湿喷混凝土技术在秦岭隧道施工中的应用

杨书江

（中铁隧道股份有限公司，河南 新乡 453000）

摘　要：秦岭Ⅰ线隧道是国内首次使用 TBM 施工的铁路隧道，TBM 配备了先进的混凝土湿喷设备，介绍了湿喷混凝土施工技术在秦岭Ⅰ线隧道的应用情况。

关键词：秦岭隧道；喷射混凝土；湿喷

中图分类号：U455.43　　文献标识码：B　　文章编号：1000－3746(2003)03－0061－03

喷射混凝土是隧道施工中最基本的支护形式和方法之一。传统的干喷工艺存在粉尘大、回弹高、混凝土质量不稳定 3 大技术难题，实现湿喷成为解决这一问题的根本途径。湿喷混凝土在国外应用比较广泛，我国对湿喷机的研制和应用起步较晚。西康铁路秦岭Ⅰ线隧道作为国内首次使用掘进机（TBM）施工的铁路隧道，在喷射混凝土施工中，应用了先进的湿喷技术。

1　原材料选择及配合比确定

1.1　原材料选择

为降低工程成本，原材料的选择应在满足质量要求的前提下，尽可能采购当地材料。

水泥：秦岭牌 425 普通硅酸盐水泥。

砂：硬质洁净的沣河河砂（中砂），细度模数 2.4。

碎石：为防止喷射混凝土时堵管和减少回弹，选用粒径 5～10 mm 的机制碎石，要求连续粒级，并坚硬耐久。

外加剂：外加剂对混凝土拌合物性能起关键作用，选用上海麦期特建材公司生产的整体稠度控制系统——稠度剂、稳定剂、速凝剂（均为液体外加剂）。SG 稠度剂起减水作用，DEL 稳定剂可以延缓混凝土凝结时间，TCC 速凝剂能促使混凝土迅速凝结硬化。

1.2　配合比确定

喷射混凝土设计等级为 C20。配合比的合理性是湿喷混凝土施工的关键，施工前根据湿喷混凝土工艺要求，通过多次试验比较，确定配合比为：水泥：砂：碎石：水＝1：1.63：1.33：0.46。

外加剂掺量分别为：稠度剂 1%，稳定剂 0.5%，速凝剂 5%，水泥用量 450 kg/m^3。施工中根据砂、碎石的含水率及时调整施工配合比。

2　施工机械

2.1　HZS50 型搅拌站

选用双卧轴强制式搅拌机为主机，扇形骨料堆放场，悬臂拉铲集料，电子自动计量，设有外加剂供料系统，配备水泥筒仓和大倾角螺旋输送机，应用工控微机实行自动或半自动化控制。生产率 50 m^3/h，进料容量 1600 L，出料容量 1000 L。

2.2　混凝土运输罐

混凝土运输罐容积为 6 m^3，罐体在柴油内燃机带动下可以正转或反转，混凝土在运输过程中正转可以延缓混凝土的凝结时间，反转则向混凝土泵料斗中卸料。

2.3　混凝土喷射配套设备

由 2 台 Putzmeister 混凝土输送泵、2 台液体速凝剂泵和 1 个遥控喷射机械手组成。混凝土输送泵输送量 2×10 m^3/h，将混凝土输送到喷嘴处，再添加速凝剂和高压风把混凝土喷射到岩壁上，完成喷射作业。

混凝土输送泵设在 TBM 后配套 3 号平台车上，机械手布置在 2 号平台车的环形架上，距离掘进工作面约 70 m，环形架可沿隧道轴线平行移动 5 m，机械手臂杆可水平伸缩 2 m，臂上装有带喷嘴的摇摆喷头，喷头可绕臂杆旋转 360°，并可在隧道轴线方向前后摆动 90°。利用机械手可以完成隧道顶部 300°范围内的混凝土喷射工作。

环形架行走、机械手臂杆伸缩、喷头旋转、速凝

收稿日期：2002－02－26；改回日期：2003－04－16

作者简介：杨书江（1973－），山东招远人，中铁隧道股份有限公司工程师，中铁隧道集团有限公司广州地铁大汉盾构项目经理部总工程师，交通土建专业，从事地铁隧道施工技术管理工作，河南省新乡市人民路 51 号，(0373)2647744，ysj0321@163.com。

万方数据

剂添加、风压调整等都可通过电动遥控器单独控制和操作。

3 湿喷混凝土施工工艺

3.1 施工工艺流程(见图 1)

