

喷射混凝土的现状与发展

王红喜 陈友治 底军
(武汉理工大学, 湖北武汉 430070)

【摘要】 对近几十年来喷射混凝土的研究工作进展作了一个较全面的介绍, 就其工艺流程、机械配置、材料控制、施工管理等方面进行比较与讨论, 探讨喷射混凝土在土木、水利工程应用中存在的问题, 并对其发展前景提出一些想法。

【关键词】 喷射混凝土; 工艺流程; 材料; 施工

【中图分类号】 TU 528

Modern Shotcrete Condition and Development

Wang Hongxi Chen Youzhi Ding Qingjun

(Wuhan University of Technology, Hubei Wuhan 430070 China)

【Abstract】 An overall introduction in recent shotcrete research are given. By discussing and analyzing the technological process and mechanical equipment and material controlling and construction management, the existing problem of shotcrete in civil engineering and hydroelectric works and its development prospects are presented

【Key words】 shotcrete; technological process; material; construction

0 引言

喷射混凝土是借助喷射机械, 利用压缩空气或其它动力, 将水泥、砂、石、掺合料、外加剂及水等原材料按一定比例配合好的拌和料, 通过管道输送, 并以高速喷射到受喷面上凝结硬化而成的一种混凝土。它是由喷射水泥砂浆发展起来的。1914 年美国在矿山和土木工程中首先使用了喷射水泥砂浆; 1948~1953 年兴建的奥地利卡普隆水力发电站的米尔隧洞最早使用了喷射混凝土支护, 这也就是后来被工程界人士所认同的“新奥法”理论^[1]。

世界各国相继在土木建筑和水利工程中采用了喷射混凝土技术。在一些大面积的衬砌支护结构工程中, 锚喷支护以及喷射混凝土支护与传统的支护形式相比有着无可比拟的优越性, 对被衬物具有支衬、充填、隔绝、转化的作用, 一方面节约了钢材和木材, 降低了施工成本; 另一方面使得施工简单, 工作安全, 减轻了笨重的体力劳动, 有利于一次成巷和加快掘进速度。

研究凝结时间可调、工作性良好、长期性能稳定的微膨胀抗渗防裂高性能喷射混凝土, 解决隧道工程中混凝土材料的关键技术问题, 已成为现代喷射混凝土发展的主要趋势。

1 施工工艺

喷射混凝土的施工工艺系统由供料、供气、供水

三个子系统组成。这三部分子系统的不同组合方式产生的不同施工工艺和施工技术, 对喷射混凝土的质量有着显著的影响, 施工费用也各不相同。在过去干喷法、湿喷法的基础上, 通过不断的工程实验研究, 不断完善和发展了新的喷射混凝土施工技术, 如纤维喷射混凝土法、水泥裹砂法、双裹并列法、潮掺浆法等。近二十年来, 我国的喷射混凝土技术得到了突飞猛进的发展, 接近和达到了国际水平^[2]。

1.1 干喷法

干喷法发展最早, 应用最广泛。它是将干料拌和后送到喷头处与水混合, 再到达受喷面上的一种方法。它的优点可概括为: 1) 施工工艺流程简单、方便, 所需施工设备机具较少, 只需强制拌和机和干喷机即可; 2) 输送距离长, 施工布置比较方便、灵活, 输送距离可达 300 m, 垂直距离可达 180 m; 3) 速凝剂可提前在喷射机前加入, 拌和比较均匀。当然它存在着固有的缺陷: 1) 其工作面粉尘量及回弹量均较大, 工作环境恶劣; 喷料时有脉冲现象且均匀度差; 2) 实际水灰质量比不易准确控制, 影响喷射混凝土的质量; 3) 生产效率低。

1.2 湿喷法

为了克服干喷法的缺点, 人们发展了湿喷法。它是将干料提前与水混合, 然后再在喷头处与速凝

剂汇合到达受喷面上的一种方法。它的优越性相应的表现在:1)粉尘、回弹量均较低,生产环境状况较好;2)设计水能与干料拌和均匀,水灰质量比能准确的控制;3)生产率相对干喷法要高。湿喷法存在机械设备复杂庞大、维修费用高,输送距离近,施工操作较吃力等缺点,这与工程中的成本经济、施工简便的原则相违背。

