

喷射混凝土技术交流

中铁西南科学研究院
罗朝廷



- 1.喷射混凝土作用机理与性能特征
- 2.喷射混凝土强度因子与射流密实特征分析
- 3.湿喷技术内涵
- 4.喷射混凝土配合比设计与试验要点
- 5.喷射混凝土原材料质量控制要点
- 6.混凝土新技术应用
- 7.高密实高抗渗喷射混凝土
- 8.喷射混凝土新技术及其应用
- 9.喷射混凝土机械化施工技术



喷射混凝土作用机理与性能特征

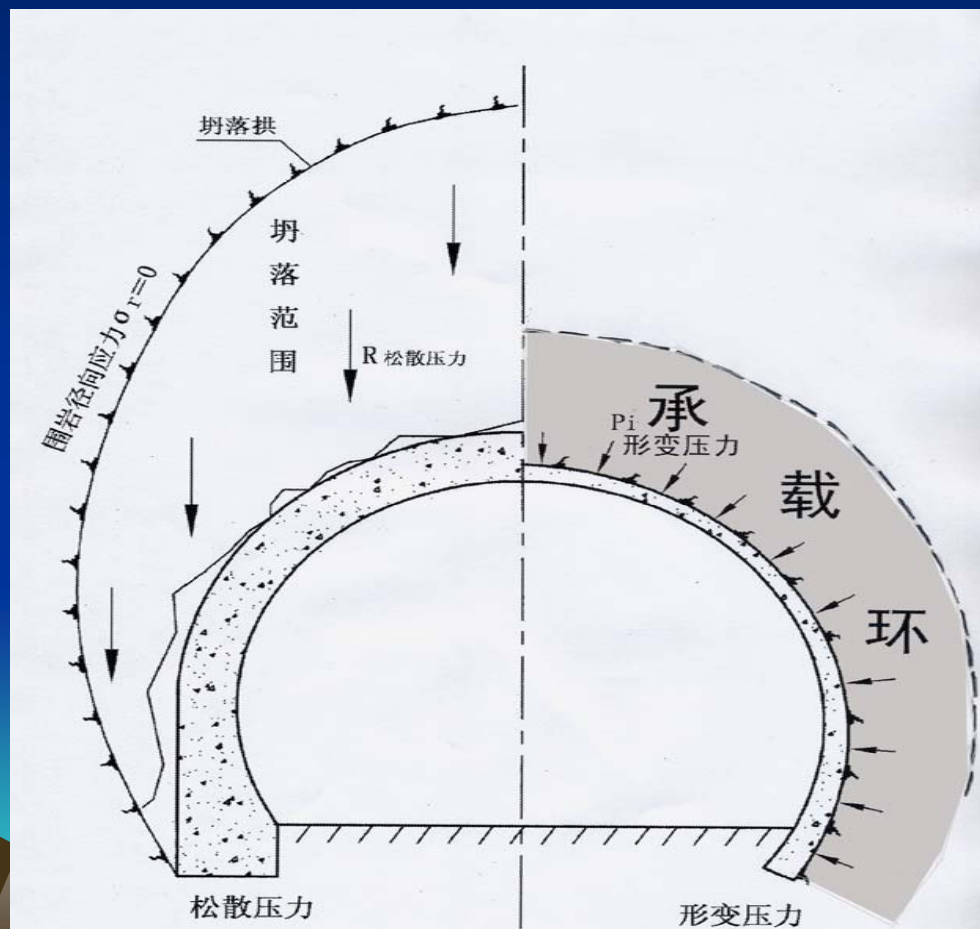
作用机理:

