建超大断面巷道模型，借助应变片、红外摄像仪、超声波传感器等手段，对超大断面巷道开挖及加压过程中围岩应力场及声-热现象进行监测，分析超大断面巷道开挖变形破坏规律及应力变化规律，进一步探究了超大断面巷道失稳因素。

③ 实验方法

a）首先根据煤矿工程地质条件及相似模拟配比得到所需相似模拟材料强度，其次按该配比进行相似模拟试验。

b）为了对模型的破坏失稳过程进行精细化表征，采取分阶段渐进加载的方式对模型进行分析。实验过程主要分为三个阶段，分别为地应力施加阶段、巷道开挖阶段和压力渐进加载阶段。在首次加载过程中，巷道已经出现垮落破坏，后续加载的目的是为揭示当巷道周边围岩体已破碎情形下并再次承受扰动载荷时围岩的失效特征。传感器布置方案见图 2-2 所示。

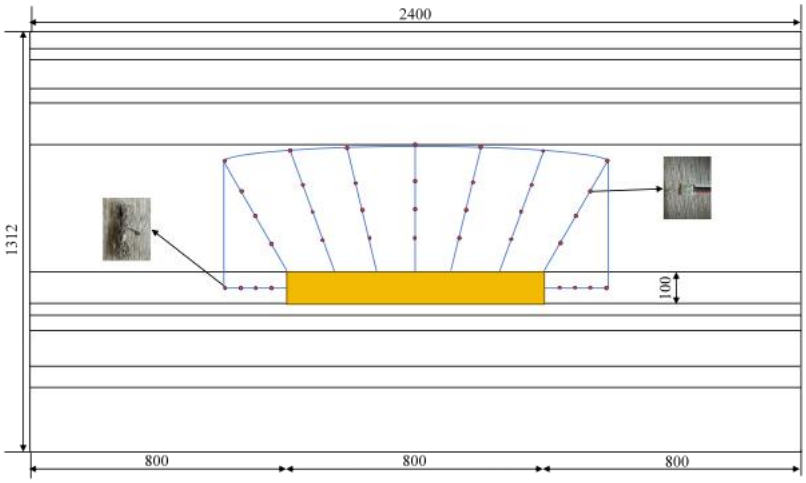


图 2-2 传感器布置方案图

（3）胶结充填材料凝结时间调控实验

① 实验内容

充填料浆从加水开始到失去流动性，即从可塑状态发展到固体状态所需要的时间称为凝结时间。凝结时间又分为初凝时间和终凝时间。初凝时间是指从料浆加水拌和时起到料浆开始失去塑性所需要的时间；终凝时间是指从料浆加水拌合时起到充填料浆完全失去可塑性，并开始具有强度的时间。具体实验内容有：

a）通过标准稠度净浆法测定胶结充填料浆的初凝和终凝时间。

b）根据矿山充填系统中长距离管道输送要求，利用不同性能的外加剂对胶结充填料浆凝结时间进行改善，观察不同掺量外加剂作用下充填料浆凝结时间的变化。

② 实验目标

a）确定胶结充填材料从加水搅拌到开始凝结和达到规定固结状态所需的时间。

b）为控制矿山充填进度、保证长距离管道输送充填工作顺利完成，避免发生堵管爆管事故提供基础数据支持。

通过添加外加剂调控胶结充填材料凝结时间，确保胶结充填材料在长距离管道输送静置状态

或停泵状态下不发生凝结，具有合适的凝结硬化速度，从而保障充填工作质量和安全。

③ 实验方法

测试前准备工作：称取实验所需的充填材料和水搅拌至均匀状态，将搅拌好的充填料浆注入试模，试模提前用湿布擦拭，充填料浆注入试模并用抹刀压实抹平，放入恒温恒湿养护箱内进行养护；维卡仪在进行初凝时间测试前，安装初凝试针并拧紧，将擦拭好的玻璃板放置到维卡仪的正下方，调整维卡仪的卡针，当初凝试针接触玻璃板时，卡针指向零点。测定终凝时间时，先将初凝试针卸下，更换为终凝试针，再进行终凝时间的测定。

a）初凝时间测定：试样在标准养护箱养护 30 分钟后，取出试模并放到维卡仪上进行第一次测试，试模正对试针的下方，擦拭初凝试针，释放滑动杆开关，缓慢降低试针与充填料浆表面接触，拧紧螺丝 2s 后，突然放松螺丝，试针自由下落，沉入充填料浆浆体，30s 后观察试针下沉后的读数，临近初凝时每 5min 测试一次，连续两次测试结果的卡针都指向到 4±1mm 位置时，这时说明充填料浆达到初凝状态，以“min”为单位记录表示。

b）终凝时间测试：完成初凝时间测定后，将试模平移从玻璃板上取下并翻转 180°，放置到提前擦拭好的新玻璃板上，将试模重新放置于标准养护箱内进行养护。在将要到达终凝时，每隔 15 分钟将充填料浆试样从养护箱中取出进行测定，初凝试针更换为终凝试针，调整终凝试针与充填料浆表面接触，当终凝试针沉入充填料浆试样的深度为 0-0.5mm 时，说明充填料浆试样达到终凝状态，也以“min”为单位记录。

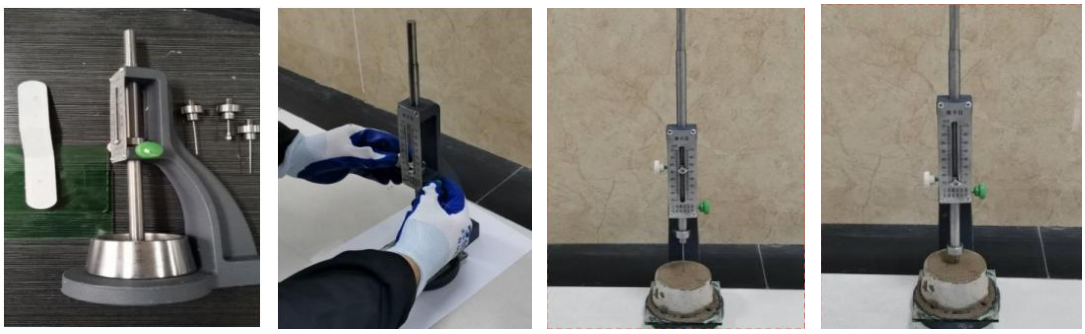


图 2-3 凝结时间测试装置及过程

（4）脱硝粉煤灰氨含量对胶结充填料浆流变性能的影响实验

① 实验内容

a）胶结充填料浆流变参数实验

b）坍落度试验

② 实验目标

加入 NH_4HSO_4 模拟不同含氨量粉煤灰，通过充填料浆流变参数测试和坍落度试验，探讨含氨量对粉煤灰基充填材料流动性能的影响规律和机理。

③ 实验方法

a）充填料浆流变参数测试：充填料浆流变参数（屈服应力、黏度）是评价其流动特性的重要指标。采用 HAAKE Viscotester i Q air 型流变仪，和型号为 FL262B/SS-01170682 的转子来测量充填料浆的流变特性。叶片的几何直径和高度分别为 28mm 和 42mm。为了避免测试过程中的边壁效应，测试容器以及叶片插入的深度应满足要求。采用了两种测试程序来确定屈服应力/粘度和触变性能。有兴趣的读者可参考详细的测试程序，为了简单起见，这里没有涵盖这些内容。

b）坍落度试验：是衡量充填料浆输送性能的重要指标，其反映了浆料的黏聚力和摩擦阻力。在实际应用中，充填料浆坍落度值大于 160 毫米（微型坍落度值=71 毫米）被认为具有良好的输送性能。由于实验室中有限的材料，常采用微型坍落度桶进行充填膏体的测试。坍落度桶顶部直径为 50 毫米，底部直径为 100mm，高度 150mm。微型坍落度测试是按中国国家标准化委员会 GB/T50080 标准执行。所有 mini-slump 测试重复三次，取平均值用于进一步分析。