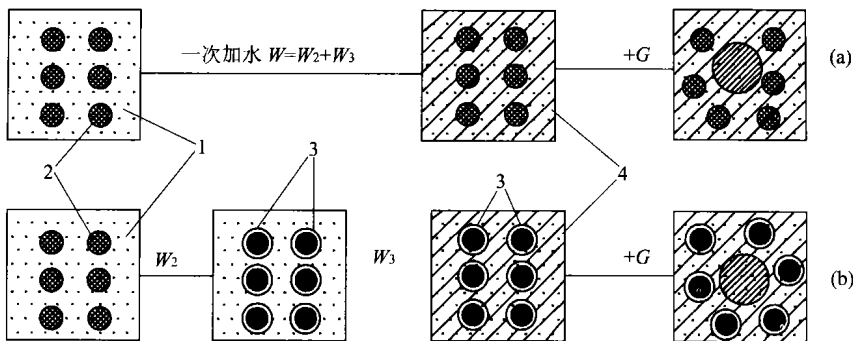
为了更直观的说明湿喷法与干喷法的工艺特点,把各指标的性能比较列于表1。

表1 干喷法与湿喷法技术性能比较

项 目	干 喷 法	湿 喷 法 (风动型)	湿 喷 法 (泵送型)
机械设备	简单	较简单	较复杂
粉尘浓度	一般大于 50 mg/m ³	可降低 50%~ 80%	可降低 80% 以上
耗风量	较大	可降低 50% 左右	或降低 50% 以上
回弹率	20%~ 40%	可降低至 10% 左右	可降低至 5%~ 10%
水灰质量比	0.4~0.5	0.5~0.55	0.55(加塑化剂)
压送距离	200~300 m	水平 60 m 垂直 30 m	水平 100 m, 垂直 30 m
设备清洗	容易	困难,中途不 能停歇	困难,中途不能停歇
水泥用量	400 kg/m ³	450~480 kg/m ³	480~560 kg/m ³
混凝土坍落度	5~7	8~10	10~12

1.3 水泥裹砂法(SEC)

干喷法和湿喷法各有利弊。近十多年来在日本



1—干燥水泥;2—干燥砂粒;3—低水灰比、高强度水泥壳;4—普通水泥净浆
W—总用水量;W₁—水泥裹砂用水;W₂—二次水泥裹砂用水;G—骨料
(a)普通砂浆一次加水拌成 (b)水泥裹砂砂浆二次加水拌成

图1 水泥裹砂造壳砂浆结构模型示意图

1.5 潮料掺浆法

潮料掺浆法喷射混凝土工艺是在总结潮喷法和SEC法实践经验的基础上发展起来的,目的是采用传统干喷法的设备和作业方式,但能取得SEC法的

发展起来的水泥裹砂法吸取了两者的优点,具有输出量大、效率高、压送距离长、喷射质量均匀、强度高、回弹率低、粉尘量少等优点,利于在涌水条件下进行作业,在国内外得到了广泛的应用。SEC喷射混凝土是将喷射集料分成两条线作不同处理后再压入混合管混合,然后通过联结混合管和喷头喷射到工作面上去的新施工方法。SEC法施工的关键环节是造壳水泥砂浆的制备,其结构模型见图1。

正是造壳水泥以低水灰比,高强度状态包裹砂粒表面,加强了界面的粘合力,弥补了传统水泥砂浆中水泥浆与砂粒表面粘合力不高的缺陷。在造壳水泥砂浆的制备中的关键环节是砂表面含水率保持4%~6%和两次加入水量的控制。SEC喷射混凝土比普通喷射混凝土的性能有很大的提高。但当前此法值得注意的问题有:1)湿路中砂的含水率保持在4%~6%很有必要;2)两条供料线路的流量要匹配;3)干路中的机械磨损;4)采用机械手喷头。

1.4 双裹并列法

双裹并列法喷射混凝土在作业方式上也是采用两条线路输送喷射物料的,但它与SEC喷射混凝土的本质差别是在于它将SEC法中的纯干路变成微湿路,也形成一种裹灰物料线路,这样两条输料线路都有水泥的包裹作用,故称“双裹并列法”。它的优点可以体现在强度提高、水泥用量减少、粉尘得到控制、回弹率进一步降低等几个方面,但同时它的配料要求明显提高,施工组织、人员管理更要求科学化。

效果的一种方法。它也是两条管道进行作业,一条是造壳潮混合料(类似于双裹并列法中的微湿线路),一条是水泥净浆,由于水泥净浆的良好粘稠性,在喷头处能更好的与造壳潮混合料糊化融合,从而

提高强度;另一优点就是它的设备和作业方式可以达到干喷法的简化程度。它所存在的问题也是集中在配料的优化设计上。

2 机械设施

喷射混凝土的施工机具,包括混凝土喷射机、喷嘴、混凝土搅拌机、上料装置、动力及贮水容器等。混凝土喷射机分干式和湿式两类。国内目前以干式喷射机为主。铁道部科学研究院西南分院研制的TK-961型转子活塞式湿喷机正在试制阶段^[3],还不能推广。相比而言,国内与国外的机械化程度有着明显的差别。美国 challenge 公司开发的挤压泵送湿喷混凝土的回弹率仅为 5%~8%,施工粉尘量显著减少,抗压强度达到 28 MPa;德国生产的一种双罐式喷射机使工程作业效率提高了 80%以上。这些都说明我国的机械行业远远落后于其他国家,这也是制约着我国喷射混凝土行业不能快速发展的一个重要因素。

