



“煤巷锚杆支护与快速掘进技术”系列报告

煤巷锚杆支护理论与技术

韩昌良

中国矿业大学

2018.05

中国矿业大学“巷道围岩控制”课题组

首席专家

张农

教师

7名

在读博士

14名

在读硕士

60名

- 主持国家重点基础研究发展计划（973计划）课题、教育部创新团队项目、国家自然科学基金和教育部科学技术项目十余项，承担企业合作攻关项目百余项。
- 拥有国家级学科和实验室研究平台。
- 已培养毕业博士11名、硕士70名。
- 拥有国际专利2件，国家发明专利40件，实用新型专利53件。
- 在国内外高水平期刊发表科技论文二百余篇。
- 获得国家科技二等奖3项，省部级科技一、二等奖30余项。

研究方向

- 巷道围岩控制：岩巷支护，煤巷支护，软岩治理，采动巷道支护
- 无煤柱开采：沿空留巷
- 小煤柱沿空掘巷
- 卸压开采：围岩应力优化控制，煤层群卸压开采
- 煤巷高效快速掘进
- 智能掘进
- 巷道矿压监测：光栅光纤在线实时监测
-

汇报提纲

- 一、煤巷锚杆支护原理
- 二、锚杆支护技术
- 三、锚杆支护质量检测监测
- 四、支护案例分析
- 五、煤巷掘进与支护的发展趋势

No.

1

煤巷锚杆支护原理

- 从兰德实验谈起
- 锚杆支护原理的经典解读
- 围岩强度强化理论



①岩石平盘模型的空框架

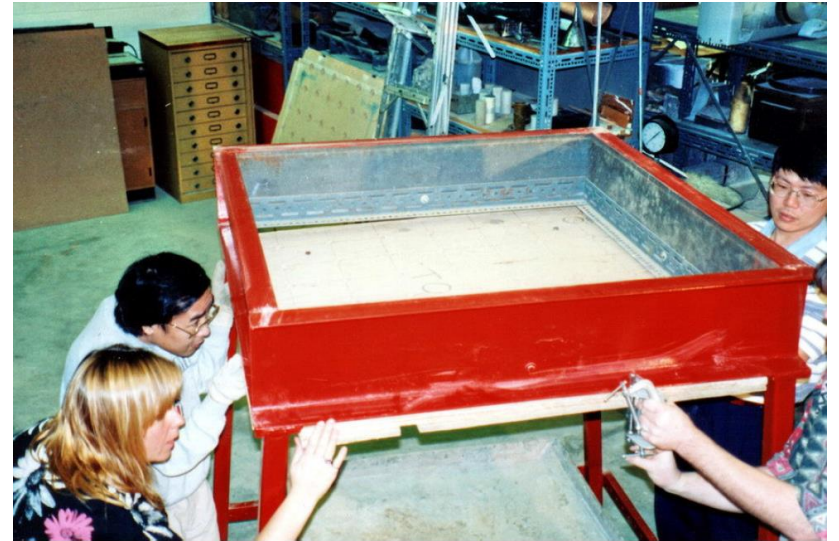


②小尺寸的相似岩石锚杆

兰德实验过程



③干净的岩块

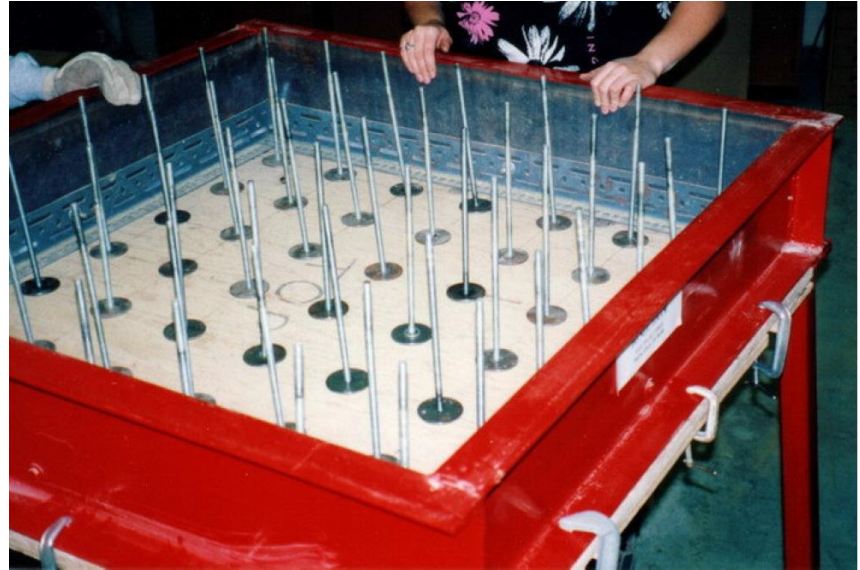


④模型框架底部安装基座

兰德实验过程



⑤定位安装锚杆



⑥锚杆定位并安装完毕

兰德实验过程



⑦填装石块



⑧夯实石块

兰德实验过程



⑨安装托盘并预紧



⑩拆掉木板

兰德实验过程



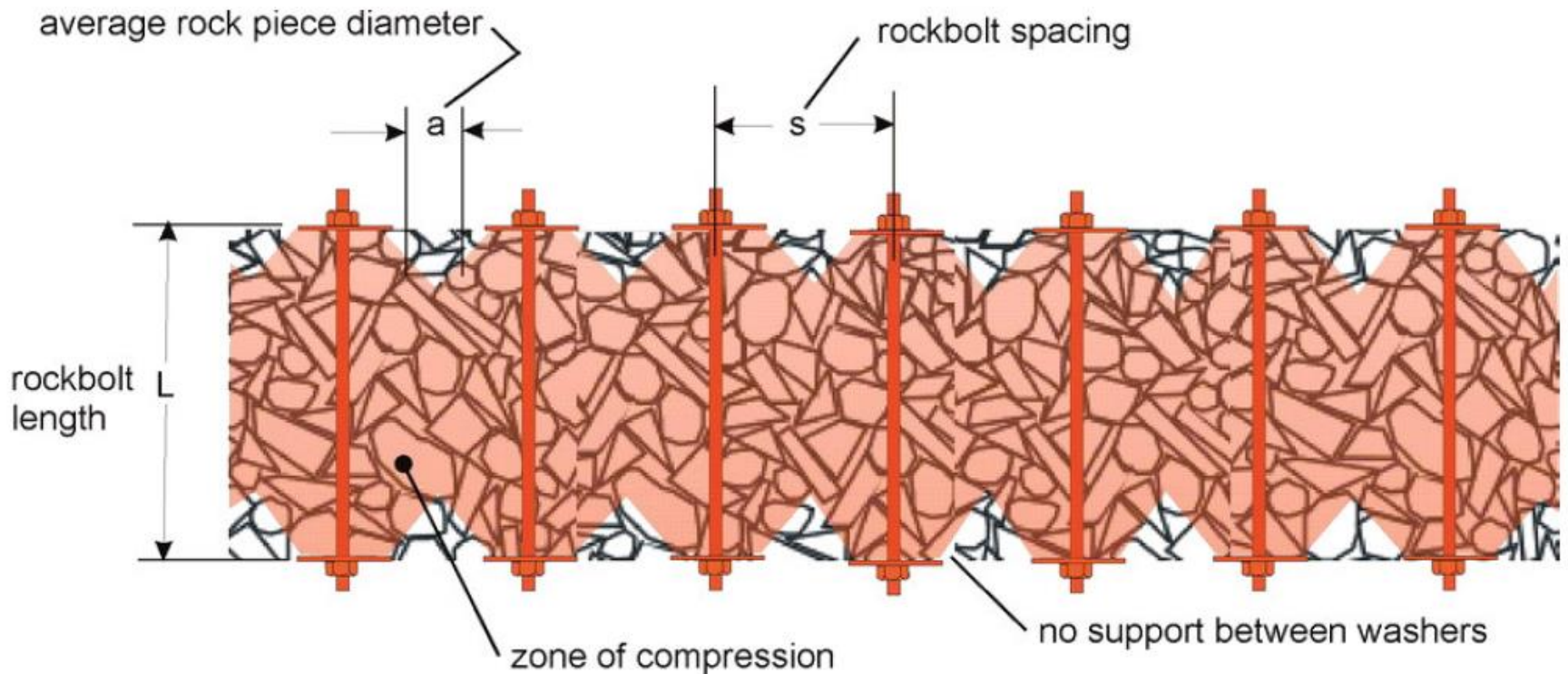
11 模型仰视

见证奇迹!



12 模型的承载力

Support function of rockbolt



Tom Lang's explanation of how rockbolts work. A zone of compression is induced in the region of the rock mass when the rockbolt spacing $s < 3a$ (岩块的平均粒径) and the average rock piece diameter is a . The rockbolts are of length $L \approx 2s$ (锚杆长度 $L \approx 2s$) so that there is no support between washers. Rock pieces will fall out of these zones on the underside of the beam.



- 石子的粒径
- 框架的约束
- 锚杆的强度、间排距、预紧力
- 石子的夯实程度、层厚
- 其它。。。

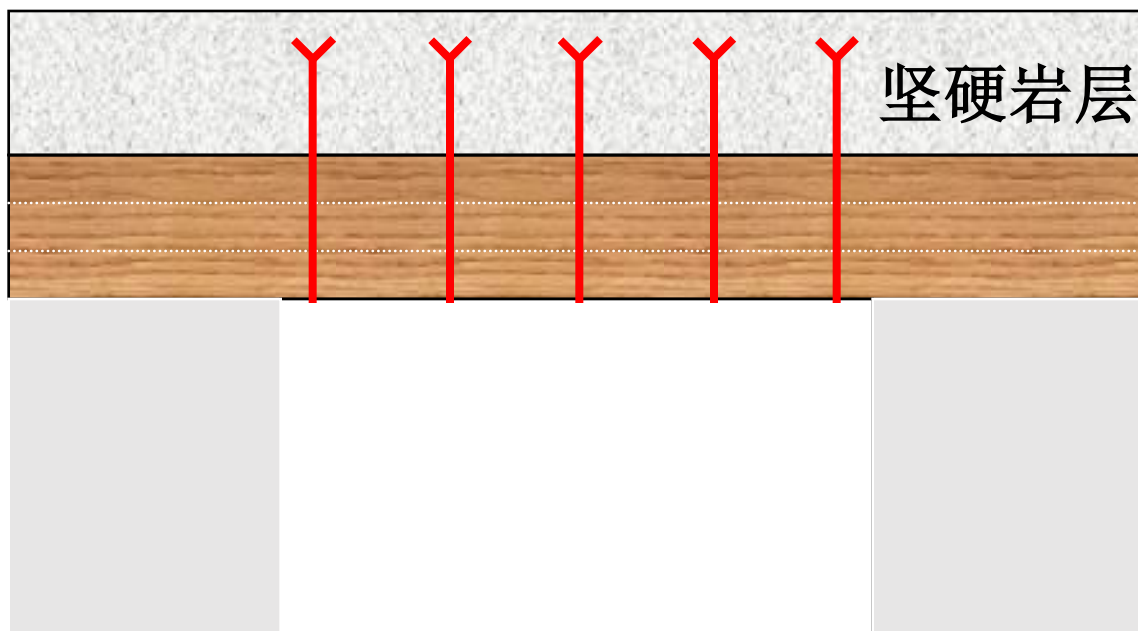
锚杆究竟如何起到支护作用的呢？

经典锚固理论

- 悬吊理论
- 组合梁理论
- 组合拱理论
- 最大水平应力理论
- 刚性梁理论
- 预应力控制理论
- 松动圈理论

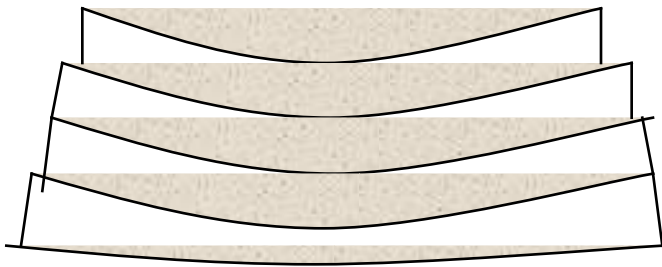
□ 悬吊理论

锚杆支护的作用就是将巷道顶板较软弱岩层悬吊在上部稳定岩层上，以增强较软弱岩层的稳定性。

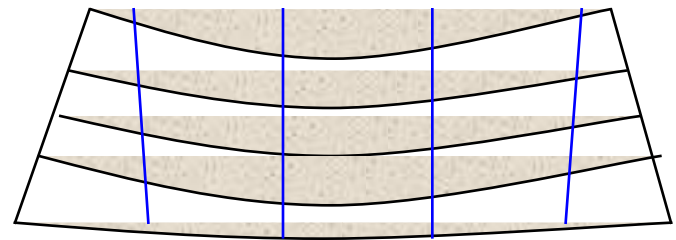


□ 组合梁理论

在层状岩体中开挖巷道，顶板锚杆的作用，一方面是依靠锚杆的锚固力**增加各岩层间的摩擦力**，防止岩石沿层面滑动，避免各岩层出现离层现象；另一方面，锚杆杆体可增加岩层间的抗剪刚度，防止岩层间的水平错动，从而将巷道顶板锚固范围内的**几个薄岩层锁紧成一个较厚的岩层（组合梁）**，梁越厚，梁内的最大应力、应变和梁的挠度也就越小。



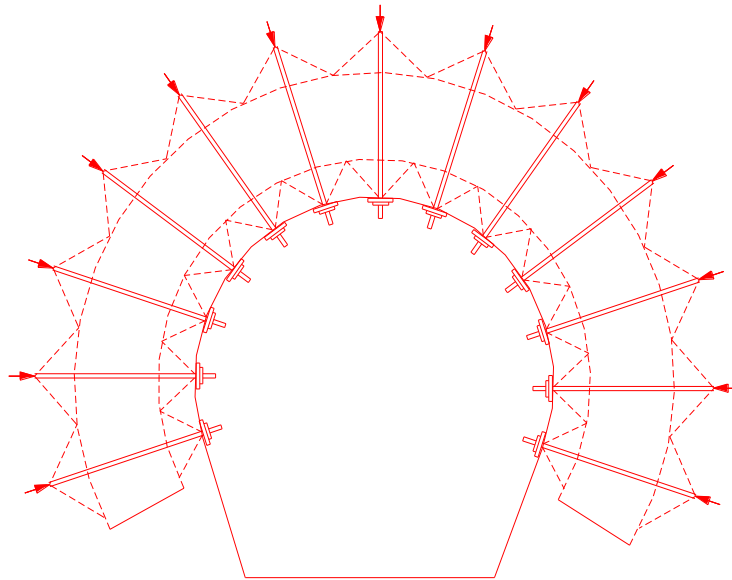
无锚杆支护



有锚杆支护

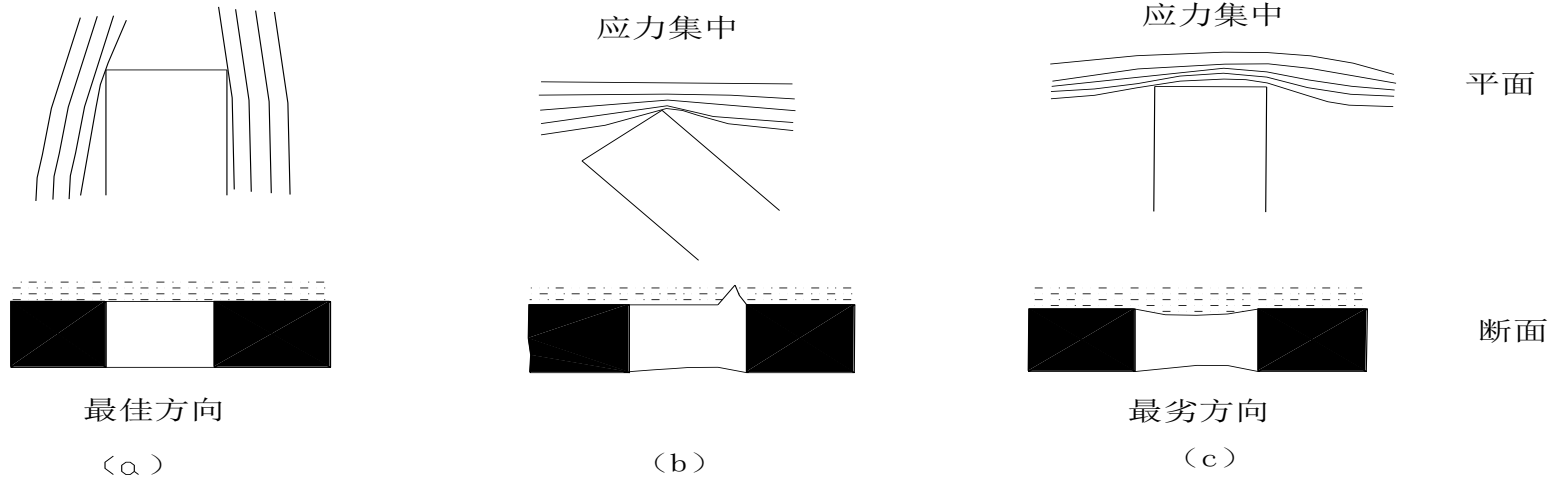
□ 组合拱理论

在拱形巷道围岩的破裂区中安装锚杆时，在杆体两端将形成圆锥形分布的压应力，如果沿巷道周边布置锚杆群，只要锚杆间距足够小，各个锚杆形成的**应力圆锥体**将相互交错，就能在岩体中形成一个均匀的压缩带，即组合拱。



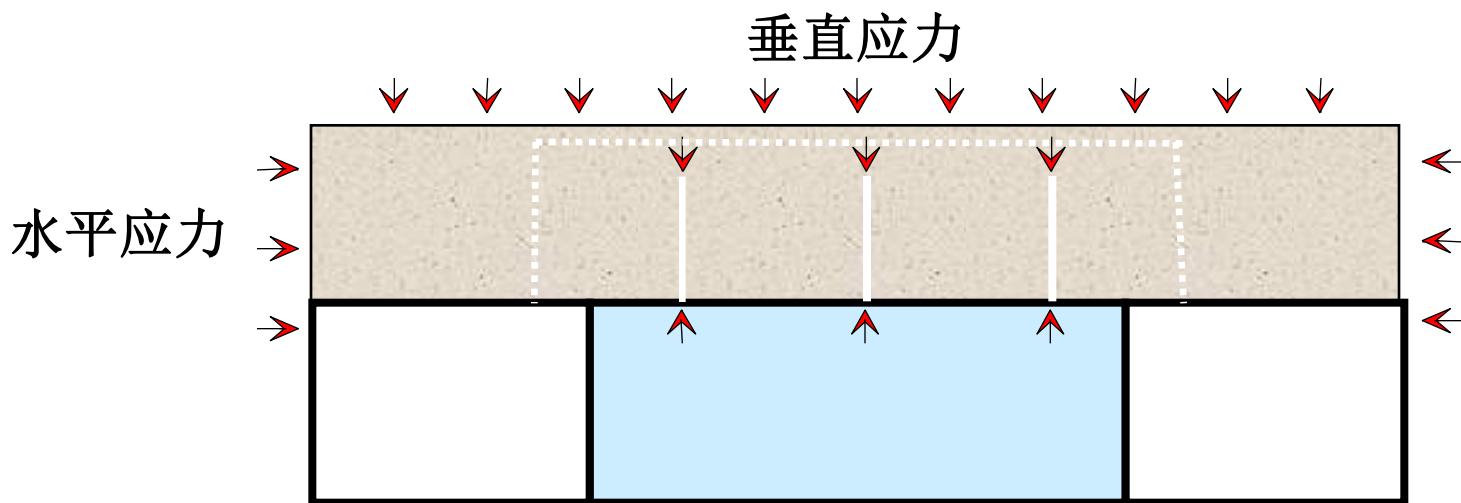
□ 最大水平应力理论

由澳大利压学者盖尔 (W.J.Gale) 提出：矿井岩层的水平应力通常大于垂直应力，水平应力具有明显的方向性，最大水平应力一般为最小水平应力的1.5-2.5倍。巷道顶底的稳定性主要受水平应力的影响。

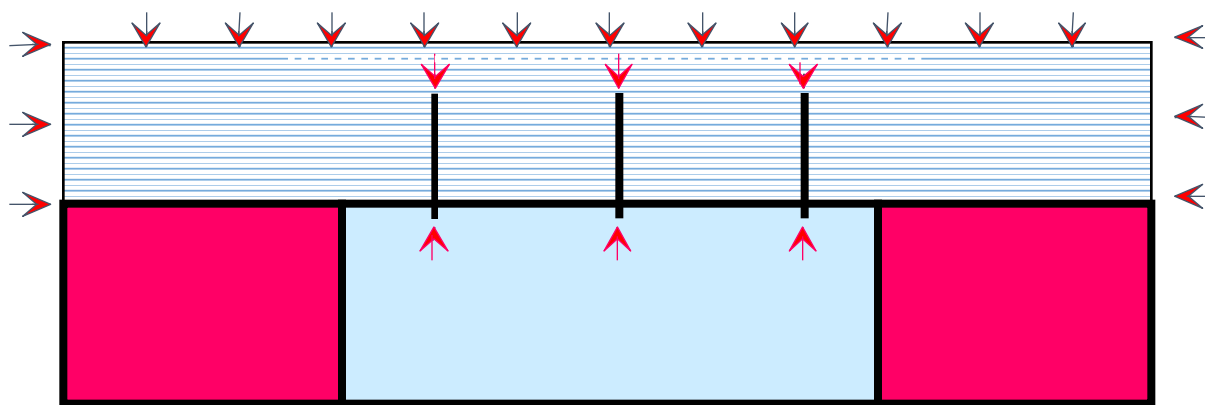
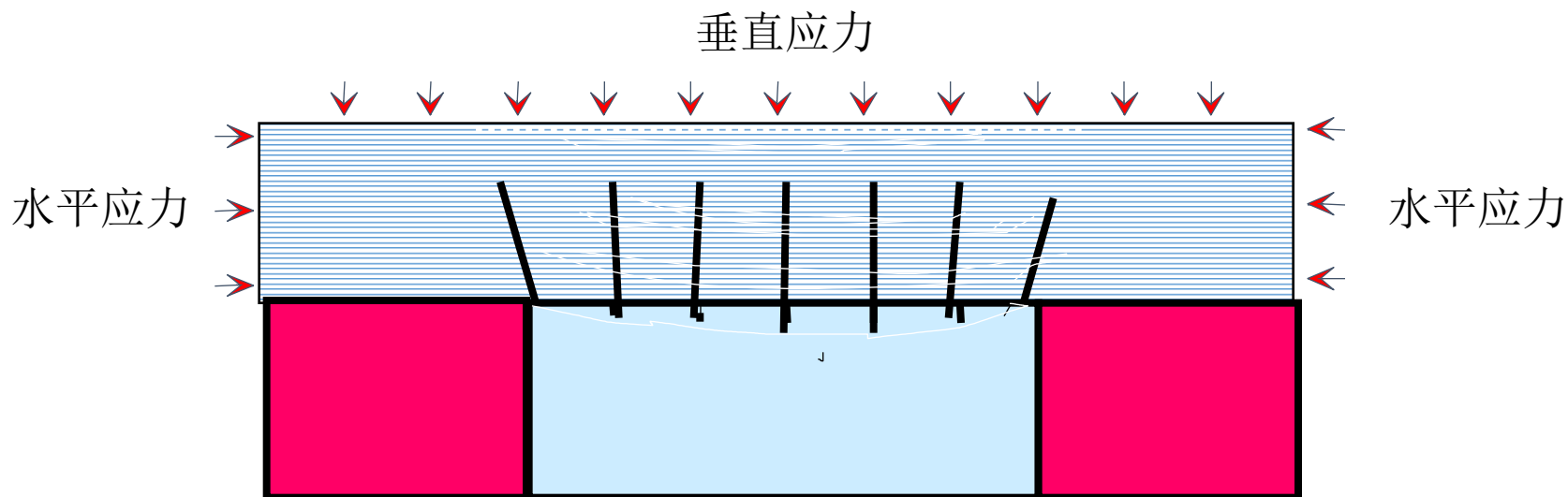