NATM的技术基础

新奥地利隧道修建方法
(简称新奥法) 遵循这样
一个原理, 即主动地
使隧道围岩 (岩土体)
成为环状承载“结构”
的一部分。

软岩隧道

控制变形, 防止松散
形成承载环



围岩主动承载作用的激发（控制变形）

应力重分布 变形 坍塌（变形控制不力）

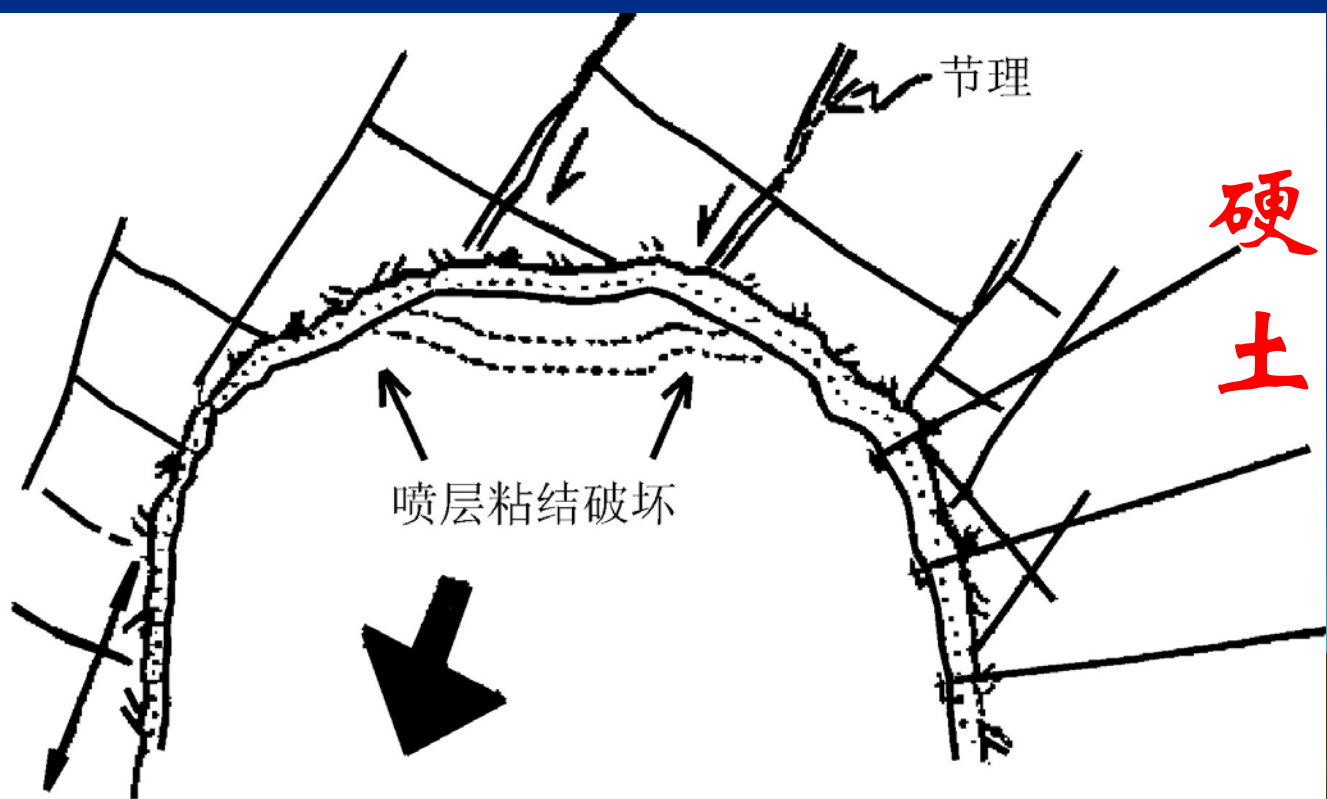
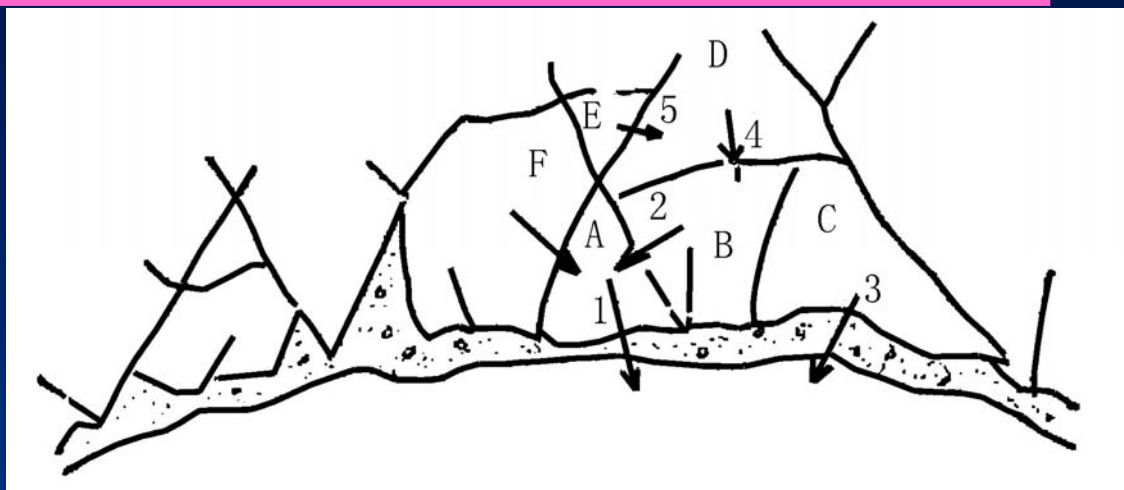
传统矿山法	等待坍塌后自稳
NATM	控制变形

初始应力	开挖	支护	稳定
一次应力	二次应力	三次应力	四次应力



喷射混凝土作用机理与性能特征

硬岩隧道
关键块体稳定
防止危石坍落
镶嵌咬合



硬岩喷射混凝土也应及时

喷射混凝土支护结构特征

喷射混凝土发挥特殊作用的三个条件

➤ 与围岩密贴(黏结强度)

➤ 及时性(控制围岩松弛与变形)

[施工及时与早期强度发展快速]

➤ 一定厚度(结构作用)



喷射混凝土作用机理与性能特征

密贴
黏结强度
共同变形



喷射混凝土力学性能特征

- 基准强度 (28d强度)
- 早期强度 (3h, 8h, 1d) (控制围岩松弛与变形)
- 黏结强度 (抗剪、抗拉) (共同变形)
- 密实性指标 (抗渗、容重)
- 耐久性指标 (钢筋锈蚀、化学侵蚀、冻融侵蚀)