2. 阐述如何利用科研团队或成果来支持实验项目

（1）超大断面巷道围岩应力数值模拟研究成果对实验项目的支持

① 探讨了巷道宽度对超大断面矩形巷道的影响，为实验项目的开展提供了思路和基础。

为研究超大断面巷道宽度对围岩变形破坏的影响，共设计了巷道宽度 b 为 5m、10m、15m、20m、25m、30m 共 6 组模型，分析在巷道高度 h 为 2.5m，侧压系数λ为 1，巷道埋深 H 为 200m 时，巷道开挖以后的围岩应力分布、塑性区分布及围岩变形破坏规律。数值模拟结果如下：

a）巷道宽度对超大断面矩形巷道围岩应力的影响

巷道开挖以后，不同巷道宽度条件下，帮部垂直应力分布如下图 2-4 所示，巷道围岩垂直应力场云图如下图 2-5 所示。

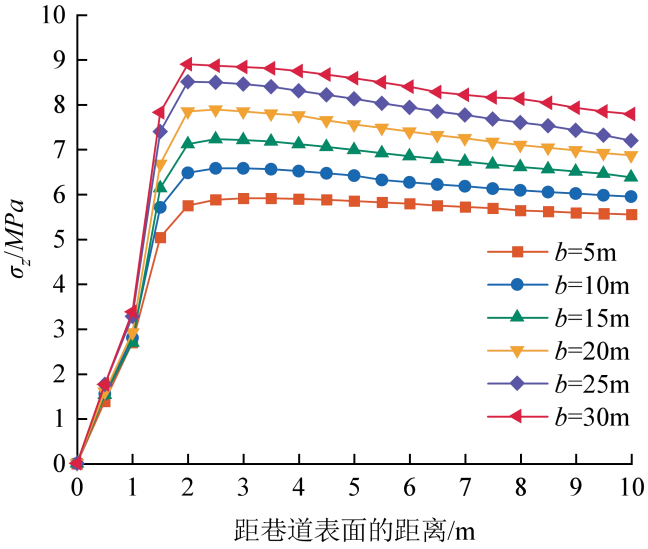
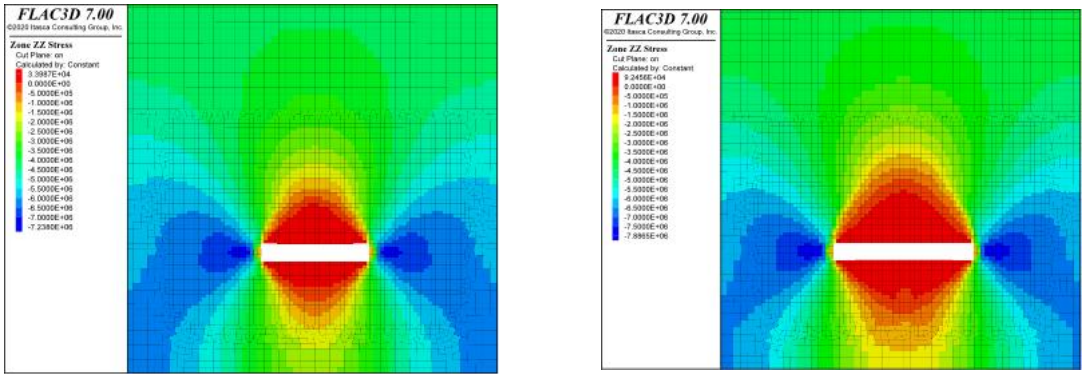


图 2-4 不同巷道宽度超大断面矩形巷道帮部围岩应力变化图



(c) b=15m　　(d) b=20m

图 2-5 不同巷道宽度超大断面矩形巷道围岩应力云图

b）巷道宽度对超大断面矩形巷道围岩变形的影响

巷道开挖以后，不同巷道宽度条件下的顶板下沉量、两帮移进量及底鼓量如下图 2-6、2-7 和图 2-8 所示。

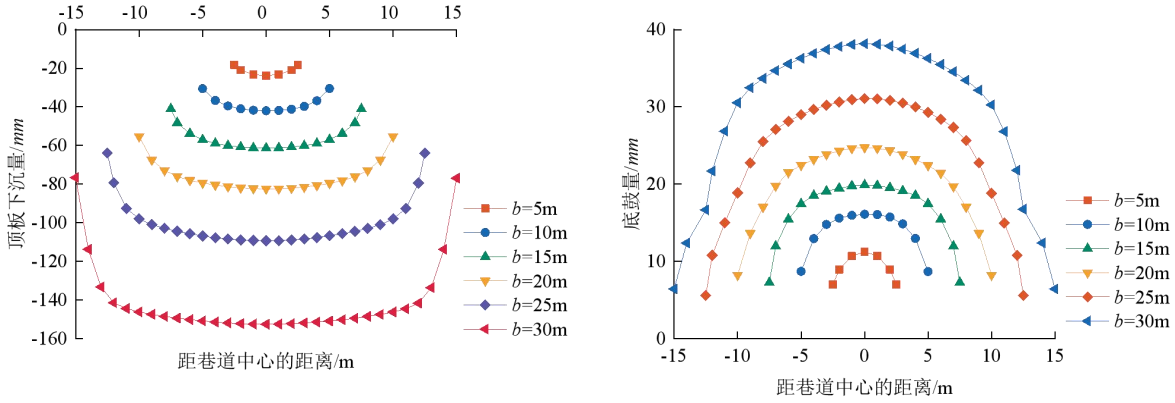


图 2-6 不同巷道宽度超大断面矩形巷道顶底板变形量

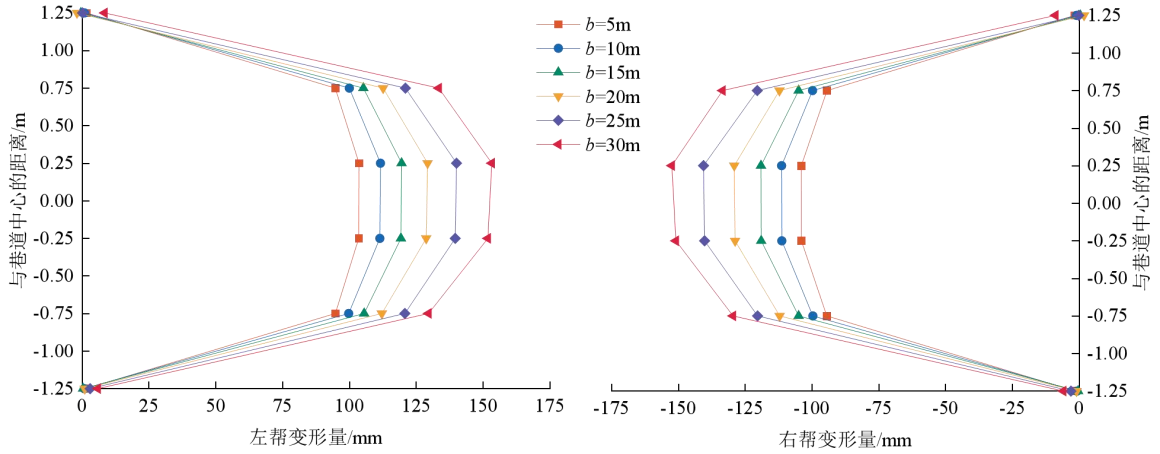
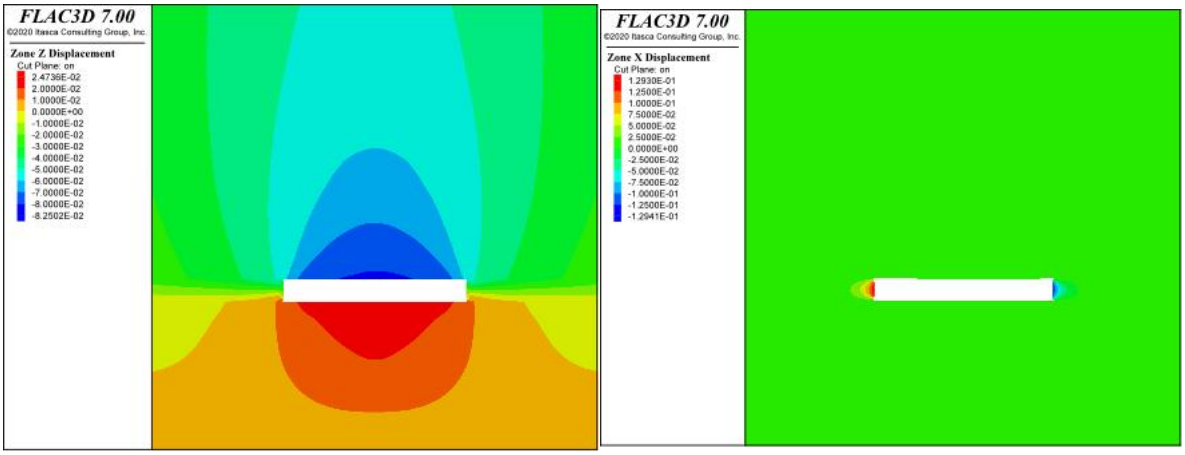