□ 刚性梁理论

锚杆的作用在于给顶板及时提供很高的初撑力以形成“刚性”顶板，“刚性”顶板本身提供了一个压力自承结构。锚杆本身不是承载结构。实测表明“刚性”梁顶板的建立使得锚杆后期增加的载荷等于零，也就是说，杆体本身除**维持锚杆预拉力**外已不起任何别的作用。



□ 预应力控制理论



预应力控制理论

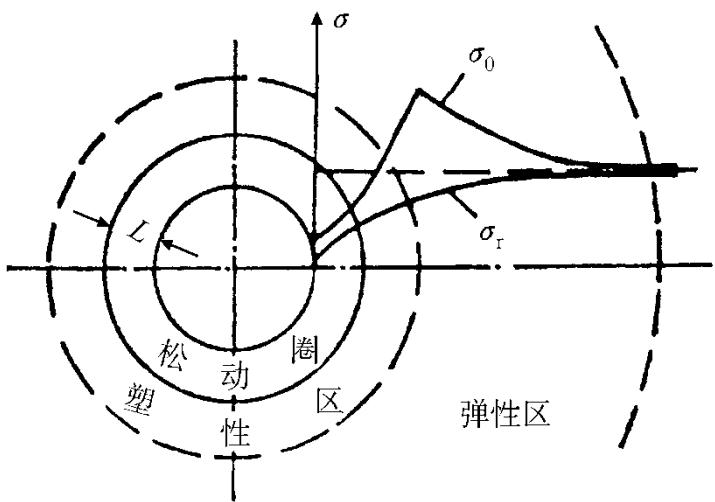
提出预拉力锚杆支护技术的概念

指支护构件主动施加预拉力，预拉力明显超过顶板松散岩体的自重，从而消除顶板板离层破坏，顶板支护共同体形成预应力承载结构的支护技术。

- 及时性
- 主动性
- 预应力水平

□ 松动圈理论

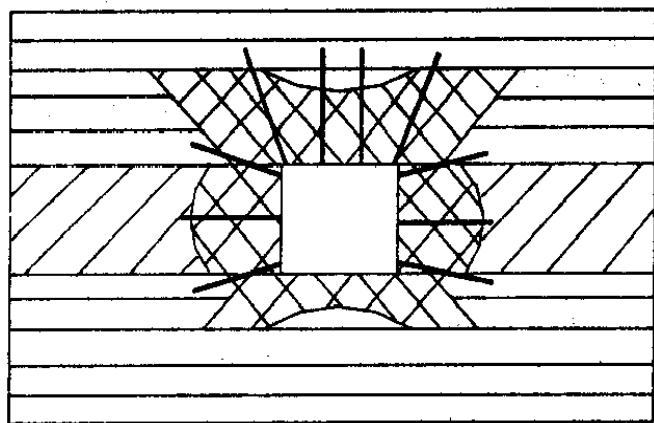
- 围岩松动圈是掘巷后地应力超过围岩强度的结果。
- 巷道支护对象：松动圈围岩自重、深部围岩的部分弹塑性变形力、松动圈围岩的变形力（占主导）
- 支护对破碎围岩的维护作用：松动圈发展变形过程中维持破碎岩块相互啮合不垮落，通过提供支护阻力限制裂缝间隙过度扩张，从而减少巷道的收敛变形。



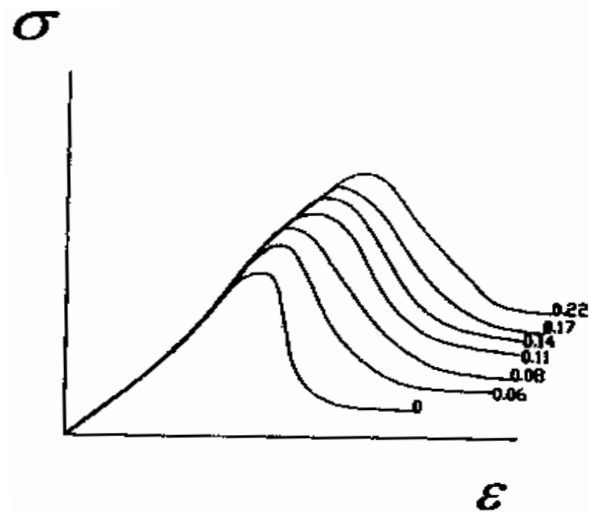
围岩级别	分级名称	松动圈 (cm)	备注	
小松 动圈	I	稳定围岩	0~40	围岩整体性好，不易风化的可不支护
	II	较稳定围岩	40~100	
中松 动圈	III	一般围岩	100~150	刚性支护，局部破坏
	IV	一般不稳定围岩 (软岩)	150~200	刚性支护，大面积破坏
大松 动圈	V	不稳定围岩(较 软围岩)	200~300	围岩变形有稳定期
	VI	极不稳定围岩 (极软围岩)	>300	围岩变形在一般支护条件下无稳定期

对锚固体提供围压，使巷道围岩特别是处于峰后区围岩强度得到强化，提高峰值强度和残余强度，改善峰后岩体力学性能。

该理论主要探讨了锚杆加固后岩石峰前区粘聚力 C 、内摩擦角 φ 、弹性模量 E 的改善情况。



锚杆布置在破碎围岩中



围岩强度强化均势

核心：一优化三强化

巷道围岩应力场的优化

区域应力场的优化

微观应力场的优化

破裂围岩体强度强化

对巷道周围低围压破裂岩石进行有效加固，通常采用锚杆和注浆两种方式

巷道围岩结构的强化

顶板的安全控制
弱化区的补强
关键承载区的加强

锚杆承载性能的强化

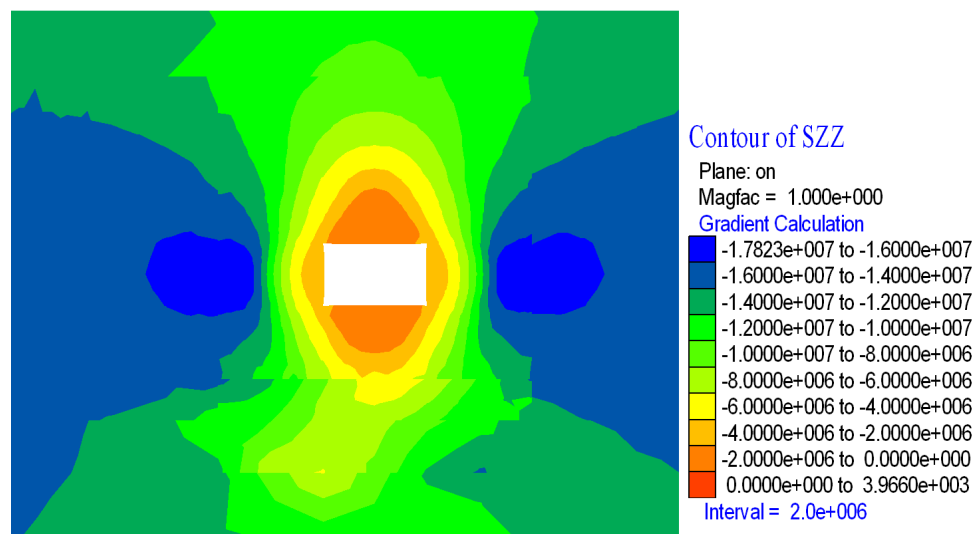
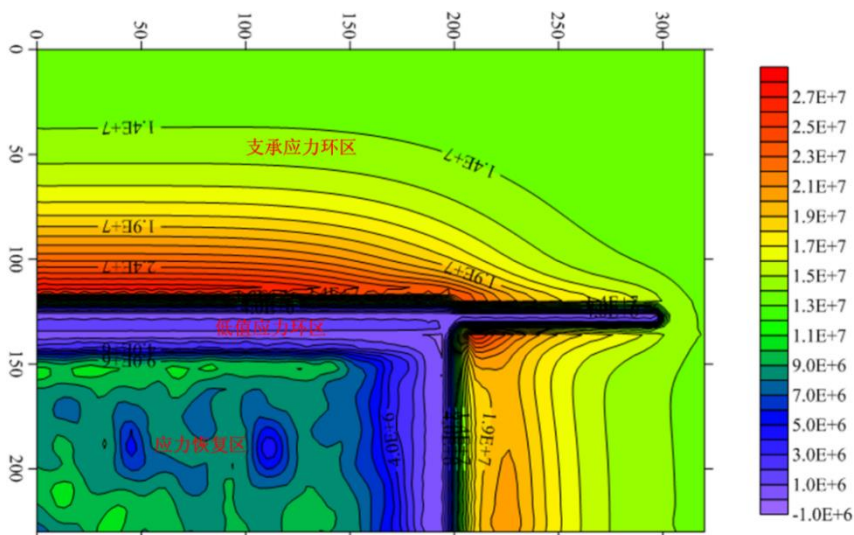
高预拉力

高强度

高刚度

■ 巷道围岩应力场的优化

- **区域应力场**：科学设计开采布局，安排好煤层的开采顺序，工作面的合理接续，尽量使巷道处于低应力场区域



- **微观应力场**：优化围岩浅部应力环境，促使围岩由两向应力状态向三向应力状态转化

■ 破裂围岩体的强度强化

巷道开挖以后，围岩必然产生一定程度的破坏，浅部的围岩处于低围压破裂状态，承载能力很低，在根本上决定着巷道围岩的稳定性。

只有对巷道周围低围压破裂岩石进行有效加固，才能提高巷道围岩的承载能力和稳定性。通常采用锚杆和注浆两种加固方式。

- 锚固体的力学性能改善
- 注浆加固体的力学性能改善

■ 围岩承载结构的强化

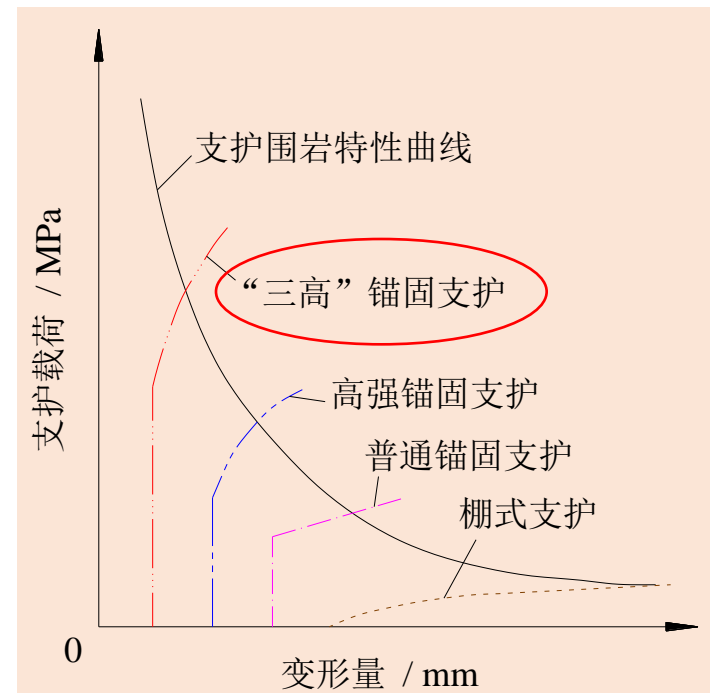
针对层状赋存特点、岩体不均衡性产生的弱化区补强，促成围岩承载结构的形成或强化，包括含弱面或软弱夹层的顶板离层控制，以及对帮角岩体破坏区、软弱煤体、开放的底板等采取加固措施。

- 顶板的安全控制，小孔径预拉力钢绞线桁架系统
- 弱化区的补强，维护巷道围岩的整体承载性能
- 顶板关键承载区的加强

■ 锚杆承载性能的强化

“三高” 锚杆支护技术

- 以高强度锚杆、高系统刚度为基础
- 高预拉力为核心
- 支护初期为围岩提供径向应力补偿，后期实现对变形高敏感性控制



护巷三要素

- 地应力：应力的状态、大小、方向
- 围岩强度：高低、环境
- 支护：断面尺寸、支护设计、结构的形成

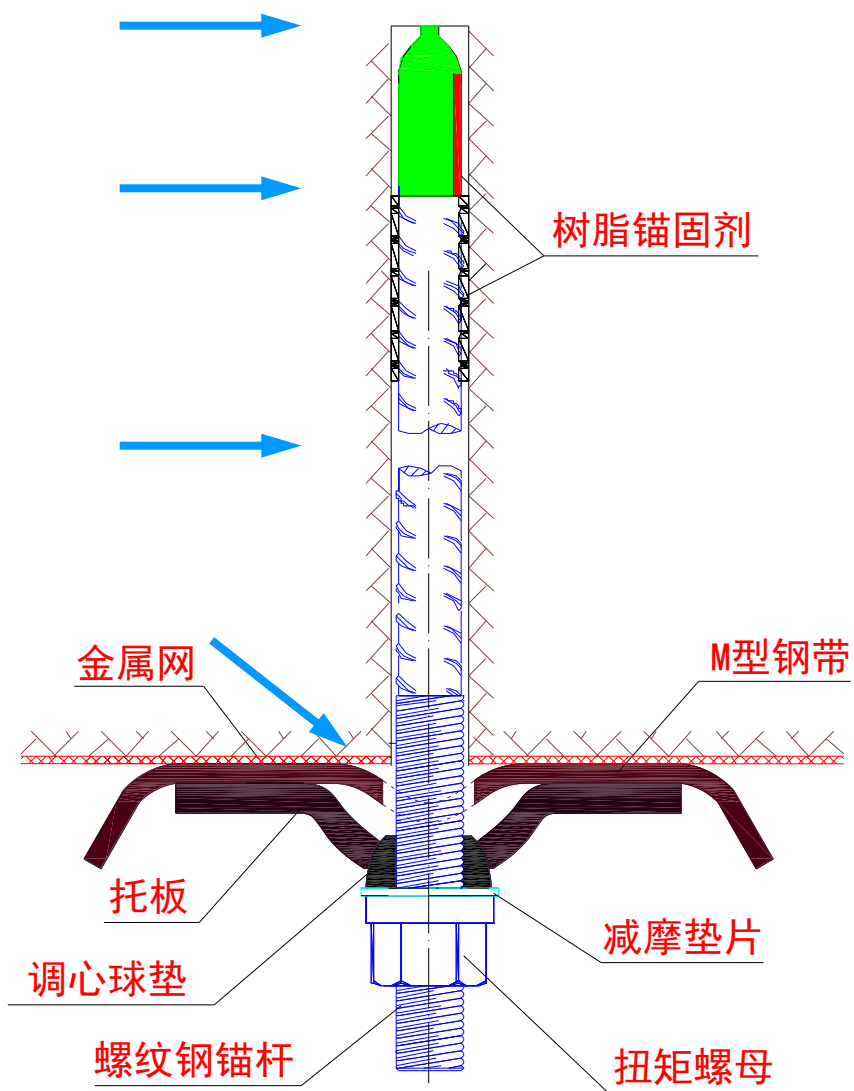
No.

2

锚杆支护技术

- 锚杆支护技术的发展概况
- 常规锚杆支护技术
- 锚固材料的加工与匹配
- 锚固的技术保障

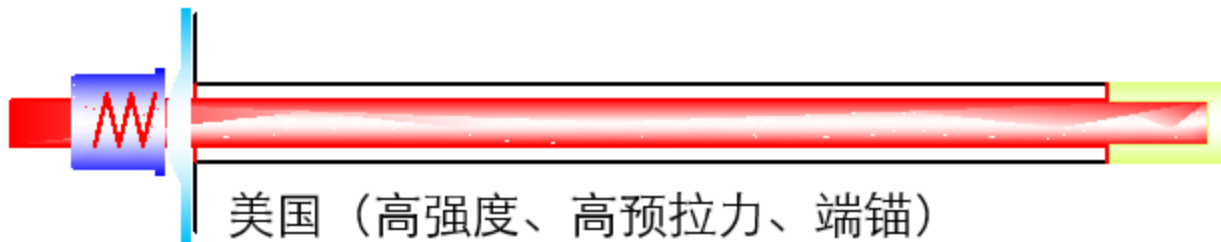
易离层或断裂的位置



- 杆体：等强、高强
- 螺纹：左旋，右旋全螺纹
- 钻孔：与杆体的直径差
- 药卷：与钻孔的直径差
- 粘结：内环、外环双界面
- 附件：钢带、托盘、垫片、螺母
- 预紧力：初始，维持

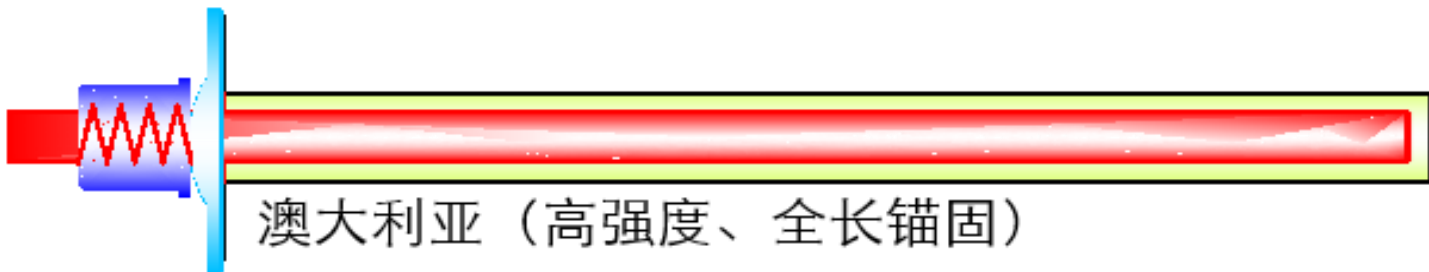
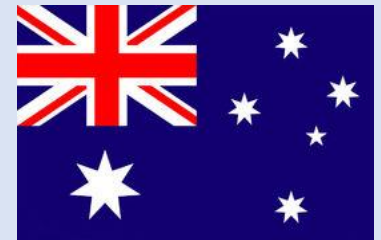
1) 美国

- 锚杆支护是美国巷道顶板支护的唯一方式，1977年修订“煤矿健康与安全法案”，定为巷道顶板永久支护方式
- 美国锚杆技术精髓：“两高一大大”
- 高强度、高预拉力、大排间距



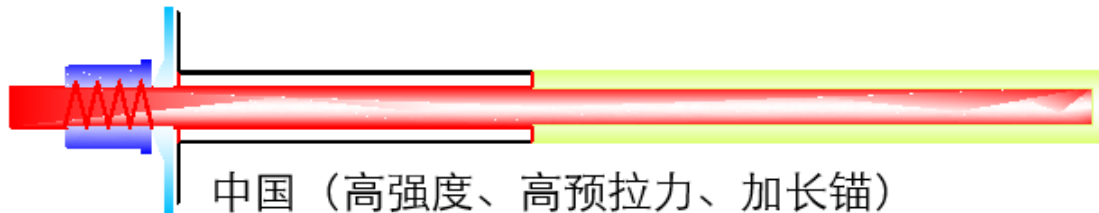
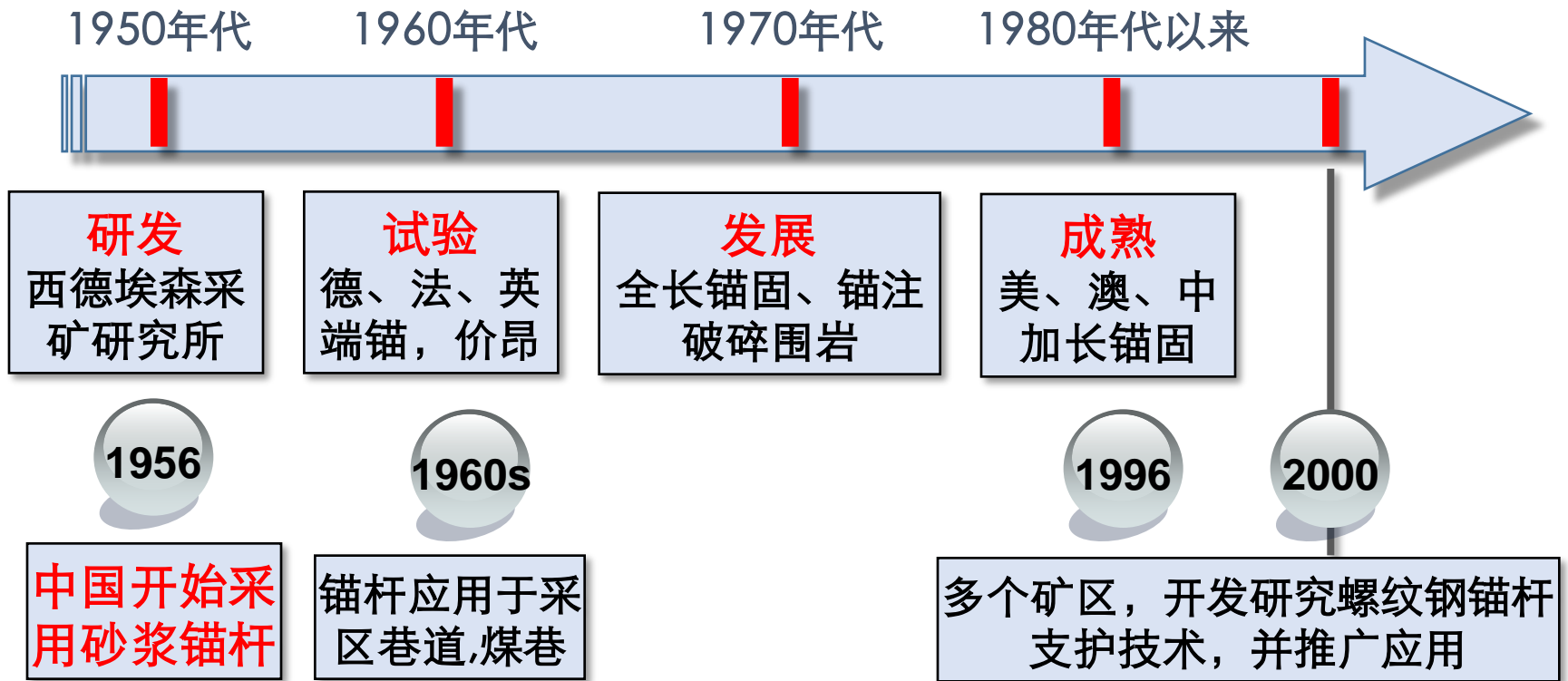
2) 澳大利亚

