

文章编号: 0451-0712(2006)11-0027-05

中图分类号: U415.6

文献标识码: B

# 公路边坡加固中机制砾砂喷射混凝土施工工艺探讨

李小青, 虞海珍

(华中科技大学土木工程与力学学院 武汉市 430074)

摘要: 随着机制砾砂及喷射混凝土在工程中的广泛应用, 机制砾砂喷射混凝土的应用已引起工程建设者的重视。结合某公路边坡机制混合砾砂喷射混凝土加固工程, 通过现场试验及采样分析, 开展机制混合砾砂的生产、砾砂喷射混凝土的配合比设计及施工工艺的研究, 从而得出了一些有益的结论, 为机制砾砂喷射混凝土在工程中的应用提供有益的借鉴。

关键词: 机制砾砂; 喷射混凝土; 施工工艺

喷射混凝土, 是指将一定配合比的水泥、砂、石的混合料, 通过混凝土喷射机, 用压缩空气作动力, 将混合料输送到喷枪出口处, 以较高的速度分层喷射到岩土表面迅速凝结而成, 形成起到加固、防渗漏、防掉块作用的支护结构。这种施工工艺已被广泛地应用于隧道、边坡防治、基坑支护、地质灾害治理和加固等工程中。

贵州省某公路 K105+300~K105+510 段与 K108+950~K109+180 段边坡加固工程设计方案以锚喷支护为主, 在下滑推力较大的坡段增加预应力锚索, 以达到全面加固边坡之目的。喷射混凝土设计参数取喷射混凝土强度为 C20、厚度为 15 cm, 配合比为水泥: 砂: 石材=1: 2: 2, 要求使用 32.5 级以上水泥及满足有关规范要求的砂石。

在施工过程中, 由于当地砂料奇缺, 喷射混凝土改用机制砾砂喷射混凝土, 机制砾砂的级配接近设计要求的砂与石的比例(1: 1)。本文结合该边坡加固工程, 探讨机制砾砂喷射混凝土在公路边坡中的应用及其施工工艺, 为机制砾砂在工程中的应用提供有益的借鉴。

## 1 机制砾砂的生产

所谓机制砾砂, 是人工砂的一种, 由岩石、尾矿加工而成。所不同的是, 砂的粒径通常是 0.15~5 mm, 而机制砾砂所含的颗粒粒径>5 mm 的砾石

占有很大一部分, 通常达到 40%~60%。所以, 把这种由制砂机从岩石、尾矿中制得的、既含有砾石又含有砂的人工砂, 称为机制砾砂(以下简称砾砂)。

人工砂的制成需经过以下工序: 爆破母岩→粗碎→预筛分→中碎→筛分冲洗→制砂。钢筛网是制取砾砂级配规格的关键, 普通打砂机筛网规格为 5 mm, 由于我们所需的是混合砾砂, 所以提高筛网的直径, 以制得既含有砾石又含有砂的混合砾砂, 而且还需选择适当的筛网孔径, 保证砂和砾石的比例。

表 1 为不同的钢筛网装在同一个打砂机上做的筛分试验结果, 是以当地的灰质白云岩为母岩。由试验的结果可以初步看出, 此种工艺制得的砾砂, 由于其工艺简单, 颗粒级配之间变化较大。这种情况的出现与母岩的岩性变化和打砂机喂入的颗粒大小有关。但这种变化通常在 10% 以内, 在喷射混凝土配合比设计时应充分考虑, 对于强度在 C30 以下水泥混凝土的砂石配合比是允许的。

表 1 砾砂的筛分试验 %

筛网规格	5 mm			8 mm			11 mm		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③
粒径≥5 mm	6	7	11	34	29	37	51	57	60
粒径<5 mm	94	93	89	64	71	63	49	43	40

2 砾砂喷射混凝土的配合比设计

2.1 砾砂喷射混凝土骨料的最大粒径和砂率确定

骨料粒径较大时,会造成不经济的回弹,而粒径较小则增加水泥用量,会增加收缩裂纹。此外,能否在当地得到价廉的合乎要求的某种粒径,也使骨料的选择受到限制。目前,大多数国家趋向于以15 mm公称粒径上限作为喷射混凝土骨料的最大粒径。

