

# 湿喷机械手在桐梓隧道施工中的应用

## Application of wet spraying manipulator in Tongzi tunnel construction

龙杰 雷唐林

Jie Long Tanglin Lei

中交一公局第四工程有限公司 广西 南宁 530033

The Fourth Engineering Co Ltd ofCCCC First Engineering Co Ltd Nanning Guangxi 530033

**摘要:**随着隧道施工技术的发展,湿喷机械手由于其优异的性能、能大大降低隧道内的粉尘浓度、施工效率高、混凝土回弹率低和施工质量高等特点,已成为隧道喷锚施工的主要工具。本文以桐梓隧道内湿喷机械手的实际应用为例,阐述和分析机械手湿喷工艺的全过程,总结出适用于隧道机械手湿喷的工艺技术要求。

**Abstract:** With the development of tunnel construction technology, wet shotcrete manipulator has become the main tool in tunnel shotcrete construction because of its excellent performance, which can greatly reduce the dust concentration in the tunnel, high construction efficiency, low concrete rebound rate and high construction quality. In this paper, the practical application of wet spraying manipulator in Tongzi tunnel is taken as an example, the whole process of wet spraying process of manipulator is expounded and analyzed, and the technical requirements applicable to the wet spraying process of manipulator in tunnel are summarized.

**关键词:** 隧道;湿喷机械手;湿喷工艺

**Keywords:** Tunnel; Wet spray manipulator; Wet spraying process

**DOI:** 10.12346/etr.v3i4.3303

## 一、引言

近年来,由于隧道机械手湿喷工艺相比较传统工艺有着诸多优点,因而正在快速的推广应用,此外,随着现在对环保、职业健康的越来越重视,传统的干喷、潮喷等工艺被淘汰已成必然,但是针对机械手湿喷工艺很少有较为完整且具有实际指导施工的工艺流程阐述。通过机械手在桐梓隧道的施工应用,详细地从机械手湿喷各个因素进行阐述,为隧道喷锚施工总结出机械手湿喷工艺参数,也为类似工程提供借鉴。

## 二、工程概况

重遵扩容项目桐梓隧道位于贵州遵义桐梓县境内,设计为左、右线分离式双向六车道隧道,主洞建筑限界净宽14.75m,净高5m,最大断面面积达213m<sup>2</sup>,桐梓隧道全长10497m,最大埋深639.61m。桐梓隧道为贵州省最长三车道公路隧道,隧道存在煤层采空区、高瓦斯、高地应力、岩溶、突泥涌水等复杂地质,为极高风险隧道,隧道IV、V级围岩占比83%。

隧道初期支护采用湿喷工艺喷射C25混凝土。

## 三、机械手湿喷工艺

### (一)机械手湿喷原理

桐梓隧道采用五新CHP25B型湿喷车,其主要参数详见表1。湿喷机械手工作原理是将骨料、水泥和水按设计比例拌和均匀,利用液压力将混合料通过管道输送至喷枪,然后在喷枪口处引入压缩空气以及速凝剂,最后再以高速在受喷面上喷射混合料,快速凝结形成混凝土支护层。这种工艺最大好处就在于安全、经济以及快速,可以有效地完成隧道初期支护工作<sup>[1]</sup>。

### (二)喷射混凝土

机械手湿喷的质量、回弹率与喷射混凝土的配合比密不可分,喷射混凝土的石子粒径不宜大于16mm,骨料级配宜采用连续级配。细骨料应采用坚硬耐久的中砂和粗砂,细度模数宜大于2.5。严格控制拌合料的水灰比,需要经常检查速凝剂注入环的工作状况。喷射混凝土的坍落度宜控制在8~10cm,过大混凝土会流淌,过小容易出现堵管现象。喷射过程中应及时检查混凝土的回弹率和实际配合比。施工现场根据喷枪效果将设计配合比进行调整,实际施工用配合比如表2所示。

**【作者简介】**龙杰(1992~),男,汉族,贵州人,工程师,本科。雷唐林(1989~),男,汉族,湖南衡阳人,工程师,专科。

表 1 湿喷机械手主要参数

项目	外形尺寸 (mm)	自重(kg)	臂架结构 形式	喷射垂直 高度(m)	喷射水平 宽度(m)	喷头水平 角	理论排量 (m <sup>3</sup> /h)	出口压力 (MPa)	喷嘴口径 (mm)	外加剂系 统压力 (bar)
参数	9450× 2500×3380	16000	主臂回旋+ 伸缩,喷射 臂折叠+伸 缩	16	2×12	360°	25	7.3	Φ50	18