- 全长树脂锚固
- 高强度材料
- 澳大利亚锚杆支护率100%



澳大利亚 (高强度、全长锚固)

3) 中国：跟踪学习到特色创新



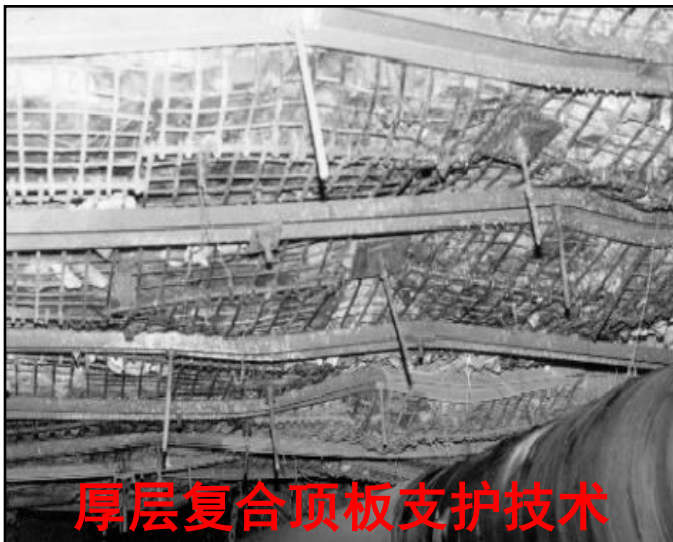
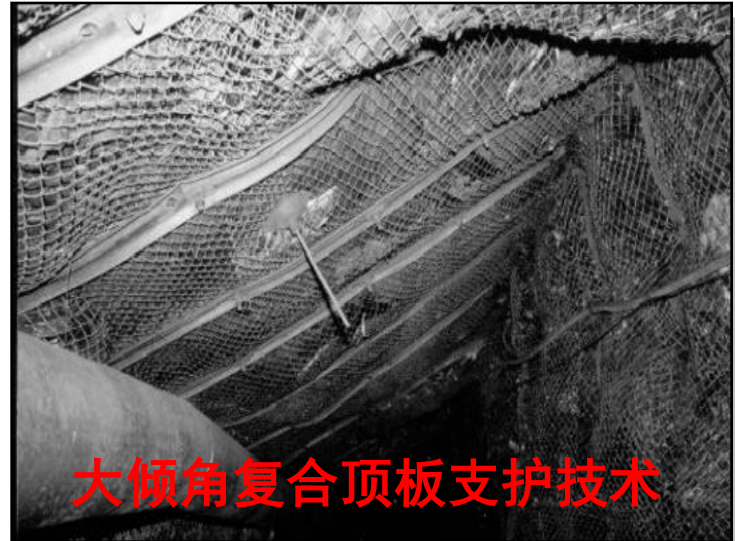
煤巷锚杆支护技术的阶段性突破

发展阶段	强度	粘结力	初锚力(工作阻力)	可靠性	使用范围	技术特征
20世纪50~60年代: 机械点锚固锚杆技术	低	低	低	低	很小	四低 一小
20世纪80~90年代末: 高强螺纹钢锚杆技术	高	高	低	低	较小	两高 两低
1999年~2004 高性能预拉力支护技术	高	高	高	高	大	四高 一大
2004年以来	以提高预紧力、支护围岩系统刚度为突破的“三 高”锚杆支护与卸压结合的控制技术					

- 锚杆支护
- 锚网支护
- 锚带网支护，锚梁网支护
- 锚带网索支护
- 锚喷支护
- 锚注支护
- 锚架支护
- 锚柱支护

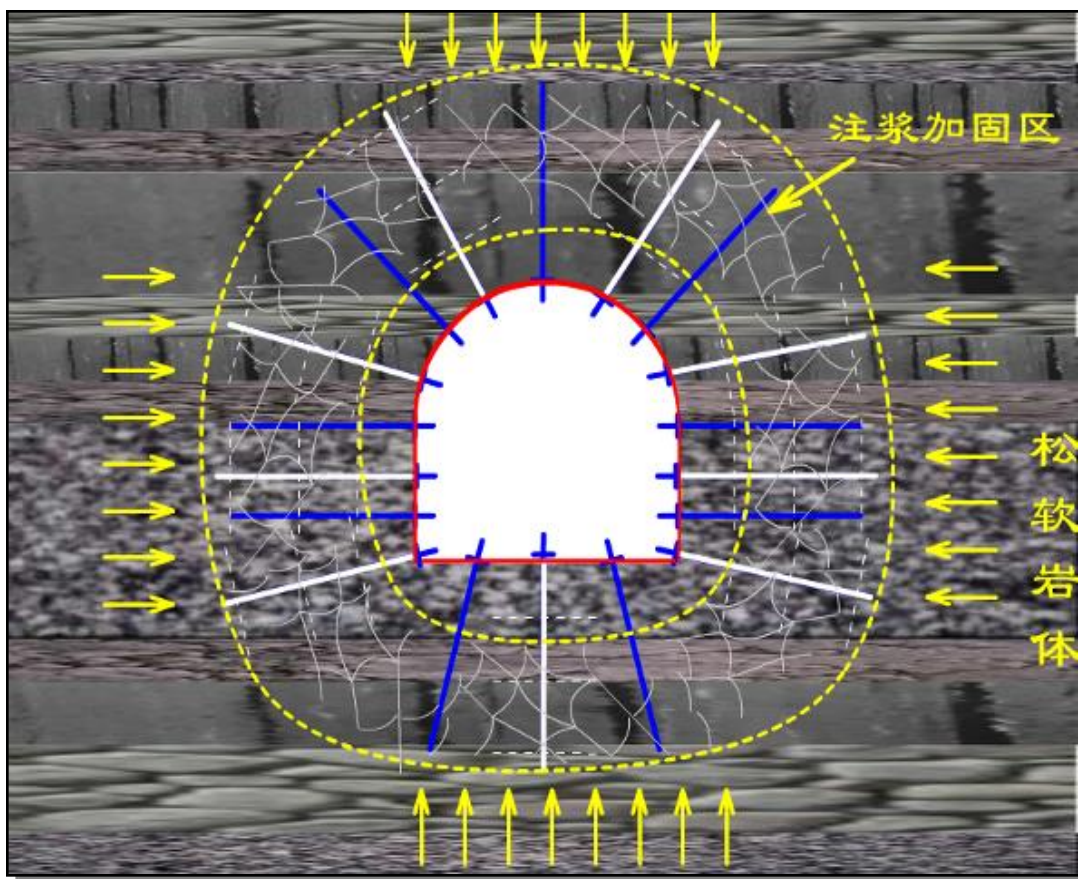
锚杆、锚索、金属网、
钢带、喷浆、注浆、架
棚、支柱等**支护形式的
匹配组合**

1) 锚带网支护



2) 喷锚注一体化

揭示采动破裂岩体的锚注加固规律，研究成功“**喷锚注一体化**”技术，有效控制采动破碎煤岩巷的变形。

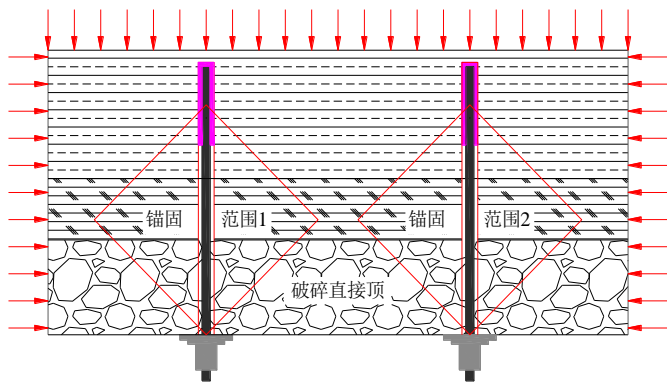


3) 锚架联合支护

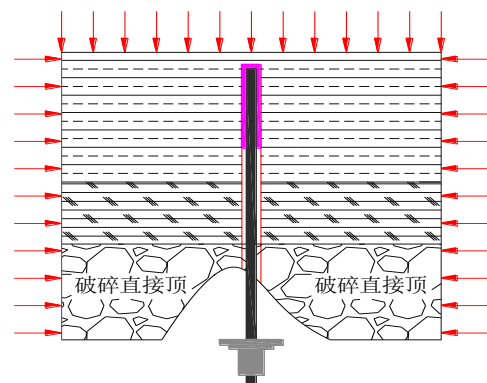
锚杆支护劣势

顶板破碎程度大，自稳能力差。

棚式支护优势



锚固区域不能叠加在一起



浅部围岩垮冒导致锚杆失效

- ★ 对地质条件的适应性强；
- ★ 承载能力大，抗压强度高；
- ★ 支架与围岩的接触面积大；
- ★ 工艺简单，施工影响小。

稳定性较差的
巷道锚架支护

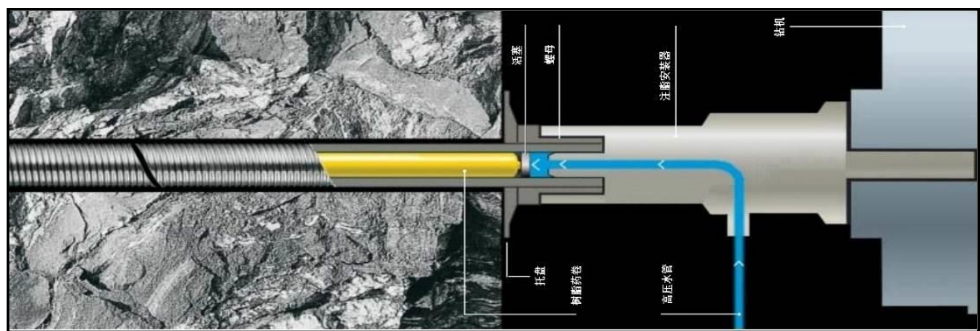
4) 锚注一体化支护技术



注浆锚杆



中空注浆锚索



中空注脂锚杆

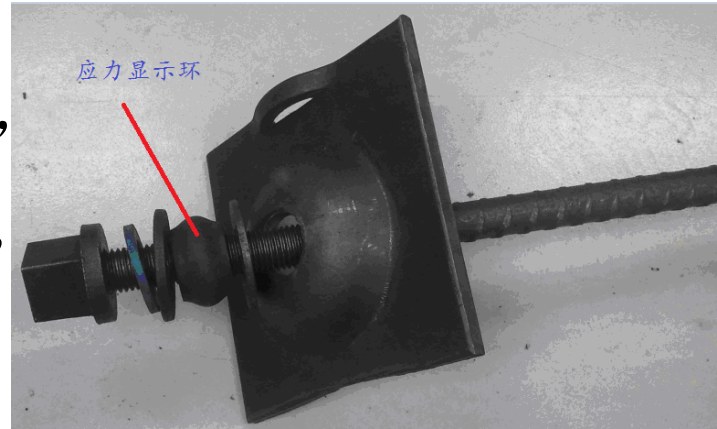


锁注一体化底板控制技术

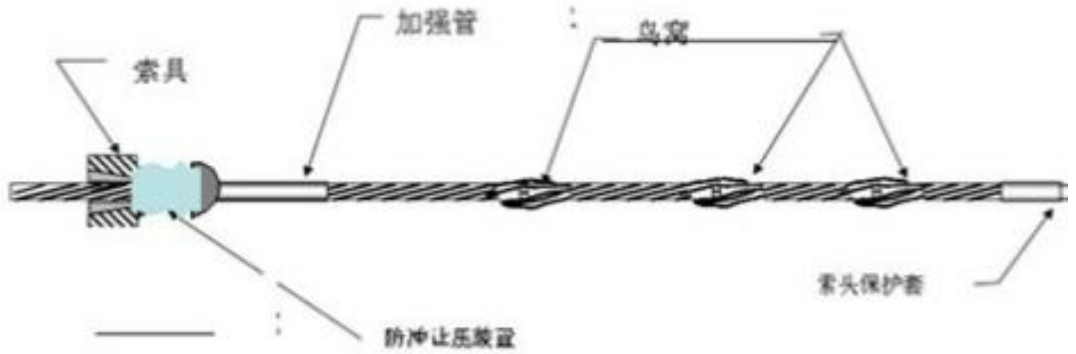
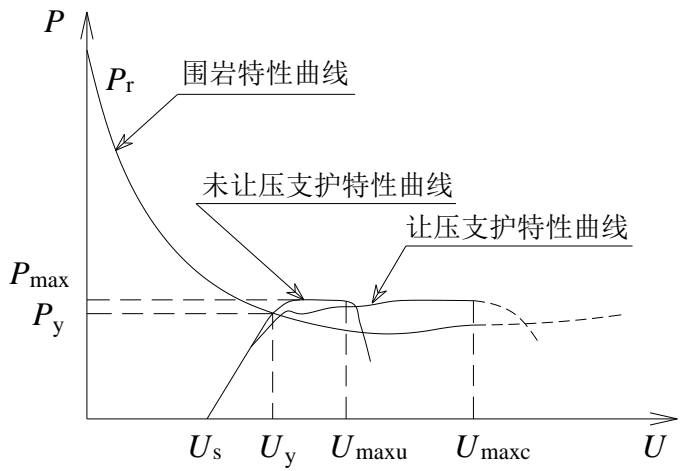
5) 让压支护技术



“慢泡”
“快泡”



高强、高延伸率锚杆



6) 锚索束支护技术

锚索束结构



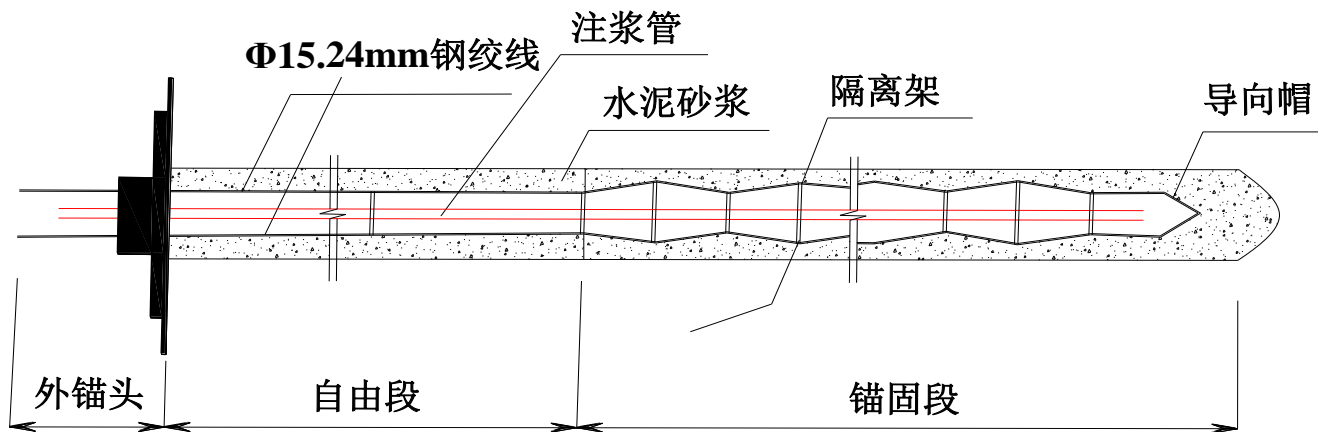
钢绞线



注浆管



导向帽



隔离架



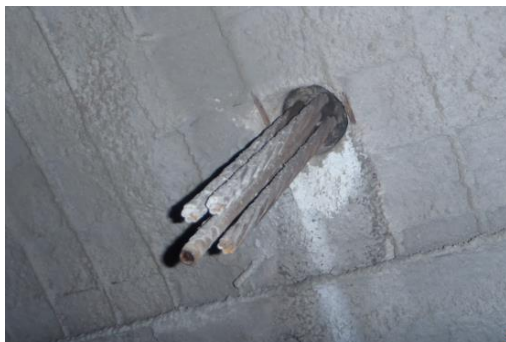
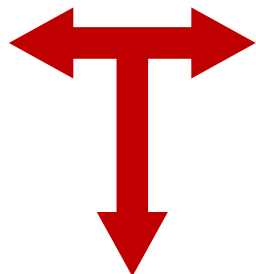
托板



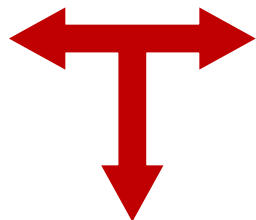
锚具



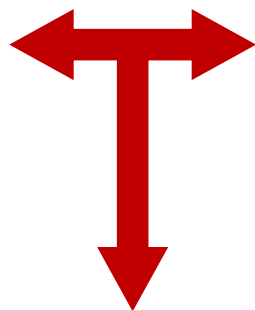
① 钻孔



② 安装



③ 注浆



④ 张拉

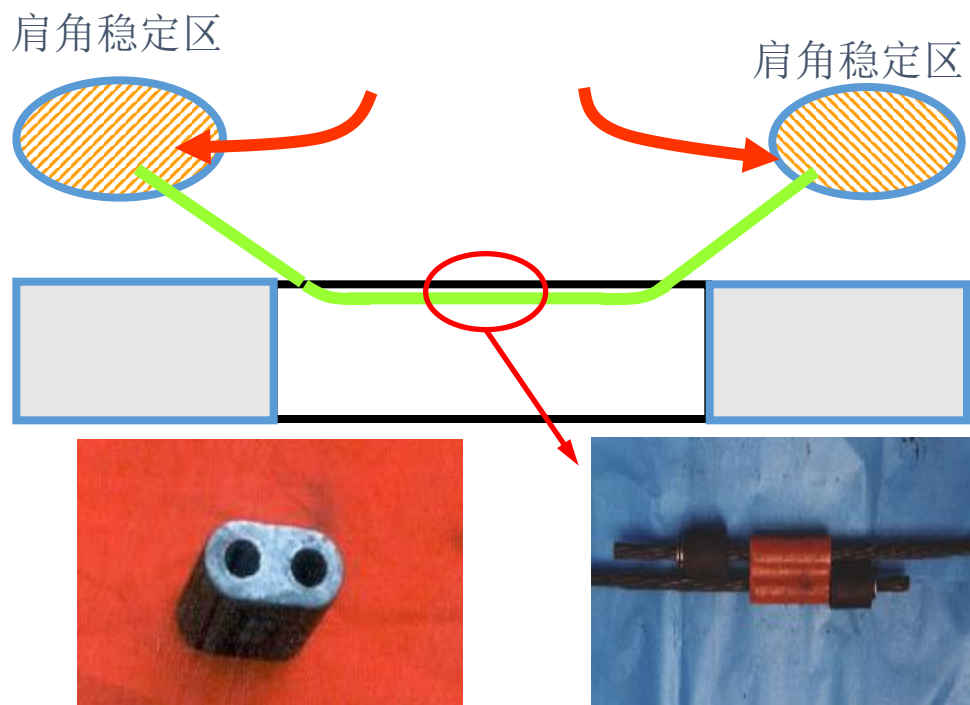


采用水泥砂浆注浆锚固，注浆压力以5~6MPa适宜，注浆结束后用快凝水泥封孔，注浆压力为0.1MPa。

注浆结束一周后张拉，预紧力设计为400kN，每根钢绞线为100kN，张拉采取分段逐级方式，以0-20kN-40kN-60kN-80kN-100kN逐根张拉。⁴³

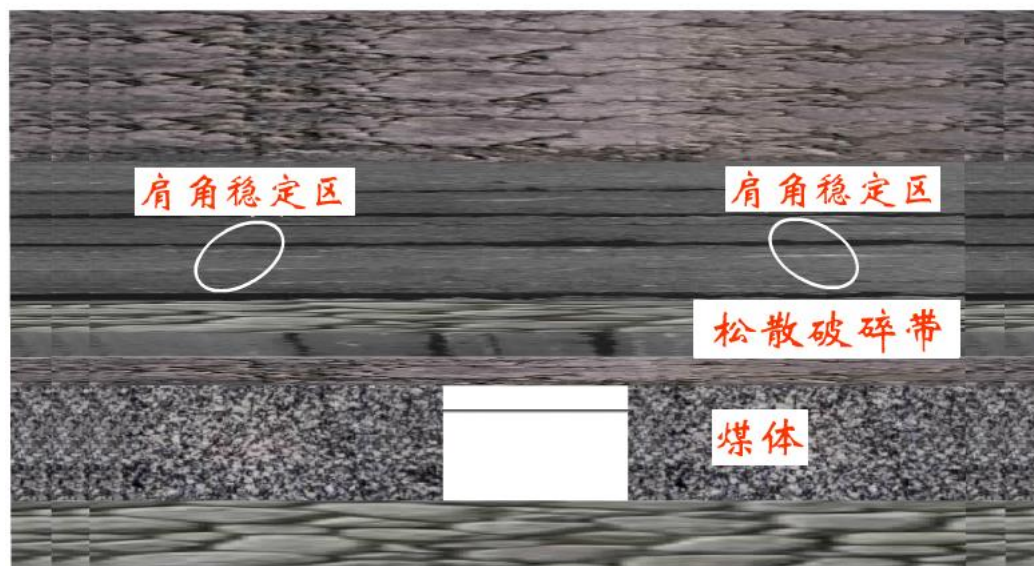
7) 钢绞线桁架支护技术

以巷道肩角稳定区域岩石作为内锚固支撑点，通过桁架连接装置将两根钢绞线对拉，形成可靠的护顶结构，控制顶板的离层、防止顶板加固区整体垮冒。



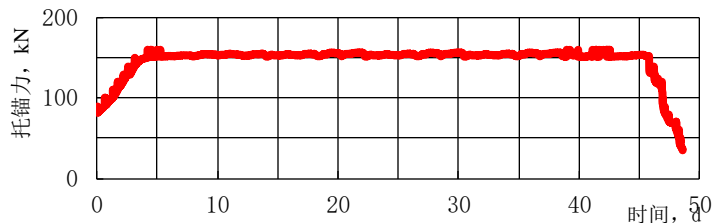
- ◆ 机械张拉实现高预拉力；
- ◆ 预拉力范围50~150kN；
- ◆ 抗剪切破坏能力强；
- ◆ 结构稳定可靠，防止顶板垮冒，确保顶板安全；
- ◆ 结构简单，安装方便。
- ◆ 发明专利

- 及时主动有效加固顶板，消除松脱型冒顶
- 增大锚固范围，消弱层状顶板沿弱面的渐次离层和垮冒
- 建立“楔形”的强化承载结构，防止锚固区外离层和挤压型冒顶
- 建立顶板锚固结构抗拉抗剪破断准则

