

# 湿喷混凝土技术在地下工程施工中的应用

张亚军<sup>1</sup> 张项铎<sup>2</sup>

(1 中铁隧集团二处有限公司 河北三河 101600 2 中铁隧道勘测设计院 河南洛阳 471009)

**摘要:**本文以某长大隧道及地铁工程为例,简要论述了湿喷技术中的混凝土材料及配合比的选择,施工工艺及机具等方面的内容,并与干喷和潮喷方法进行对比,同时指出湿喷混凝土技术在地下工程中的应用前景。

**关键词:**湿喷技术 锚喷支护 混凝土

## 1 前言

某长大铁路隧道,全长18.46km,采用隧道掘进机(TBM)施工。隧道初期支护为锚喷,喷射200号砂,厚度为5~10cm,由TBM上的湿喷系统实现。

某城市地铁工程地质条件较好,隧道穿过地层多为花岗岩,围岩以Ⅱ~Ⅲ类(国标)较多。围岩的自拱能力好,可采用锚喷支护结构,即利用围岩的自拱能力,以达到结构要求,这样不仅方便施工,而且可节省工程投资。故在施工中,充分考虑该地区的地质条件,采用锚喷支护结构和湿喷工艺,这在国内地铁、交通隧道等的建设中还较为少见,有许多问题值得探讨。

## 2 湿喷混凝土简介

所谓湿喷是相对干喷和潮喷而言的,将拌好的砂料由输送泵输送至喷咀后,在喷咀处加速凝剂、高压风,从而实现砂的喷射作业。湿喷具有工作环境好,砂质量稳定,回弹小,生产效率高优点。目前,在国外许多发达地区,湿喷已在喷砂施工中占主导地位,在我国近几年发展也越来越快。湿喷工艺对机械设备性能要求较高,一般由砂输送泵,外加剂输送泵、空压机、喷咀以及相应的计量设备组成,目前市场上以国外产品为主。

## 3 湿喷砂材料选择

### 3.1 某特长隧道砂材料

该隧道湿喷砂施工由TBM上的湿喷系统完成。输送泵是瑞士产putzmeister双活塞泵,输送能力为8~13m<sup>3</sup>/h;输送管为 $\phi$ 50;喷射系统采用机械手形式,可在隧道轴线方向及隧道径向移

动,同时整个喷浆系统可沿隧道轴线方向移动,与之相应的外加剂泵送系统可根据不同情况调整外加剂的掺量。根据试喷阶段的施工经验,该套系统要求砂料的塌落度为13~15cm、粗骨料最大粒径10mm,喷射效果最佳。

本隧道湿喷混凝土所用材料中,水泥采用当地散装525号水泥,砂为中粗砂,石为5~10mm机制碎石,水用饮用水。对混凝土拌合物性能起关键作用的外加剂中,因喷射机具的要求,湿喷混凝土必须用液态速凝剂,同时各种外加剂必须兼容。由于国内尚无液态速凝剂的标准,且应用刚处于起步阶段,故市场上产品种类较少,以合资产品为主。对此类外加剂产品,经调研,获取相应的技术资料 and 样品后,试验其影响混凝土凝结时间、触变流动性以及水泥胶砂强度等主要性能,并经过试生产,同时综合技术经济各方面比选,最后采用上海麦斯特建材有限公司的整体稠度控制系统—稳定剂、稠度剂、速凝剂。

### 3.2 某地铁工程混凝土材料

(1) 水泥:采用525号普通硅酸盐水泥,450kg/m<sup>3</sup>。

(2) 砂:当地河砂,颗粒级配要求如表1,中砂、细度模数2.5。

(3) 碎石:当地碎石场过筛的花岗岩碎石,颗粒级配要求如表2。

(4) 防水剂:本工程采用青岛同技建材厂生产的TJ高效多功能防水剂。它的作用机理是在混凝土拌合物能与水泥的水化产物作用生成不溶性凝胶,阻塞混凝土的毛细管通路,同时该凝胶所产生的微膨胀还可部分抵消混凝土硬化所产生的干缩。该产品能配置抗渗标号S10的高密度自