图 2-7 不同巷道宽度超大断面矩形巷道两帮变形量

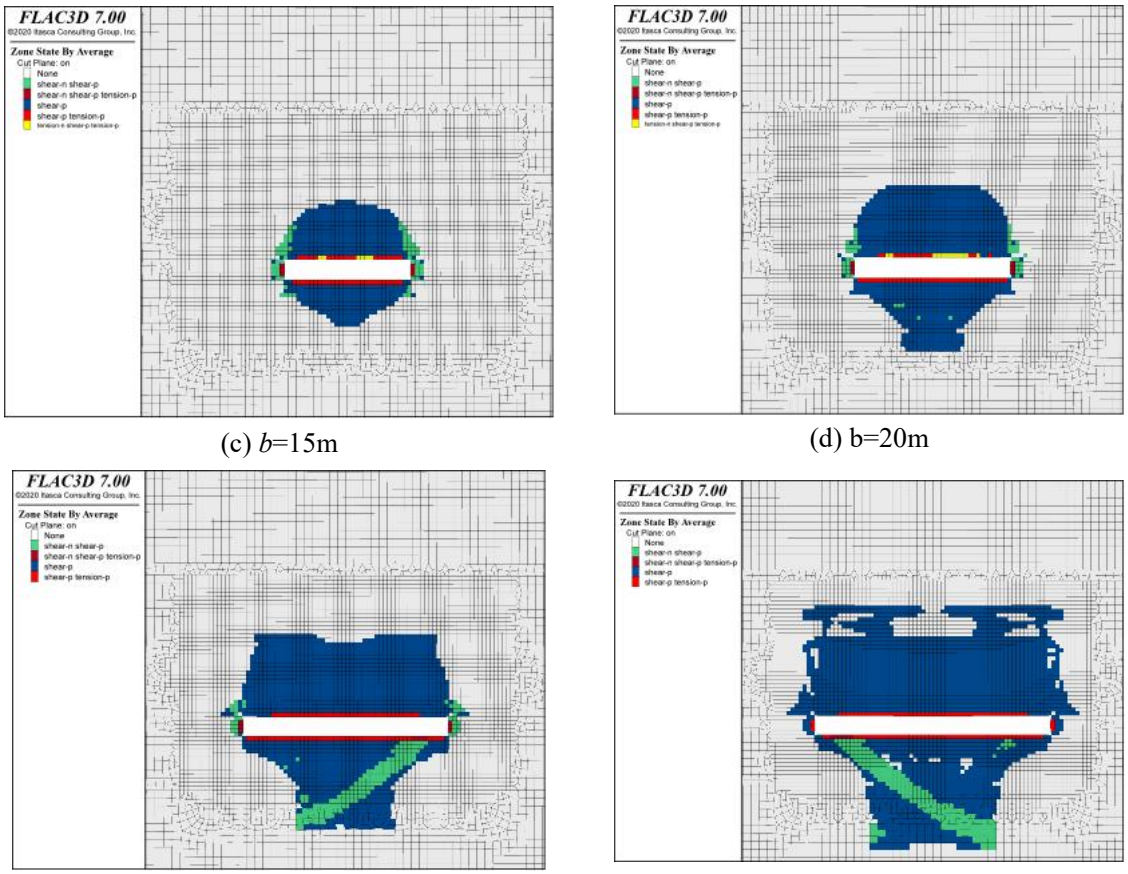


(g) b=20m 时顶底板变形　　(h) b=20m 时两帮变形

图 2-8 不同巷道宽度超大断面矩形巷道变形云图

c）巷道宽度对超大断面矩形巷道围岩塑性区的影响

巷道开挖以后，不同巷道宽度条件下的围岩塑性区如下图 2-9 所示。



(c) *b*=15m　　(d) b=20m

(e) *b*=25m　　(f) *b*=30m

图 2-10 不同巷道宽度超大断面矩形巷道围岩塑性区分布图

② 探讨了巷道高度对超大断面矩形巷道的影响，为实验项目的开展提供了思路和基础。

为研究超大断面巷道高度对围岩变形破坏的影响，共设计了巷道高度 h 为 2.5m、3.5m、4.5m、5.5m 共 4 组模型，分析在巷道宽度 b 为 20m，侧压系数λ为 1，巷道埋深 H 为 200m 时，巷道开挖以后的围岩应力分布、塑性区分布及围岩变形破坏规律。数值模拟结果如下：

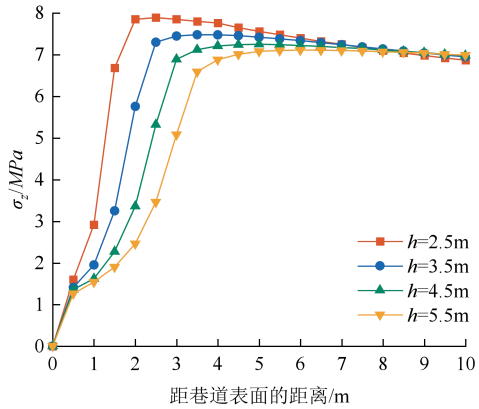
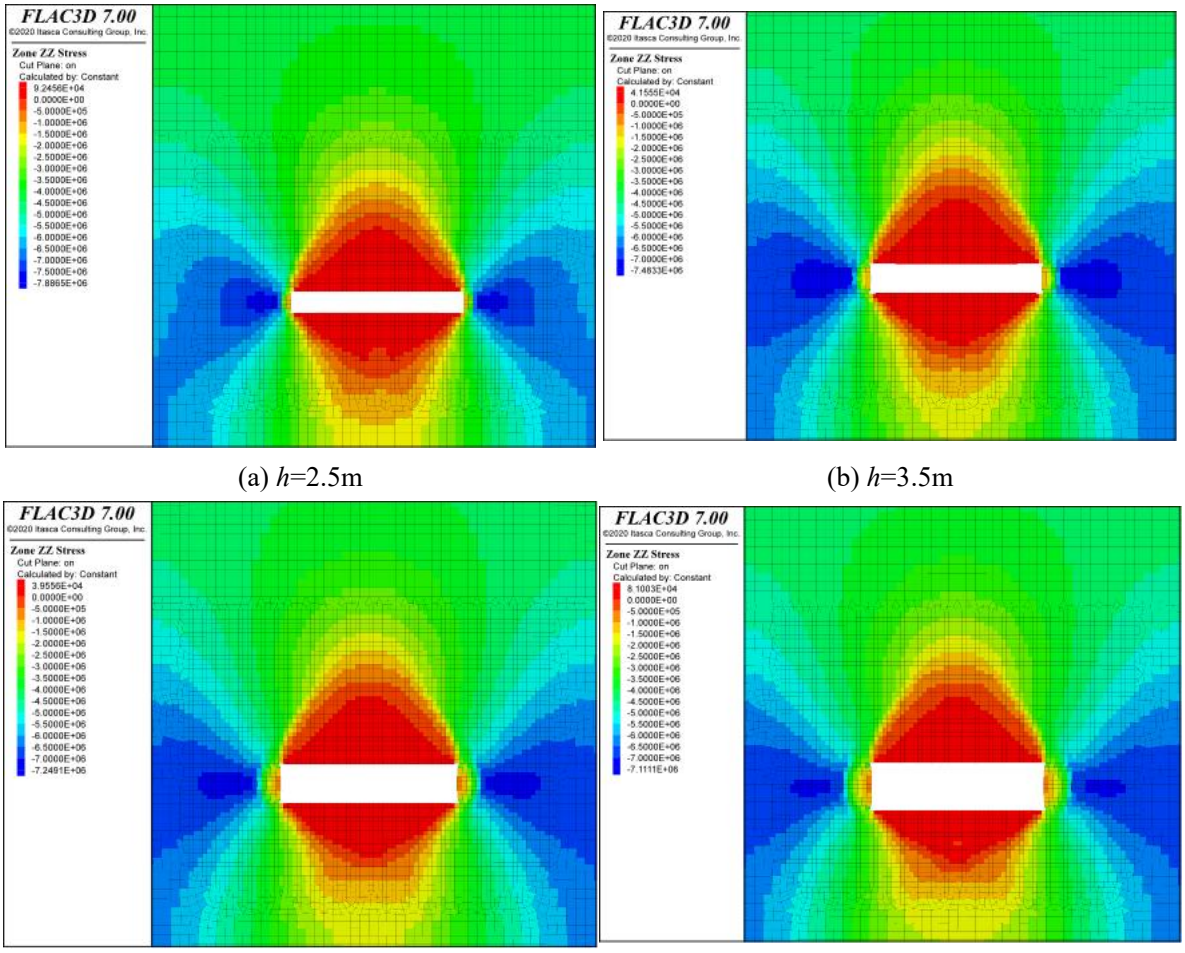