3 原料配比优化

在建筑材料特别是混凝土这样的结构材料中,原材料的选择及配比设计对它们成型后的性能起着决定性的作用,同时它也是材料耐久性的决定因素。因此对原材料的控制一定要严格。同时,又要有一定的技术创新性。本文所指的原料技术创新主要是指掺入活性掺和料和外加剂两个方面。

3.1 掺入活性掺和料

喷射混凝土主要采用硅酸盐系列水泥,水泥水化后生成的主要水化产物为水化硅酸钙、氢氧化钙、水化铝酸钙、水化铁酸钙、水化硫铝酸钙等,其中水化硅酸钙的粒径为 10~100 nm,相当于胶体物质,占水化产物的 50%以上,对喷射混凝土的强度起关键作用的是 C-S-H 凝胶的数量。根据研究,凝期 28 d 时的水泥中各种矿物成分没有完全水化,水泥的实际利用率仅为 60%~70%,相当一部分水泥起到填充作用。由此看出过高的水泥用量无助于提高强度,甚至会损害后期强度。这是因为水泥用量过多,其中未水化部分中的 CaO 后期遇水后生成 Ca(OH)₂,体积膨胀,产生内应力,从而降低强度。因此,考虑在喷射混凝土中掺入一些活性物质,以促进水泥水化产物的转化,提高喷射混凝土的强度,同时掺入一些遇水后呈粘性的物质,有助于降低回弹率。焦作工学院利用工业废渣研制出 F 型和 K 型两种高活性细掺料^[4],使用这些高活性细掺料替代 30%水泥时,喷射混凝土强度可以提高 20%。这些高活性细掺料的要求有:1)活性大,有助于提高水

泥水化程度,从而提高喷射混凝土强度;2)遇水后有粘聚性,附着力强,有利于降低回弹和粉尘;3)有微膨胀作用,以便补偿干燥收缩,从而提高喷射混凝土的抗渗性;4)价格低廉。

3.2 外加剂的研制

近 20 年的科学研究和工程应用表明,外加剂作为高性能混凝土的第五重要组分地位已无可争议。为了满足工程所需特殊要求和适应机械化操作,喷射混凝土用速凝剂、增粘剂、粘稠剂、降尘剂、增强剂、减水剂等在不断的发展更新。自 20 世纪 60 年代中期中国科学院力学所建材室成功研制红星一型速凝剂以来,我国各部门都投入了大量人力物力进行研制开发新型添加剂,取得了不少成果。发达国家近年来多以湿喷工艺替代干喷工艺,但在研究改进喷射工艺和喷射机具的同时,从未间断过对喷射混凝土新型添加剂的研制。目前,喷射混凝土用添加剂的开发应用大致经历了两个阶段。第一阶段,以铝氧熟料、纯碱或硅酸盐等为主要原料的无机物类速凝剂;第二阶段则以具有特定功能的有机材料制成粘稠剂并适当加入促凝组分的复合型速凝剂。

但是,对于喷射混凝土技术来说,若它们都仅仅是单纯对速凝剂进行研究,那远远不能满足喷射混凝土对材料综合性能的要求。因为这些速凝剂只是速凝、快硬、早强,往往存在与水泥、减水剂和其他外加剂的相容性差,有的甚至性能不匹配,达不到应有的效果。因此研究一种具有复合作用的材料—集速凝、快硬、早强、高强、抗渗、增加混凝土的和易性和流动性,提高粘着力等性能于一体,是提高和发展喷射混凝土技术,特别是湿喷混凝土技术的重要途径之一。

目前国内使用的喷射混凝土外加剂碱性普遍较高,一方面对施工人员腐蚀大,另一方面降低混凝土的早期强度。由于近几年的市场需求,大大刺激了喷射混凝土添加剂的开发研究,国内也出现了一些适应性强、能满足施工工艺要求的复合外加剂。例如由地矿部探矿工艺研究所研制开发的 S 型湿喷混凝土复合添加剂,通过室内、现场试验证实,早期强度高,速凝效果好,可大幅度地减少混凝土材料回弹,降低粉尘浓度,改善工人劳动环境。中国矿业大学研制的一种新型增稠速凝剂 IVA^[5],它具有增稠、速凝、中性、掺量少(以固体计为水泥质量的 2.4%)、成本低等特点,具有对不同水泥良好的速凝适应性和对早期及后期强度贡献大等特点。沈阳建筑工程学院唐明等人针对不同煤矿现有的无机增