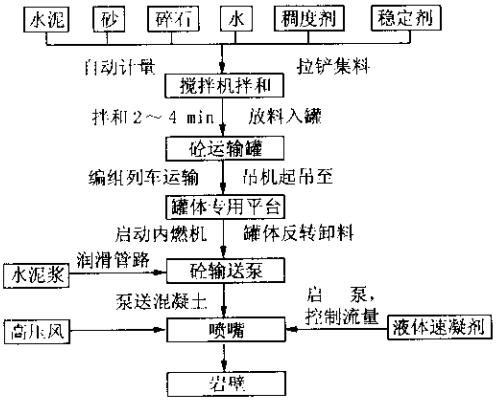

图 1 湿喷混凝土施工工艺流程

3.2 混凝土拌制运输

混凝土拌制时按砂→碎石→水泥→水的顺序投料,加入 SG 稠度剂后搅拌 30 s,然后加入 DEL 稳定剂,继续搅拌 2～4 min。根据现场经验,搅拌时间 < 2 min 时稳定剂在混凝土中分散不均匀,超过 4 min 时可能破坏稳定剂的性能,影响混凝土的拌制质量。

混凝土运输过程中,罐体一般应保持转动以防止混凝土初凝。加入稳定剂后,若混凝土在 2 h 内喷射则不用再搅拌,搅拌会使稳定剂失去其功能。

在搅拌站取部分混凝土样品袋装后放置在平板车上,若 TBM 出现机械故障,导致混凝土不能及时喷射时,应检验样品是否有变化,坍落度应保持在 14～18 cm,若样品不能使用则罐内混凝土同样不能使用。

3.3 混凝土喷射工艺

喷射前用高压风、水冲洗岩面。冲洗时从隧道拱顶开始,按从上到下的顺序清洗至边壁底部。试验表明,洁净湿润的岩面与混凝土粘结比较紧密。

喷射混凝土时从隧道最底处开始由下往上喷射,以避免回弹料污染已冲洗干净的岩面,影响喷射混凝土的质量。

喷射机械手的喷嘴到岩面的距离 1.0 m 是固定不变的,所以混凝土喷射质量取决于风压、速凝剂掺量及喷射角度。喷射操作员应注意观察风、速凝剂、混凝土成股状流体喷出的关系。喷射混凝土时应严格控制风压,风压太小,无法满足喷射混凝土粘结密实要求;风压太大,喷射混凝土一触及岩面(或上一喷层)就会被后续的强大冲击力吹走。二者都会直接造成回弹的增加。速凝剂掺量大时,混凝土瞬间凝结,后喷的混凝土无法渗透镶嵌到前一层混凝土中,就会被回弹掉,喷射时的粉尘也比平时大;速凝剂掺量小时,起不到加快混凝土凝结的作用。速凝剂在 20～30 kg/m^3 间保持较低的掺加量,喷射边壁时比拱顶掺量低些。喷嘴尽量垂直岩面,以确保混凝土的密实效果。喷射时可以观察到喷嘴与岩面的角度偏离直角越多,喷射混凝土材料回弹就越大。

喷射混凝土时应根据围岩类别及水文地质情况,确定适宜的初喷层厚度。初喷层厚度过薄,粗骨料不易粘结牢固,会增加回弹量;初喷层过厚,混凝土自身重力超过其内部凝聚力或超过混凝土与岩面的粘结力,就会造成初喷层下坠掉落或形成空壳。根据设计的支护参数及现场施工情况,初喷层厚度确定为 4～5 cm,初喷 10～15 min 后再继续喷射混凝土至设计厚度。

3.4 特殊情况下的喷射工艺

挂钢筋网地段,喷射后混凝土层面有时呈波浪形,喷头垂直于岩面喷射则可使混凝土均匀分布,避免起伏。

设全圆钢拱架地段,因岩石破碎,混凝土喷射工作显得尤为重要。喷射混凝土必须从填充岩面空洞、裂隙开始。喷头成直线状沿拱架从拱底向拱顶移动,注意不要旋转喷头。钢拱架与围岩之间的空隙必须用喷射混凝土填充密实,并将钢拱架用混凝土包裹严实,使其与喷射混凝土构成整体受力体系。