图 2-11 不同巷道高度超大断面矩形巷道围岩应力变化图

a）巷道高度对超大断面矩形巷道围岩应力的影响

巷道开挖以后，不同巷道高度条件下，帮部垂直应力分布如下图 2-11 所示，巷道围岩垂直应力场云图如下图 2-12 所示。



(a) h=2.5m　　(b) h=3.5m

(c) h=4.5m　　(d) h=5.5m

图 2-12 不同巷道高度超大断面矩形巷道围岩应力云图

b）巷道高度对超大断面矩形巷道围岩变形的影响

巷道开挖以后，不同巷道高度条件下的顶板下沉量、两帮移进量及底鼓量如下图 2-13、2-14 和图 2-15 所示。

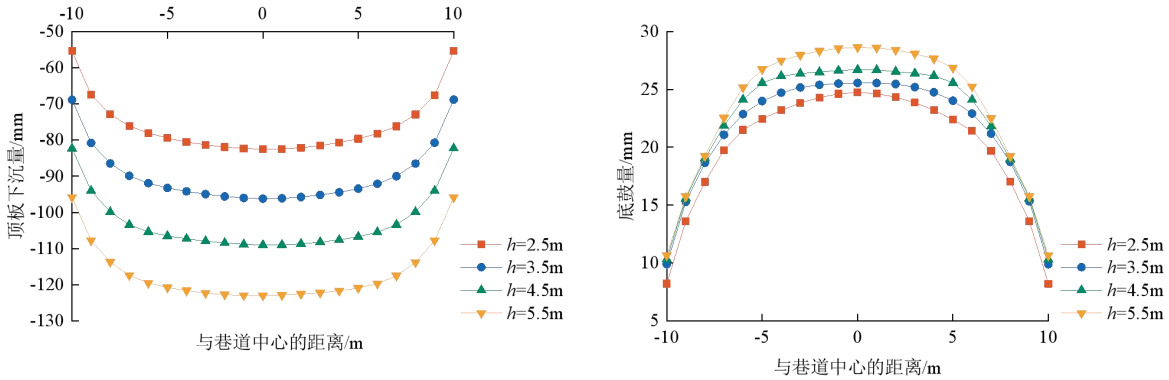


图 2-13 不同巷道高度超大断面矩形巷道顶底板变形量

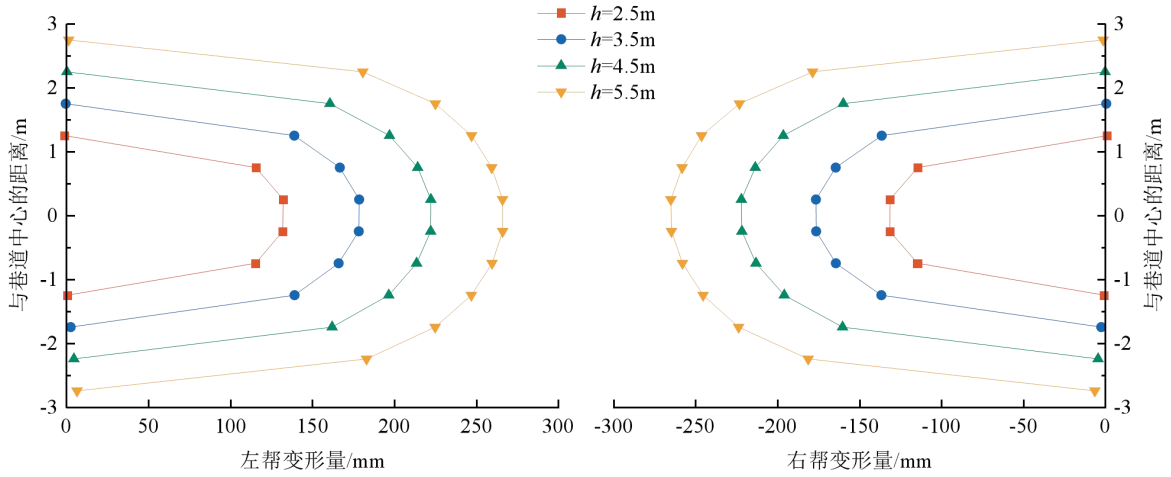
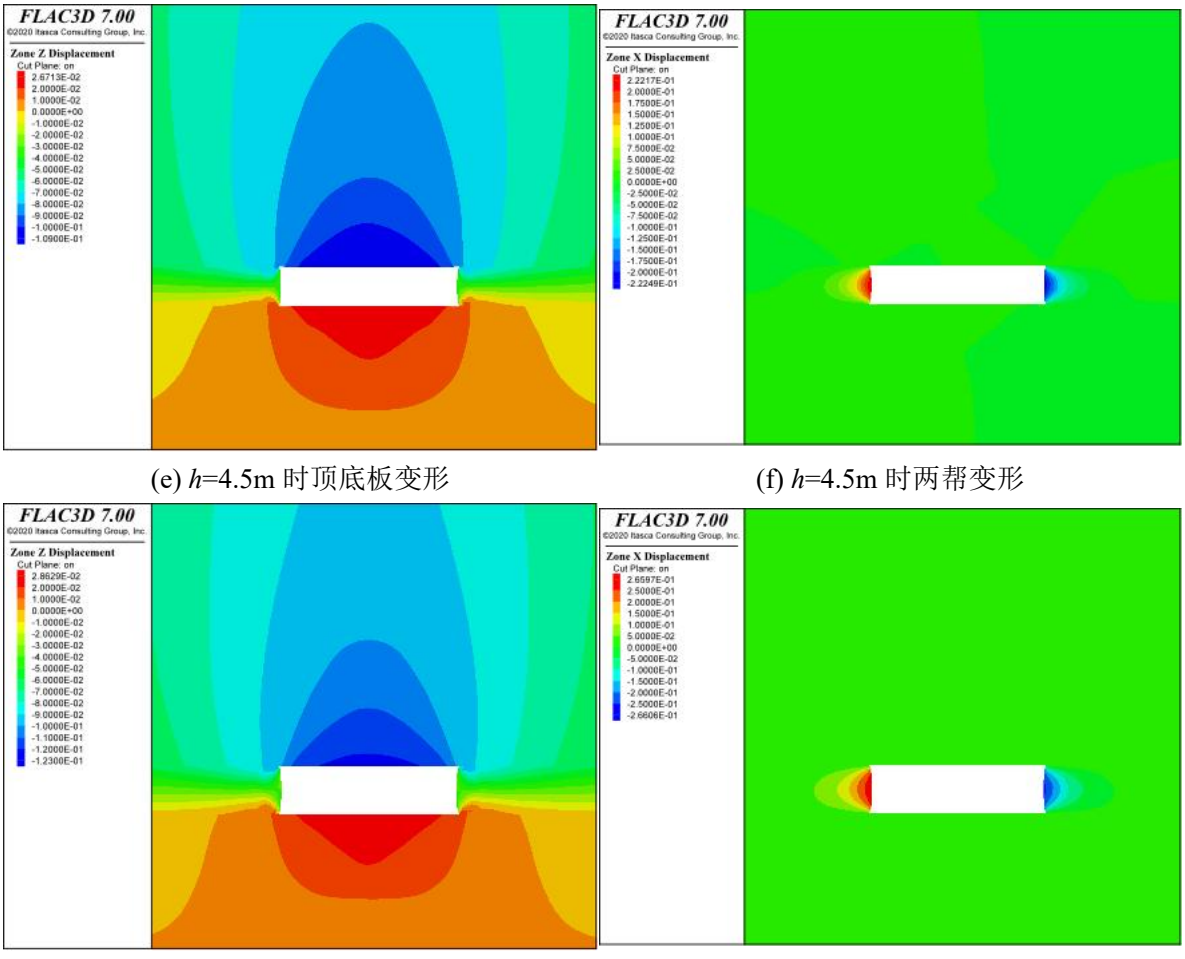