防水混凝土,因而可从根本上解决混凝土因微观结构缺陷所引起的渗漏问题,大幅度提高混凝土的抗渗性和耐久性。

表1 砂颗粒级配

筛孔尺寸 (mm)	累计筛余 (%)
5.0	5.8
2.5	12.7
1.25	20.6
0.63	51.4
0.315	84.0
0.16	92.2
< 0.16	100

表2 碎石颗粒级配

筛孔尺寸 (mm)	累计筛余 (%)
15	0.4
10	9.9
5	69.5
2.5	95.4
< 2.5	100

(5) 减水剂:喷射砼时由于坍落度指标的要求,水灰比较大。砼中水泥水化后多余的水要蒸发,使砼喷层产生“干裂”现象,降低了混凝土的支护能力。在搅拌砼时加入萘系高效减水剂,在同样坍落度时,减少率大于12%。

(6) 速凝剂:在喷射砼工艺中,当混凝土的料束喷到受喷面上后必须尽快凝固。这既可减少回弹,又能使混凝土尽快凝固形成支护能力。故需在混凝土中加入速凝剂。选用TK-961型湿喷机配用河南巩义市特种建材厂生产的8604-II型液态速凝剂,通过可调解流量的计量泵和速凝剂容器,再经胶管压入喷嘴,依靠喷射管中的压缩空气将速凝剂雾化后,并与料束一起喷至受喷面上,水泥与之发生反应迅速凝固。根据试验,该速凝剂初凝时间1~4min,终凝时间2~10min,后期强度保存率大于90%。室内强度对比试验数据见表3。

表3 室内强度对比试验数据

1天强度	掺8604-II型 液态速凝剂	抗折1.54MPa	抗压12.1MPa
	未掺8604-II型 液态速凝剂	抗折0.9MPa	抗压6.7MPa
28天强度	掺8604-II型 液态速凝剂	抗折6.69MPa	抗压37.4MPa
	未掺8604-II型 液态速凝剂	抗折7.27MPa	抗压38.6MPa

注意事项:液态速凝剂属于碱性,有刺激性气味,作业中要注意人身防护。

## 4 湿混凝土配合比选择

### 4.1 某特长隧道湿混凝土配合比

由现场材料检验情况,计算并通过室内试验确定混凝土理论配合比为:1:1.98:1.98:0.50,每立方混凝土水泥用量为430kg。根据现场材料、设备及施工情况,同时考虑现场相应的缓凝要求以及坍落度损失,各主要参数经过相应的调整为:

(1) 水灰比:与室内试验时的材料相比,考虑到水泥标号高,堆料现场混杂较多粉尘,故水灰比确定为0.48~0.52。

(2) 坍落度和砂率的确定:根据现场要求(先泵送后喷射),为确保顺利施工,坍落度定为120~160mm;考虑粗骨料粒径偏小,故砂率适当降低,取45~50%。

按照以上调整原则,共进行四组混凝土配合比设计,综合考虑强度和水泥用量等指标,水灰比定为0.50较为恰当,坍落度为130~150mm较为合适,其他参数可不变。最后确定配合比为:水泥:砂:碎石:水=1:1.58:1.92:0.50。

外加剂掺量为:TCC(速凝剂)5%;SG(稠度剂)1%;DEL(稳定剂)0.2%。每立方混凝土用量440kg。

### 4.2 某地铁工程湿喷混凝土配合比

(1) 混凝土配合比:水泥:中砂:石子=1:2:1.6;

(2) 水灰比:0.45:1;

(3) 防水剂: 掺量为水泥重量的0.4~1.0%;

(4) 速凝剂: 液态速凝剂, 掺量不超过水泥重量的5%;

(5) 坍落度: 80~150mm.