《隧道围岩稳定性及其控制技术研究》

核心理念：

初期支护承受全部变形荷载

二衬只是防水结构和安全储备

强化初期支护，二衬标准化简单化

贵广铁路二衬优化设计（取消钢筋），节约8亿

水平：国际先进

目标：建立中国隧道修建技术体系

由隧道大国变为隧道强国

喷射混凝土作用机理与性能特征

喷混凝土支护，在地下工程中占据十分重要的位置，这是大家公认的，是隧道现代支护技术的物质基础。

它不仅是初期支护的主要构件，也是永久支护的重要构件。

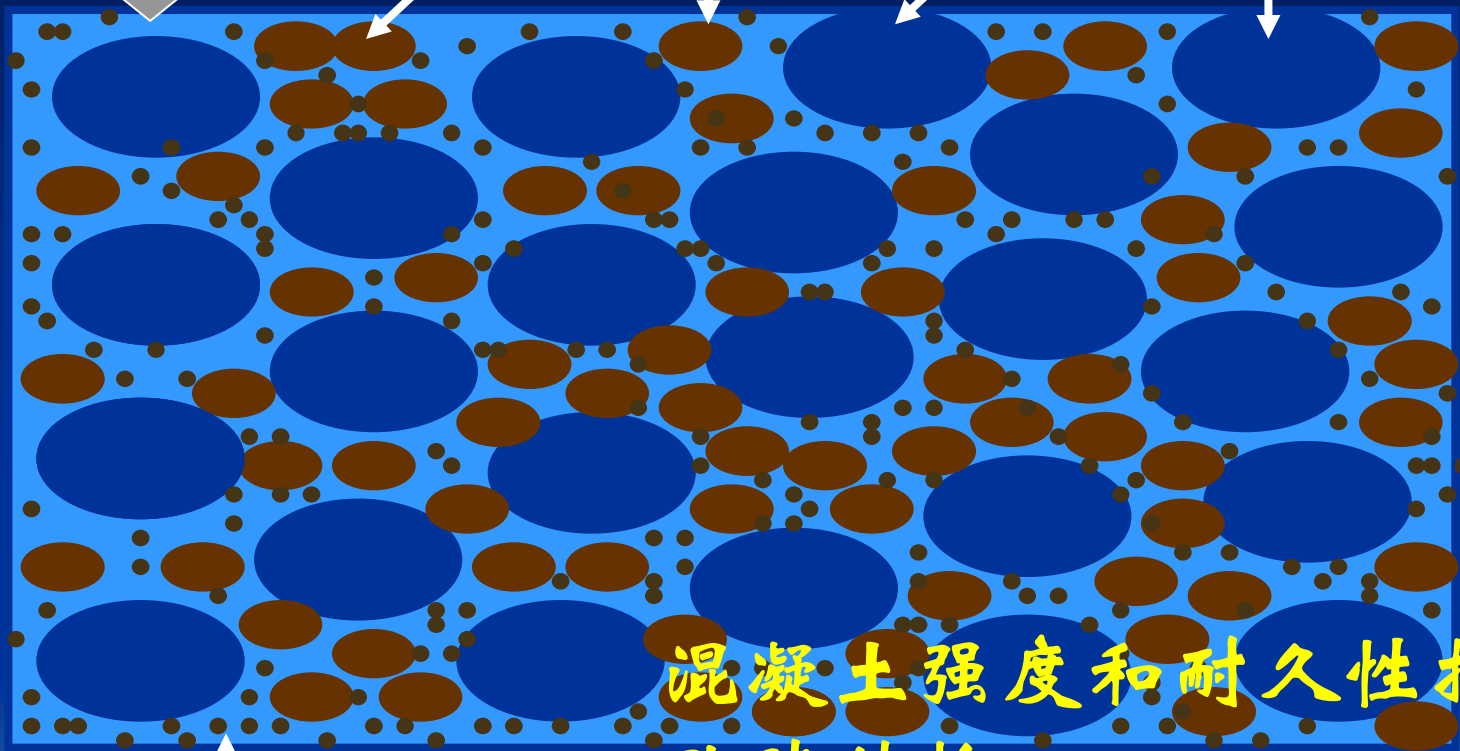
许多国家都把提高喷混凝土的性能、技术放在十分重要的位置。日本土木学会2005年公布的“隧道喷混凝土指南”、挪威规范“岩石支护用喷混凝土-规范、指南与测试方法”、欧洲规范（EFNARC）、奥地利标准“Sprayed Concrete Guideline 以及我国国标GB50086-2001等，都说明了这个问题的重要性。

喷射混凝土强度因子与射流密实特征分析

水泥浆

小颗粒粗骨料

大颗粒粗骨料



细骨料

混凝土强度和耐久性指标
孔隙结构
水化产物结构
界面结构

混凝土性能控制的核心就是：

孔隙率和孔隙结构

密实度是影响混凝土强度和耐久性的关键因素

$\Delta f_c = 500(1 - d_c)$ -- 不密实引起的强度损失

密实度降低1%，强度降低5%

换算为容重：容重降低5Kg，强度降低1%

密实性是混凝土耐久性的先决和必要条件



喷射混凝土强度因子与射流密实特征分析

混凝土孔隙分类

种类	成因	影响因素	尺度
凝胶孔 毛细孔	水化产物的内部孔隙		不可见
	多余水蒸发	水灰比	不可见
气泡 蜂窝孔	含气、引气、 喷射裹入		不可见
	浆体充填 不饱满	射流密实 过程	肉眼可见

喷射混凝土强度因子与射流密实特征分析

喷射混凝土混凝土强度影响因子

	影响机理	干喷	湿喷
W/C	毛细孔	人工粗约控制	设备准确控制
α	水泥石结构	喷嘴加水，水化不充分	搅拌形成浆体，水化充分
d_c	蜂窝孔	容重2250左右	容重2350左右
速凝剂	水泥石结构	人工粗约控制	设备准确控制



喷射混凝土强度因子与射流密实特征分析

混凝土有三种成型密实方式

振捣密实

自密实

喷射射流密实



喷射混凝土强度因子与射流密实特征分析

密实特征分析			
振捣 密实	浆体流动方向为三维	充填饱满	水囊 泌水
射流 密实	1浆体流动方向为一维 2受速凝影响，扩散距离小 3浆体充填与骨料嵌入	骨料和钢筋 背面阴影区 孔隙	



喷射混凝土强度因子与射流密实特征分析

实现高密实度喷射混凝土的基本条件

根据喷射混凝土射流密实特征，要实现浆体充填饱满

➤ 总浆体量满足要求

➤ 喷嘴料流质量

浆体充填饱满度
决定密实度

喷射混凝土强度因子与射流密实特征分析

根据对射流密实特征的试验分析
提出实现高密实喷射混凝土的四点措施

- 均匀稀薄流输送
- 水泥裹砂（石）
- 浆体射流填充（拌和物流动性）
- 减小骨料背后阴影区（最大骨料粒径控制）

实现上述四点措施的途径

混凝土拌和物工作性

设备性能（喷嘴料流质量）

发展湿喷技术的初衷是 粉尘与回弹

(煤炭部:六.五攻关项目,喷锚降尘办公室)

质量控制与性能改性 实现机械化施工

铁建设函〔2008〕777

《关于铁路隧道施工机械配置的指导意见》

为什么湿喷代表了喷射混凝土发展方向？

因为湿喷技术具有丰富的内涵

- 从根本上解决粉尘问题-矽肺病
- 可建立质量管理体系,对喷层质量实施有效控制
- 充分享受混凝土技术发展成果,发展复合材料技术
- 发展绿色喷射混凝土技术(贯彻国家低碳发展理念)
- 发展高强与高性能喷射混凝土技术(工艺基础)
- 发展单层衬砌技术(匀质性与耐久性)
- 实现隧道快速作业、喷射混凝土施工机械化、混凝土制备商品化的工艺基础