图 2-14 不同巷道高度超大断面矩形巷道两帮变形量



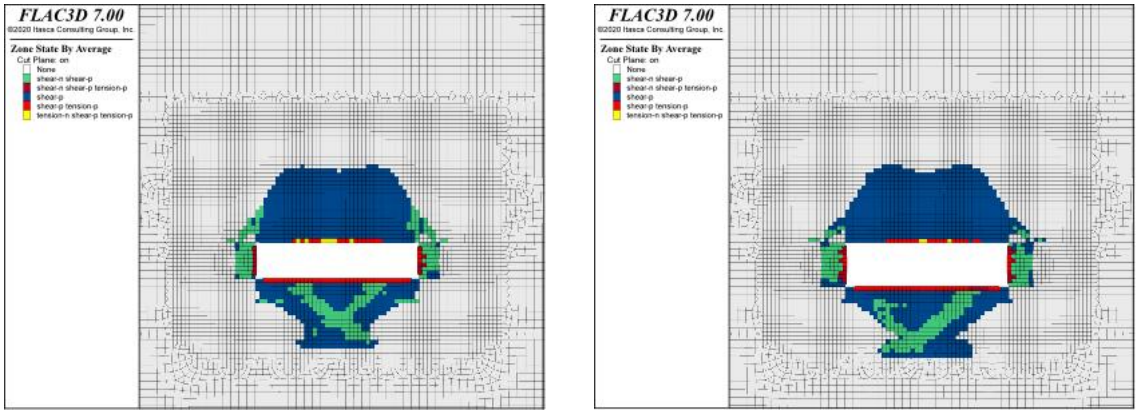
(e) h=4.5m 时顶底板变形　　(f) h=4.5m 时两帮变形

(g) h=5.5m 时顶底板变形　　(h) h=5.5m 时两帮变形

图 2-15 不同巷道高度超大断面矩形巷道变形云图

c） 巷道高度对超大断面矩形巷道围岩塑性区的影响

巷道开挖以后，不同巷道高度条件下的围岩塑性区如下图 2-16 所示。



(c) h=4.5m　　(d) h=5.5m

图 2-16 不同巷道高度超大断面矩形巷道围岩塑性区分布图

③ 探讨了侧压系数对超大断面矩形巷道的影响，为实验项目的开展提供了思路和基础。

为研究超大断面巷道侧压系数对围岩变形破坏的影响，共设计了巷道侧压系数λ为 0.5、1、1.5、2 共 4 组模型，分析在巷道宽度 b 为 20m，巷道高度 h 为 2.5m，巷道埋深 H 为 200m 时，巷道开挖以后的围岩应力分布、塑性区分布及围岩变形破坏规律。数值模拟结果如下：

a） 侧压系数对超大断面矩形巷道围岩应力的影响

巷道开挖以后，不同侧压系数条件下，帮部垂直应力分布如下图 2-17 所示，巷道围岩垂直应力场云图如下图 2-18 所示。

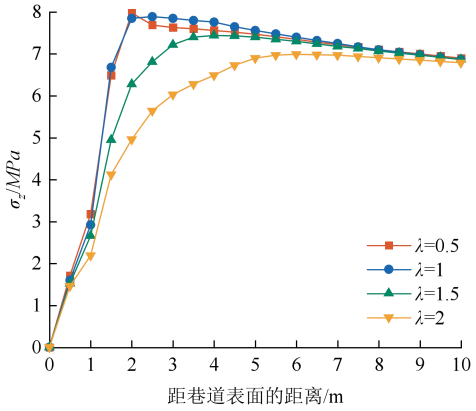
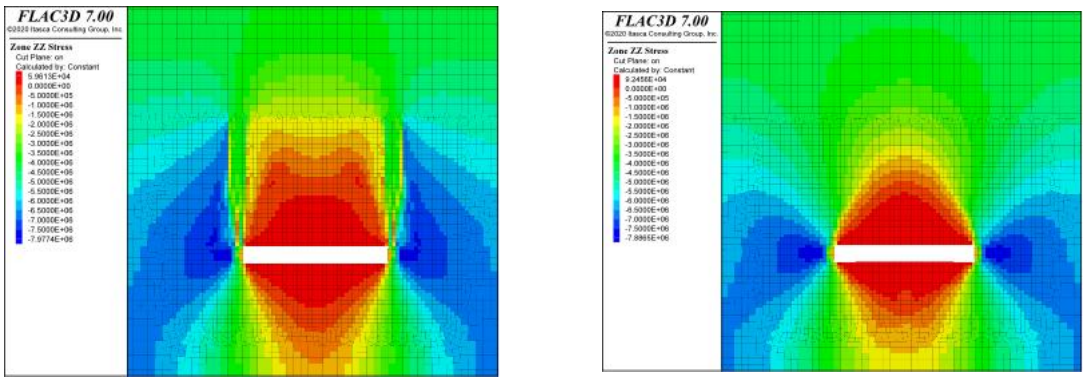


图 2-17 不同侧压系数超大断面矩形巷道围岩应力变化图



(a) λ=0.5　　(b) λ=1

图 2-18 不同侧压系数超大断面矩形巷道围岩应力云图

b） 侧压系数对超大断面矩形巷道围岩变形的影响

巷道开挖以后，不同侧压系数条件下的巷道顶板下沉量、两帮移进量及底鼓量如下图 2-19、2-20 和图 2-21 所示。

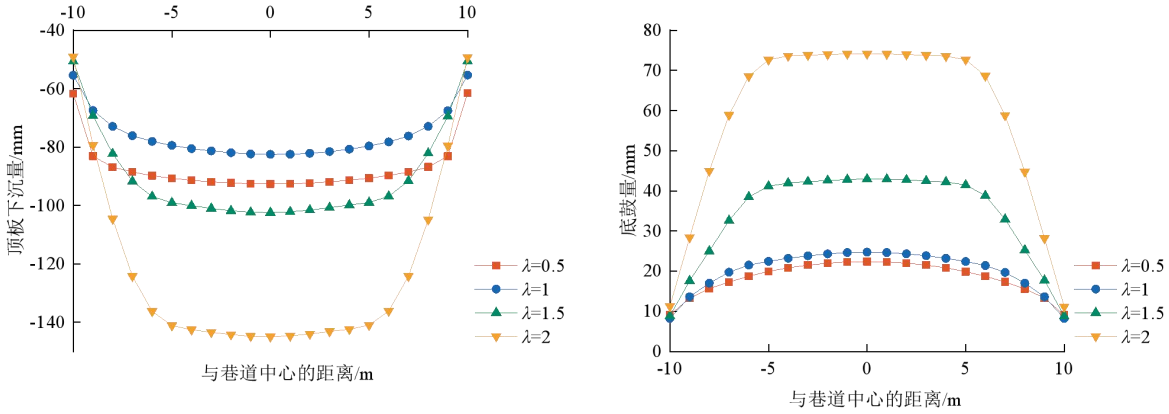


图 2-19 不同侧压系数超大断面矩形巷道顶底板变形量

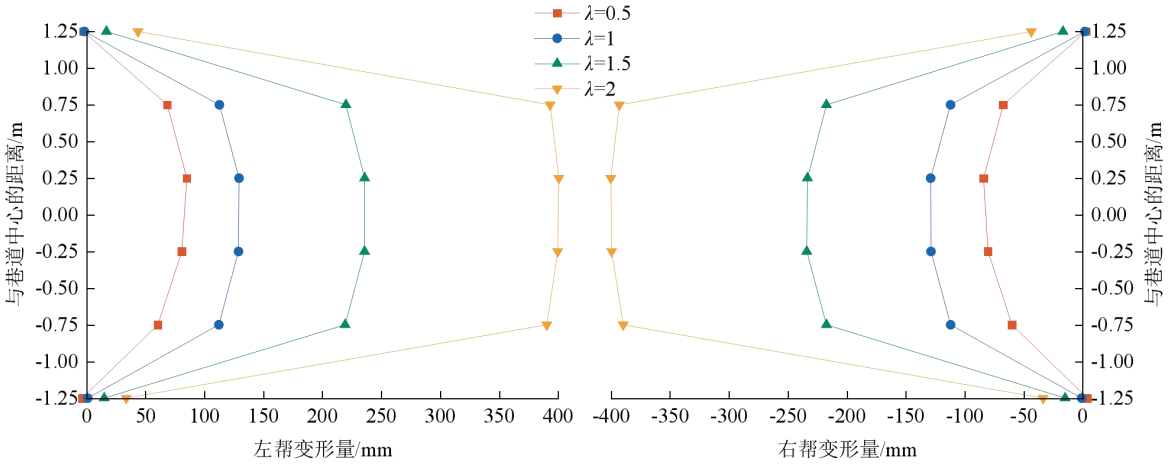
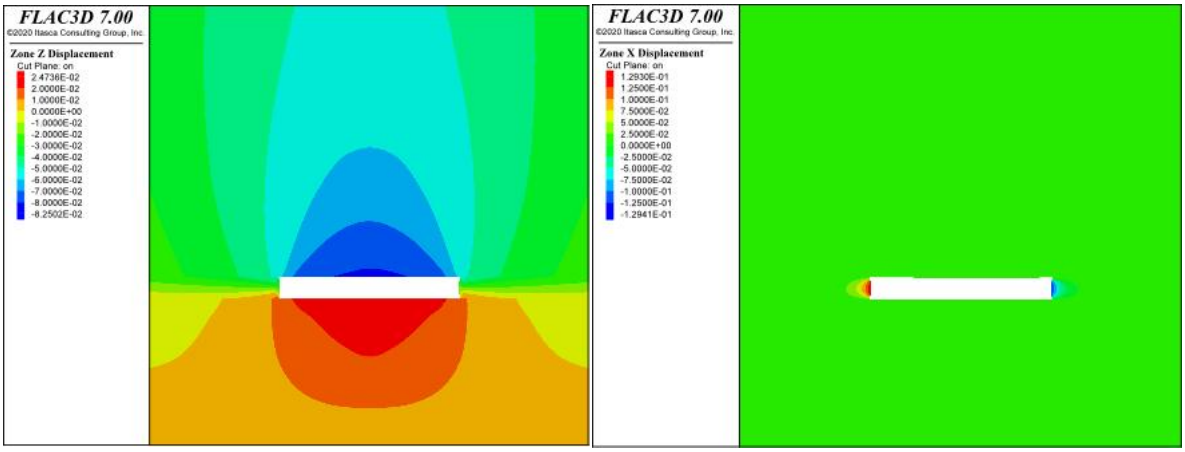