混凝土掉落部位的补喷,应在 10～15 min 后进行,立即补喷只能引起更大范围的混凝土垮落。喷射时喷头不能旋转,以免在其周围形成凸包。

TBM 掘进后隧道为光滑的圆形断面,在有水地段,喷射混凝土与岩面的粘结力较差,混凝土垮落严重。喷射前应先设法排除岩石表面的渗漏水,然后进行混凝土喷射作业。

3.5 施工中应注意的事项

(1)混凝土的拌和质量直接影响喷射效果,施工中应加强原材料检测及混凝土拌和质量的控制。

(2)喷射前必须用水泥浆润滑混凝土输送泵和送料管,喷射结束后用水冲洗干净管路内残留的混凝土。

(3)喷射工长应注意积累不同地质条件下湿喷混凝土施工的经验,不断提高操作熟练程度和技术水平。

(4)喷射工长在喷射混凝土时要注意站位,加

万方数据

强劳动保护,防止混凝土垮落伤人。

4　喷射混凝土质量评定

喷射混凝土质量评定主要有抗压强度和喷层厚度 2 项指标,此外混凝土与岩石粘结强度、回弹率也是检验评定喷射混凝土质量的重要内容。

4.1　抗压强度

用喷试模法制取试块,在标准条件下养护 28 天进行试验。统计 DK64 +850 ~ DK65 +150 段混凝土抗压强度试验结果,平均值为 24.7 MPa。

4.2　喷层厚度

有锚杆地段利用锚杆露头,其余地段采用凿孔法检测厚度,除严重淋水段外,均达到或超出设计厚度(设计厚度分别为 5、8、10 cm)。

4.3　混凝土与岩石粘结强度

采用铁锤敲击混凝土检查,未发现空洞,表明混凝土与岩石粘结效果良好。

4.4　喷射材料的回弹率

无水干燥地段,材料回弹少,经现场实测回弹率平均为 8% 左右;严重淋水地段混凝土与岩石粘结效果差,回弹明显增加。

5　需要解决的问题

(1)积极探索混凝土湿喷设备的维修保养规律,使之能够保持良好的工作状态。

(2)混凝土堵管后处理费时较多,应继续优化混凝土配合比,避免或减少混凝土堵管现象的发生。

(3)有水地段湿喷混凝土效果差,应继续改进完善湿喷混凝土施工工艺,使其能够适应不同地质地段施工。

(4)湿喷混凝土施工经验不足,需要解决 TBM 快速掘进与喷射混凝土相互制约的矛盾。

6　结语

湿喷混凝土技术在秦岭 I 线隧道的应用,较好地解决了干喷混凝土存在的不足,也取得了一些施工经验,但由于对湿喷混凝土工艺的认识和应用时间较短,诸如防止堵管、有水地段喷射混凝土工艺的研究都将是今后施工中急需解决的问题。湿喷混凝土由于粉尘少、回弹低、生产率高、混凝土质量稳定可靠,虽然目前还处在推广阶段,但是作为一种崭新的施工工艺,其应用必将越来越广泛。

石膏可能成为可燃冰勘探新标志

随着全球经济的发展,能源供应日益紧张,作为一种‘绿色’替代能源,可燃冰对一个国家的战略能源储备、社会经济可持续发展形成了重要的战略意义。如何有效地勘探可燃冰是各国科学家追逐的热点。日前,中国地质大学地球科学学院的王家生博士和德国科学家通过合作研究,发现甲烷气水合物伴生的沉积物中存在自生石膏矿物,可能为‘可燃冰’的勘探提供一种新的识别标志。

天然气水合物广泛分布于海(洋)底和陆地永久冻土区的沉积物里,据估计,其中的有机碳全球储量相当于迄今为止陆地上已经探明的所有煤、石油和天然气中有机碳的 2 倍,在绿色替代能源勘探、全球碳库计算、温室效应和海底稳定性等研究方面具有极为重要的意义。

王家生说,他们的研究区位于东北太平洋美国俄勒冈州海岸 Cascadia 地区的海底水合物隆起区,水深 600 ~ 1000 m 不等。国外科学家曾多次对该地区进行了多种手段的研究,也钻取了大量海底甲烷气水合物的样品。他们此次研究的两个样品是由德国太阳号科学考察船 1999 年钻取的。

通过双目镜观察、X 光粉晶衍射、扫描电镜晶体形貌分析和电子探针元素成分测定后,研究人员最终确定,在研究区甲烷气水合物发育背景下的沉积物内,存在 2 种形态的石膏自生矿物集合体,分别为纺锤状(球状)和颗粒状集合体。前者与其它杂质(如泥沙等)混合构成相对复杂的矿物组成,后者则主要由纯洁的板柱状石膏晶体构成。这也说明二者的微地球化学动力背景有明显差异。

王家生说,自生石膏的出现与研究区甲烷气水合物产出背景密切相关。通常认为,石膏是一种过饱和的化学沉淀产物,一般形成于浅水地区的盐滩或盐湖等过量蒸发环境中。在深水区发现自生石膏的报道很少。研究区海底沉积物中由于形成了大量的甲烷气水合物,使得沉积物的孔隙水中富集了相对多的钙离子和硫酸根离子。当其浓度超过一定限度时,就结晶形成了石膏晶体。由于不同钻孔位置的沉积物中的流体强度不同,造成了石膏矿物晶体的不同集合体外形。它们会常常出现在海底天然气水合物稳定带的上部沉积物中,因此,可作为一种识别标志来暗示下部的沉积物中可能存在天然气水合物。

我国拥有辽阔的海疆,海洋面积相当于陆地面积的 1/3。海底天然气水合物的研究前景广阔,但是由于我国的研究时间相对较晚,总体研究水平与国际上同行存在一定差距。王家生认为,这主要表现在勘探理论和技术方法上不够先进成熟、勘探设备(例如钻探工艺)相对不足等。他说,摆在我们面前的首要任务是尽快查清我国海域的天然气水合物分布位置,尽早实地钻取天然气水合物样品。他希望这些新进展能在我国海域的相关研究中起到对比借鉴作用,引起国内同行的注意,共同为我国海域天然气水合物研究取得突破性进展而努力奋斗。

(据 2003 年 5 月 20 日《科学时报》)

万方数据