湿喷并不只是一种工艺的选择,也并不只是单纯追求粉尘和回弹的降低,而是一种新的喷射混凝土技术体系

ISO质量管理体系认证

影响质量的因素是否处于受控状态

只有过程受控才能实现预定结果

过程控制:四大关键及变动因素

- 水灰比 〈决定混凝土强度的关键因素〉
- 水化过程 〈在搅拌机充分水化并形成浆体〉
- 射流密实过程
〈受料流质量控制,相当于浇注与振捣过程〉
- 速凝剂 〈决定喷射混凝土强度的关键因素〉

湿喷使得

- 水灰比可控
- 水化过程可控
- 密实过程可控
- 速凝剂掺加比例和混合均匀程度可控

重点分析密实过程可控



湿喷技术能给我们带来什么？

配合比可以设计

质量过程可控

结果可以得到保证



湿喷技术能给我们带来什么？

过程可控				结果
项目	环节	结构		材料彻底改性
水灰比 可控	搅拌环节	毛细孔		高密实
射流密实 过程可控	浆体均匀 充填	蜂窝孔 (密实度)		高强度
速凝剂 可控	液体+计 量泵	水泥石微观 结构		高性能
				早高强
				降低胶凝材料 用量

喷射混凝土配合比设计与试验要点

必须高度重视配合比设计

喷射混凝土配合比设计的一个创新理念

建立混凝土拌合物工作度概念

(相当于混凝土可泵性)

配合比设计必须按强度、工作度、耐久性
进行多指标控制

基准配制强度的确定

(必须考虑速凝剂和射流密实因素的影响)



配合比设计 主要因素

回弹

成本

混凝土
强度指标
(结果指标)

拌和物
工作度指标
(过程指标)

混凝土
耐久性指标
(结果指标)

配合比设计的主要内容

- 水胶比 ($0.30 \sim 0.7$)
- 用水量 (一般 $180 \sim 220 \text{Kg/m}^3$)
- 水泥用量 ($300 \sim 540 \text{Kg/m}^3$)
- 速凝剂 (品种与掺量)
- 砂率 ($40 \sim 60\%$)

工作度指标



性能指标

目前规范的局限性

强度指标: $C15 \sim C30$

水灰比: $0.4 \sim 0.5$

水泥用量: $390 \sim 470 \text{Kg/m}^3$

影响喷射混凝土强度指标的主要因素

- 水胶比 K_1
- 射流密实特性 K_2 （料流质量、工作度）
- 速凝剂 K_3 （品种、掺量）
- 温度 K_4 （对早期强度影响大）
- 养护条件 K_5

$$f_{cu,o} = y\{k_1, k_2, k_3, k_4, k_5\}$$

影响喷射混凝土强度的特征因素

K_2 : 射流密实特性系数

K_3 : 速凝剂系数



拌和物工作度影响以下参数

喷射混凝土密实性（强度、耐久性）

生产效率

成本（回弹、外加剂消耗）



喷射混凝土配合比设计与试验要点

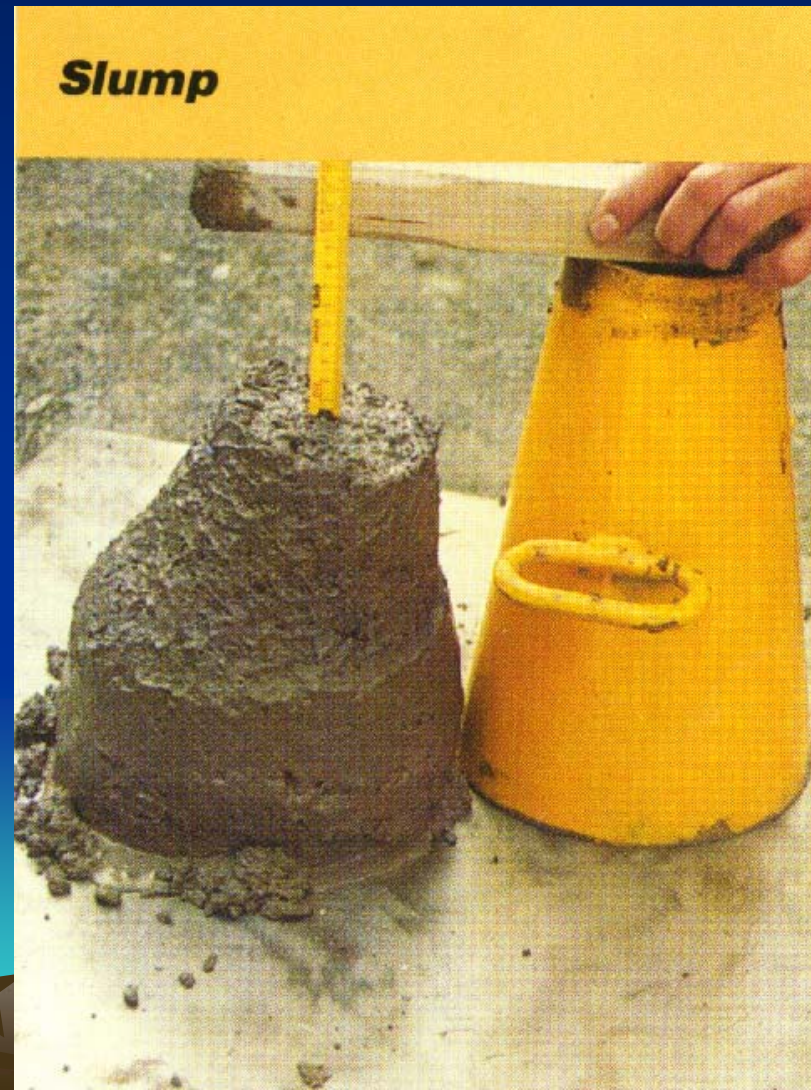
混凝土工作度--流动性与粘聚性

最适宜喷射混凝土坍落度

稀薄流:10~22cm(≥ 15 cm)