图 2-20 不同侧压系数超大断面矩形巷道两帮变形量

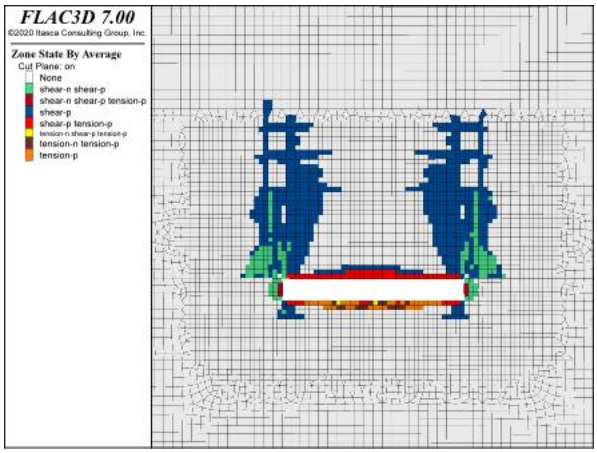


(c) λ=1 时顶底板变形　　(d) λ=1 时两帮变形

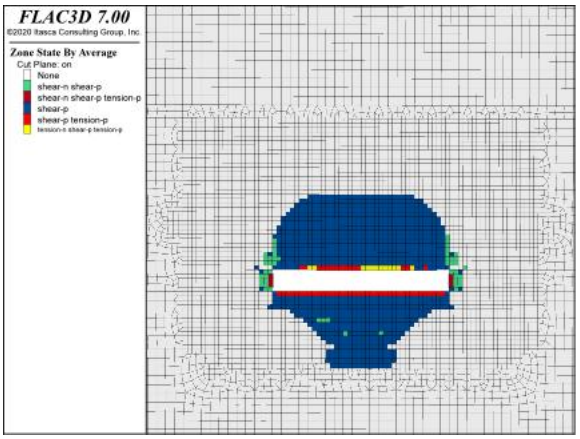
图 2-21 不同侧压系数超大断面矩形巷道变形云图

c） 侧压系数对超大断面矩形巷道围岩塑性区的影响

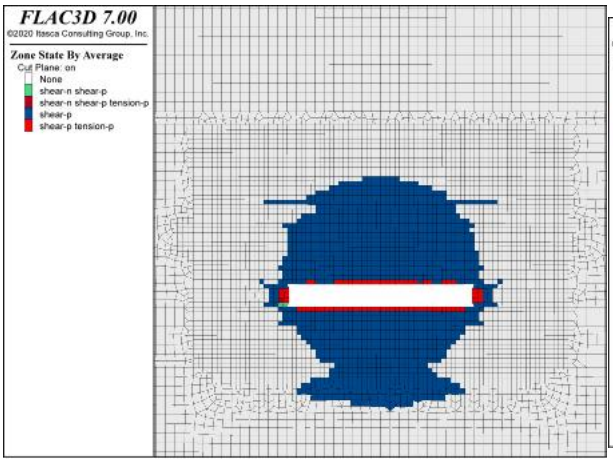
巷道开挖以后，不同侧压系数条件下的围岩塑性区如下图 2-22 所示。



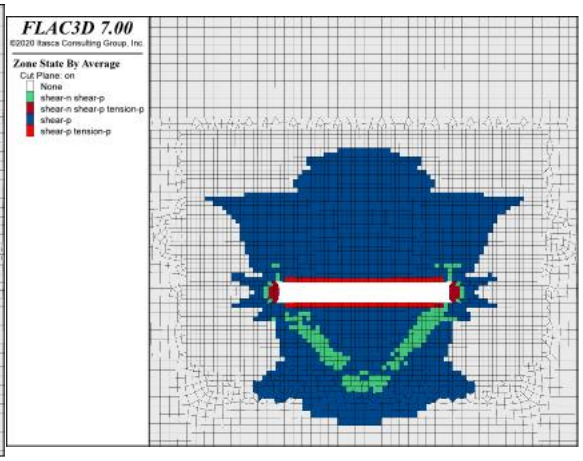
(a) λ=0.5



(b) λ=1



(c) λ=1.5



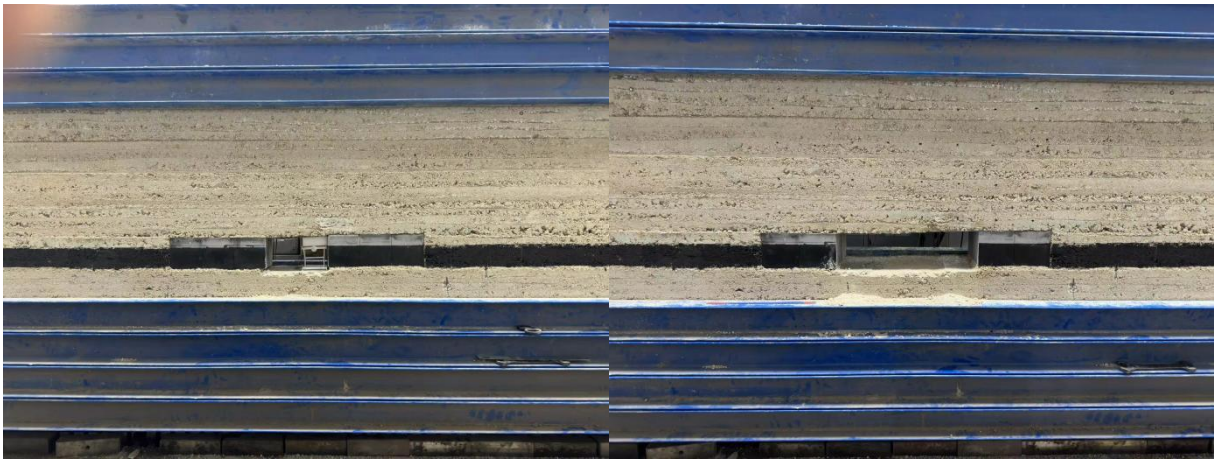
(d) λ=2

图 2-22 不同侧压系数超大断面矩形巷道围岩塑性区分布图

（2）超大断面巷道围岩应力数值模拟研究成果对实验项目的支持

① 探讨了巷道掘进过程中覆岩变形破坏特征，为实验项目的开展提供了思路和基础。

在巷道开挖 5m 后，静置 30min，测量巷道表面变形，未出现离层，巷道表面仅出现微小变形。在巷道开挖 10m 后，静置 30min，测量巷道表面变形，顶板出现 2mm 下沉，直接顶出现明显离层，但未贯通整层。在巷道开挖 15m 后，静置 30min，测量巷道表面变形，顶板出现 5mm 下沉，顶板离层加大，巷道隅角处及顶板中心裂隙开始发育。在完全开挖 20m 断面前，两帮隅角处出现明显裂隙，顶板上方 12cm（3m）处出现离层，即将垮落；在完全开挖 20m 断面瞬间，两侧裂隙贯穿离层，发生垮落，共垮落 4 层 12cm，随后在 2min 内再垮落 1 层；在完全开挖 20m 断面后，静置 30min，模型稳定，总计垮落 5 层 15cm（3.75m）。在垮落拱上方，存在两条明显离层，离层①存在裂隙，但未贯通整个顶板，离层②仅在该层中心出现，未曾贯通裂隙。



(a) 开挖 5m　　(b) 开挖 10m



(c) 开挖 15m　　(d) 开挖 20m

图 2-23 巷道开挖过程覆岩变形破坏

② 探讨了巷道加压过程中覆岩变形破坏特征，为实验项目的开展提供了思路和基础。

在顶部载荷加到 0.185MPa，侧压加到 0.198MPa 时，顶板发生再次垮落，形成“梯形”垮落拱，总计垮落层数 6 层 18cm（4.5m）。至此顶板离层①破断，离层②加大，两帮进一步变形、片帮。



(e) 加压至 0.185MPa　　(f) 加压至 0.251MPa



(g) 加压至 0.317MPa　　(h) 加压至 0.383MPa

图 2-24 巷道加压过程覆岩变形破坏

在顶部载荷加到 0.251MPa，侧压加到 0.264MPa 时，顶板离层②进一步发育、增大，且其底部中心拉破断已经贯通，但不曾贯穿整层，故仅发生离层，顶板出现新的离层③。

