

# 公路隧道初期支护喷射混凝土超耗的分析及控制

李加朋<sup>1</sup>, 贾旭<sup>2</sup>

(1. 中交一航局第五工程有限公司; 2. 中交一航局第二工程有限公司)

**摘要:** 公路隧道初期支护的一个主要施工材料为喷射混凝土, 但在使用过程中存在的一个关键问题是超耗, 造成了大量的资源浪费。为了确定初期支护喷射混凝土超耗的主要原因, 文章从初期支护混凝土喷射操作方法、混凝土配合比、施工条件、机械设备等方面进行分析并通过对实际工地的初期支护喷射混凝土超耗数据进行深入分析, 得到了造成超耗的主要因素及主要因素算法, 为后续隧道初期支护混凝土超耗改进提供了参考。

**关键词:** 控制喷射混凝土性能; 速凝剂掺量; 预留变形量; 超挖回填量

## 0 引言

我国隧道初期支护施工均已全面推广应用湿喷混凝土工艺, 喷射混凝土标号一般不低于 C20, 基本处于 C20—C30 之间, 与拱架等共同组成支护体系并承担洞身开挖后的围岩荷载。目前, 公路工程隧道设计图纸中给定的初期支护混凝土工程数量是未考虑其他因素的采用固定结构物尺寸进行理论计算得出的数量, JTG/T 3832—2018《公路工程预算定额》中给定的隧道初期支护混凝土回弹率为 20%。但在实际施工过程中, 由于各种原因, 目前的隧道支护喷射混凝土用量远远超过了设计规定的理论消耗量, 以超耗率为评估指标,  $\text{超耗率} = (\text{实际消耗 } Z - \text{设定值 } D) / \text{设定值 } D$ 。通过对混凝土建筑工程的容许超耗(以下称为应耗率)进行深入的研究分析, 建立了相应的条件、计算方法及消耗标准。本文提出了一套适用于隧道工程中控制初期支护喷射混凝土用量的工程技术与和管理, 以达到减少喷射混凝土过量消耗的目的, 并提出相应的控制措施, 降低工程建设周期内的损失。本文的研究成果可作为今后隧道施工中混凝土用量计算和施工定额修订的依据。

## 1 隧道初支混凝土实际消耗量

隧道初支混凝土实际消耗量  $Z$  由设计结构净量  $D$ 、超挖回填量  $E$ 、预留变形回填量  $T$ 、喷射混凝土回弹量  $S$  等组成。

### 1.1 设计结构净量

根据隧道断面及围岩不同, 设计的初支厚度及混凝土工程量也不同。本文以某高速公路施工标段单洞两车道隧道各级围岩衬砌类型断面为例,

统计出了延米初支混凝土设计结构净量  $D$ , 如表 1 所示。

表 1 延米初支混凝土设计结构净量表

围岩级别	占比/%	适用条件	预留变形/mm	厚度/mm	设计量 $D/\text{m}^3$
S-III	—	常规	5	10	2.60
IV-A	65	软岩深埋	8	22	5.55
IV-B	65	软岩深埋	8	22	5.39
IV-C	65	硬岩深埋	8	22	5.39
V-A	35	浅埋偏压	12	26	9.69
V-B	35	浅埋	12	24	8.93
V-C	35	软岩深埋	10	24	6.10
V-D	35	硬岩深埋	10	24	6.10
V-E	35	断层破碎	15	26	9.69

### 1.2 超挖回填量

本文将超挖回填量分为允许超挖回填量  $E_1$  和扰动超挖额外回填量  $E_2$  两部分。

#### 1.2.1 允许超挖回填量

按照 JTG/T 3660—2020《公路隧道施工技术规范》第 2 条 7.3.3 款中的“欠挖量要严格控制”的要求。当岩层完整、岩石抗压强度大于 30 MPa 并确认不影响衬砌结构稳定和强度时, 每  $\text{m}^2$  内欠挖面积不宜大于  $0.1 \text{ m}^2$ , 欠挖隆起量不得大于 50 mm。拱脚、墙脚以上 1 m 范围内及净空图折角对应位置严禁欠挖。

当岩石抗压强度为 30 MPa 时, 应加强对欠掘量的控制。同时, 受钻孔设备结构影响, 周边孔在钻进过程中需要有一定的外插角, 保持一定的超挖量, 才能始终满足隧道净空设计要求, 特别是 IV、V 级围岩, 受支护结构影响, 钻孔外插角

及超挖量会更大,按照《公路隧道施工技术规范》7.4.8 条目要求“应控制周边孔外插角度”、“隧道开挖总不免会有超挖,超挖量随岩质、节理裂隙状况、开挖方式和方法等而异”,故隧道施工时围岩有一个允许超挖量。