稠密流:12~22cm

同时要具有良好的粘聚性



影响混凝土拌合物工作度的主要因素

- 用水量（常规喷射混凝土大于 200Kg/m^3 ）
- 砂率与砂的质量
（细度模数、级配、含泥量（石粉含量））
- 外加剂（减水剂）
- 胶凝材料用量

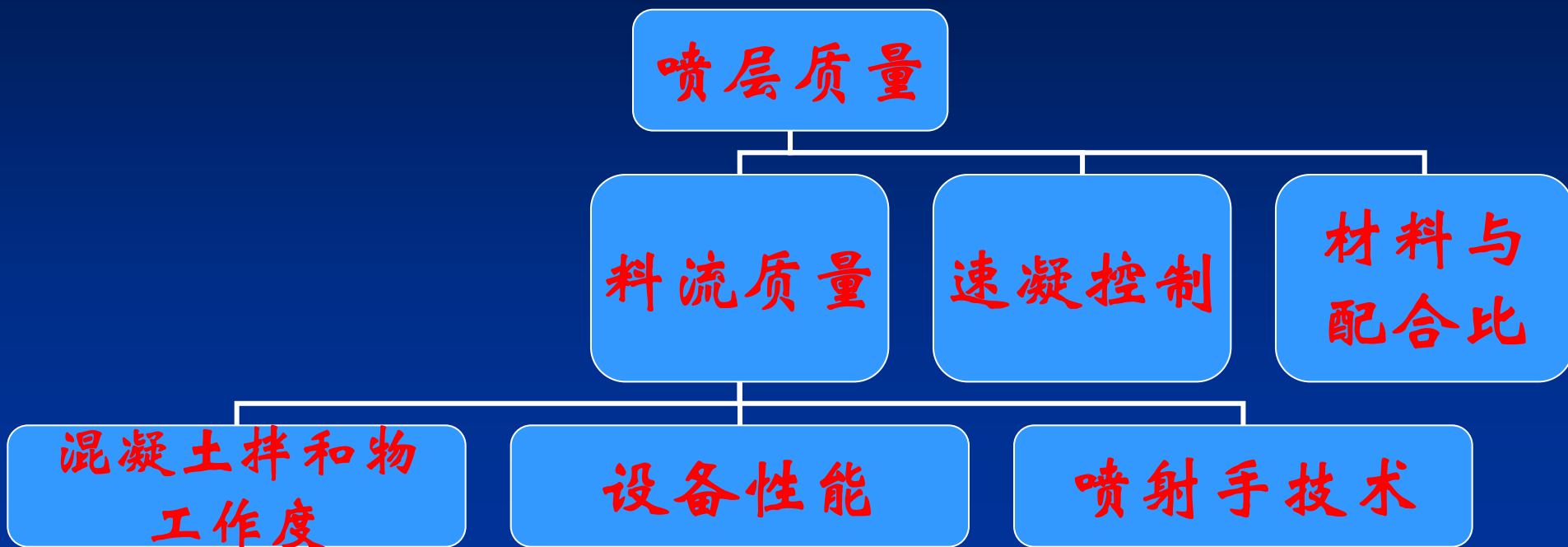


混凝土工作度对喷射效果的影响

项目	指标	结果
流动性 (坍落度)	过小	生产效率低，砂石料表面浆体包裹量小，射流渗透密实效果差（影响喷层密实性），喷嘴处粉尘大
	过大	离析（喷嘴跌浆），材料成本增加（水泥或外加剂用量大）或强度降低（水灰比大）
粘聚性	适度	输送阻力小，回弹低，混凝土界面结合强度高（强度与密实性好）
	不好	回弹大，易离析（喷嘴跌浆），混凝土界面结构不好
	过粘	输送阻力增加，喷嘴易出现脉冲，可能堵管。过粘还可能影响喷层密实性。

理想喷射状态：砂石料呈均匀颗粒态，被水泥浆体完全包裹

混凝土工作度对喷层质量的影响



提高料流质量的关键是混凝土在管道内不能离析，喷嘴处不得跌浆，出料要均匀，水泥浆要充分包裹砂石料，这就要求喷射混凝土拌和物必须具有良好的工作性。

影响喷射混凝土回弹率的主要因素

- 喷嘴料流质量（设备性能、拌和物工作度）
- 混凝土拌和物工作度
- 速凝剂性能
- 速凝剂添加系统性能
- 风量控制
- 喷射手技术水平（距离、角度）

配合比建议(C25)

必须保证一天强度大于10MPa

➤ 水胶比0.5~0.55 (速凝剂和砂石料质量)

➤ 水泥用量360~420Kg/m³

(建议掺加20%磨细矿渣)

➤ 坍落度 $\geq 15\text{cm}$

➤ 砂的细度模数2.5~3.0

V级围岩建议用无碱速凝剂，水胶比0.45
胶凝材料用量460，强度提高到C35~C40
一天强度提高到20MPa以上

速凝剂：粉状、液体

液体速凝剂：

碱性速凝剂（PH值，碱含量）

低碱速凝剂（5%左右）

无碱速凝剂（ $\leq 1\%$ ）

混凝土碱含量与碱-集料反应

碱-集料反应是混凝土的癌症

（膨胀性破坏）

高度重视液体速凝剂试验与选择 它与成本和质量关系重大

试验要点:

凝结时间与掺量试验(标准实验条件)

无碱液体速凝剂的凝结时间测试方法与标准(欧洲方法)

强度损失试验

合理的初终凝时间(蠕动、孔隙与气孔、回弹、掉块)

与水泥和减水剂相容性试验(速凝剂配方与水泥品种调整)

最佳掺量试验

对水灰比敏感性试验(实际使用水灰比)

工艺性检测(杂质、沉淀)

实际使用量与实验室掺量的差异性

(水灰比变化、合理损耗)