在顶部载荷加到 0.317MPa，侧压加到 0.330MPa 时，离层②的中部、左侧 4cm 处及右侧 5cm 处的裂隙贯通整层，发生破断，总计垮落 7 层，21cm（5.25m）。离层③进一步发育。

（3）胶结充填材料凝结时间调控实验研究成果对实验项目的支持

胶结充填材料凝结时间调控实验研究成果对实验项目开展提供了基础参数和参考。

凝结时间作为膏体充填材料性能的一个重要指标，影响充填料浆管道输送的正常运行。

长距离管道输送在小空间充填后需要充填材料保持良好的流动性，则需要延长充填材料在不超过其初凝时间的情况下在管道内静置足够长的时间以完成下次充填。

图 2-25 为添加不同 $CaCl_2$ 质量分数对矸石胶结膏体充填体凝结时间的影响。结果表明，未掺添加剂的空白组初凝时间为 526min，终凝时间为 796min，$CaCl_2$ 对胶结膏体充填材料时间的影响效果根据掺量多少大致可以分为两类，在质量分数为 0.1%-0.5%表现为缓凝效果，掺量为 0.4%的充填体初凝时间为 548min，同时终凝时间缩短了 73min。这可能是由于 $CaCl_2$ 在水溶液中溶解电离出带电离子，在水泥水化初期 $Ca(OH)_2$ 电离表面带正电吸附氯离子，影响 C-S-H 成核，进而延缓水泥硬化[30,31]。当 $CaCl_2$ 掺量超过 0.5%时，起到了较为明显的速凝效果，加入 4%$CaCl_2$ 的试件初凝时间为 390min，比空白组缩短了 25.9%，终凝时间为 636min，缩短了 20.1%。这是由于随着氯离子浓度的升高，促进 C_3A 水化生成钙矾石(AFt），这一过程在 4.1 中详细解释，$Ca(OH)_2$ 浓度降低，缩短膏体的凝结时间。

分析发现低掺量膏体下充填材料初凝时间延长，但初、终凝时间差异明显缩短，且随掺量的增多呈先减少后增加的趋势。0%膏体材料的初、终凝时间差为 270min，0.1%-0.5%表现出初凝时间延长而终凝时间缩短的现象，且初终凝时间差明显小于空白组，说明加入 $CaCl_2$ 抑制了水泥初期水化、促进早期水化，可以满足长距离管输对充填材料凝结时间的要求。

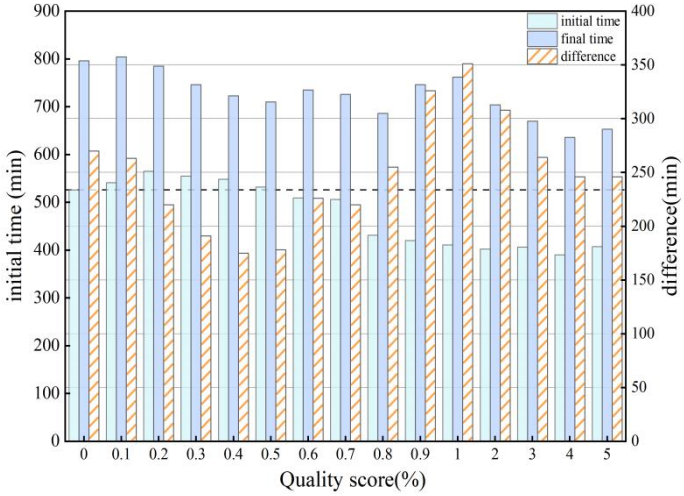


图 2-25 不同 $CaCl_2$ 掺量对 CPB 凝结时间的影响

（4）脱硝粉煤灰氨含量对胶结充填料浆流变性能的影响实验

① 探讨了粉煤灰氨含量对充填料浆屈服应力和粘度的影响，为实验项目的开展提供了思路和基础。

图 2-26 为不同氨含量粉煤灰充填料浆的流变曲线，采用 HeB 模型对含铵盐 FA-based CPB 充填料浆流变曲线进行了拟合，A1-A5 中最小 R^2 值为 0.9912，表明 HeB 模型可以用于说明含铵盐 FA-based CPB 的流变特性。A1-A5 的流变指数 n 均小于 1，最大 n 值为 0.9236，含铵盐粉煤灰充填膏体具有剪切减薄特性。随着剪切速率增加，充填料浆的剪切应力也随之增加。

屈服应力是浆体流动所需的最小剪应力，如图 2-26 所示，随着氨含量的增加，充填料浆的屈服应力也随之增大。当含氨量小于 1139ppm 时，屈服应力增加幅度较小；含氨量为 1139-2139ppm 时，屈服应力从 18.15Pa 增加至 41.49Pa，屈服应力增加幅度较大，说明当氨含量大于 1139ppm 时，屈服应力对含氨量更敏感。稠度因子 K 也表现出与屈服应力相同的规律。随着粉煤灰含氨量增加，充填料浆剪应力 τ 也会随之增加。

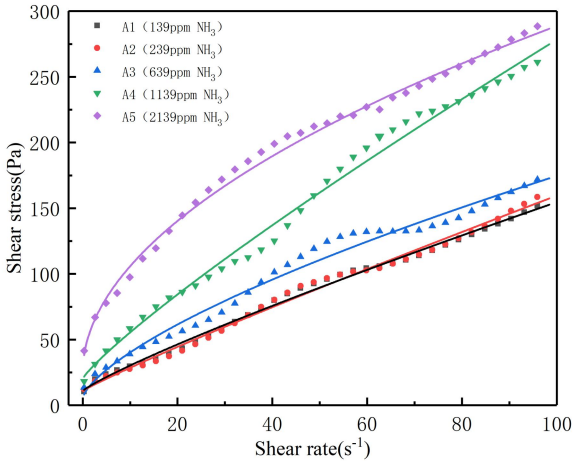


图 2-26 不同氨含量粉煤灰充填料浆的流变曲线

图 2-27 显示了表观黏度随着剪切速率的变化。结果表明随着粉煤灰含氨量的增加，表观黏度也随之增大；随着剪切速率增大，各浆体的表观粘度都随之减小。A1-A5 都没有出现明显的临界剪切速率点，各浆体都表现出剪切变薄现象。根据序-无序转变理论，浆体的剪切变薄特性可由固体颗粒间的作用力决定(Hoffman, 1998)。在 FA-based CPB 浆体剪切过程中，凝胶材料水化产生的水化产物所形成的网络结构被破坏，固体颗粒在剪切方向上重新排列。

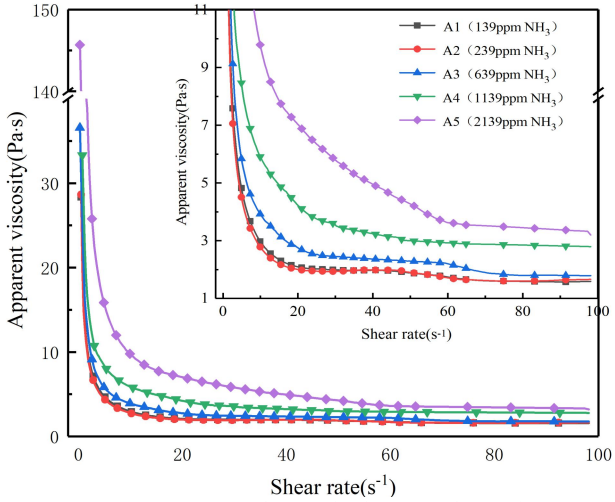


图 2-27 表观黏度随着剪切速率的变化

② 探讨了粉煤灰氨含量对充填料浆坍落度的影响，为实验项目的开展提供了思路和基础。

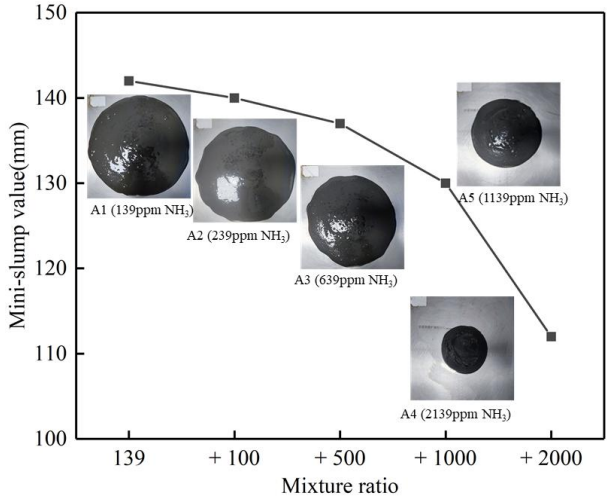


图 2-28 充填料浆微坍落度值

人们普遍认为，坍落度值与屈服应力呈负相关。大量文献表明，根据美国材料试验协会（American Society of Testing Materials，ASTM）测试标准下的标准坍落度为 23.5-27.5cm 或屈服应力小于 200Pa 时适用于管道输送。