砂率对喷射混凝土的稠度和粘聚性影响很大,对喷射混凝土的强度也有一定影响。根据喷射混凝土施工工艺的特点,为了能最大限度地吸收二次喷射时的冲击能,必须选择较大的砂率。砂率以50%~60%为宜,一般粗骨料的最大粒径愈大,其砂率应当愈小。另外,砂粒较粗时,砂率可以偏大些;砂粒较细时,砂率可以偏小些。

2.2 水泥用量确定

水泥过多,不仅使粉尘量增多,而且硬化的强度不一定增加,反而使水泥混凝土产生过大的收缩变形。水泥用量对喷射混凝土抗压强度的影响,如表2所示。除了因水泥混凝土中起结构骨架作用的骨料太少外,水泥用量过多,水与水泥颗粒在喷嘴处混合不均匀,水化不充分,也是降低喷射混凝土强度的重要原因之一。

表2 水泥用量对喷射混凝土抗压强度的影响

单位体积混凝土的材料用量/(kg/m <sup>3</sup> )						抗压强度 MPa	容重 kg/m <sup>3</sup>
水泥		砂		石			
设计	实测	设计	实测	设计	实测		
380	526	950	883	950	810	31.2	2 450
542	689	812	698	812	730	22.6	2 370
692	708	692	716	692	644	19.0	2 360

水泥过少,回弹量大,初期强度增长慢;水泥的用量,可以用喷射混凝土的胶骨比表示,即水泥与骨料之比,常为1:4~1:4.5。

2.3 水灰比及砾砂的用量确定

喷射混凝土的水灰比应根据喷射物要求的稠度而定。它与水泥净浆标准稠度需水量、喷射物的砂率、砂的粒径、细粉掺料及外加剂的种类与掺量有关。在不掺加减水剂的情况下,喷射混凝土的水灰比为0.4~0.6,以喷射物不出现干斑、不流淌、色泽均匀为佳。

表3为水灰比与砂率的关系,由此可选定砾砂的水灰比为0.45~0.51。

表3 水灰比与砂率的关系

λ/%	35	40	45	50	55	60	65	70	75
w/c	0.41	0.43	0.45	0.47	0.49	0.51	0.53	0.55	0.57

在确定喷射混凝土中水泥、水的用量及速凝剂占水泥的百分比后,喷射混凝土中的砾砂用量,可以根据绝对体积公式法计算。

3 砾砂喷射混凝土的施工

3.1 喷射机的选择

砾砂喷射混凝土的施工机具,包括水泥混凝土喷射机、喷嘴、水泥混凝土搅拌机、上料装置、动力及贮水容器等。水泥混凝土喷射机又分干式和湿式两类。干式喷射设备简单,价格较低,能进行远距离压送,易加入速凝剂,喷嘴脉冲现象少;但施工粉尘多,回弹比较严重,工作条件较差。湿式喷射施工粉尘少,回弹比较轻,水泥混凝土质量易保证;但设备比较复杂,不宜远距离压送,不易加入速凝剂。国内以干式喷射机为主。

3.2 待喷面的准备工作

在正式进行喷射施工之前,除搞好配料、设备运转、施工劳动组织等工作外,做好待喷面的准备工作,也是保证顺利施工的关键。待喷面的准备工作,主要包括清除危石、待喷面冲洗、作业区段划分和其他准备工作等。

3.3 喷射混凝土的作业

3.3.1 工作风压的选择

选择适宜的工作风压,是保证砾砂喷射混凝土顺利施工和质量的关键。工作风压是否适宜,对砾砂喷射混凝土的粉尘大小与回弹率高低影响甚大。不同类型的喷射机有不同的工作风压,而且它还与喷射方向、混合料输送距离、水泥混凝土配合比、含水量等有关。当其他条件变化不大时,工作风压主要取决于输料管长度。

喷射机在工作开始时,应打开进气阀,在机械空转中调好空载压力;待开始喷射混合料后,风压逐渐增大,使其达到某一较稳定的数值;在实际操作中,再根据喷嘴处粉尘和回弹大小,对工作风压进行微调,使之达到满意的压力。表4为我国常用的双罐式、螺旋式喷射机的空载风压和工作风压,可供施工时参考。表4所列数值为水平输料时的情况,在实际喷射作业中,作业手应根据实际情况及时调整风压。当输送距离或方式变化时,工作风压的调整可参考