喷射混凝土原材料质量控制要点

高度重视液体速凝剂试验与选择
它与成本和质量关系重大

选择要点（综合考虑以下因素）：

- 添加比例
- 单价
- 28天强度保持率
- 对回弹的影响
- 工艺性（沉淀、杂质）

性价比！
单价比？

合理初终凝时间控制对喷射混凝土孔隙率有重要影响

过慢：喷层在高压风作用下产生蠕动，增大回弹与掉块

过快：不利于密实（浆体填充、孔隙），成本高。

无碱液体速凝剂

无碱液体速凝剂是发展方向

➤ 环保

➤ 对混凝土后期强度和耐久性（碱-集料反应）有利
现有规范无法对无碱液体速凝剂进行检测和评价
欧洲规范具有可操作性



喷射混凝土原材料质量控制要点

砂的质量和砂率对

混凝土拌合物工作度影响很大
砂的质量（同时关注以下三点）

➤ 细度模数

➤ 级配曲线

➤ 含泥量（石粉含量）

根据砂的质量和胶凝材料用量确定合理砂率
保证砂的质量，哪怕适当增加购买砂的单价
也是值得的。

混凝土新技术应用

充分应用混凝土技术发展成果,发展复合材料技术

高效减水剂与矿物掺合料的应用,使新拌混凝土可以在远低于水泥能充分水化的水灰比(水胶比)条件下配制,并能借助普通的施工设施浇注和成型密实。

高效减水剂

矿物添加料(胶结料)

纤维(合成纤维、钢纤维)



矿物外掺料的应用是混凝土进入高科技时代的重要标志

	微硅粉	粉煤灰	磨细矿渣	普通水泥
SiO ₂ %	92	50	38	20
Fe ₂ O ₃ %	0.8	10.4	0.3	3.5
Al ₂ O ₃ %	0.3	28	11	5
CaO %	0.4	3	40	65
MgO %	0.3	2	7.5	0.1
Na ₂ O %	0.2	0.7	0.4	0.1
K ₂ O %	0.9	2.5	0.8	0.7
细度 m ² /kg 测定方法	15000-25000 氮吸附法	400-700 透气法	350-600 透气法	300-400 透气法

超细矿粉和高效减水剂是高性能喷射混凝土的必备组分

高效减水剂被誉为混凝土的第五组分

超细矿粉被誉为混凝土的第六组分

节约水泥，减排 CO_2 ，减轻温室气体效应，是我们每个人的职责

超细粉不但替代水泥，而且改善混凝土的微观结构（微粒填充与二次水化），提高混凝土性能，特别是耐久性。



微硅粉的物理作用

- 微硅粉取代10%水泥，则在混凝土中水泥颗粒与微硅粉颗粒的数量之比为：1:100,000
- 微硅粉巨大表面积束缚水分，防止泌水和水分在骨料下表面聚集，从而将净浆—骨料界面过渡区的厚度减小、密实度增加。
- 微硅粉微小颗粒成为水泥水化产物CH的‘晶种’，使CH晶体的尺寸更小、取向更随机。
- ‘微粒填充’效应，即微硅粉填充于水泥颗粒的空隙之间，效果如水泥颗粒填充在细骨料空隙之间和细骨料填充在粗骨料空隙之间一样，从更微观尺度增加混凝土的密实度。

微硅粉的火山灰反应

➤ 火山灰反应：



➤ 将对强度不利的CH转化为C-S-H凝胶，并填充在水泥水化产物之间，有力促进混凝土强度增长和密实度提高。

➤ 微硅粉与CH反应，CH不断被消耗会加快水泥水化速率，因此提高混凝土的早期强度。



钢纤维喷混凝土

阻裂性能

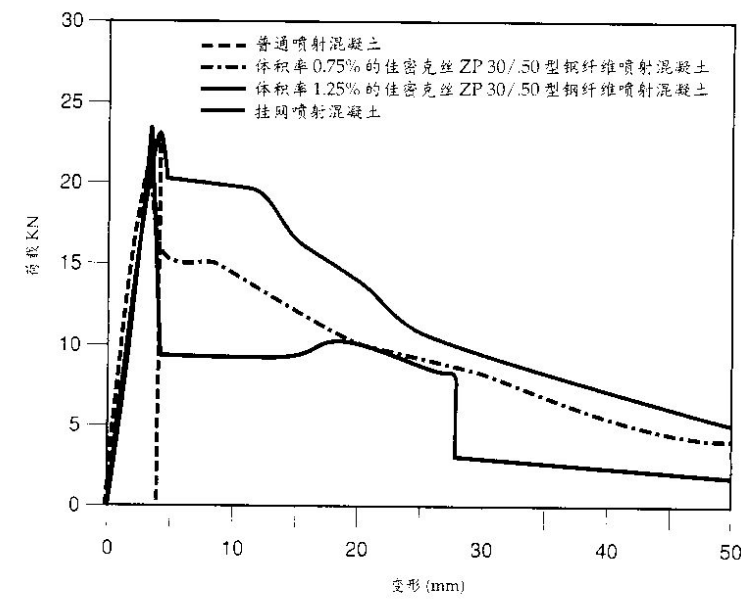
(密实性与耐久性)

裂后性能 (韧性)