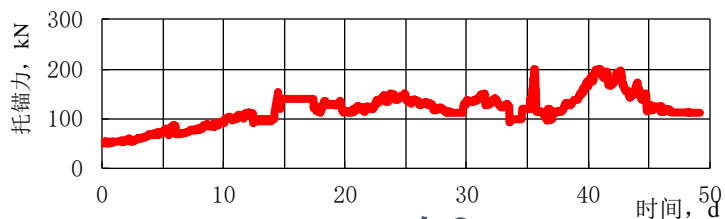


IV、V类巷道顶板离层控制原理图

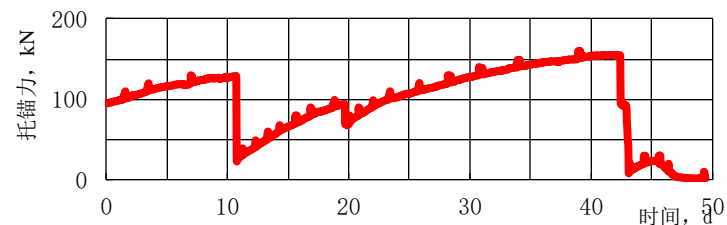
□ 锚杆的工况



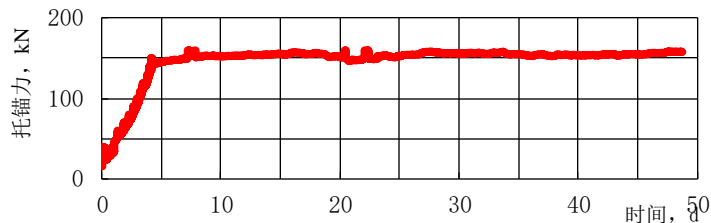
顶左1



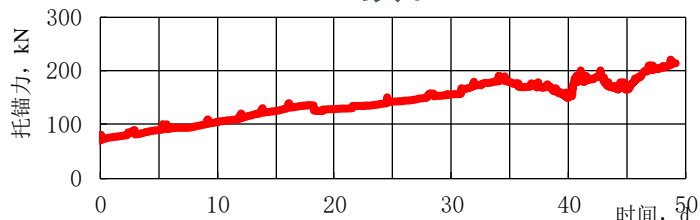
顶左2



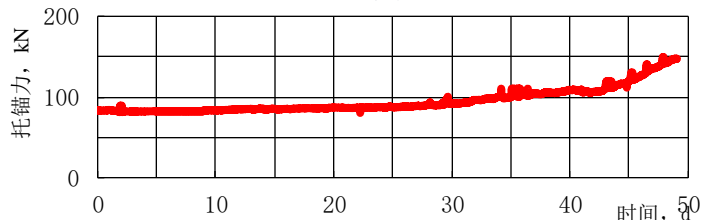
正中



顶右3



顶右2



顶右1

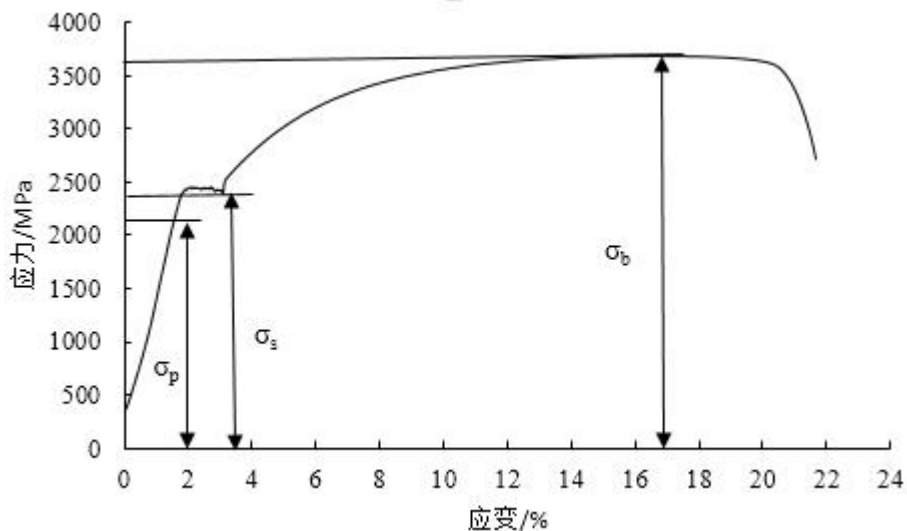
- 锚固力呈现复杂的波动演化规律

1) 锚杆材料及精细加工

□ 精细化加工：丝扣，避免径缩、断牙、毛刺等缺陷



□ 尾部螺纹的加工



- 锚杆尾部应采用热处理或滚丝法加工螺纹，否则容易出现应力集中，在尾部出现拉断现象。此外，锚杆的高延伸率多发生在屈服强度之后，并不利于锚固系统的稳定，应对杆体进行“冷作应化”处理。

□ 必要时的防锈蚀处理

- 锈蚀杆体的断裂强度仅为其原强度的70%左右（0.68~0.72），其伸长量比承载力更容易受到腐蚀的影响。
- 应力腐蚀：在应力和腐蚀环境的共同作用下引起的破坏。
- 长期服务或环境恶劣的锚杆索及其附件，有必要进行防腐处理：
 - 锚杆杆体：沥青防腐漆等防腐材料
 - 锚索：钢丝镀锌，或涂刷防锈层

2) 锚杆的选择



左旋无纵筋螺纹钢锚杆



右旋全螺纹锚杆

- 左旋无纵筋螺纹钢锚杆：尾部细密螺纹，高预应力，顶板和煤帮；
- 右旋全螺纹锚杆：全长粗螺纹，低预应力，煤帮。

□ 杆体强度的选择

- 热轧带肋钢筋分二级HRB335、三级HRB400、四级HRB500三个牌号，当前煤矿锚杆多用二级HRB335螺纹钢。

锚杆钢材的力学性能参数表

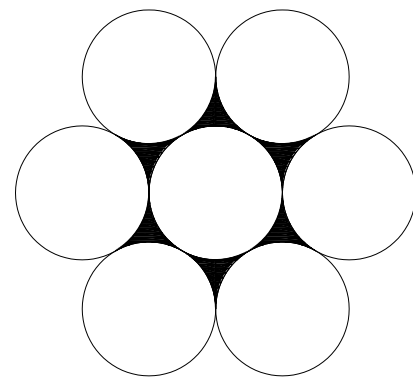
锚杆编号	直径/mm	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率/%
Q235	14~20	235	380	25
BHRB335	16~22	335	490	22
BHRB400	18~22	400	570	22
BHRB500	20~25	500	670	20
BHRB600	20~25	600	780	18

锚杆钢材编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	冲击吸收功/J
BHRB500	500	670	25	70 ~ 90
BHRB600	600	780	22	40 ~ 50
BHRB700	700	850	18	60 ~ 120

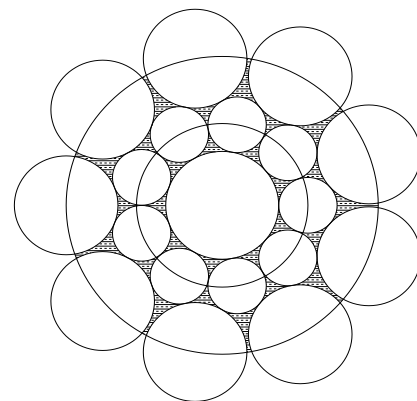
3) 锚索材料的选择

□ 小孔径树脂锚固锚索

- 原锚索直径小，钻孔不匹配；破断力小，延伸率低，预应力低。
- 大直径、大延伸率、高吨位强力锚索。
- 加大索体直径，最大28.6mm。大幅提高破断力。
- 新19根钢丝代替7根，结构合理，提高锚索延伸率。



原1×7结构



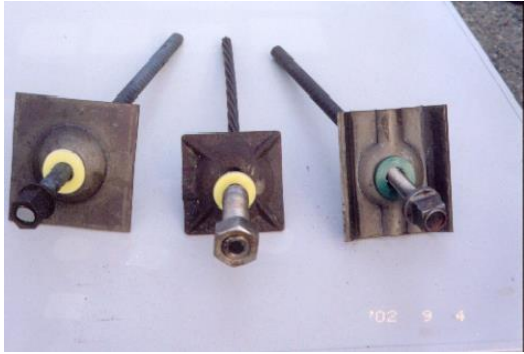
新1×19结构

- 强度与延伸率大幅提高。Φ22mm锚索破断力达600kN，是Φ15.2mm的2.3倍；索体延伸率7%，比Φ15.24mm提高1倍。预应力级别300-400kN。

结构	公称直径/mm	拉断载荷/kN	伸长率(δ)/%
1×7结构	15.2	260	3.5
	17.8	353	4
	18.9	400	4
	21.6	520	4
1×19结构	18	408	7
	20	510	7
	22	607	7
	28.6	900	7

↑ 72% !

4) 附件的设计及匹配性



成套锚杆



扭矩螺母与预应力垫圈



杆体外型结构优化



M型钢带



Π型钢带



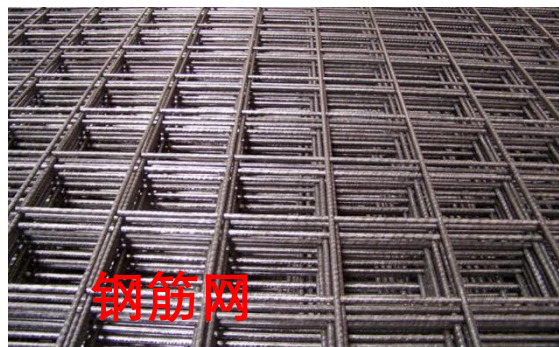
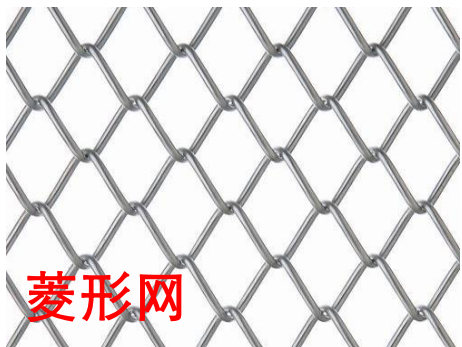
Ω型钢带



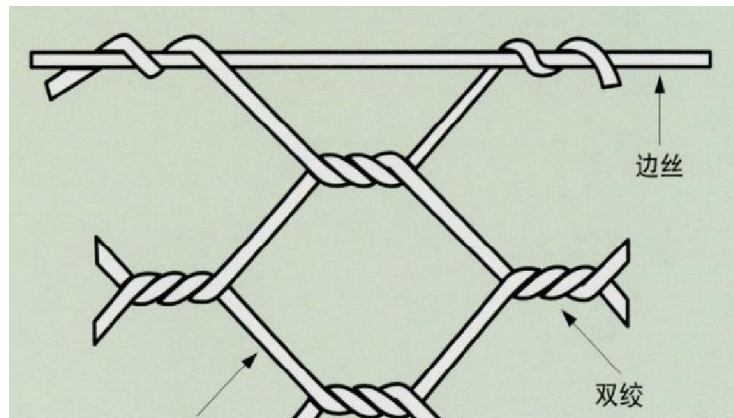
W型钢带

□ 菱形网、钢筋网与格宾网

序号	分类依据	典型网类别
1	生产工艺	编制网、焊接网、轧制/冲孔网、冲孔网和复合熔塑网
2	网丝材质	铁丝网、钢筋网、钢板网、塑料网及复合塑钢网
3	网孔形状	菱形、矩形、三角形、六角形和异形网
4	格栅连接方式	勾花式、旋拧式、焊接式、熔接式

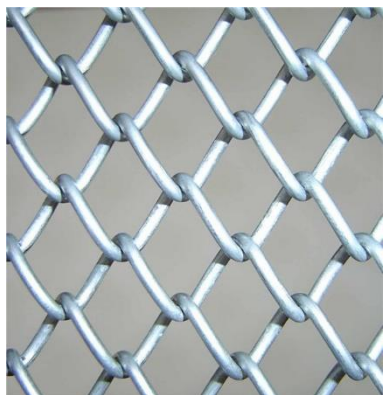


煤巷使用菱形金属网，柔韧性好，但只能被动的“护”，起不到主动的“支”的作用，这与锚杆预应力支护背道而弛；格宾网是蜂巢型生态网，较好解决了这一问题。



□ 金属网的护表效应

- 护表的整体性：防漏，搭接长度有要求
- 护表的拉紧度：兜护效应，贴住岩面，及时约束
- 无网化支护：高性能无机材料，薄喷
- 轻质网支护



5) 树脂药卷的选择

型号	特性	凝胶时间/s	等待时间/s	搅拌时间/s
Cka	超快	8~25	10~30	8~15
CK		8~40	10~60	
K	快速	41~90	90~180	25~40
Z	中速	91~180	480	25~40
M	慢速	>180		25~40

- 煤矿巷道主要使用CK、K、Z型树脂锚固剂，以K和Z型最常用；
- 混合使用：快速安装和加长锚固；
- 药卷直径：23~35mm，长度：300~900mm以上；
- 抗压强度 $\geq 60\text{MPa}$ ，剪切强度 $\geq 35\text{MPa}$ ；
- 粘接强度：对螺纹钢 $> 16\text{MPa}$ ，对混凝土 $> 7\text{MPa}$ 。

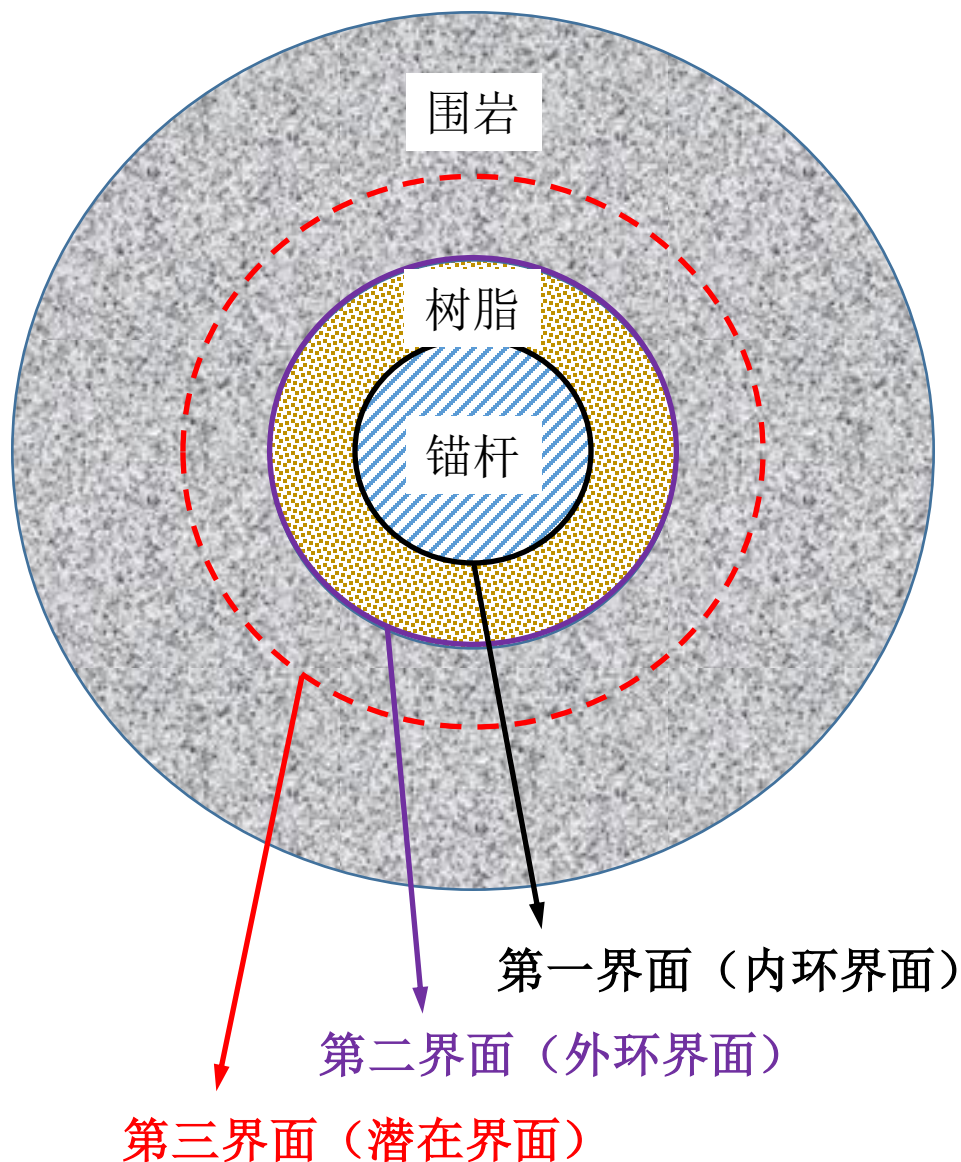
1) 锚固方式的设计

- **非全长锚固：可施加预应力，但自由段敏感度不高**
 - 适用：围岩完整，累积变形量小
 - 易造成托锚力消失，锚固整体失效

- **全长锚固：难以施加预应力，但对变形敏感度高**
 - 工况相对较平稳：巷道围岩控制效果较理想
 - 适应于围岩破碎、压力较大的巷道

- **全长预应力锚固：利用粘结材料的时间差**
 - 优点兼备
 - 适应于围岩破碎、压力较大的巷道

2) 三径匹配



- 树脂锚固环的厚度：
3~4mm最佳，不超过5mm
- 杆体与钻孔直径差：
6~8mm最佳，不超过10mm
- 药卷直径：与钻孔相差
3~4mm，不超过6mm
- 锚固环的三重作用：粘结、摩擦、阻压

3) 预应力的施加与维持

□ 预应力

- 地面工程中，预应力锚杆张拉控制应力不超过锚杆杆体强度标准值的0.75倍。
- 煤矿巷道锚杆预紧力一般为杆体屈服载荷的30%~50%。

不同材质与规格锚杆的预紧力值

编号	屈服强度/ MPa	预紧力/KN			
		Φ16mm	Φ18mm	Φ20mm	Φ22mm
Q235	240	24.1	30.5	37.7	45.6
BHRB335	335	33.7	42.6	52.6	63.7
BHRB400	400	40.2	50.9	62.8	76.0
BHRB500	500	50.3	63.6	78.5	95.0
BHRB600	600	60.3	76.3	94.2	114.0

□ 锚杆预紧扭矩与预紧力

- 预应力与螺母力矩、规格、加工精度、减摩垫片等有关。高预应力对锚杆结构、加工精度提出高要求。

$$P_0 = \frac{4\pi(1 + f_1)M}{2(s + \pi d_2 f_1) + \pi f_o (1 + f_1)(D_1 + d_0)}$$

$$P_0 = M/kd$$

f_1 —螺母与螺纹段摩擦系数； f_o —螺母、垫圈端面摩擦系数；

d_2 —螺纹中径，mm； d_0 —垫片内径，mm；

D_1 —螺母端部有效接触面外接圆直径，mm；

s —螺纹导程，mm， $s=nt$ ： n —螺纹头数； t —螺距，mm；

M —螺母预紧力矩，N.m。

● 螺母扭矩

- 螺母扭矩越大，预应力越高；
- 螺纹钢锚杆：300-600N·m；
- 扭矩倍增器，气动、液压扳手。

● 螺母与垫圈端面摩擦系数 f_0 。

- f_0 越小，k值越大；
- 减摩垫圈：高效减摩塑料垫圈，减少螺母、垫圈摩擦阻力。塑料垫圈的材质起关键作用。

● 螺母与螺纹段摩擦系数 f_1

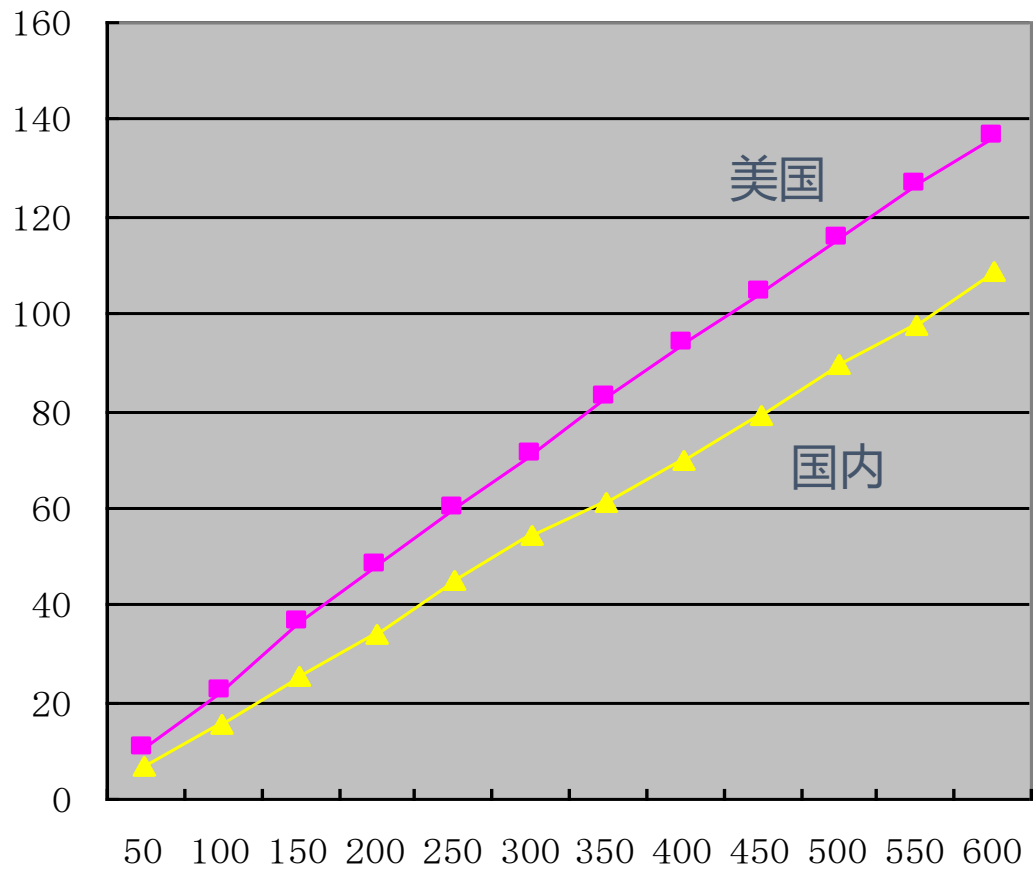
- f_1 越小， k 值越大。
- 提高锚杆螺纹与螺母加工精度。
- 优化螺母与螺纹段的强度、刚度、几何尺寸的配合。



(a) 美国加工

(b) 国内加工

国内外锚杆螺纹加工精度对比



国内外锚杆螺纹扭矩与预应力关系对比 (M24)

● 锚杆预应力施加设备

- 大扭矩预紧扳手
- 风动预紧扳手：265-880N·m
- 液压预紧扳手：340-1600N·m
- 扭矩倍增器：传动比9:1，最大输出扭矩 800N·m



风动预紧扳手

液压预紧扳手



扭矩倍增器

□ 预应力维持

- 锚杆安装后，受岩体变形破碎或裂隙闭合的影响，大多都会发生应力松弛
- 锚杆尾部双重/三重减摩
- 避免相邻锚杆的预应力干扰
- 二次加扭
- 建立预应力标准化，防止预应力高的锚杆先承压破断