根据《公路隧道施工技术规范》第 7.3.4 条的规定,宜减少超挖,对应本项目高速公路隧道围岩超挖控制值如表 2 所示<sup>[2]</sup>。

表 2 高速公路隧道围岩超挖控制值

项目	超挖控制值/mm
破碎岩、土(Ⅳ级、Ⅴ级、Ⅵ级围岩)	平均 100, 最大 150
中硬岩、软岩(Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级围岩)	平均 150, 最大 250
硬岩(Ⅰ级围岩)	平均 100, 最大 200
每侧	+100, 0
全宽	+200, 0
仰拱、隧底	平均 100, 最大 250

本项目高速公路隧道除了出入口浅埋地段外,洞身主要段落均为采用爆破开挖工艺开挖的Ⅳ级、Ⅴ级中硬岩、软岩,变更设计后预计最终Ⅳ级围岩占 65%,Ⅴ级围岩占 35%。考虑施工误差,调增平均超挖值 20 mm,拱部、边墙、仰拱各占 1/3,以此计算允许超挖回填量  $E_1$ 。

### 1.2.2 扰动超挖额外回填量

不同破碎程度的围岩爆破后进行机械或人工整修、支设钢架、挂钢筋网片,超前小导管和系统锚杆锁脚锚管(杆)打设等均会对爆破开挖形成的隧道轮廓围岩产生扰动。图 1 为隧道实测开挖断面图。

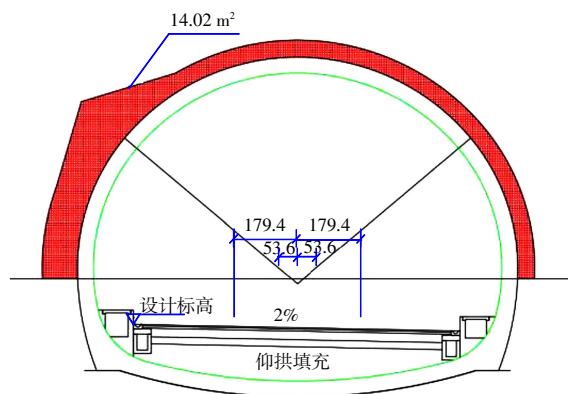


图 1 隧道实测开挖断面图(cm)

本文结合公路隧道设计规范<sup>[1]</sup>中表 3.6.4 公路隧道围岩级别划分和表 3.6.6 隧道各级围岩自稳能力判断等信息,将不致形成拱部坍塌需要编制专项方案处理的超挖的围岩破碎程度分为完整、较

完整、较破碎和破碎 4 种,并引入与之对应的扰动超挖影响系数  $k_1$ ,用以建立核算扰动超挖额外回填量  $E_2$  的初步模型。

$$E_2 = k_1 \times D$$

结合既有经验,  $k_1$  的暂赋值如表 3 所示,后续应根据经验及现场采集的数据对  $k_1$  的赋值进行修订、更新。一般高速公路隧道扰动超挖系数值见表 3。

表 3 高速公路隧道扰动超挖系数值

围岩破碎程度	性状简要描述	$k_1$
完整	围岩质硬较完整,节理不发育或弱发育	1.05
较完整	围岩质较硬较完整,节理弱发育或发育,不易掉块	1.15
较破碎	围岩质较软较破碎,节理较发育,较易掉块	1.50
破碎	围岩质软破碎,节理强发育,易掉块滑落	2.00

### 1.3 预留变形回填量

随着隧道开挖,由于岩体自重和应力的作用,周围的围岩将发生收缩或位移,因此,实际的挖掘尺寸必须略大于原定的挖掘轮廓,这一部分被称为预留变形量。预留变形量主要是为了应对施工过程中可能出现的隧道变形,保障隧道的整体结构稳定和安全。围岩的变形程度不仅取决于围岩类型和水文地质条件,并且与施工技术、初期支撑、辅助工程措施等因素有关,为了保证隧道的安全可靠,在施工过程中必须密切关注现场监测数据,并及时进行调整。这样,即使实际变形量超出预留的变形量,也能确保开挖净空足够,并保证二次衬砌的厚度。在设计变形量的同时,应注意避免出现开挖浪费、二次衬砌厚度超出规定范围以及需要额外的回填量的情况<sup>[3]</sup>。预留变形量主要影响二次衬砌混凝土消耗量,本文暂不考虑预留变形量对初支混凝土消耗的影响。

### 1.4 喷射混凝土回弹量

根据已有的回弹率  $r$ ,可以通过计算混凝土总量来估算施工过程中的回弹量。

$$S = r \times (D + E + T) \quad (1)$$

式中:  $S$  为喷射混凝土回弹量,  $\text{m}^3$ ;  $r$  为已知回弹率, %;  $D$  为设计结构净量,  $\text{m}^3$ ;  $E$  为超挖回填量,  $\text{m}^3$ ;  $T$  为预留变形回填量,  $\text{m}^3$ 。