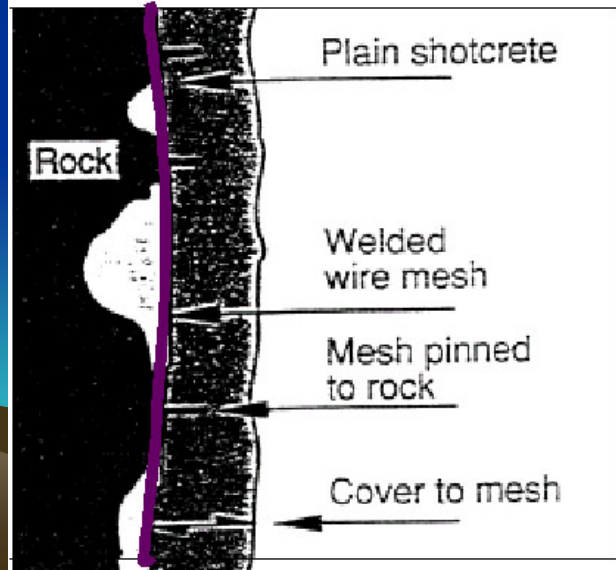
吸收变形

大变形

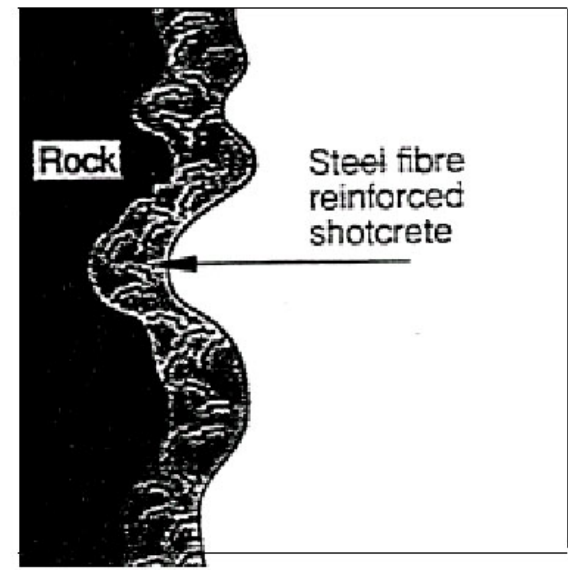
岩爆



钢筋网喷混凝土



钢纤维喷混凝土



纤维种类	聚丙烯腈	聚丙烯	聚酰胺	合成纤维
直径mm	13	18~65	23	
长度mm	6~25	4~19	19	
含量kg/m³	0.5~1.0	0.9	0.9	
28天收缩率降低%	11~14	10	12	
收缩裂纹减少%	58~73	55	57	
抗渗提高%	44~56	29~43	30~41	
冲击耗能提高%	42~62 (1.0~2.0)	70 (1.0~2.0)	80 (1.0~2.0)	

体积率0.05~0.3% 湿喷
拌和合时间延长40~60s
降低回弹
控制和减少裂纹

韧性不如钢纤维

高密实高抗渗喷射混凝土

大量试验证明：

湿喷混凝土具有更高的密实性

➤ 水灰比控制(毛细孔)

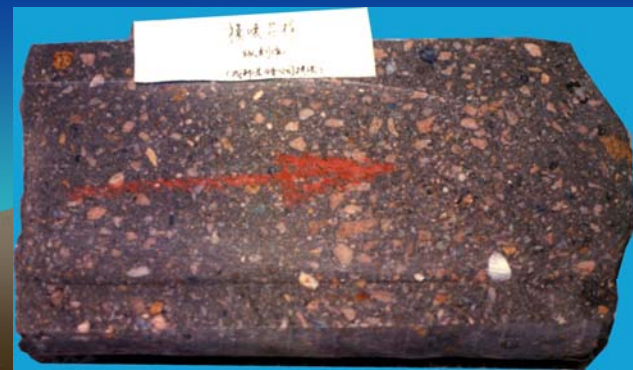
➤ 速凝剂控制(合理的凝结时间控制)

➤ 射流速度

➤ 水泥裹砂(石)效应〈界面结构优化〉

➤ 浆体射流填充密实效应

➤ 消除水囊作用



高密实高抗渗喷射混凝土

体现密实性的两大指标：
容重与抗渗标号

抗渗试验

常规C25喷射混凝土

抗渗等级可以达到P40

容重——湿喷:2370Kg/m³

干喷:2259



大板试件取芯

将圆柱试件加工成圆堆试件



抗渗试验



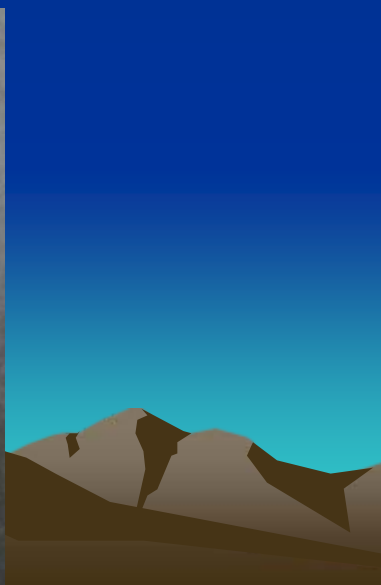
高密实高抗渗喷射混凝土



4MPa水压作用下
的渗水高度



高密实高抗渗喷射混凝土



高密实高抗渗喷射混凝土

西南院200多组试验数据：抗渗标号达到P40
所有喷射混凝土（0.7水灰比）都可以达到P20以上
并且是3d龄期就可以达到

材料抗渗
结构抗渗
裂纹

（收缩裂纹、变形裂纹）

施工缝

基面处理



喷射混凝土高抗渗能力机理分析：

1、水泥裹砂（石）效应

要求必须实现均匀稀薄流输送形态

2、垂直射流渗透效应

水泥浆体完全充填砂石料空隙
拌和物和易性

足够的浆体量，合理凝结时间控制

干喷水化作用不充分，没有形成足够的浆体去
射流填充砂石料空隙，这是干喷结构疏松的关键

3、喷射过程中裹入气泡阻断毛细孔通路

高密实和高抗渗的意义

密实性是耐久性的关键（是必要条件但不是充分条件）
大量研究表明：混凝土的渗透性与其耐久性之间有着密切的联系，因此通常认为渗透性是评价混凝土耐久性最重要指标

降低各种腐蚀介质如水、 CO_2 、 O_2 、硫酸盐、氯离子在混凝土中的渗透性和扩散性以及 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的溶出