4) 超张拉与预应力的有效扩散

超张拉是为了防止预应力损失，预紧时将刚性锚杆和柔性锚杆的预拉力分别提高为设计值的（105~110）%和（120~130）%。

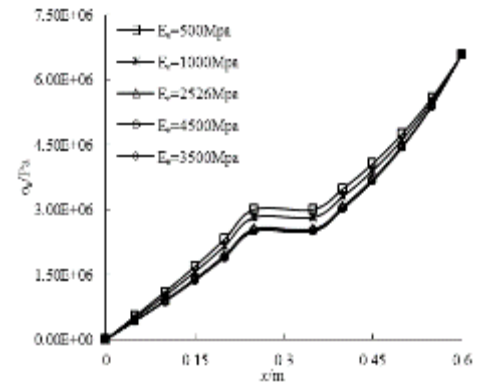
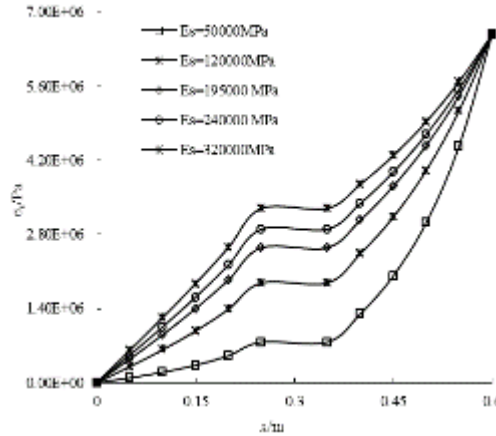
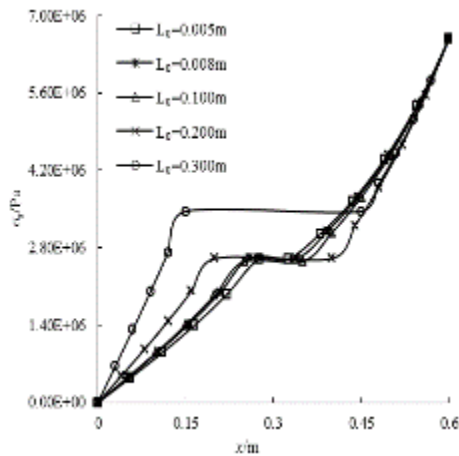
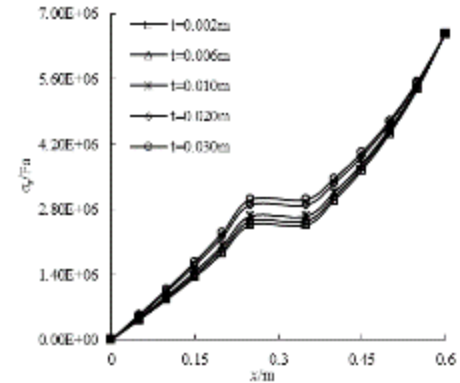
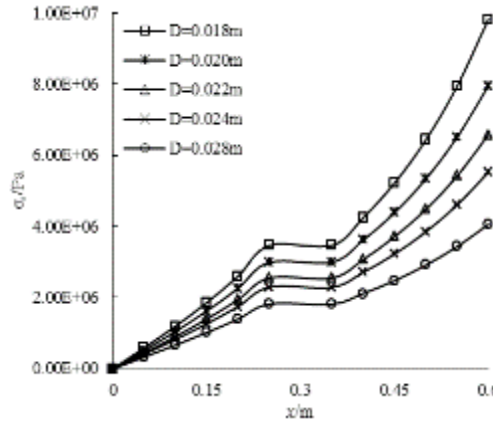
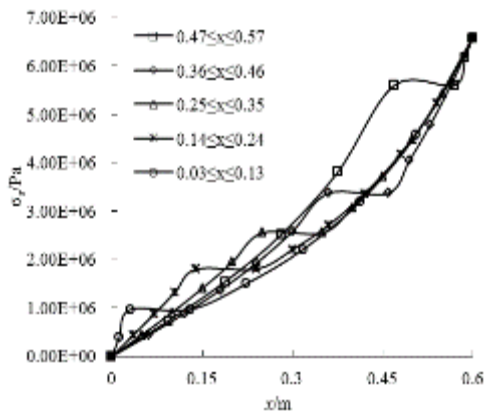
合理尺寸和刚度的托盘、金属网，是锚杆预应力有效扩散的介质。巷道顶板较平整、锚杆间排距大、预紧力高，要求托盘和钢筋网的规格匹配。

5) 控制锚固空洞

由于材料或施工因素，锚固层出现空洞，锚固空洞会导致锚杆与锚固层或锚固层与岩体之间粘结力损失或降低，使锚杆减弱对围岩的加固和保护作用。

- 钻孔、锚杆、树脂药卷“三径匹配”，杆体与钻孔直径差：6~8mm最佳，不超过10mm；药卷直径：与钻孔相差3~4mm，不超过6mm；
- 锚固剂安装期间适度均匀搅拌；
- 科学制定支护方案，抑制岩层离层；
- 预防杆体腐蚀。

树脂锚固体空洞

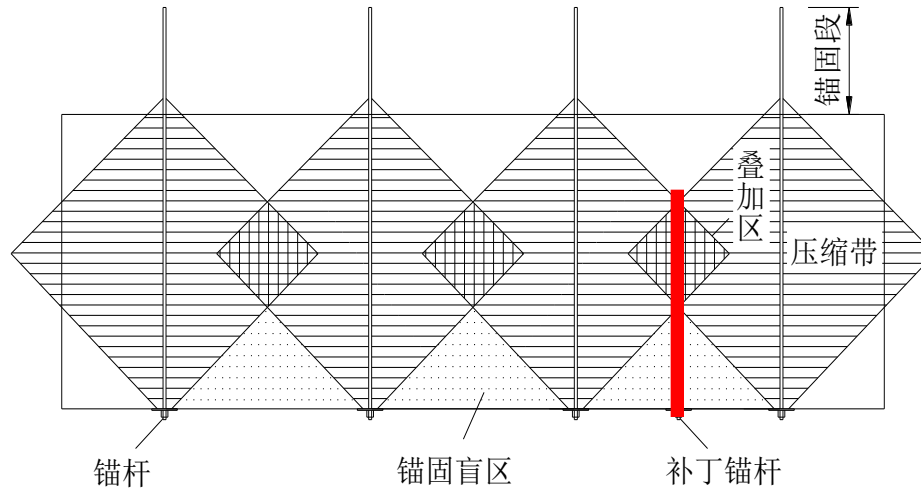


不同锚固层厚度下 σ_s 沿锚固方向上的分布曲线

不同空洞长度下 σ_s 沿锚固方向上的分布曲线

- “三径匹配”、均匀适度搅拌，是避免树脂锚固空洞的必要措施。

6) 巷道浅表锚固盲区的维护



- 锚固盲区分离了岩层，使之失去整体性；锚固盲区破碎，压缩带的下部失去约束作用，致使锚固力松弛，造成恶性循环。
- **对策：**①加大锚杆的预应力，减小锚固盲区的范围；②搭配高刚度的托盘和钢筋网网，将预应力和锚固力扩散至更大范围的岩体中；③采用短锚杆补丁支护，锚杆深入锚固叠加区即可。

No.

3

锚杆支护质量检测监测

$$\begin{cases} \frac{\sum f_i}{b \cdot p} + \frac{\sum F_i}{b \cdot P} \geq \sigma_{\min} \\ \max[s, p] < L_{\max} \end{cases}$$

式中， $\sum f_i$ 为每排锚杆的有效预紧力， $\sum F_i$ 为每排锚索的有效预紧力， σ_{\min} 为临界支护强度，取值0.1~0.3MPa； b 为巷道宽度， s 和 p 分别为锚杆的间距和排距， P 为锚索的排距， L_{\max} 为顶板的极限空顶距或煤帮的极限空帮距。

注意：

- 设计预紧力、安装预紧力和有效预紧力这三者的区别；
- 支护强度检验，施工中还有时间因素，即安装是否及时。

- **几何尺寸**：巷道断面、间排距、外露长度等
- **力学参数**：预紧力、锚固力等
- **安装质量**：金属网、钢带、托盘的安装质量
- **检测趋势**：锚杆施工质量显性化，直径与长度、预应力垫圈



预应力垫圈



扭矩扳手

■ 矿压监测

- 巷道表面收敛规律
- 巷道顶板离层规律
- 锚杆(索)受力规律
- 顶板围岩裂隙发育规律
- 巷道围岩应力分布规律

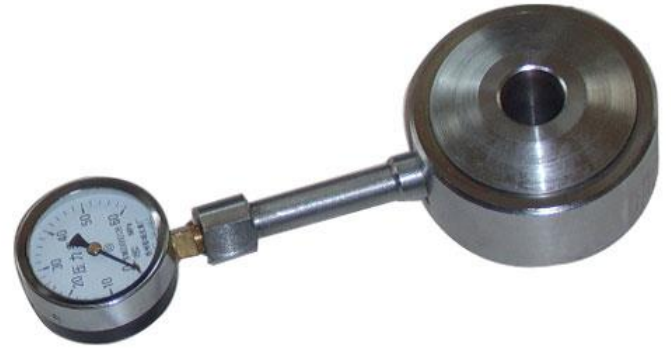


- 高效快掘质量评价
- 高效快掘矿压显现规律
- 反馈和优化支护参数
- 反馈和优化施工工艺
- 为其它工程提供指导

■ 常规矿压监测



螺母钩(表面位移)



测力计(液压枕)



多点位移计



岩层探测记录仪

■ 光纤光栅在线实时监测



顶板动态监测仪

振弦式钻孔应力计

电子压力表

● 性能特点

- ★ 本质安全，基于光纤传感技术，监测及传输通过光纤工作，传感器无需供电；
- ★ 稳定性强，不受潮湿及电磁干扰，长期工作无漂移；
- ★ 系统易扩展，可以实现多种传感器共用同一根光纤传输；
- ★ 可以实现远程分布式、多点同时测量；
- ★ 响应时间短，可以对矿井压力、应力、离层等显现进行及时捕获。

No.

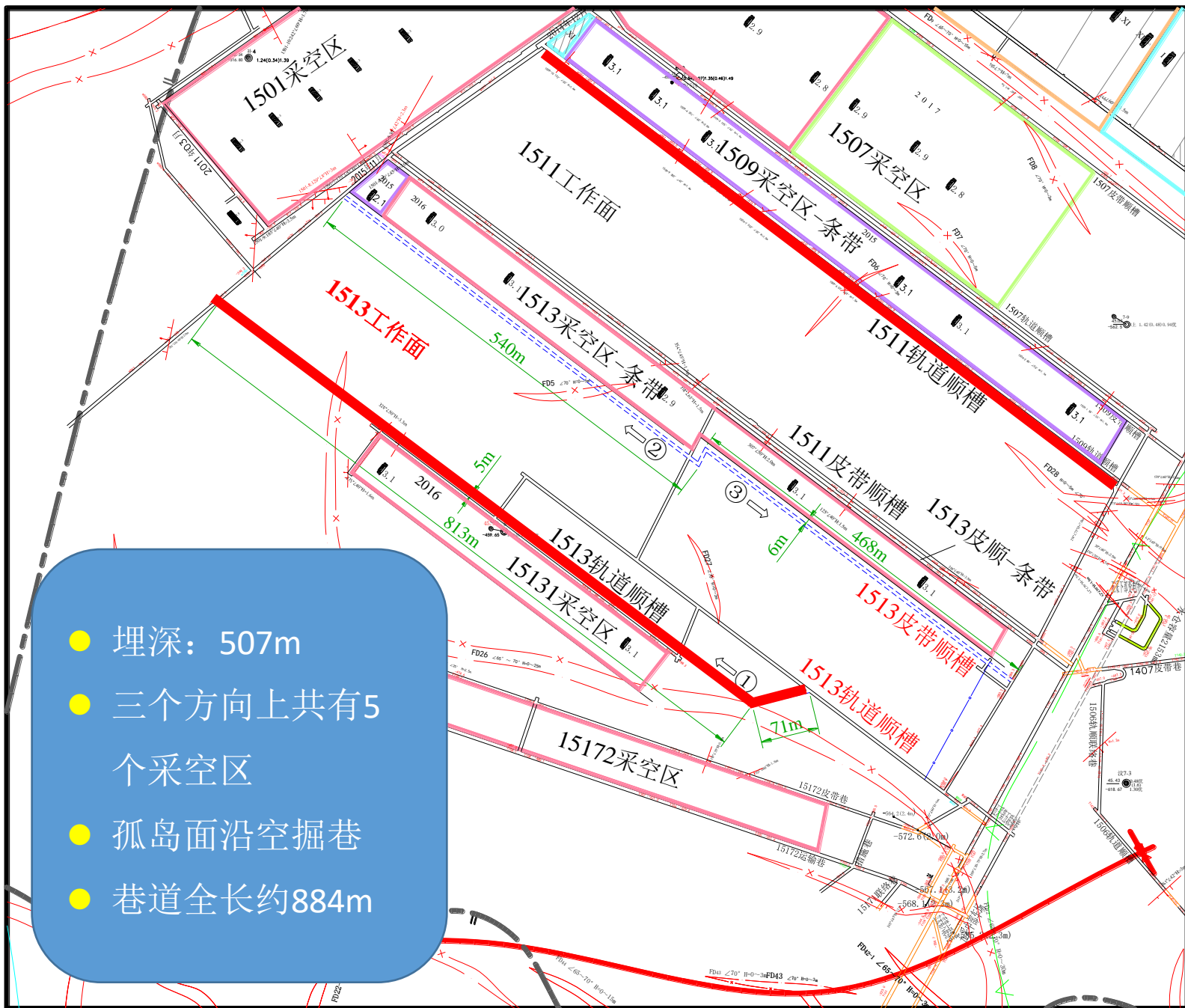
4

支护案例分析

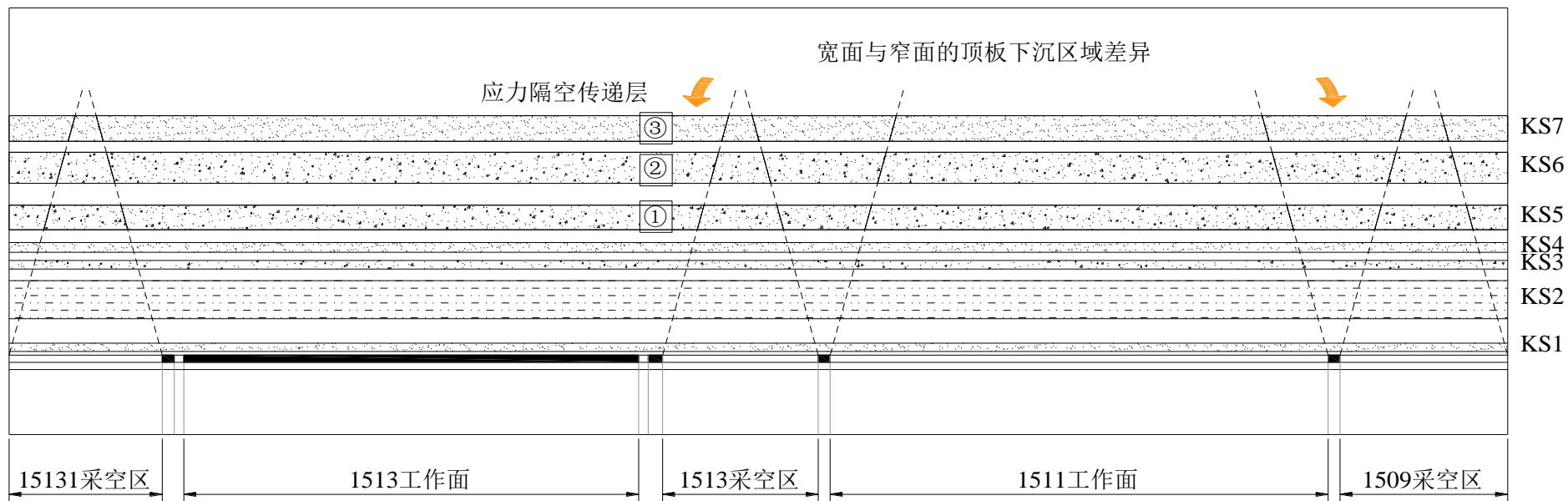
■ 基本条件

- 1513工作面开采3上煤层，煤层普氏硬度 $f = 1 \sim 2$
- 煤层厚度2.85~3.38m，平均3.11m
- 平均倾角 13°

钻孔→	补4		1513条带面综合柱状		8-5		1511面综合柱状		汶7-3	
序号	岩层	厚度/m	岩层	厚度/m	岩层	厚度/m	岩层	厚度/m	岩层	厚度/m
7	/		/		细砂岩	1.50	/		粉砂岩	1.20
6	/		粉砂岩	4.20	粉砂岩	5.32	泥岩	0.84	泥岩	0.44
5	粉砂岩	2.78	细砂岩	1.20	煤	0.30	煤	0.30	2煤	0.09
4	铝质砂岩	0.50	泥岩	4.75	粉砂岩	3.38	粉砂岩	10.75	泥岩	0.94
3	粉砂岩	23.95	2煤	0.20	细砂岩	3.57	细砂岩	4.58	粉砂岩	0.70
2	细砂岩	10.59	细砂岩	6.50	粉砂岩	0.96	中砂岩	4.23	细砂岩	0.83
1	泥岩	0.40	粉砂质泥岩	2.30	炭质粉砂岩	0.62	粉砂岩	2.80	中砂岩	14.02
0	3上煤	3.10	3上煤	2.80	3上煤	2.85	3上煤	3.20	3上煤	3.38
-1	粉砂岩	1.76	粉砂质泥岩	0.50	粉砂岩	3.12	泥岩	1.20	泥岩	1.02
-2	中砂岩	21.93	粉砂岩	4.20	细砂岩	27.98	粉砂岩	5.32	粉砂岩	3.48
-3	细/粉砂岩	6.80	/		3下煤	0.72	细砂岩	19.94	中砂岩	32.40



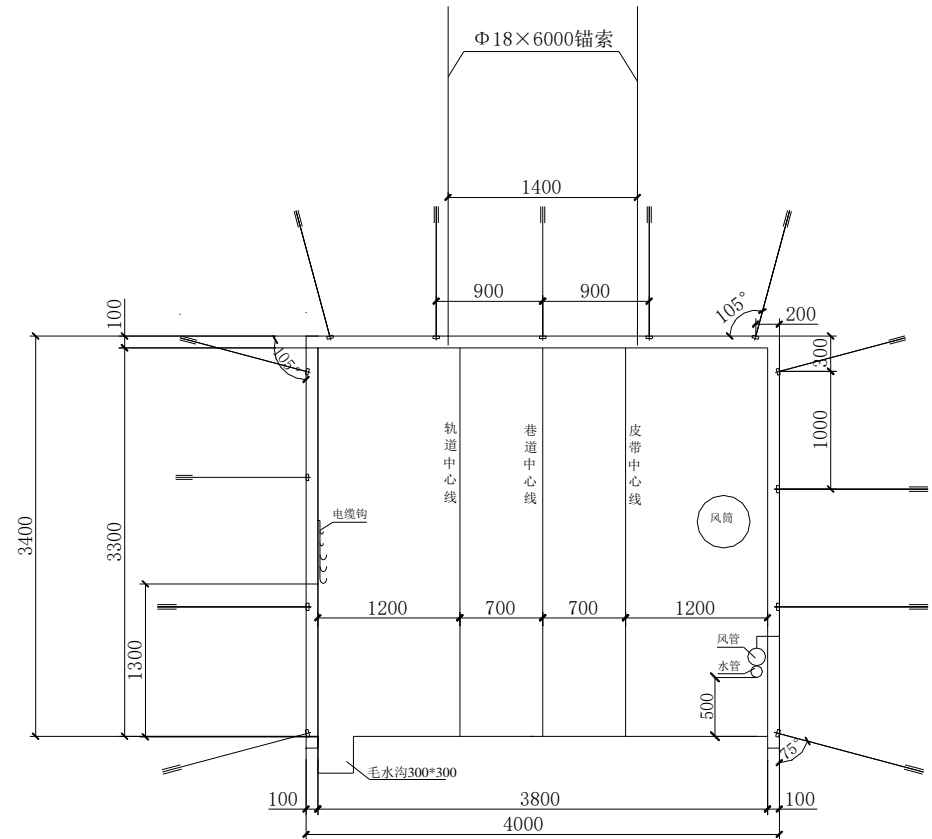
- 埋深：507m
- 三个方向上共有5个采空区
- 孤岛面沿空掘巷
- 巷道全长约884m

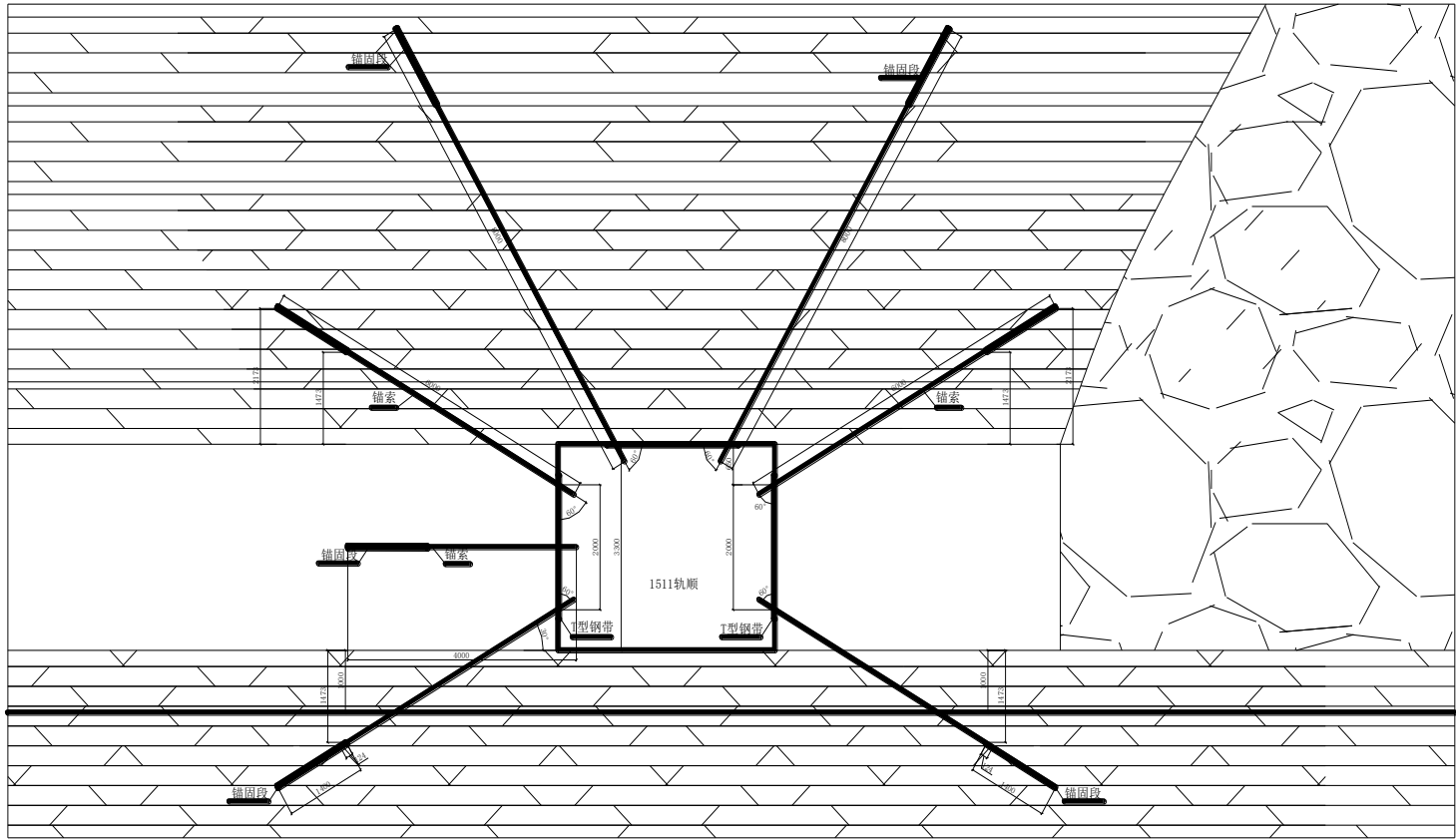


宽窄交替工作面“隔面来压”现象的发生机理

■ 1511轨顺掘进支护方案

- 留5m小煤柱掘巷
- 顶板：MSGLW-500，
Φ20×2100mm左旋无纵肋树脂
锚杆，0.9m×1.1m，Φ17.8×6m
锚索，2-0-0-2或2-0-2
- 煤帮：MSGLW-335，
Φ18×2100mm右旋无纵肋全螺
纹钢锚杆，1.0m×1.1m