图 2-28 为含铵盐粉煤灰充填料浆微坍落度值。结果表明，粉煤灰氨含量为 139ppm、239ppm、639ppm、1139ppm、2139ppm 时，充填料浆微坍落度值分别为 142mm，140mm，137mm，130mm，112mm。随着氨含量的增加，微坍落度值随之降低。当氨含量大于 639ppm 时，微坍落度值的降

低幅度更为显著。粉煤灰氨含量的增加对充填料浆流动性能有不利的影响，但 A1-A5 各组的微坍落度值和屈服应力均能满足管道输送的要求。

（二）实验项目效果简介

1.实验项目所产生的教学成效

重大科研成果转化本科生实验项目教学案例-面间煤柱掘充一体化模拟实验项目所产生的教学成效显著，主要体现在以下几个方面：

（1）提升了学生的实践能力

通过面间煤柱掘充一体化模拟实验项目的开展，学生能够亲自参与实验过程，从实验设计、试剂配制、器材准备、仪器调试到实验结果的记录与分析，全程参与并体验科研的严谨性和复杂性。这不仅加深了学生对理论知识的理解，还显著提高了他们的动手能力、实验技能和问题解决能力。

（2）增强创新意识

面间煤柱掘充一体化模拟实验项目涉及前沿技术和创新方法，将其转化为实验项目能够激发学生的好奇心和探索欲。在实验过程中，学生需要查阅大量文献、设计实验方案、分析实验结果，这些过程都有助于培养他们的创新思维和独立思考能力。一些优秀的本科生甚至能够在实验项目中提出新的见解或改进方法，为科研工作注入新的活力。

（3）优化教学资源

面间煤柱掘充一体化模拟实验项目的开展，不仅丰富了教学内容，还优化了教学资源。实验项目中的先进设备、实验材料和实验方法都可以成为教学资源的一部分，为学生提供更好的学习条件和实践机会。同时，这也促进了教师与科研人员之间的交流与合作，共同推动教学质量的提升。

（4）培养团队协作精神

在面间煤柱掘充一体化模拟实验项目中，学生需要作为一个团队开展实验。这有助于培养他们的团队协作精神、沟通能力和责任感。在实验过程中，学生需要相互协作、共同解决问题，这不仅能够提高实验效率，还能够增进同学之间的友谊和信任。

（5）激发学习兴趣

通过面间煤柱掘充一体化模拟实验项目的开展，学生能够在实践中体验到科研的乐趣和成就感。这有助于激发他们的学习兴趣和动力，使他们更加积极地投入到学习和研究中。同时，实验项目中的成功案例和优秀学生也能够成为榜样，激励其他同学不断努力提升自己的能力。

综上所述，面间煤柱掘充一体化模拟实验项目所产生的教学成效是多方面的，包括提升学生实践能力、增强创新意识、优化教学资源、促进学科建设、培养团队协作精神以及激发学习兴趣等。这些成效不仅有助于培养学生的综合素质和创新能力，还为他们的未来发展奠定了坚实的基础。

2.师生的反馈和评价

（1）正面反馈

①实践技能提升：绝大多数学生表示，通过参与项目，他们对实验室基本操作、仪器使用有了更直观的认识和熟练的掌握。

②科研兴趣激发：项目中的科研探索和实践让学生感受到了科研的魅力，激发了他们对科研领域的兴趣和热情。

③ 团队合作经验：项目合作过程中，学生学会了如何有效沟通、分工合作，增强了团队意识和责任感。

④ 导师指导有效：大部分学生对导师的专业指导表示满意，认为导师的引导对于理解科研思路、解决实验难题至关重要。

（2）改进建议

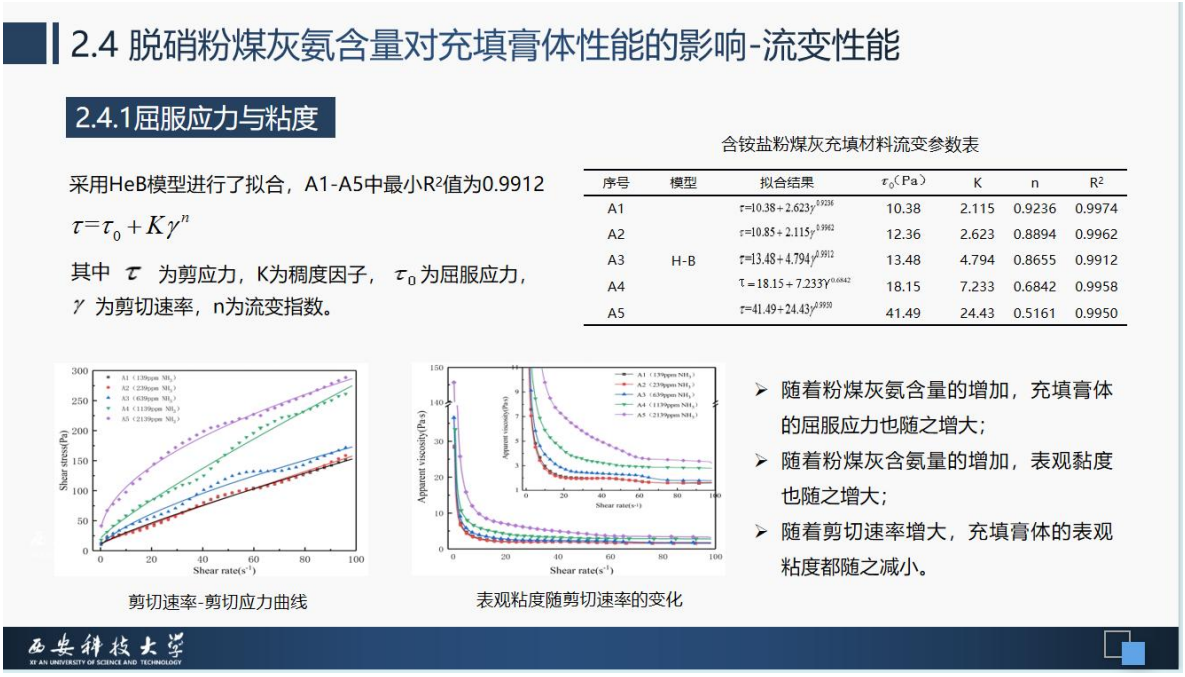
项目难度调整：部分学生反映，部分项目难度过高，初期难以入手，建议根据学生专业基础和兴趣进行适当分层，设置不同难度的实验模块。

3. 其他应用效果

面间煤柱掘充一体化模拟实验项目的开展还有助于推动学科建设。通过实验教学，学生能够更深入地了解学科的前沿动态和发展趋势，为未来的学习和研究打下坚实的基础。同时，实验项目也为其他教师提供了教学案例和实验素材，有助于他们更新教学内容和改进教学方法。

三、支撑材料

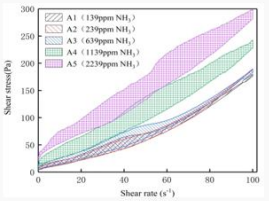
实际教学应用中的部分 PPT 如下：



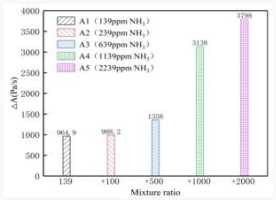
2.4 脱硝粉煤灰氨含量对充填膏体性能的影响-流变性能

2.4.2触变性

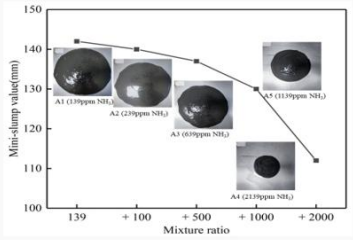
料浆触变环面积随着氨含量的增加而增大，氨含量可以促进充填料浆触变性的发展，当氨含量大于639ppm时，料浆触变性的发展发生了显著变化。



剪切应力-剪切速率触变环



触变环面积



充填料浆微坍落度值

- 随着氨含量的增加，坍落度值随之降低。当氨含量大于639ppm时，坍落度值的降低幅度更为显著。
- 粉煤灰氨含量的增加对充填料浆流动性能有不利的影响。

西安科技大学 XI'AN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

超大断面巷道围岩应力数值模拟实验

面间煤柱超大断面矩形巷道围岩变形破坏分析

掘进宽度为15m，顶板下沉0.125m，离层开始增大；掘进巷道宽度增加至20m，两帮隅角处出现明显裂隙，顶板上方3m处出现离层，即将垮落