粘材料特点,磨细加工处理后,复合高效减水组分和速凝剂,通过正交实验原理配制具有不同特点的低回弹喷射混凝土外加剂^[6~8]。

3.3 掺入纤维掺和料

喷射混凝土由于其较小的水灰质量比和喷出时具有较大的速度,因而使其与岩石间具有较大的粘接力。同时,又由于它具有施工方法简单,速度快等优点,使之被广泛用于井下支护。但随着社会需求的增加和资源的匮乏,矿井的深度也在不断的增加,这就要求用于支护的混凝土具有较高的强度,以承受深井围岩越来越大的压力。同时,还要求用于支护的混凝土具有较好的塑性,以抵抗深井巷道变形,但混凝土材料是一种脆性材料,喷射混凝土也不例外。研究表明:纤维能有效的改善混凝土的脆性。

过去隧道施工遇到不良地质,就用钢纤维喷射混凝土支护,及时制止了坍塌,施工顺利,尝到了甜头。但掺钢纤维也有其难度:成本高昂、配料搅拌时易结团、喷射时易堵管和钢纤维回弹易伤人,并且由于钢纤维的锈蚀使混凝土表面出现锈斑等。铁道部第十八工程局五处杨昌泉等人采用新型材料超混杂纤维代替钢纤维喷射混凝土的研究,其各项物理性能与掺钢纤维混凝土相当,但喷射效果优于掺钢纤维混凝土,且成本低廉,经济效益显著,很有推广价值^[9~12]。

4 科学合理的施工组织管理^[13]

我国的工程应用质量与国外存在的差距除了工艺不成熟,机械化程度不高的原因之外,在很大程度上与国内现有的管理模式不合理、组织经验欠缺有很大关系的。工人的操作技术水平极大地影响着喷射混凝土的质量,在现代喷射混凝土作业中需要预先进行水泥裹砂和水泥裹石作业,另外,掺入了活性掺和料和多种外加剂,工序较以往复杂得多。各个工序有先后次序,否则,将达不到预期效果。所以,必须制订详细的操作规程,对工人进行技术培训,工人必须严格按照技术规程操作。

5 结论

1)本文论及的五种喷射混凝土技术方法是作为当前喷射混凝土现代技术的代表,在具体条件下均可选用,但鉴于喷射混凝土技术本身具有高度综合机械化的特点,应该朝着低成本、高效率、设备机动灵活、作业安全的施工工艺方向改进,对现有的技术

进行不断革新;

2)通过对掺入细掺和料和纤维增强的研究使喷射混凝土材料的配比设计得到优化,降低回弹率和粉尘量;

3)喷射混凝土的添加剂应由含碱性高向低碱或无碱方向发展,由性能单一的添加剂向具有优良性能的复合添加剂发展,由单纯无机活性剂向有机高分子材料和不同类型表面活性剂发展;

4)施工的组织管理要力求科学合理。

参 考 文 献

- 1 程良硅著.喷射混凝土.北京:中国建筑工业出版社,1990
- 2 谢兴保.现代喷射混凝土技术原理及特性分析.武汉水利电力大学学报,1994,27(6):659~666
- 3 赵孝忠.湿喷射混凝土配合比设计与工艺控制.焦作工学院学报(自然科学版),2001,20(3):213~216
- 4 樊文熙,张振虎,郑永保.喷射混凝土用高活性细掺料的研制.煤炭学报,2000,25(2):165~168
- 5 刘波,陶龙光,李维维等.无碱增稠速凝剂对水泥增强作用机理分析与应用.煤炭学报,2000,25(1):46~50
- 6 唐明,佟钰,王博.低回弹喷射混凝土复合外加剂的研究与应用.沈阳建筑工程学院学报,1998,14(3):209~214
- 7 Robins P, Austin S, Chandler J. Flexural strain and crack width measurement of steel-fiber-reinforced concrete by optical grid and electrical gauge methods. Cement and Concrete Research, 2001, (31): 719~729
- 8 Austin S, Robins P. The performance of hardened wet-process sprayed mortars. Magazine of Concrete Research, 2000, 52(3): 195~208
- 9 于书翰著.隧道施工.北京:人民交通出版社,1999
- 10 Malmberg B. Quality and quantity variations of wet and dry mix shotcrete-Experiences from Grodinge railway track project. Shotcrete for Underground Support VII Telfs Austria, 1998. 251~258
- 11 Banthia N, Trottier J. Steel-fiber-reinforced wet-mix shotcrete; comparison with cast concrete. Journal of Material in Civil Engineering, 1994, 6(3): 430~437
- 12 Austin S, Robins P. The rheological performance of wet-process sprayed mortars. Magazine of Concrete Research, 1999, 51(5): 341~352
- 13 铁道部第二工程局主编.7JB 04-96.铁道隧道施工规范.1996

收稿日期:2003-10-24