混凝土浇筑的总量不仅要符合设计要求,还必须满足可能超出的回填要求。在施工过程中,如果隧道的超挖尺寸变得更大,那么未经计量的喷

射混凝土的反弹力也会相应增加。为了降低这种影响,应该尽可能地减少隧道的超挖。

1.4.1 常规混凝土回弹量

隧道施工采用湿喷机械手进行初期支护,以最大限度地减少施工工艺对回弹率的不利影响。结合 JTG/T 3832—2018《公路工程预算定额》,将湿喷机械手施工时的回弹率 $r_1$ 定为 20%。此外,通过选择合适的配合比,也可以有效地降低回弹率。图 2 为隧道喷射混凝土初期支护现场作业。



图 2 隧道喷射混凝土初期支护作业

1.4.2 混凝土额外回弹量

不同水文地质条件下的围岩,洞身开挖完成后可能会有不同程度的洞身开挖轮廓面,对有水隧道出水的处置会产生额外的如导、排水等措施费用,也会改变喷射混凝土配比,从而对回弹量产生额外影响。

本文将水文条件分为无水、潮湿、出水和涌水 4 种情况,并引入与之对应的水文影响系数 $k_2$ 以及水文地质因素导致的混凝土额外回弹率 $r_2$ ,用以建立核算水文地质因素导致的混凝土额外回弹量 $S_2$ 的初步模型。

$$r_2=k_2\times r_1 \tag{2}$$

$$S_2=r_2\times (D+E+T) \tag{3}$$

式中: $r_1$ 为湿喷机械手施工时回弹率,%; $r_2$ 为水文地质因素导致的混凝土额外回弹率,%; $k_2$ 为水文影响系数; $S_2$ 为水文地质因素导致的混凝土额外回弹量, $\text{m}^3$ ; $D$ 为设计结构净量, $\text{m}^3$ ; $E$ 为超挖回填量, $\text{m}^3$ ; $T$ 为预留变形回填量, $\text{m}^3$ 。

结合既有经验, $k_2$ 的暂赋值如表 4 所示,后续应根据经验及现场采集的数据对 $k_2$ 的赋值进行修订、更新。一般高速公路隧道水文影响系数如表 4 所示。

表 4 高速公路隧道水文影响系数表

水文条件	性状简要描述	$k_2$
无水	掌子面及开挖轮廓面无水	0
潮湿	掌子面及开挖轮廓面潮湿,有间断滴水情况	0.2
出水	掌子面及开挖轮廓面有水,不间断出水沿洞身滴落或汇集,需要引排	0.5
涌水	掌子面及开挖轮廓面有涌水情况,需要采取于洞身打管引排等专项措施	1.0

1.5 混凝土施工过程损耗量

在混凝土的加工、生产和施工过程中,必然会出现一定的损失,例如:在运输车内残留混凝土或是湿喷机械手喷浆完成后残留,为确保喷射质量超出预期方量等。为了控制这些损失,暂时将混凝土施工过程的损失量定为 1%<sup>[3]</sup>。

总体核算该隧道初支混凝土消耗量及超耗率如表 5 所示。

表 5 隧道初支混凝土消耗量及超耗率

围岩级别	设计量/ $\text{m}^3$	总消耗量/ $\text{m}^3$	超耗率/%
Ⅳ-A	5.39	13.58	151.95
Ⅴ-A	6.10	14.91	144.43
平均	5.64	14.05	149.11

2 混凝土超耗原因分析

1) 施工工艺引起的超耗

在喷射混凝土施工过程中,未能严格按照施工方案及工艺要求对整个岩面采用高压风进行清理再进行混凝土喷射作业,未针对边墙、拱腰、拱顶等不同喷射部位及时调节喷枪高压风的压力,导致喷到岩面上的混凝土由于压力过大引起喷射混凝土回弹量较大,浪费材料。

2) 材料原因引起的超耗

按照设计要求对喷射混凝土配合比进行了设计,但是在使用过程中存在 5~10 mm 碎石、中粗砂级配不均匀、含泥量超标,外加剂性能不稳定、掺量不准确,拌和后运送到现场的混凝土和易性及黏结性较差,坍落度不能满足喷射要求,喷到岩面上的混凝土掉落,导致喷射混凝土超耗。

3) 用量估算引起的超耗

在拱架安装合格可以进行喷射混凝土施工后,因围岩破碎存在超挖现象,技术人员对混凝土实际使用数量进行了预估并报拌合站进行混凝土生产配送,由于预估量不准确、喷射过程中不能及时根据现场使用情况对报批量进行调整,导致该工序施工结束后材料剩余造成浪费。