表 4 我国常用的双罐式、螺旋式喷射机的  
空载风压和工作风压

输料管 的长度/m	双罐式喷射机		螺旋式喷射机	
	空载风压 MPa	工作风压 MPa	空载风压 MPa	工作风压 MPa
20	0.03~0.04	0.10~0.11	0.05~0.07	0.12~0.13
40	0.05~0.06	0.14~0.16	0.10~0.12	0.14~0.20
60	0.07~0.08	0.17~0.18	0.13~0.14	0.21~0.23
80	0.09~0.10	0.20~0.22	0.15~0.16	0.24~0.26

下列数值:(1) 水平输送距离每增加 100 m,工作风压应提高 0.08~0.10 MPa;(2) 倾斜向下喷射时,输送距离每增加 100 m,工作风压应提高 0.05~0.07 MPa;(3) 垂直向上喷射时,输送距离每增加 10 m,工作风压应提高 0.02~0.03 MPa。

3.3.2 喷嘴处水压的选择

在采用干式喷射施工时,作业手必须在风流通过喷嘴时向材料注入正确的水量,而正确水量的注入必须有适宜的水压力。工程实践证明,喷嘴处的水压必须大于工作风压,并且压力稳定才会有良好的喷射效果,以水压比工作风压大 0.10 MPa 左右为宜。正确选择喷嘴处的水压,对砾砂喷射混凝土的施工质量影响甚大,如加水过多(水压过大),则表面会出现流淌,喷射混凝土易出现下坠;如加水过少(水压过小),则表面将呈现干斑,料流的粉尘大并有过多回弹,将大大降低水泥混凝土的强度。

3.3.3 一次喷射厚度的确定

一次喷射厚度太薄,喷射时骨料易产生大的回弹;一次喷射厚度太大,易出现喷层下坠、流淌,或与基层面之间出现空包。因此,一次喷射的适宜厚度,以喷射混凝土不滑移、不坠落为度,一般以大于骨料粒径的 2 倍为宜。根据施工经验,喷射混凝土的一次喷射厚度,与喷射方向、是否掺加速凝剂有密切关系,也与水平夹角有一定关系。适宜的一次喷射厚度,可参考表 5。

表 5 一次喷射厚度

喷射方向	一次喷射厚度/mm	
	掺加速凝剂	不掺加速凝剂
向上	50~70	30~50
水平	70~100	60~70
向下	100~150	100~150

3.3.4 含水率的控制

砾砂喷射混凝土所用的骨料,如果含水率低于 4%,在搅拌、上料及喷射过程中,很容易使粉尘飞扬;如果含水率高于 8%,很容易发生喷射机料罐粘料和堵管现象。因此,骨料在使用前应提前 8 h 洒水,使之充分均匀湿润,保持适宜的含水率,这样拌制混合料时对水泥同骨料的粘结、减少粉尘和提高喷射混凝土的强度都是有利的。喷射混凝土所用骨料中适宜的含水率,一般情况以 5%~7% 为宜。

3.3.5 水泥预水化的控制

骨料中有适宜的含水率,具有众多的优越性。但是,水泥与高湿度的骨料接触,会产生部分水泥预水化,特别是加入速凝剂后更会加速水泥预水化。水泥预水化的混合料,会出现结块成团现象,使混合料温度升高,喷射后则形成一种缺乏凝聚力的、松散的、强度很低的水泥混凝土。水泥预水化并不是单一因素引起的,而是几种因素的联合作用结果。为了防止水泥预水化的不利影响,最重要的是缩短混合料从搅拌到喷射的时间,即混合料一般应随拌随喷,两者应当紧密衔接。