1511轨顺加固方案



1511轨顺维护情况

■ 1513轨顺的工程地质条件评估

- 巷道埋深大、原岩应力高，顶板岩层变化频繁，支护方案应具有较高适应性
- 最大埋深达617m，推算垂直应力平均为13.7MPa、最大达16.7MPa，侧压系数1.2~1.5之间，水平应力高达25MPa，在这种应力环境开挖的巷道，围岩必然向自由空间剧烈变形。从3上煤顶底板岩层赋存情况看，顶板岩层变化频繁，存在着坚硬中砂岩直接覆盖（钻孔：汶7-3）、薄层泥岩直接顶（钻孔：补4）、中厚层直接顶（钻孔8-5）等多种情况，而参照相邻工作面的综合柱状图可知巷道具有复合顶板赋存特点，这些多变的条件对巷道支护方案的适应性提出了很高的要求。

■ 1513轨顺的工程地质条件评估

- 1513孤岛面三向多面临空，问题突出，沿空掘巷围岩控制难度较大
- 1513工作面的北、西、南三个方向上数十米范围内共有5个采空区，多个采空区包围形成1513孤岛工作面。该工作面受到多个残余支承压力的影响，维护环境恶劣，在局部转角、采掘交错地段更是出现多个应力叠加。1513工作面两巷距离采空区仅有5m煤柱，在相邻大采高工作面覆岩强烈活动的影响下，采空区边缘残留煤柱产生较大损伤，承载能力急剧下降。如此工程环境下掘进巷道，不稳定因素增多、安全隐患突出，技术难度极大。

■ 1513轨顺的工程地质条件评估

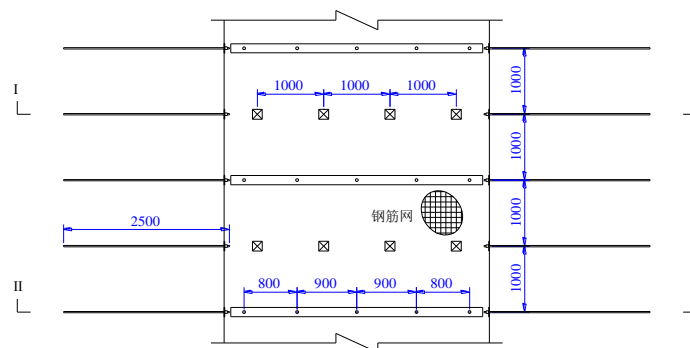
- 类似条件下的巷道出现剧烈变形，支护效果较差
- 类似条件下的1511工作面两巷已经掘出并回采一定距离，从当前维护情况来看，巷道出现了较为剧烈的变形，两帮变形尤其严重，最大变形量约1.3m。而参考条件相似的1507工作面，该工作面的轨道顺槽两帮鼓出现象极为明显，鼓出距离达1.3-2.0m，超前支护段全断面来压变形，变形后所余空间仅能通过1人，超前影响距离超过100m，而部分地段4.0m长锚索可见整体松出。这种维护状态无法满足工作面正常生产的巷道断面需求，顶板的安全性更难以得到保障。

■ 1513轨顺的工程地质条件评估

- 现有支护难以应对强矿压显现，技术短板凸显，亟需改进
- 从工程应用的现场反馈判断，巷道当前采用的“锚杆+锚索”组合支护方式难以应对强矿压显现，围岩变形并无缓和迹象，核心原因有三点：①力学性能协调度不足，容易被各个击破。②顶板锚固层厚度较小。③支护密度高、钻孔破坏岩体。以往简单条件下成熟的支护技术无法适应该孤岛工作面巷道维护，亟需技术创新，形成适应性更强的新型支护技术。

综上所述，1513轨道顺槽属于大埋深、高应力、强采动、多变化、复合易碎顶板条件下的小煤柱沿空掘巷，支护难度客观存在，需展开针对性研究和工业性试验。

■ 轨顺：实体煤段支护方案一



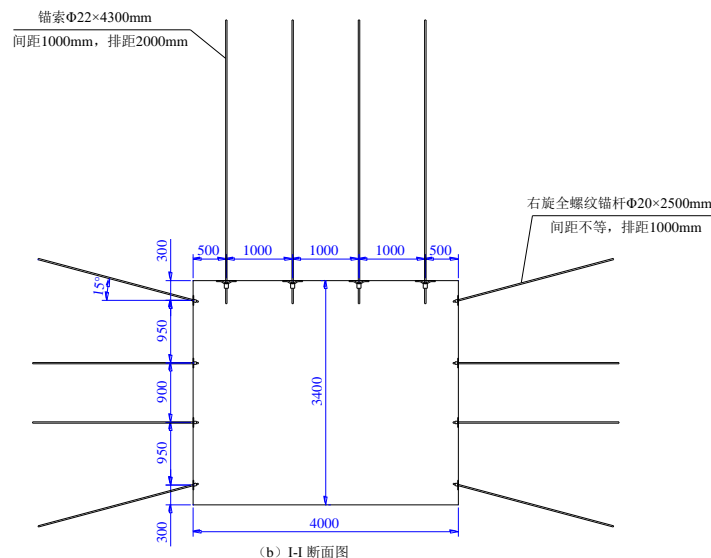
(a) 巷道支护俯视图

- **顶板**：锚杆短支：每排采用5根 $\Phi 22 \times 2500\text{mm}$ 左旋螺纹钢锚杆（MSGWL-500）压M5钢带和 $\Phi 6.5\text{mm}$ 钢筋网支护，间距不一，排距2.0m。

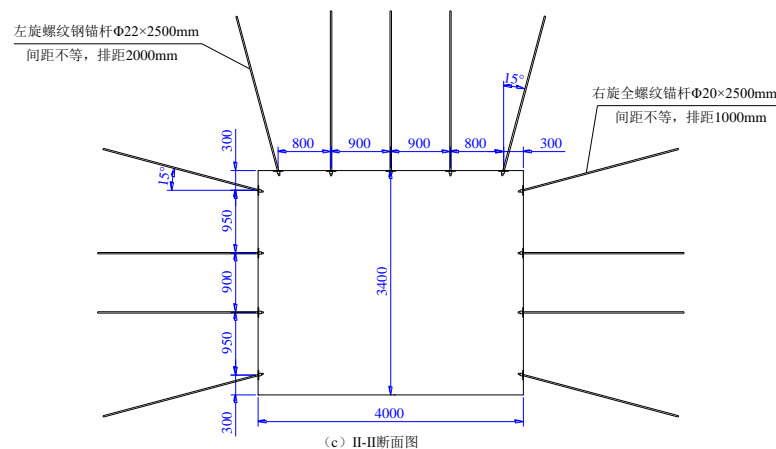
- 锚索长支：每排采用4根 $\Phi 22 \times 4300\text{mm}$ 单体锚索（SKP22-1/1860）支护，排距2.0m。

- **煤帮**：煤帮每排各采用4根 $\Phi 20 \times 2500\text{mm}$ 右旋螺纹钢锚杆（MSGWL-335）压M4钢带和菱形金属网支护，间距不一，排距1000mm。