## 5 施工机具选择

湿喷混凝土质量好坏, 跟湿喷机的性能息息相关。某特长隧道由于采用TBM施工, 因而湿喷机由TBM上的湿喷系统替代。在某地铁施工中湿喷混凝土采用成都岩锋科技发展有限公司生产的TK-961改进型转子活塞式湿喷机, 其作用原理是随着料腔的圆周运动, 使九个活塞沿凸轮曲面上下的往复活动, 将进行料斗的混凝土连续送入混合室, 与压缩空气混合后进入输送管形成“稀薄流”, 在喷嘴口与用计量泵压送的液态速凝剂混合形成料束, 喷到受喷面上。此种机器体积小、机动性强、构造简单、易于清洗、维修方便, 对集料的级配和坍落度要求范围宽, 易操作。对于地铁隧道小断面的施工方便、灵活、便于操作, 并能减少粉尘、回弹, 保证混凝土品质的稳定性。该机器的主要参数指标和具体施工参数如下:

- (1) 生产率: 5m<sup>3</sup>/h;
- (2) 骨料最大粒径: 15mm;
- (3) 适用混凝土: 塑性混凝土, 混凝土坍落度50~200mm;
- (4) 工作风压: 0.3~0.7MPa;
- (5) 耗风量: 10<sup>3</sup>/min;
- (6) 喷射角度: >70度;
- (7) 最大输送距离: 水平40cm, 垂直20cm;
- (8) 喷头距岩面: 1.5~2.0m;
- (9) 一次性喷层厚度: 边墙≤100mm, 拱部≤70mm;
- (10) 作业面气温: >15°C;
- (11) 外形尺寸: 2200×1400×1500(mm);
- (12) 重量: 2200kg。

## 6 湿喷混凝土工艺流程与喷射方法

由于某特长隧道装饰面大, 且采用TBM开

挖, 湿喷混凝土施工由TBM上的湿喷系统实现; 而某地铁工程隧道断面小, 采取常规方法施工, 湿喷混凝土由国产TK-961型湿喷机完成。因此两项工程的湿喷混凝土工艺流程与喷射方法也不尽相同。

### 6.1 某特长隧道湿喷混凝土工艺流程

混凝土生产采用工控微机实现自动控制的混凝土搅拌站, 主机为双卧轴强制式搅拌机, 扇形骨料堆场, 悬臂拉铲集料, 机械杠杆电子称称量, 设有外加剂供料系统, 除尘设备, 配备有水泥筒仓和大仰角螺旋输送机。混凝土在拌合站生产后, 直接放入6m<sup>3</sup>的混凝土罐后, 编组进TBM运输列车由小型内燃机车顶推至隧道内, 由TBM上的湿喷系统完成喷混凝土作业。其相应施工流程见图1。