3.3.6 控制喷射混凝土的回弹

砾砂喷射混凝土回弹量的大小与很多因素有关,是随着水泥混凝土的配合比、喷射压力(速度)、喷射水压、喷射角度、喷射距离、操作技术等变化的,这些都直接影响回弹量的大小,而不能单纯根据喷射机的性能来确定。在以上众多影响因素中,水泥混凝土的配合比是最重要的一个方面。喷射混凝土回弹是由于喷射料流与坚硬表面、钢筋碰撞或集料颗粒间相互撞击,而从受喷面上弹落下来的混合料。回弹是喷射混凝土施工中的一大难题,它不仅浪费建筑材料和能量,而且改变了水泥混凝土的配合比和强度。回弹率大小,同原材料的配合比、施工方法、喷射部位及一次喷射厚度关系很大。

为保证喷射混凝土的施工质量,进行喷射施工时应尽量减少回弹。在正常情况下,侧墙的回弹率不得超过 10%,拱顶的回弹率不得超过 15%。回弹物应及时回收利用,但掺量不得超过总骨料的 30%,并要进行试验确定。

3.3.7 砾砂喷射混凝土的养护

加强对砾砂喷射混凝土的养护,对于水泥含量高、表面粗糙的薄壁砾砂喷射混凝土结构尤为重要。为使水泥充分水化,减少和防止收缩裂缝,在砾砂喷射混凝土终凝后即开始洒水养护。

砾砂喷射混凝土在喷射后的 7 d 内,是养护的最关键时期,因此,在任何情况下,地下工程养护时间不得少于 7 d,地面工程不得少于 14 d。养护中喷水的次数,主要取决于水泥品种和空气湿度,当地下工程相对湿度大于 85% 时,也可采用自然养护。喷射混凝土冬季施工时应注意以下事项:作业区的气温不得低于 +5℃;干混合料进入喷射机时的温度及混合用水温度不低于 +5℃;分层喷射时,已喷射面层应保持正温;受冻前必须养护到具有足够的强度。普通硅酸盐水泥配制的砾砂喷射混凝土,低于设计强度的 30% 时不得受冻;矿渣硅酸盐水泥配制的砾砂喷射混凝土,低于设计强度的 40% 时不得受冻。

#### 4 喷射混凝土施工时的安全保护

##### 4.1 粉尘防护

在干法喷射混凝土作业中,由于粉尘在喷嘴中未及湿润,喷嘴出口处因受高速料流的影响形成有力的涡流,载运喷射物料的有压风亦迅速在喷射工作面周围四处扩散,粉尘被吹扬到空气之中。喷射机附近因拌料、喂料及排气等也产生飞扬的粉尘。

通过采用标准的撞击式吸尘器和吸微滤尘器,在 6 个不同施工部位测试的施工粉尘浓度结果说明:喷射点附近的平均粉尘浓度为 44~94 mg/m<sup>3</sup>;在离喷射地点 20~170 m 处抽风检验,总粉尘浓度为 10~84 mg/m<sup>3</sup>;顺风流采得的样品中,粒径小于 5 μm 的粉尘浓度平均为 14 mg/m<sup>3</sup>。上述粉尘浓度都远远超出规定的范围。

因此,在喷射混凝土作业时,做好喷射混凝土作业的除尘工作,采用遥控喷嘴(机械手),改革喷嘴的形状及构造(双水环或混合腔),掺用外加剂提高物料湿化效果,控制适当的风压和喷射距离,采用湿法喷射工艺等都是降低粉尘浓度的有效措施。同时,施工人员都要强制性地戴好面罩,也要注意附近其他人员的防护。表 6 为采用干法和湿法喷射进行粉尘浓度对比试验的结果。由此可见,湿法喷射的粉尘浓度为干法喷射的 21.3%~48.4%。

表 6 干、湿法喷射混凝土粉尘浓度比较

×10 <sup>2</sup> mg/m <sup>3</sup>				
喷射机型号	喷射方法	最大值	最小值	平均值
Torkret 双罐式	干法	2.35	0.28	1.22
Comperness 双立罐加螺旋	湿法	1.37	0.06	0.59
Spirocet 双平罐加螺旋	湿法	0.57	0.04	0.26

##### 4.2 化学腐蚀防护

水泥会腐蚀皮肤,而且在大多数喷射混凝土中所使用的速凝剂都使这一问题加剧。美国开垦局曾在格兰尼特的亨特隧道水泥混凝土喷射期间进行过试验,试验证明,在操作者周围,包括离新鲜空气 3 m 远的地方以及滤尘器内,都具有很大的腐蚀性。经改用其他的滤尘器后,证明碱雾是可以滤掉的。