#### 4) 设备因素引起的超耗

隧道开工后,按照现场施工需求配置了混凝土湿喷机,且配备了相应的操作、管理人员,但在施工过程中,操作人员不能在每次使用后及时对设备进行清理、保养、检修,不能对设备运转情况准确掌控,导致在使用过程中设备故障率较多,停工检修造成已拌和好的喷射混凝土不能在有效时间内使用,造成材料超耗。

#### 5) 操作人员技能引起的超耗

在施工过程中,由于操作人员技能不熟练、操作不规范、存在惰性心理,不能熟练掌握湿喷机操作规程、喷射混凝土施工技术要点及工艺流程,同一喷射部位喷射厚度较厚,喷至墙面上的混凝土由于自重原因掉落现象严重,导致回弹量较大,造成喷射混凝土材料超耗。

### 3 隧道初支混凝土超耗控制建议

本文对隧道初期支护喷射混凝土超耗进行分析研究,建立相关参数初步模型,得出以下结论:

1) 为了保证隧道安全,必须严格控制和动态调整爆破参数和外插角。此外,要加强操作人员的光爆技术学习培训,以提高施工水平;认真对待超欠挖的考核,努力将其控制在最小范围内,避免轮廓整修及施工扰动,避免超前小导管上下循环间及上下台阶拱脚部位的掉块围岩超挖;在浇筑混凝土时,会出现反弹现象,因此必须严格控制,以减少反弹的数量。做好喷射混凝土配合比设计并动态优化,加强对现场速凝剂添加率的控制。

2) 为了保证喷射混凝土的质量,将其到达施工现场时的坍落度控制在 100 mm 以下,确保其质量和性能。将水灰比控制在 0.45 以下,粗细骨料比保持在 45%<sup>[4]</sup>;严格控制速凝剂质量,碱性速凝剂掺量 6%~9%,并做好掺率控制<sup>[4]</sup>;为了确保喷层厚度符合要求,将边墙部分的混凝土厚度控制在 7~9 cm 之间,以便作为参考标准。每个区域的拱部高度应该在 6~7 cm 之间,而标志间隔则按照环形的 1 m×1 m 规格进行设置<sup>[4]</sup>;控制风压为边墙 0.3~0.5 MPa,拱部 0.4~0.65 MPa,以保证最小回弹率<sup>[4]</sup>;为了获得最佳的湿喷效果,喷嘴和受喷面的角度尽量保持在 90°,采用垂直喷射方式,可以显著提高湿喷混凝土的回弹率<sup>[4]</sup>;控制湿喷距离

在 1 m 左右时,混凝土湿喷回弹率最低。

3) 为了更准确地估算二次衬砌的承载能力,应进行全面的数据收集和分析,以便清楚地了解每一个层次围岩的累积变形量,准确地估算出二次衬砌的承载能力,尽可能减少混凝土的回填量。

4) 通过参考设计院给定的隧道初支混凝土量规范约定,从而考虑允许超挖、预留变形的工程数量,修订施工定额。

### 4 喷射混凝土施工方法

在实际操作中,建议按照以下步骤完成喷射混凝土:

1) 确保地基的整体稳定。然后按照从高到低的原则,在每个部位都要有足够的空间,并且要尽量避免出现过多的空隙。在每个部位都要有足够的空间,并且在每个部位都要有足够的空间来填补空隙。

2) 在施工过程中,需要采用分段喷涂的方式,首先在 2 个钢结构的表面施加混凝土,然后在它们的中心处加适量水。需要注意从墙角处一直向上施工,以免将混凝土的反弹部分覆盖到底部。同时,需要保证施工过程中的稳定性,以便达到预期的效果。

3) 通过大力提升施工技能,并定期组织实地考察、反馈、指导,提高施工质量。

### 5 结语

初支喷射混凝土应耗量的大小取决于多种因素,包括设计量、回弹量、均匀线性超挖量、预留变形量、返弹率。当对一个施工中的隧道进行研究时,如果采用提高湿喷机械手操作规范和控制超挖量的方法,喷射混凝土应耗量将会比设计量高 2.52 倍,超耗率也会更高,可能达到 152%。

初支喷射混凝土超耗率总体情况较为复杂,在当前施工技术水平及环境条件下,隧道初期支护混凝土消耗量远大于设计混凝土量,后续应进一步加强相关研究工作。

### 参考文献:

- [1] JTG 3370.1—2018,公路隧道设计规范 第一册 土建工程[S].
- [2] JTG/T 3660—2020,公路隧道施工技术规范[S].
- [3] 方俊波,罗斌智,刘洪震.铁路隧道混凝土理论消耗量分析及计算[J].隧道建设,2021,41(5):721-728.
- [4] 熊小锋.隧道工程初支湿喷混凝土回弹率控制施工技术研究[J].价值工程,2020,39(1):148-150.