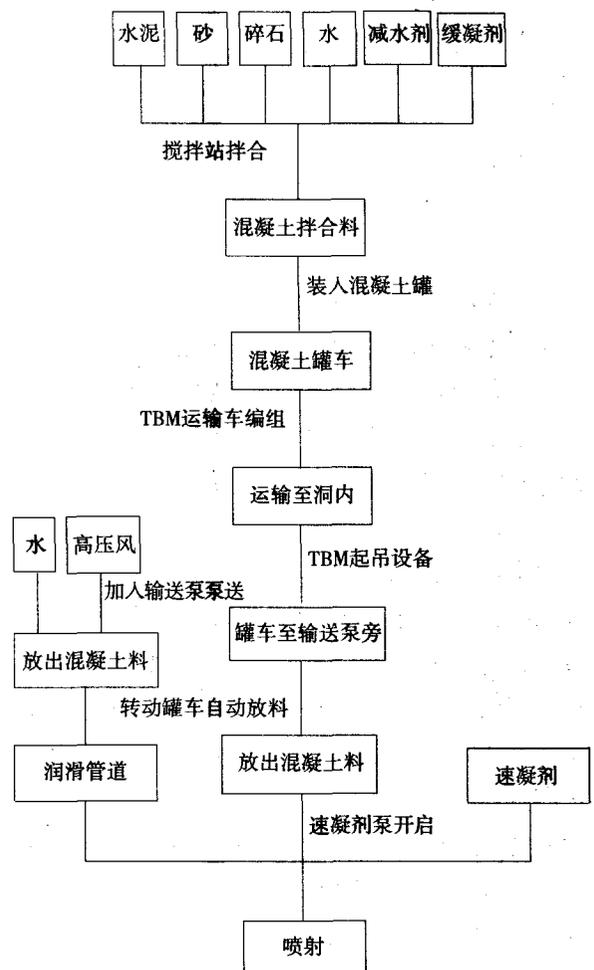


图1 湿喷混凝土施工流程图

混凝土喷射与TBM掘进相协调进行,通常情况掘进3个循环时(5.4米)喷射一次混凝土,遇不良地质需加强支护等特殊情况下临时调整;在此较顺利情况下,通过调整输送泵的泵送频率,可以实现喷混凝土厚度的自动控制。

## 6.2 某地铁工程湿混凝土喷射方法

### 6.2.1 喷射角度与距离岩面的距离

喷头应与受喷面垂直,因操作、现场工况等原因,无法保持垂直时可稍微倾斜,但喷射角度不宜小于70度。若喷头与受喷面的角度太小,会形成混凝土物料在工作面上的滚动,产生凹凸不平的波形喷面,增加回弹量,影响混凝土质量。

喷头距岩央的距离为1.5~2.0m时为宜。因为TK-961型湿喷机需要风压为0.3~0.7MPa,喷头距岩面太近,压缩空气会将刚“粘”到受喷面上的混凝土拌合料吹走,增大粗骨料的回弹量。

### 6.2.2 喷头运动方式

喷头应作连续不断的圆周运动,并形成螺旋状运动,后一圈压前一圈三分之一。喷射路线应自上而下呈“S”形运动,隧道内的混凝土应按新奥法理论,进行先拱后墙地喷射。

### 6.2.3 喷射厚度

湿喷混凝土一次性喷层厚度比干(潮)喷要大,拱部为70mm,边墙为100mm以上。喷层厚度主要受混凝土坍落度、速凝剂的作用效果和作业面气温影响。一般情况,80mm左右的坍落度可以获得较厚的喷层;混凝土在2min内凝结的速凝效果较好;作业面气温在15°C以上为宜。

### 6.2.4 劳动力组织

现场操作的劳动组织安排和机械配备:

- (1) 喷射手: 2人;
- (2) 湿喷机司机: 1人;
- (3) 湿喷机上料工: 4人;
- (4) 后台混凝土搅拌及运输工: 4人;

(5) 混凝土搅拌机1台;湿喷机1台;翻斗车2台;独轮车2辆。

## 7 湿喷与干(潮)喷比较(见表4)

表4 湿、干(潮)喷优、缺点比较表

类别 项目	干(潮)喷	湿喷
单机价格	2万元左右	10万元左右
清洗	方便	易清洗
机器耗材	结合板磨损大	结合板、衬板、 输送消耗较少
混凝土质量控制	水灰比有随意性,混凝土质量不易控制	混凝土配比处于受控状态,混凝土质量得到保证
生产效率	标定生产率5m <sup>3</sup> /h,因回弹量大而小	标定生产率5m <sup>3</sup> /h,因回弹量小而大
回弹量	40~50%	20%左右
成本情况	综合成本略高,社会效益较差	综合成本略低,社会效益较好
粉尘	喷嘴旁粉尘约120mg/m <sup>3</sup>	喷嘴旁粉尘约20mg/m <sup>3</sup>

## 8 结束语

喷混凝土作为建筑施工中的一种重要手段,其应用范围愈来愈广泛,单就欧洲而言,每年的用量就在300万立方以上;湿喷技术由于其明显的优点,也越来越有在喷混凝土中占据主导地位的趋势。就整个湿喷技术来看,建筑材料、喷射机具的优化直接关系到湿喷质量的好坏。湿喷技术的发展离不开建材、机械等行业的大力支持,因此,全面掌握这些领域的动态,寻求共同发展,方能使湿喷技术在实际施工中不断提高、完善。

### 参考文献

- [1] 铁道部科学研究院西南所成都岩峰科技发展有限公司, TK-961型湿喷机系列资料。
- [2] 河南省巩义市特种建材厂, 8604-II型液态速凝剂系列资料, 1998年。