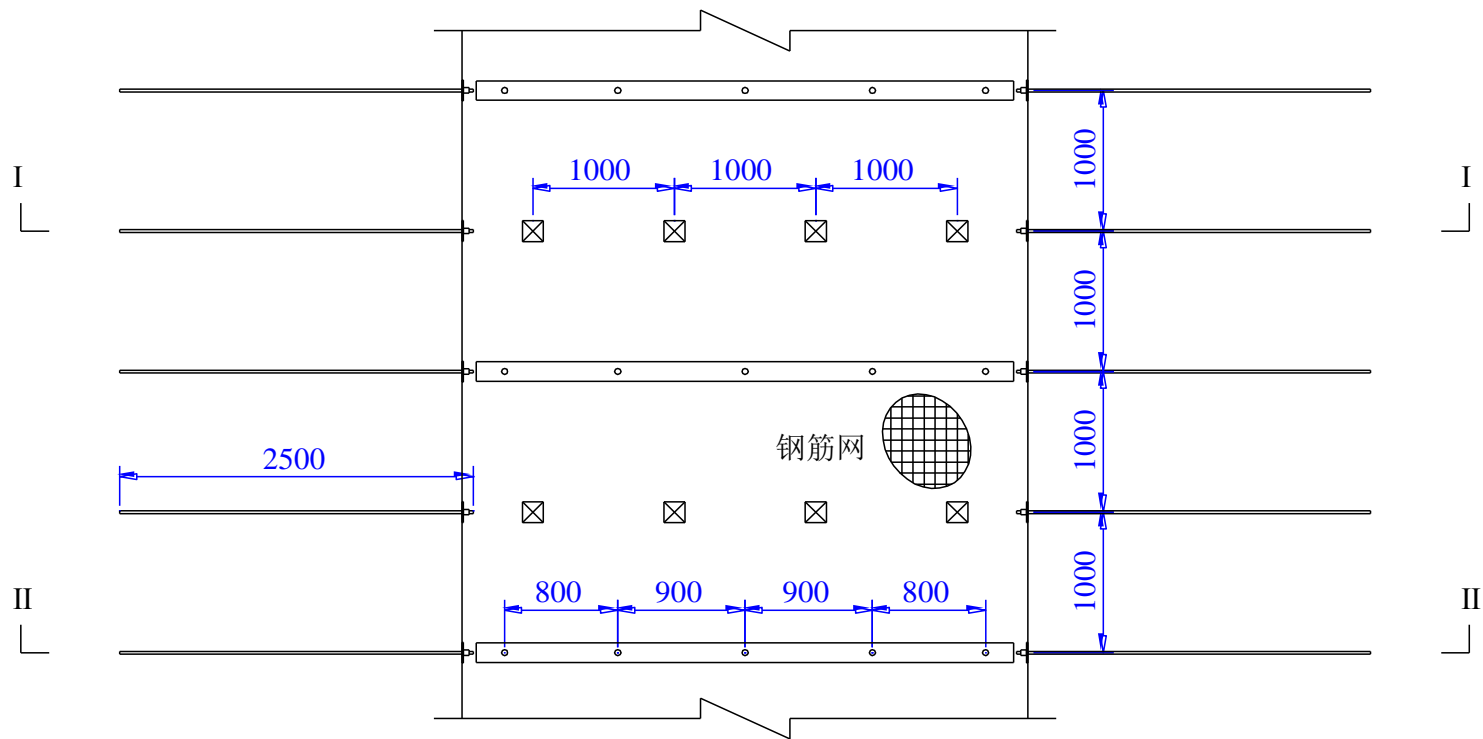
- 角度、预紧力、预拉力、刚度



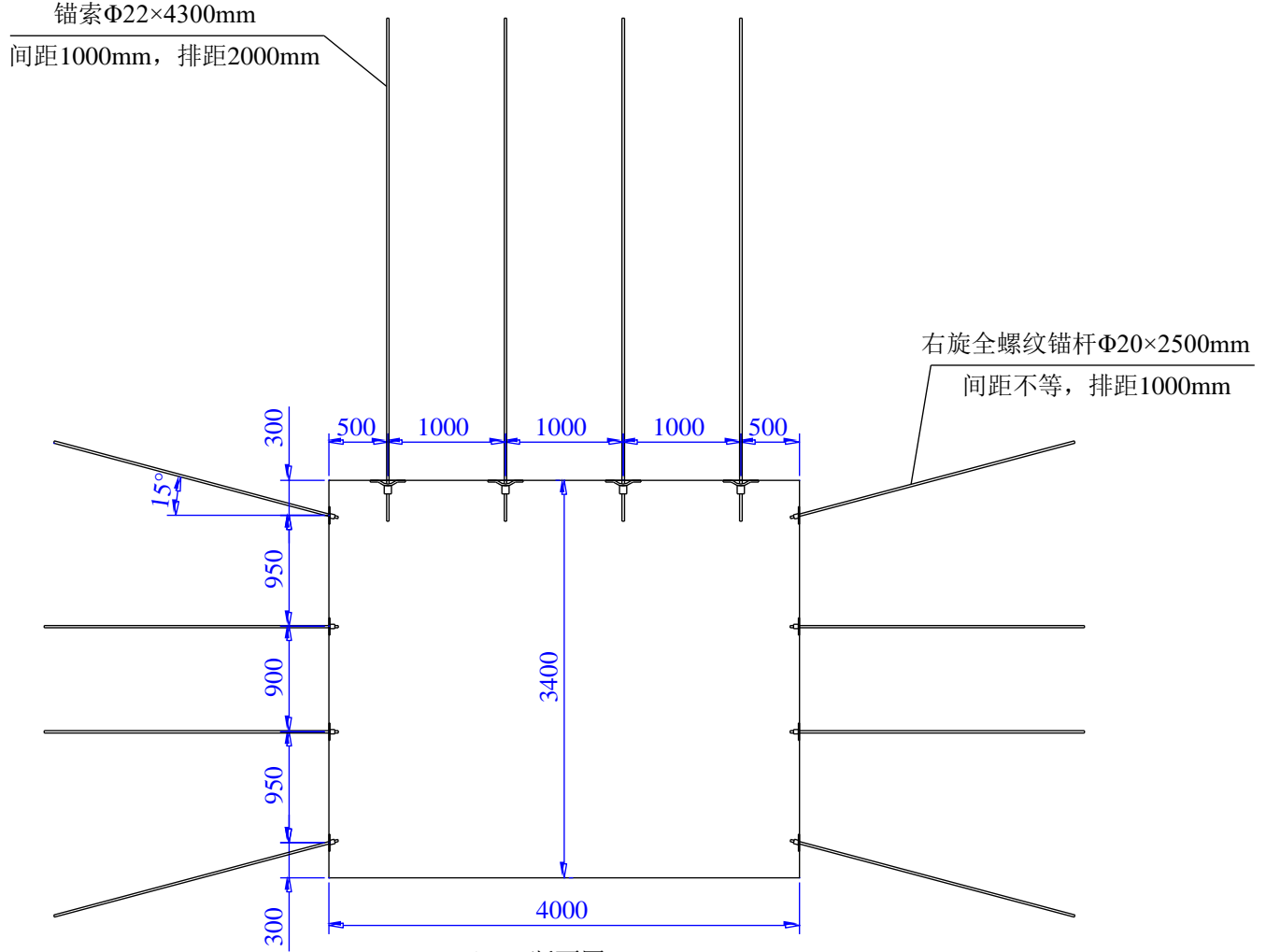
(b) I-I断面图



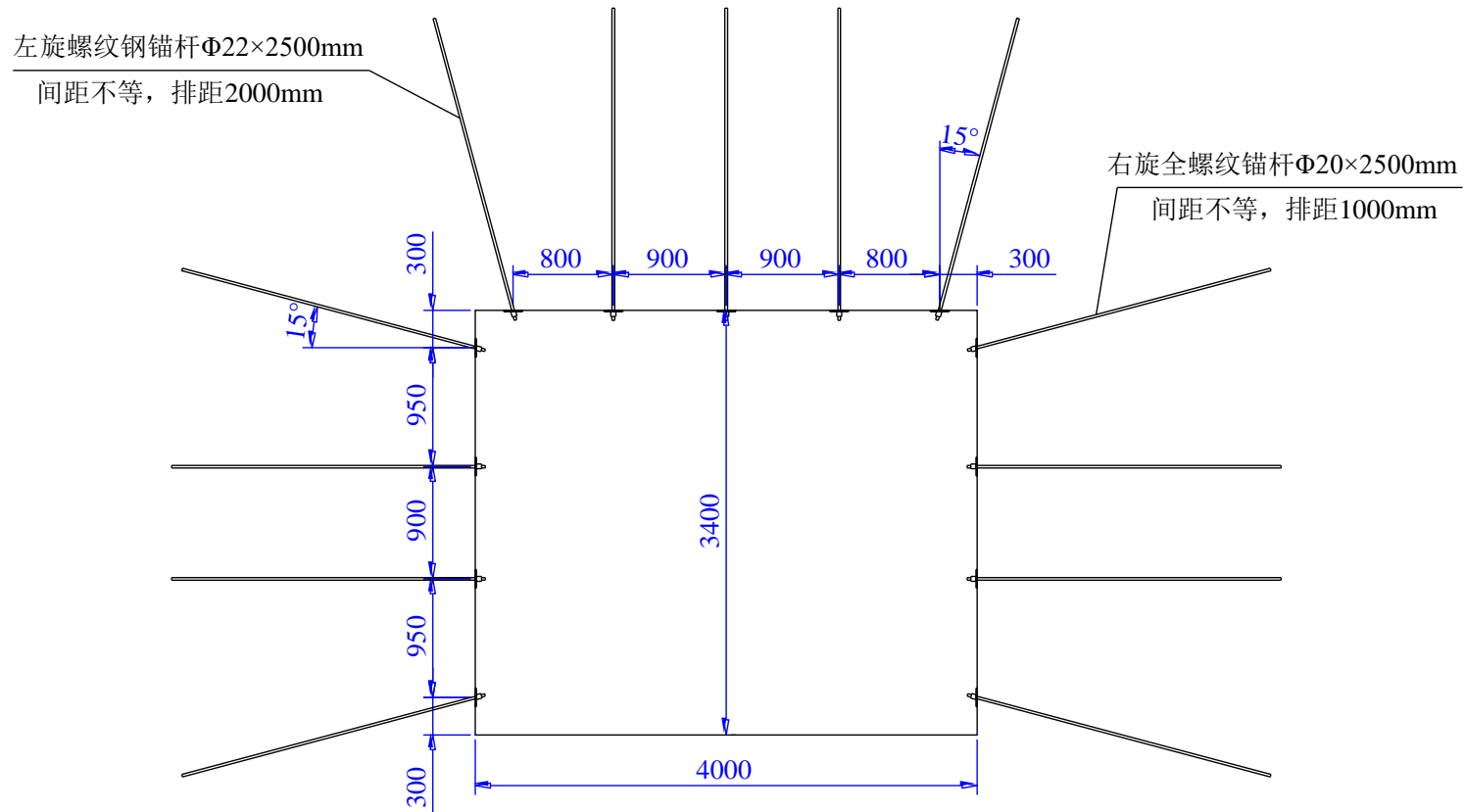
(c) II-II断面图



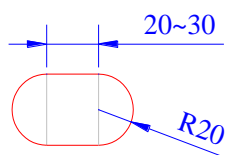
(a) 巷道支护俯视图



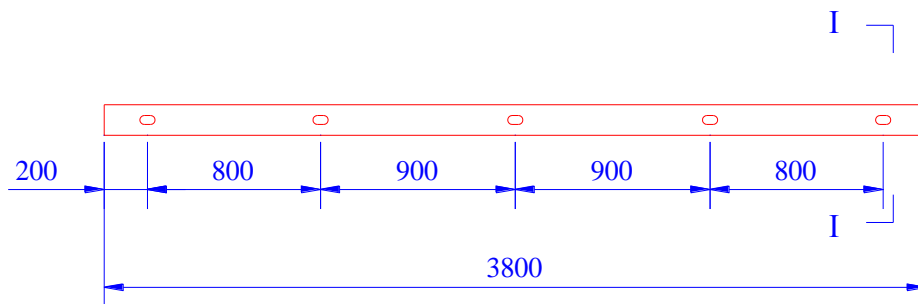
(b) I-I 断面图



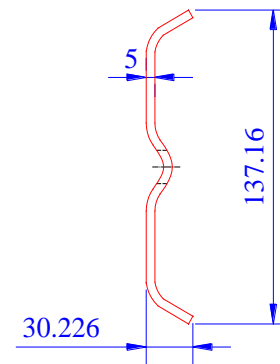
(c) II-II断面图



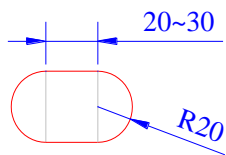
长圆形锚杆孔



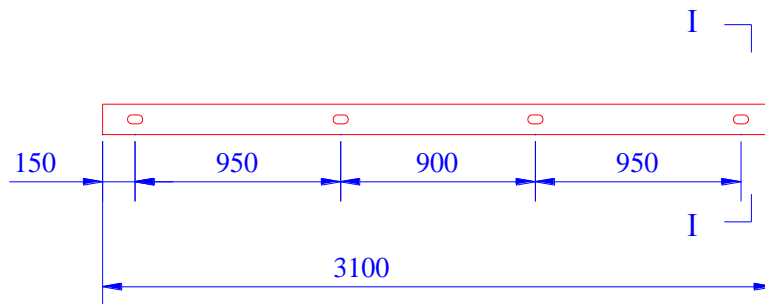
顶板3.8m长M5型钢带加工示意图



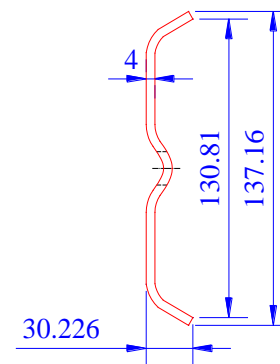
I—I剖面



长圆形锚杆孔



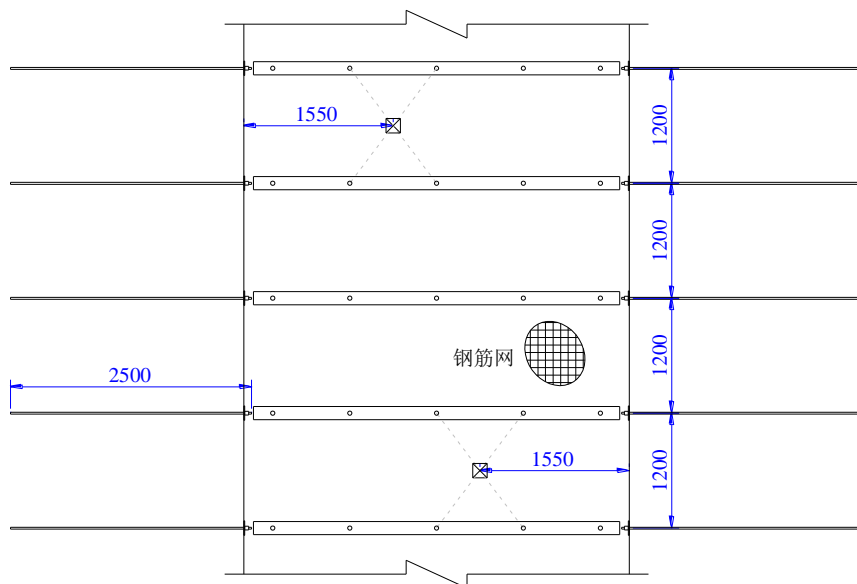
帮部3.1m长M4型钢带加工示意图



I—I剖面

■ 轨顺:实体煤段支护方案二

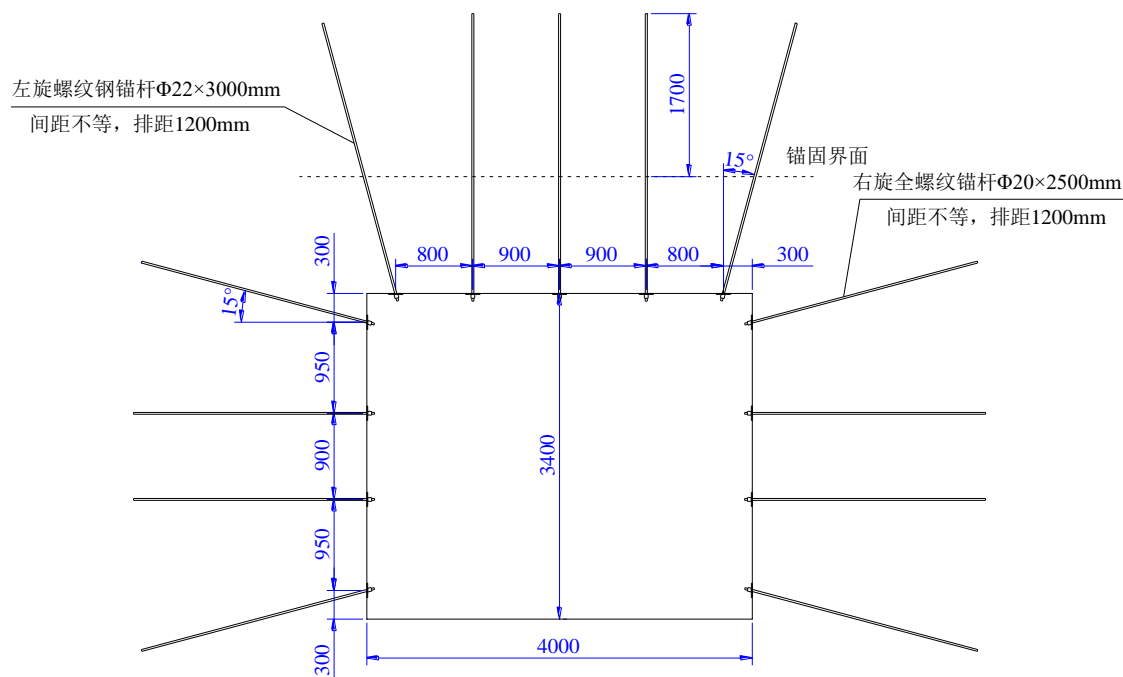
- 顶板：锚杆压M5钢带和 $\Phi 6.5\text{mm}$ 钢筋网支护，间距不一，排距1.2m。预紧扭矩不小于 $300\text{N}\cdot\text{m}$ 。每3.6m施工1根 $\Phi 17.8 \times 6300\text{mm}$ 单体锚索。



(a) 巷道支护俯视图

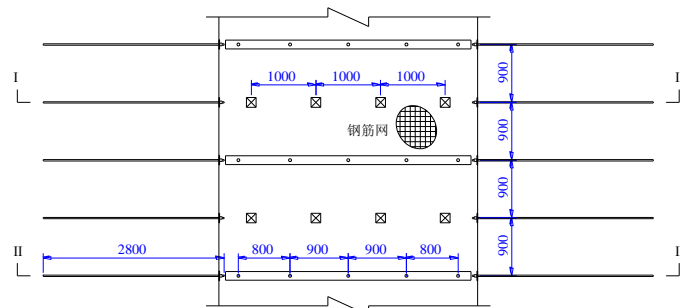
- 煤帮：锚杆压M4钢带和菱形金属网支护，排距1.2m。预紧扭矩不小于 $200\text{N}\cdot\text{m}$ 。

- 煤帮顶角和底角锚杆配调心球垫倾斜 15° 安装，其余锚杆全部垂直岩面安装。



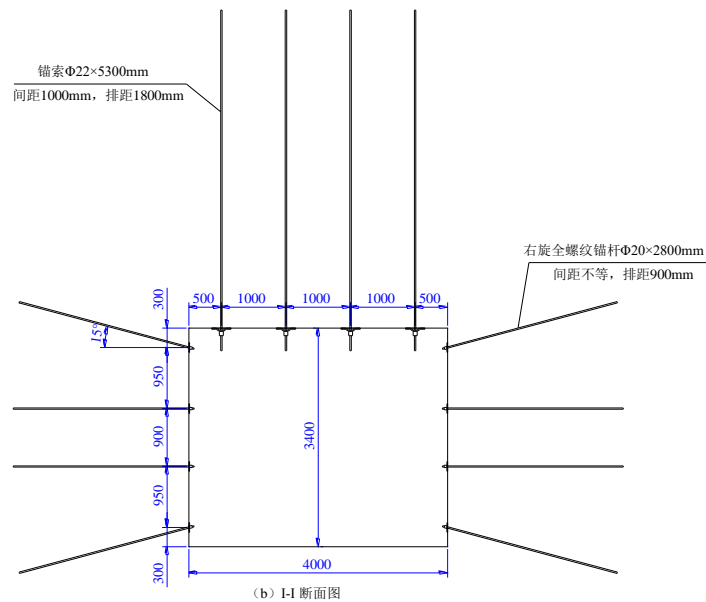
(b) 巷道支护断面图

■ 轨顺：沿空掘巷段支护方案一

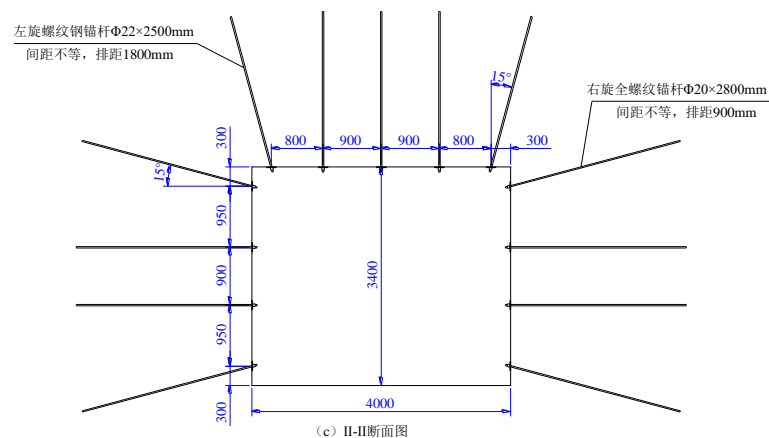


(a) 巷道支护俯视图

- 顶板：锚杆短支：每排采用5根 $\Phi 22 \times 2500\text{mm}$ 左旋螺纹钢锚杆（MSGWL-500）压M5钢带和 $\Phi 6.5\text{mm}$ 钢筋网支护，间距不一，排距1800mm。
- 锚索长支：每排采用4根 $\Phi 22 \times 5300\text{mm}$ 单体锚索（SKP22-1/1860）支护，排距1.8m。
- 煤帮：煤帮每排各采用4根 $\Phi 20 \times 2800\text{mm}$ 右旋螺纹钢锚杆（MSGWL-335）压M4钢带和菱形金属网支护，间距不一，排距900mm。
- 角度、预紧力、预拉力、刚度。



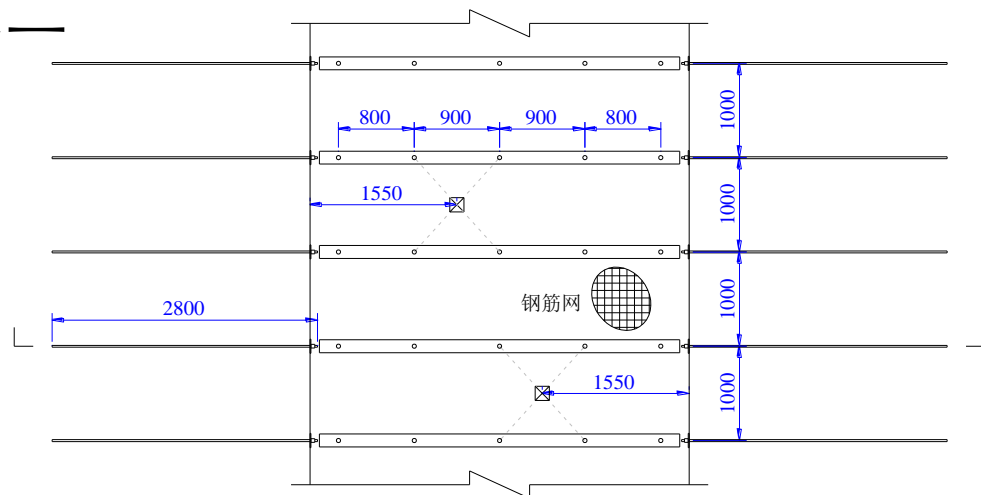
(b) I-I 断面图



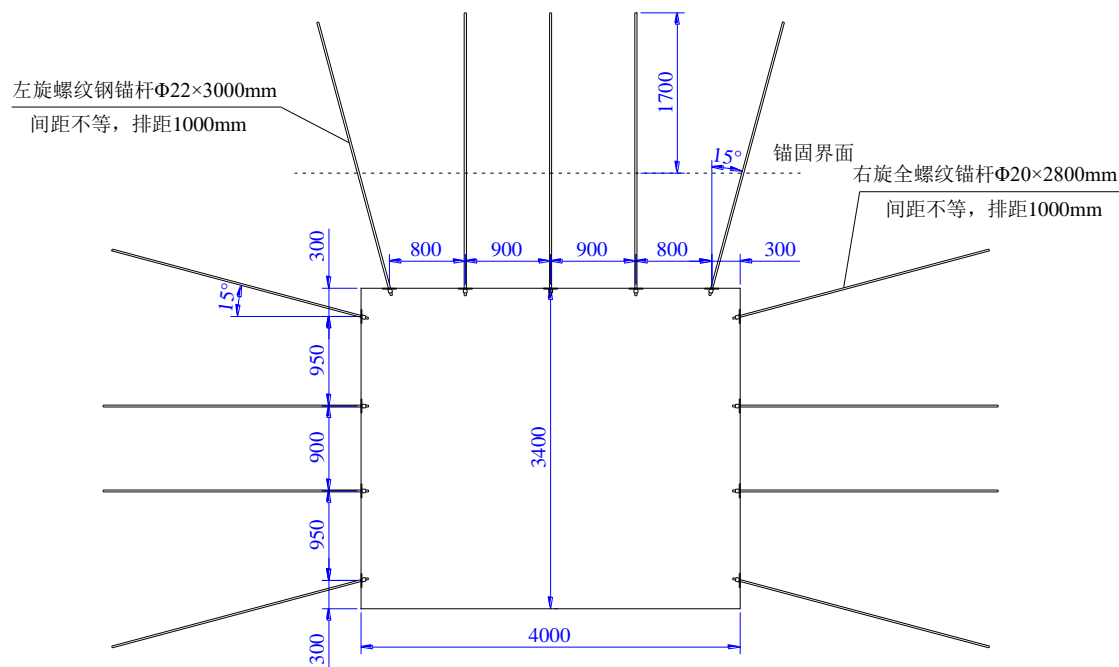
(c) II-II 断面图

■ 轨顺:沿空掘巷段支护方案二

- 顶板：锚杆压M5钢带和 $\Phi 6.5\text{mm}$ 钢筋网支护，间距不一，排距1m。预紧扭矩不小于 $300\text{N}\cdot\text{m}$ 。每2m施工1根 $\Phi 17.8 \times 6300\text{mm}$ 单体锚索。
- 煤帮：锚杆压M4钢带和菱形金属网支护，排距1m。预紧扭矩不小于 $200\text{N}\cdot\text{m}$ 。
- 煤帮顶角和底角锚杆配调心球垫倾斜 15° 安装，其余锚杆全部垂直岩面安装。