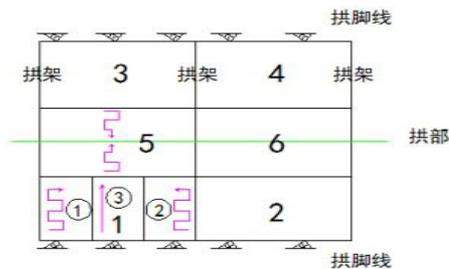
表 2 喷射混凝土配合比

项目	标号	水(kg)	水泥(kg)	砂(kg)	碎石(kg)	减水剂(kg)	速凝剂(%)	坍落度(mm)
参数	C25	174	498	915	663	4.48	边墙:3 拱部:5	180 ± 20

**(三) 喷锚顺序**

喷射作业应分区段进行,每一小段作业宽度以 1.5~2m 为宜,其喷射顺序为:先墙后拱,自下而上;边墙应自墙基开始,拱部应自拱基线开始。喷射时先自下而上进行喷钢拱架与壁面间混凝土,再喷两钢拱架之间混凝土。喷射时从边墙到拱顶以螺旋状沿横向往复移动,使回弹不致裹入最后喷层。隧道边墙初喷期间,需要一名人员用长柄铁锹将拱架上混凝土铲掉,以免视线受到干扰造成喷射面不平整。然后开始补喷拱顶,喷至凹弧形。最后将上一循环拱顶补喷平整。至此喷锚工序完成。

隧道容易受到围岩情况及开挖技术的影响造成超挖现象,针对边墙超挖部分,一般需要加塞网片,喷射时需要加大湿喷机的喷射压力,最终将边墙面喷射成凹面弧形。针对拱顶超挖过大情况,需要严格进行分层喷射,每层厚度控制在 10cm 左右,同时需要加大速凝剂掺量,以降低回弹掉块。



整体喷锚顺序:1-2-3-4-5-6, 其中 1、2、3、4 中喷射顺序为①-②-③

图 1 湿喷机械手喷射顺序示意图

**(四) 喷射参数**

1、喷射角度

根据现场喷射混凝土经验,两边边墙初喷时,喷射角度宜控制在 90°,即喷嘴与受喷面呈 90°角。而拱顶喷射混凝土时,喷射角度控制在 60°至 90°之间,首先 90°喷射,后 60°喷射,使受喷面形成较小的斜率,增加初喷时的初始接触面积,既能达到减少回弹的目的,也能达到适当增加喷射混凝土一次性喷射厚度的效果。

复喷或补喷喷射角度最好不要低于 70°,否则会形成混凝土物料在受喷面上的滚动,产生凹凸不平的波形喷面,增加回弹量,影响混凝土质量。

复喷或补喷时,喷射角度不应小于 70°,否则会导致混凝土物料在喷射表面滚动,导致初喷表面不平整,致使回弹量增加,同时使混凝土质量受到影响。

**2、喷射厚度**

喷射混凝土应划分区域,分层喷射<sup>[2]</sup>。一般情况下,每个区域喷射时可先初喷一层,厚度不超过 10cm,然后再复喷至设计厚度。另外尽管喷射混凝土加有速凝剂,但是初喷厚度过大,容易使速凝剂尚未凝结,新喷射混凝土覆盖上来,引起较大的回弹<sup>[3]</sup>,甚至导致直接大面积掉块现象。如果遇到超挖现象,尤其是拱顶超挖,应针对超挖处加塞钢筋网片,再视情况分多次分层喷射混凝土。

通常,在每个区域喷射时,过程中要保证喷射混凝土厚度,边墙一次喷射厚度控制在 5~10cm,拱顶一次喷射厚度控制在 4~6cm,然后逐步喷射到设计厚度。另外,尽管在喷射混凝土中添加了促进剂,但是初始喷射的厚度太大,这很容易使促进剂不凝结,而新的喷射混凝土覆盖了它,从而导致较大的回弹<sup>[4]</sup>,甚至是直接的。大面积堵塞。

**3、喷射风压**

在实际施工中,需要根据现场情况确定喷嘴风压控制,风压过大或过小都会影响喷射混凝土的强度、密实度和回弹率。现场的风压控制需要操作人员结合试验室的测试结果来灵活调整。另外风压的大小与混凝土的和易性有关,和易性越好,所需风压较小,反之则偏大<sup>[5]</sup>。通常情况下,边墙风压控制在 0.3~0.5Mpa 之间,拱部则控制在 0.4~0.65Mpa 之间,喷射混凝土度试验结果满足相关要求。

#### 4、喷射距离

湿喷机作业时,如果喷头距初喷表面太近,高压风会吹掉初喷面的混凝土,为了避免回弹量增大,因此从喷嘴到初喷表面的距离一般控制在 0.8m 至 1.2m 之间,具体值需要由操作员根据初喷效果来进行调整。进行复喷时,喷锚距离以 1.5m 至 2m 的间距进行控制,因为此时喷射的混凝土接触面积较小,这样有利于减少喷射砼的回弹量并且增加混凝土的密实度。