抗渗性能与抵抗离子扩散能力是有差异的

抗渗能力（体现物理密实）

抗离子扩散能力（体现化学密实）

目前的试验结果是突破性的，需要进一步的试验研究

密实性、耐久性、全寿命周期成本

建立全寿命周期成本概念

隧道病害

结构安全性

环境影响（漏水）

隧道维护费用

隧道使用寿命



早高强喷射混凝土技术

我院承担的铁道部科研课题

国标 1d强度 $\geq 5\text{MPa}$

铁道部 1d强度 $\geq 10\text{MPa}$

根据喷射混凝土作用机理

在软岩隧道提高标准

3h强度标准

8h强度标准

1d强度标准

早高强喷射混凝土

早期强度影响因素

水胶比、外加剂、外掺料、环境温度
通过外掺料与早强剂的联合作用，早高强喷射混凝土可以达到以下标准：

3h强度--1~5MPa

8h强度--10~20MPa

1d强度--20~30MPa

早高强喷射混凝土适用于软岩或大变形隧道以控制围岩变形；城市浅埋隧道控制地面沉降。

喷射混凝土新技术及其应用

高性能混凝土为一种新型高技术混凝土，是在大幅度提高普通混凝土性能的基础上采用现代混凝土技术制作的混凝土，是以耐久性作为设计的主要指标，针对不同用途的要求，对下列性能有重点的加以保证：耐久性、施工性、适用性、强度、体积稳定性和经济性。

吴中伟

技术途径：

低水灰比(高效减水剂){第五组分}

矿物添加料{第六组分}

优化射流密实过程以提高密实度

改善过渡层及界面结构

控制裂纹

工艺途径：

湿喷

喷射混凝土新技术及其应用

青岛海底隧道高性能喷射混凝土初步成果

高效减水剂：聚羧酸盐类，减水率 $\geq 30\%$

超细粉：硅粉、粉煤灰

水胶比：0.4(含速凝剂中含水量)

强度等级：C35

1d强度： $\geq 10\text{MPa}$ (具有更强控制围岩松弛与变形的能力)
实际达到17MPa

抗渗标号：可以达到S40

氯离子扩散系数： $\leq 3 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$
($0.79 \sim 2.34 \times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)

电通量： $\leq 1500\text{C}$



喷射混凝土耐久性基本指标控制
电通量

外掺料作用最为显著

混掺效果最好

可以达到小于500库仑



喷射混凝土新技术及其应用

高强与高性能喷射混凝土的特殊性:

由于具有低水胶比和较高水泥用量

新拌混凝土具有很强的粘稠性,管道输送阻力大,
应特别注意新拌混凝土的工作性,提高坍落度指标
否则容易造成气孔和疏松

虽然减少了毛细孔,但却增加了气孔

高强(高性能)喷射混凝土其性能与工作性和喷射密实
工艺过程的关联度更高

因此:高性能混凝土必须首先具有高工作性



高强与高性能喷射混凝土的应用前景

提高初期支护技术标准与结构安全性

减薄喷层或减薄二衬（水压力与冻胀压力）

提高结构耐久性

提高早期强度，控制变形与沉降

结构自防水

推广单层衬砌



喷射混凝土结构自防水功能的开发

在有水地段进行喷射混凝土施工，如果不事先对水进行处理，则水在压力作用下渗过早龄期喷射混凝土，形成透水通道，那么既不能发挥喷层的防水能力，又会对喷层造成溶蚀破坏。如果在喷射前对水进行注浆封堵或集中引排处理，使喷层在3天以内不受到水压力的作用，在3天以后对排水点实施封堵，则可以充分发挥喷射混凝土的高抗渗特性，减少初期支护渗水量，既保护混凝土不受溶蚀破坏，又有利于保护围岩水体环境。



喷射混凝土机械化施工技术

目前的干喷工艺使喷射作业还停留在手工小作坊时代（单机搅拌、小型机械运输、人工上料、人工控制水灰比与速凝剂），作业环境差、劳动强度大、质量控制水平低，材料消耗高、生产效率低。与目前的社会经济发展水平极不适应，与党中央构建和谐社会和科学发展观（可持续发展）的要求极不适应。

湿喷工艺可以使喷射作业实现集中搅拌（搅拌站）与自动计量、机械化运输与上料，使喷射作业进入现代工业化时代。



喷射混凝土机械化施工技术

混凝土制备商品化与支护施工机械化

湿喷工艺使喷射混凝土使用商品混凝土有了可能，商品混凝土是混凝土从小生产方式向工业化大生产转变的象征，是普通混凝土技术向高性能混凝土发展的关键。

目前我国正在大力推广实施一项节能减排、实现生态文明的重大举措：推广散装水泥和预拌混凝土

与传统的袋装水泥相比，2007年我国发展散装水泥共减少使用水泥包装袋113亿只，仅此一项可大约节省牛皮纸17万吨、聚乙烯71万吨；此外，水泥物流散装化可减少水泥损耗约2227万吨。上述两方面节约带来的综合经济效益约200亿元，能够大约减少能耗526万吨标煤、减少粉尘排放224万吨、减少CO₂排放970万吨。

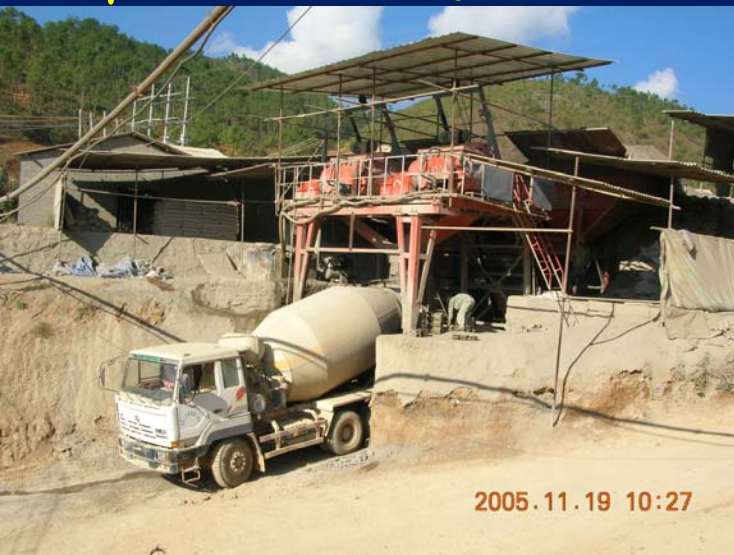
喷射混凝土机械化施工技术

喷射混凝土机械化作业模式



喷射混凝土机械化施工技术

喷射混凝土 半机械化作业模式



谢谢！

不当之处敬请批评指正

联系电话 :13908027800

E-mail: lct.yf@163.com