(a) 巷道支护俯视图



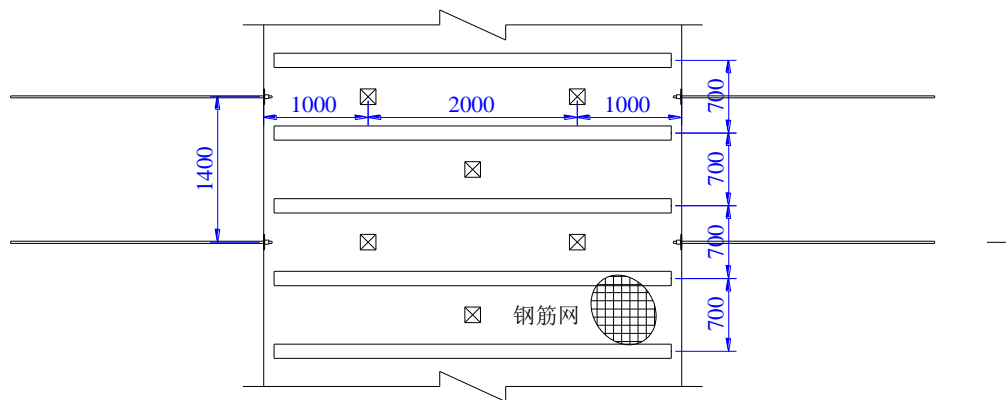
(b) 巷道支护断面图

■ 构造破碎段支护方案

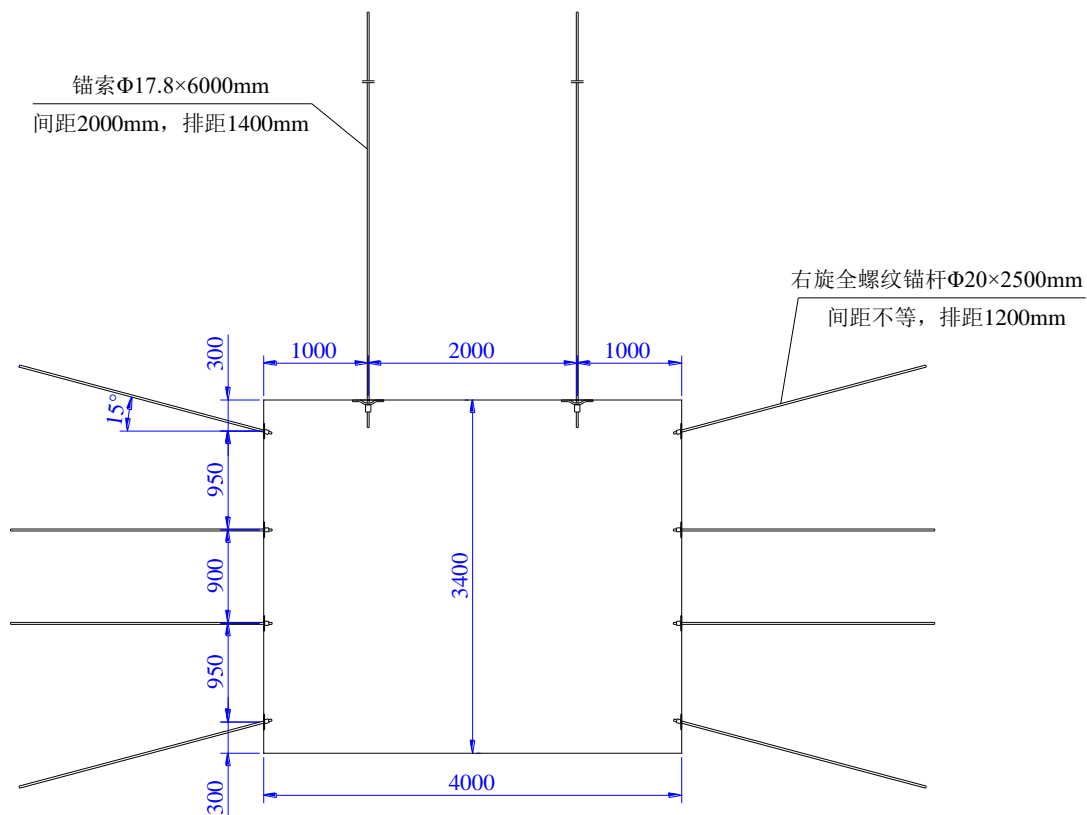
- 12#矿用工字钢棚，棚距700mm

- 棚腿应外扎 5° 安装，底角作窝，将棚腿埋入底板150mm

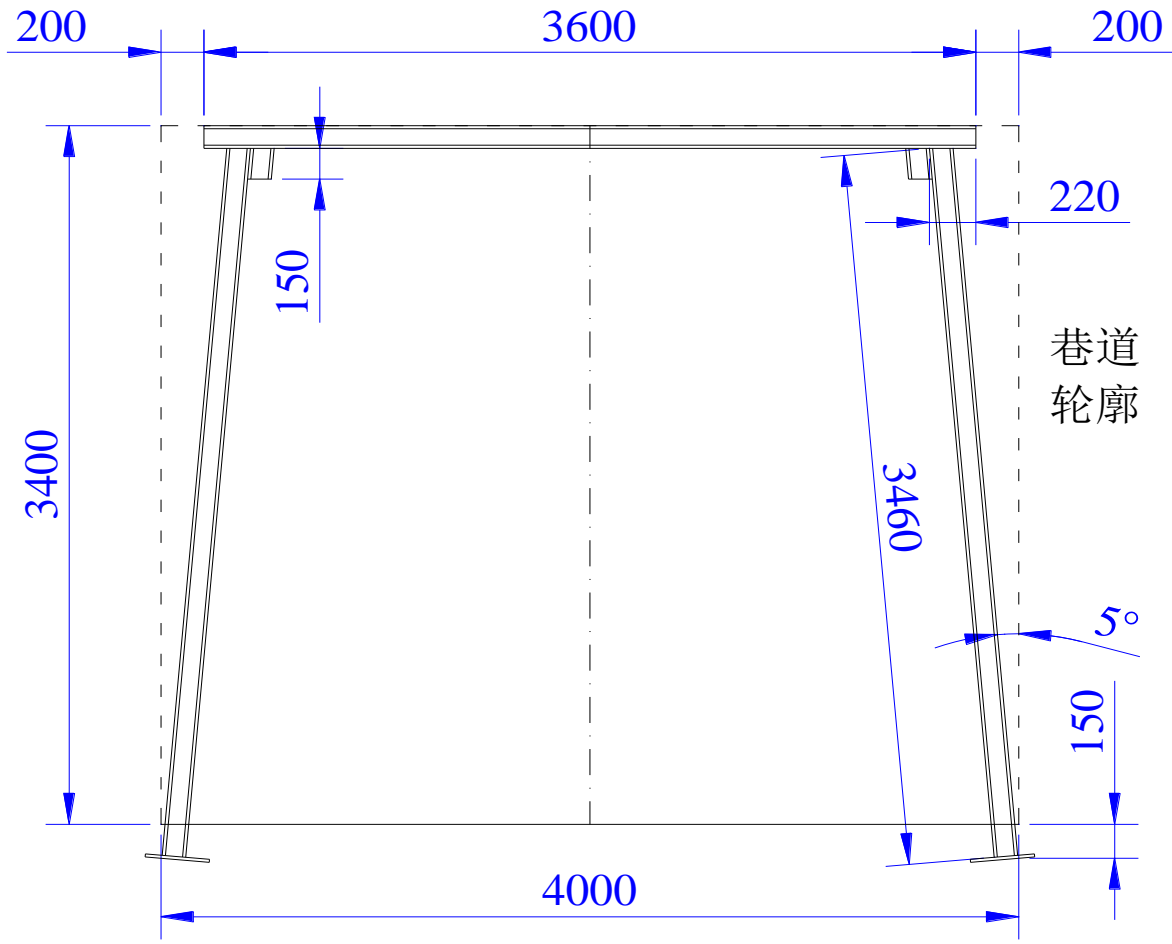
- 架棚后，及时对顶板和两帮进行锚固，排距1400mm



(a) 巷道支护俯视图

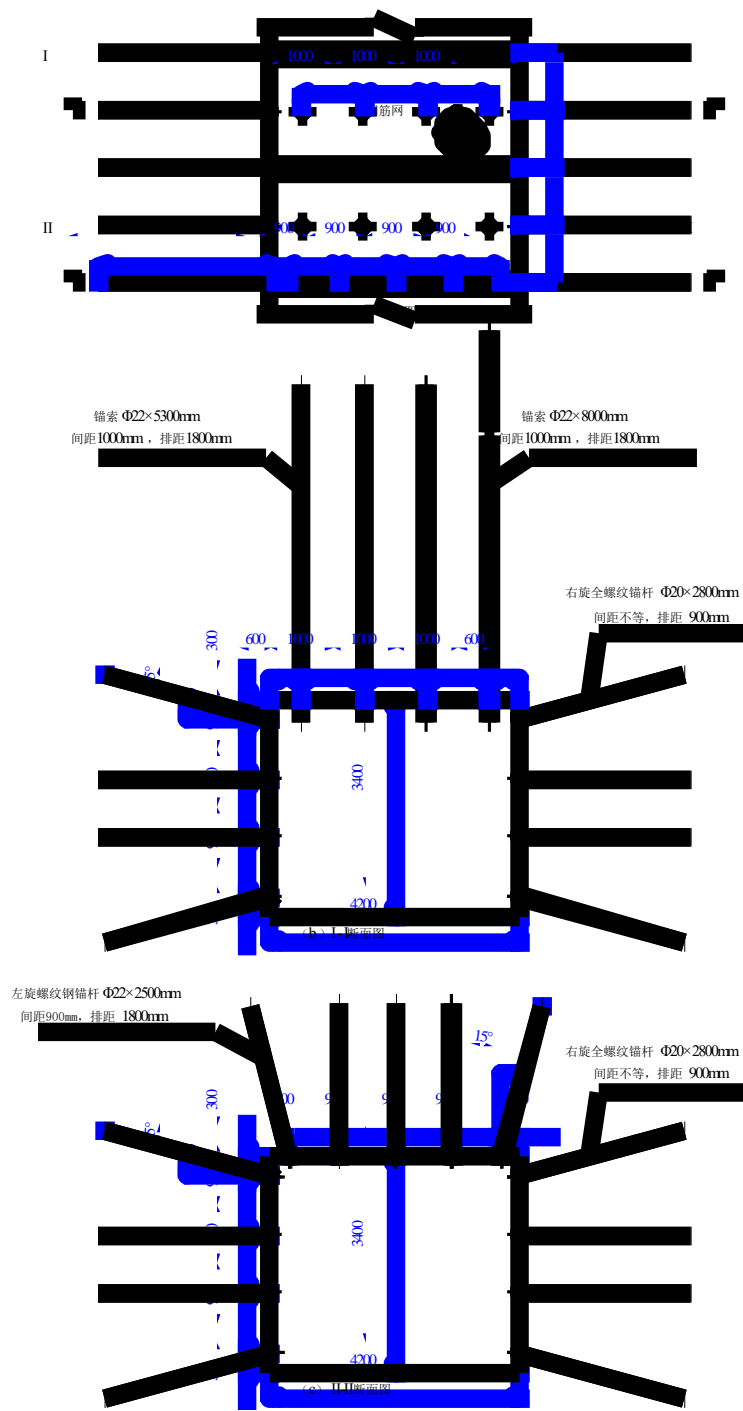


(b) 巷道支护断面图

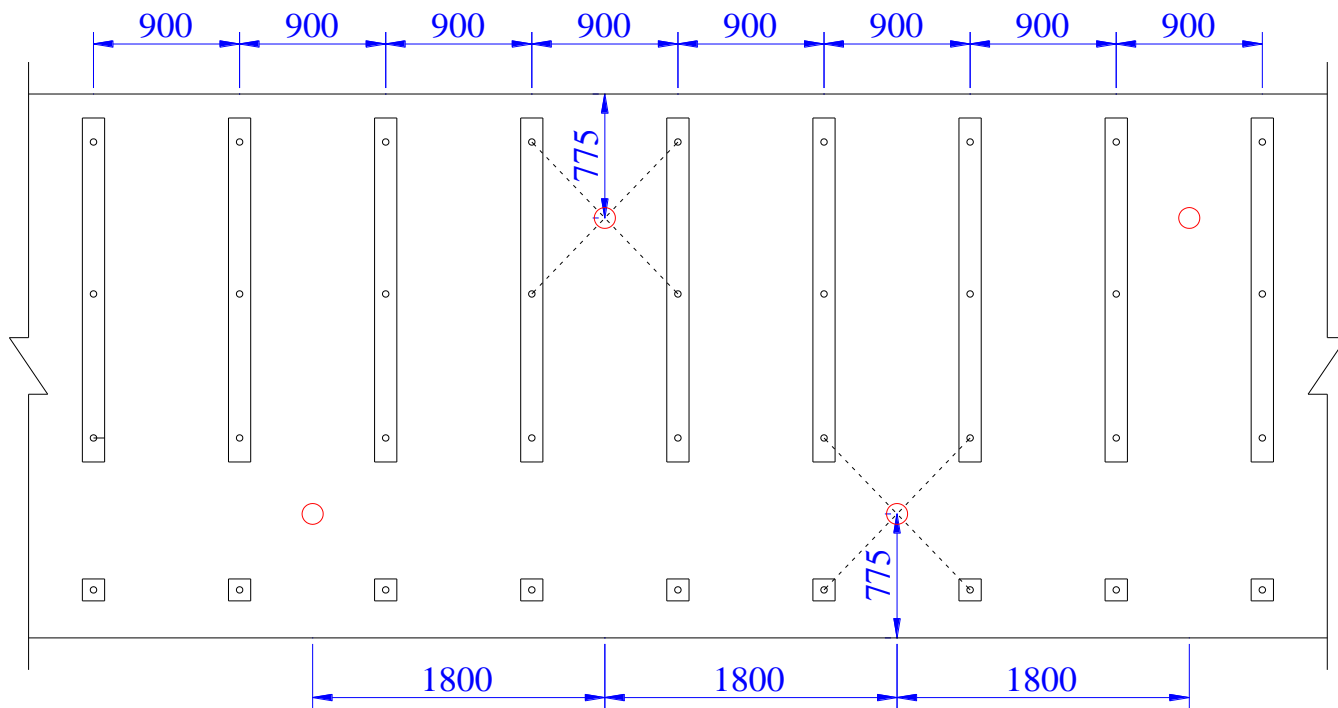


■ 皮顺：“卸压-锚固”一体化治理方案

- 顶板锚杆短支：每排采用5根 $\Phi 22 \times 2500\text{mm}$ 左旋螺纹钢锚杆（MSGLW-500）压M5钢带和 $\Phi 6.5\text{mm}$ 钢筋网支护。
- 顶板锚索长支：每排采用3根 $\Phi 22 \times 5300\text{mm}$ 单体锚索（SKP22-1/1860）、1根 $\Phi 22 \times 8000\text{mm}$ 单体锚索（SKP22-1/1860）支护。
- 煤帮：煤帮每排各采用4根 $\Phi 20 \times 2800\text{mm}$ 右旋螺纹钢锚杆（MSGLW-335）压M3钢带和菱形金属网支护。

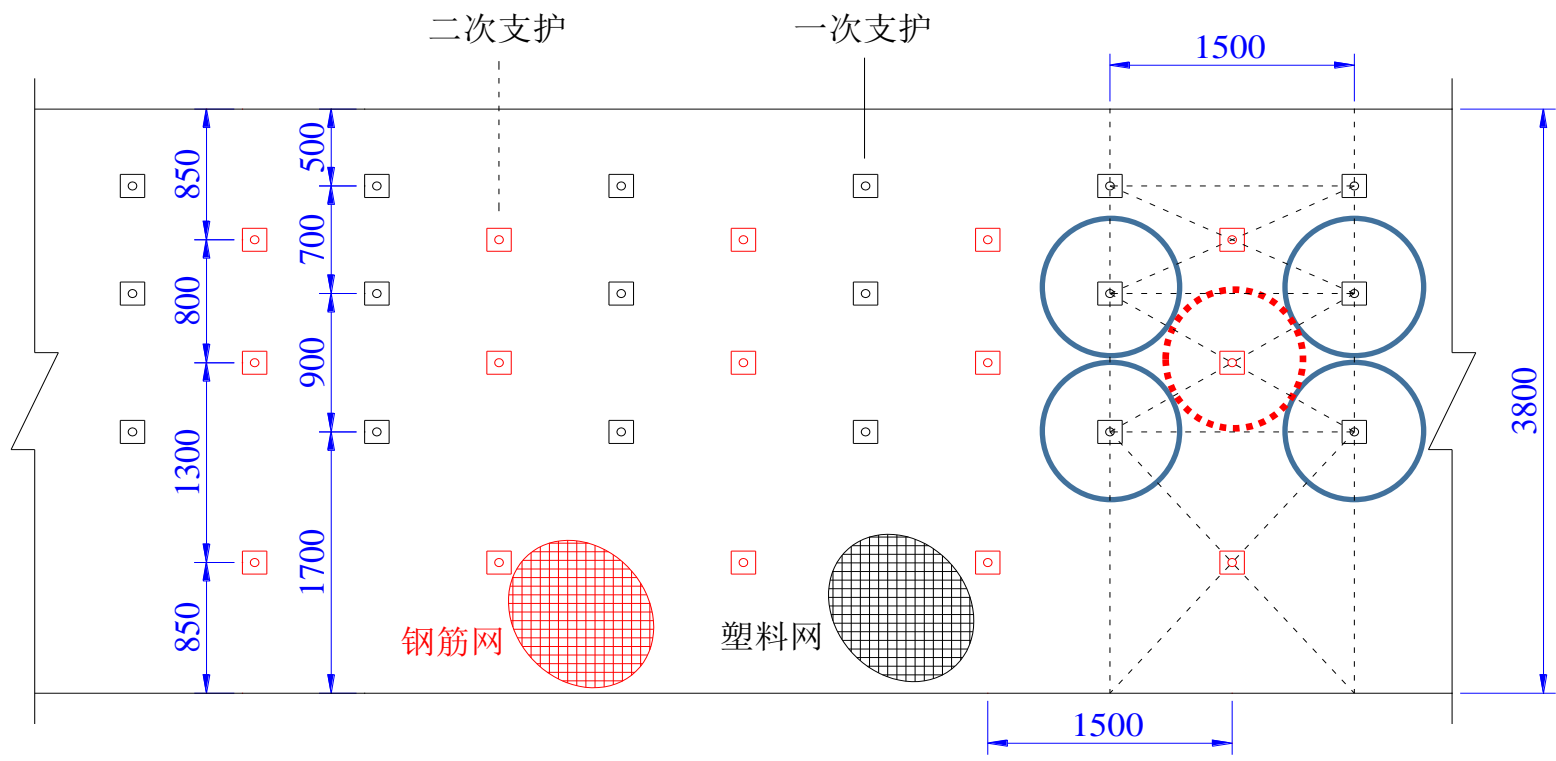


■ 皮顺：“卸压-锚固”一体化治理方案



(d) 实体煤帮卸压钻孔布置

- 实体煤帮每两排施工1个卸压钻孔，引导采动应力向深部转移，为巷道营造低应力环境。
- 钻孔位于周边4根锚杆中心，避免干扰锚固应力。钻孔直径 $\Phi 125$ ，深度10m，排距1.8m。滞后迎头20~40m择机施工。



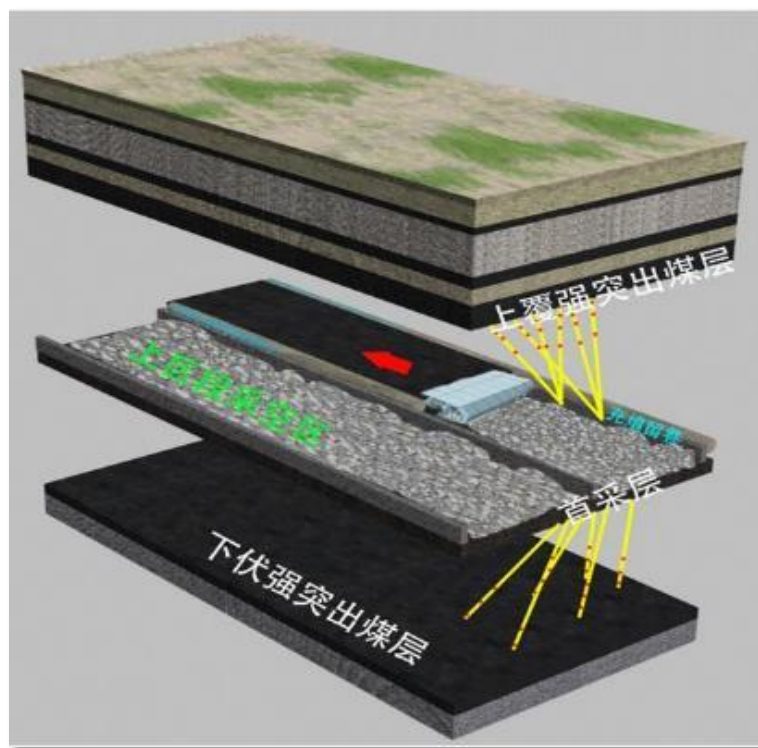
No.

5

煤巷掘进与支护的发展趋势

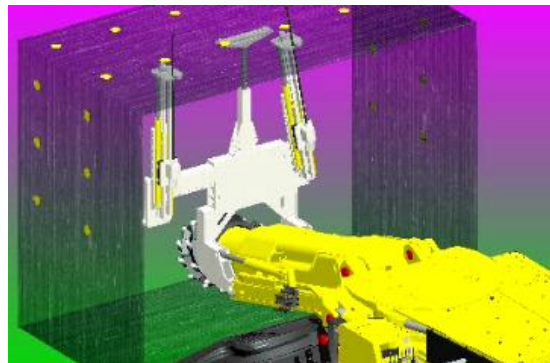
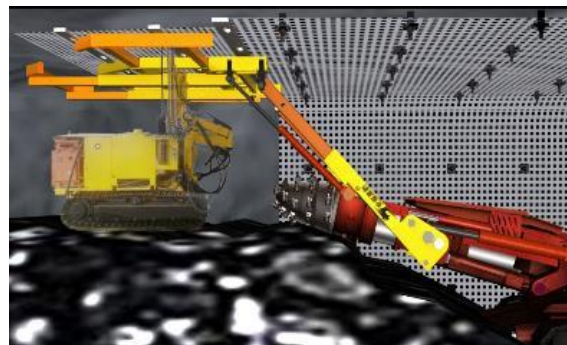
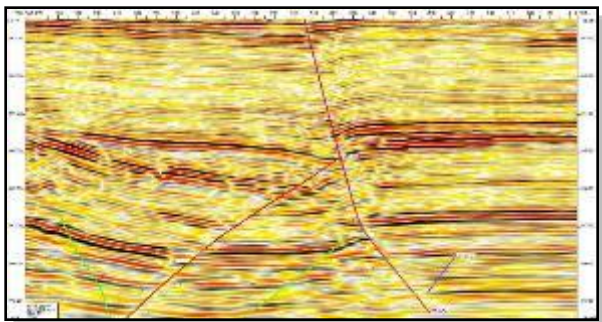
□ 趋势：煤巷锚杆支护技术与卸压开采统筹考虑

- 从开拓开采源头出发，统筹考虑采掘面面临的煤与瓦斯突出、动压、冲击矿压、突水等技术挑战，选择安全层（煤层、煤线或软弱岩层）首先开采，通过大范围区域卸压，消除或降低突出和冲击矿压等动力灾害，实现煤与伴生资源协调开采和采动巷道的科学维护。



□ 巷道快速掘进的四大保障（地质、支护、装备、施工组织）

- 通过精细勘探，查明细微地质构造、地质异常体、地质构造
- 实现破岩、装岩、运岩和支护工序的自动化同步作业，优化关键技术施工路线，实现高效快速掘进与支护同步作业工艺



5.2 掘进装备：主要功能的一体化

使用现代化机械完成掘进的破、装、运、支工序，达到加快掘进速度和降低工人劳动强度的目的。

机械化设备

地质条件复杂

机动、灵活设备

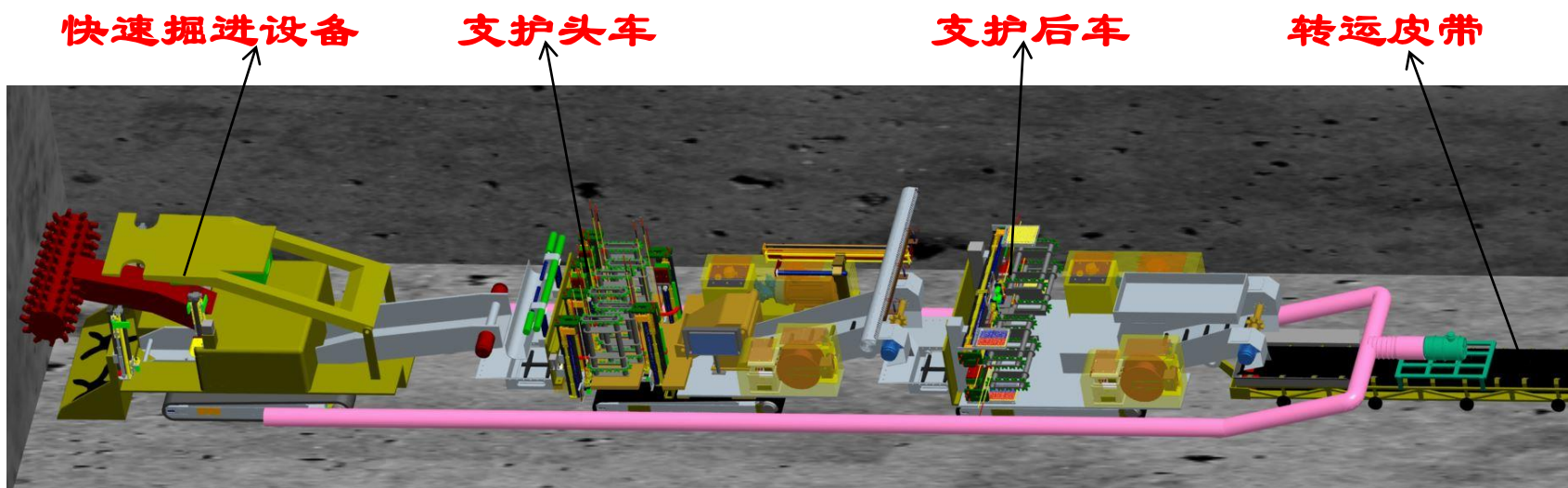
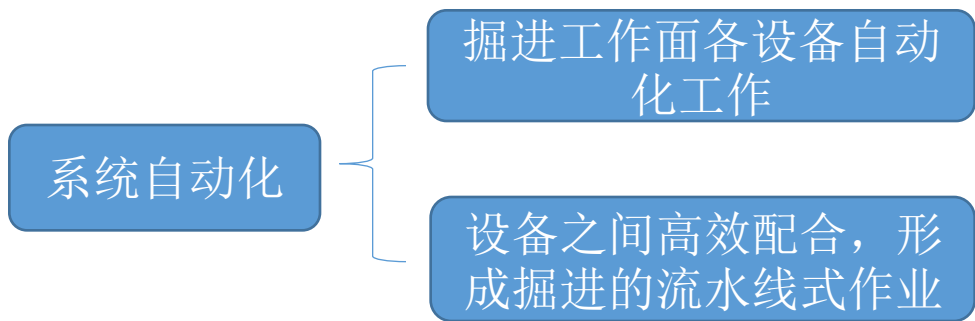


地质条件简单

一体化、大型化
高可靠性设备



从钻探到围岩性质分析，从掘进到支护，掘进系统中的设备自动完成检测、信息处理、分析判断、操纵控制，最终实现掘进头无人或少人的目标。



5.3 高效掘进的信息化

通过**快速获取**、**准确识别**、**科学分类**，实现快速精细勘探，识别细微地质构造、地质异常体，实时、全面把握地质异常度和矿压烈度。

- 光纤光栅监测技术
- 三维地震精细勘探技术
- 无线电波透视技术
- 定向千米钻孔探测技术
- 顶板岩性的随钻探测技术
- 一周地质预测预报技术
- 三维可视化技术
- 装备工况故障诊断

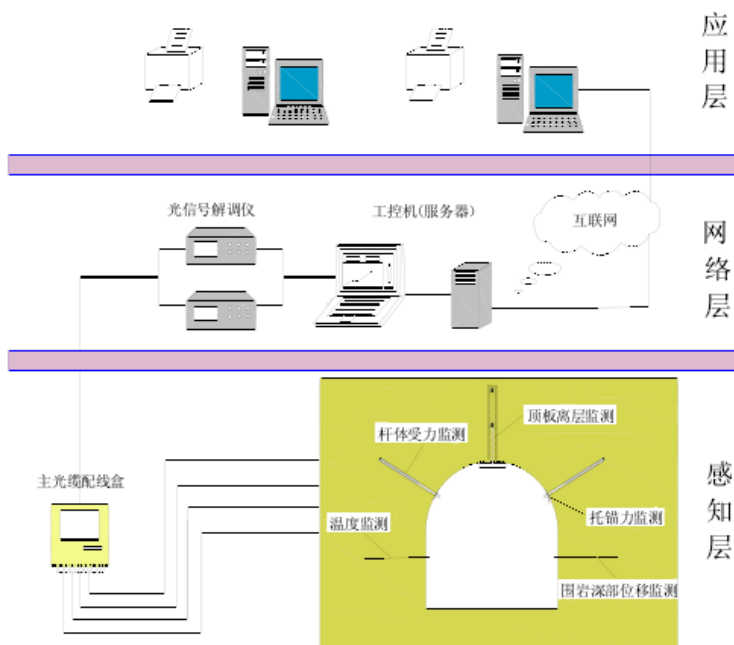


图 5-3 煤矿巷道围岩实时动态在线监测系统框架图

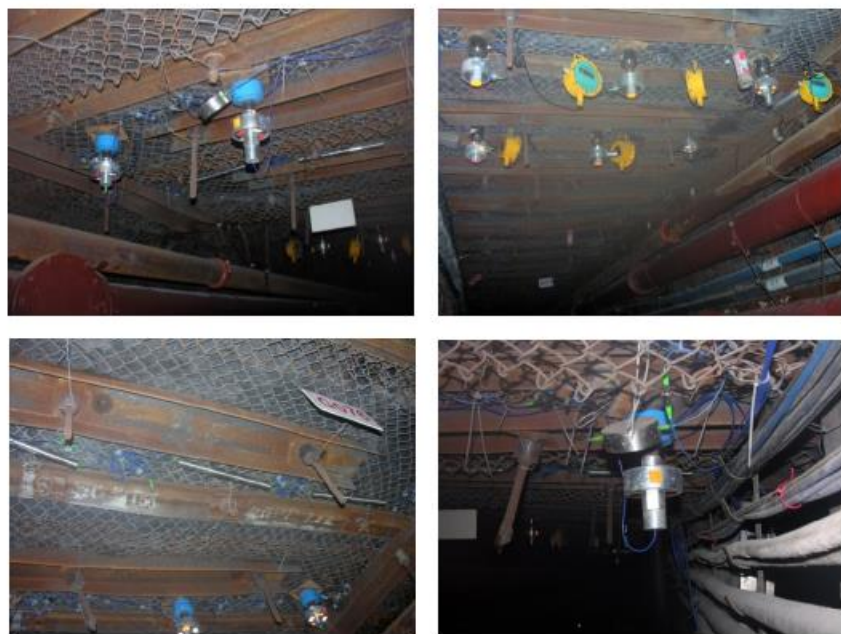


图 5-41 轨道顺槽光纤光栅测力锚杆安装后的实拍照片

电子探头和各类传感器对掘进头的设备运转状况和地质信息进行采集、传输至管理中心，供中心人员进行实时监控、决策。



信息化将会为决策提供可靠依据，大幅减轻人员劳动强度，为掘进迎头无人化创造条件

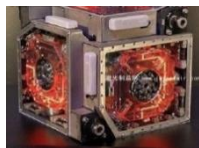
智能探测

- 随钻探测：在锚杆钻机上安装**传感器**及**存储系统**，采用**传感器自记自储式**分析软件，一边打钻，一边分析**岩性**。



智能导航

- 利用先进的**光电**、**计算机和导航技术**对掘进设备和围岩进行自动定位，以实现安全监控和精确掘进。



智能控制

- 根据掘进条件变化自动调控掘进过程，甚至调整支护方案和参数，使智能化掘进设备与自动调度决策集为一体。

□ 实践多年，问题依然存在

- 锚杆加工质量差：产品粗糙
- 锚固系统和组件的匹配性差：强度、刚度、形状
- 理论指导的针对性不够：支护强度不足或过剩
- 复杂条件支护效果差：依赖多手段、效率低
- 施工速度慢：工艺过程复杂、技术装备水平低
- 安全可靠性能低：冒顶事故偶发，死亡事故不能杜绝

□ 煤巷高效快速掘进

谢谢！ 敬请指正！

姓名：韩昌良

手机：13641532955

邮箱：13641532955@126.com

单位：中国矿业大学矿业工程学院