#### 5、喷射时间

根据现场的实际情况,一个循环(进尺 3m)的射涂时间平均为 5 小时,喷射时间最长的部分拱顶喷射时,基本上占初喷时间的一半。根据现场实际的超挖情况,操作人员可以优先喷射超挖部位,从而减少混凝土的喷射时间。

#### (五)回弹率测定

现场喷射砼的回弹率是通过传统方法测定的:在现场通过多个点测算出回弹混凝土的平均厚度,并据此估算回弹量。为了尽可能准确地计算数据,在喷射混凝土之前,应先将掌子面的底板进行机械整平。据此测算出回弹率约为 12%。考虑到在喷射混凝土过程中,由于喷嘴处的混凝土喷射压力高于 7Mpa,会导致部分回弹混凝土无法测定,综合得出回弹率约为 13%。

### 四、注意事项

#### (一)关于喷射距离的控制

湿喷机喷嘴与喷射表面之间的距离与诸如风压,速凝剂,混凝土坍落度等参数有关。假设上述参数已达到最佳,操作人员则根据现场反弹量的经验对喷射距离进行调整,如果回弹量小,则距离将减小,如果回弹量大,则距离将增大。

#### (二)关于喷射角度的选择

根据现场观察,边墙的喷射角应尽可能控制在 90°左右,这样回弹量最小。当混凝土喷射到拱形腰部时,通常先垂直喷射,然后将其调整到约 60°的斜角进行喷射,这样可以有效减少回弹量。

#### (三)关于混凝土坍落度

根据现场经验来看,坍落度调整至砼可以从罐车顺利流出即可。坍落度过大,加大速凝剂掺量也无明显改善效果,而且速凝剂影响喷射混凝土的强度。

#### (四)关于喷砼技巧

有丰富经验的操作手开始时可近距离试喷,根据喷射出的砼情况调整喷射时的参数。初喷时可以先将拱架背后空隙喷密实,然后再从拱架处缓慢地喷射到拱架之间,使混凝

土可以具有更大的附着面从而减少掉块。喷至拱架面时必须用铁锹铲平拱架上混凝土。复喷时,喷嘴与受喷面距离可调整至 1.5m 至 2m,一是可以减少回弹量,二是操作手易控制喷射厚度,更容易控制砼面平整度。

#### (五)关于喷射时间

混凝土的喷射时间与隧道的超欠挖情况、混凝土的质量、操作手的熟练度、湿喷机的故障率以及现场工序衔接情况等因素息息相关,因此管理过程中要减少这些影响因素的发生。

#### (六)关于喷射混凝土

喷射混凝土的质量非常重要,如果质量差,将直接导致喷射混凝土发生堵塞或掉块严重现象。另外,混凝土应连续供应,避免供应不及时导致湿喷机频繁停机造成堵管<sup>1)</sup>。

### 五、结论与建议

(1)通过对桐梓隧道湿喷工艺的总结,虽然当前混凝土综合回弹率为 13%符合相关要求,但是以后仍需继续对工艺进行总结,将回弹率控制在 10%以内,争取更大的经济效益。

(2)机械手湿喷仍为人工操作遥控实现,所以机械手操作员的素质也是一个不可忽略的因素。

(3)对于像桐梓隧道这样的大断面隧道,建议研发生产一种带有两个自由喷射臂的机械湿喷机械手,可以同时拱顶和边墙进行喷射,操作时只需要调整喷射位置,两个臂可以同时工作而互不干扰,这可以节省大约一半的喷射时间。

#### 参考文献

- [1] 李鹏华.混凝土湿喷机械手在隧道施工中的应用[J].工程建设标准化,2015(2).
- [2] 宋晓辉,徐飞萍,方耀卿,等.公路隧道湿喷工艺一体化施工方案研究[J].山东交通科技,2008(2):84-87.
- [3] 张硕.谈隧道湿喷混凝土施工工艺[J].山西建筑,2009,35(8):176-178.
- [4] 翟富强.混凝土机械手湿喷技术在长大隧道中的应用[J].隧道建设(中英文),2010(s1):346-349.
- [5] 石亚勇.喷射混凝土在工程中的应用[J].轻工科技,2009,25(11):17-18.
- [6] 皮亮,蒋树屏.穿越高层建筑大跨隧道施工力学与支护结构研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(05):1303-1310.
- [7] 胡曦波,李壮,焦雷,金星亮,梁斌.浅埋扁平超大断面隧道围岩变形及核心土开挖合理长度研究[J].河南大学学报(自然科学版),2017,47(05):614-620.