从事喷射混凝土工作的人员如果防护不周,常常导致严重的腐蚀性伤害。一些操作者看起来好像进行了防护,但疏忽了细节,例如袖口和裤脚没有扎牢,领口处只是用毛巾围住很不严密。在干法喷射工艺中,由于排放泛气常常喷出一股尘雾,粉状速凝剂变成扬起的粉尘,其危害性更为严重。

喷射混凝土施工过程中的化学腐蚀问题,可以通过防护教育、防护训练等办法来解决。最根本的办法莫过于改善喷射工艺,采用液体速凝剂或研制其他腐蚀性小的速凝剂等等。

##### 4.3 安全隐患的防范

喷射混凝土在未达到一定的强度之前,是不能起支护岩层的作用的。有些地方曾经遇到过喷射混凝土的早期破坏,而且也带来过一些危害。造成这种早期破坏的原因,主要是由于粘结性差,例如离层现象和在岩缝中只填入一小部分水泥浆或者根本未填入,而且喷射混凝土没有足够的早期强度来支护岩层。喷射混凝土能盖住岩石的隐患给人以安全的假象,其实这些隐患仍在不停地发展,即使暂时处于平衡状态,但隐患仍有可能在相当长的时间以后发生。因为这样的喷射混凝土层仅仅是一个简单的喷敷层,并没有和围岩一道形成完整的支承结构。这种隐患一旦显现,很可能造成事故。

为了防止这种隐患的发生,在喷射混凝土之前,必须清除危石,并用风、水清刷和湿润岩面(粘土质岩石只能稍加湿润,不能用水清刷),喷射混凝土用水不能含有油污。喷射混凝土硬化以后,应进行一次全面性的检查,如果发现离层(空鼓)现象,应采取有效措施进行修补。

#### 5 结语

(1)按公路工程验收标准的要求,该边坡取得了良好的加固效果,加固工程验收合格。这说明了机制砾砂喷射混凝土在技术上是可行的,在缺少天然砂和砾石的地区,机制砾砂喷射混凝土完全可替代普通喷射混凝土,可以进一步推广。



(2)砾砂喷射混凝土在公路边坡加固工程中是一次大胆的创新,它有别于喷射砂浆。砾砂喷射混凝土比喷射砂浆的强度高,防渗效果好,膨胀率低,具有良好的支护效果,能完成较复杂的支护要求。

(3)对于砾砂的生产设备方面:由于受制于砾砂喷射混凝土的量的限制,可以对普通的离心打砂机进行改装,以满足砾砂喷射混凝土对砾砂的需求。对于灰质白云岩为母石的情况,通过试验,得出打砂机的钢制筛网规格为 11 mm。

(4)砾砂喷射混凝土的施工与普通喷射混凝土的施工相似,但比普通喷射混凝土施工工艺简单,减少了碎石的生产、筛分及碎石和砂的混合工序,并且无需单独的砾石材料供应,砾砂喷射混凝土具有较高的经济效果。

(5)砾砂喷射混凝土研究的不足处:由于本论文提出的课题属应用前沿型,还缺少更多的事例,比如还缺少相关的渗透性试验、抗冻性试验、腐蚀性试验和动力特性试验等。

#### 参考文献:

- [1] 中建四局研究所. 山砂混凝土[M]. 中国工业出版社, 1979.
- [2] GB 50086—2001, 锚杆喷射混凝土支护技术规范[S].
- [3] 程良奎, 等. 喷射混凝土与土钉墙[M]. 中国工业出版社, 1999.
- [4] 陈家珑. 国标《建筑用砂》修订对建筑施工的影响[J]. 施工技术, 2001.
- [5] 李赤波. 喷射混凝土问答[M]. 煤炭工业出版社, 1981.
- [6] (苏)扎斯拉夫斯基, 贝科夫, 柯姆帕涅茨, 等. 李成君, 译. 喷射混凝土[M]. 煤炭科学研究院, 1986.
- [7] 石人俊. 混凝土外加剂性能及应用[M]. 中国铁路出版社, 1985.
- [8] 田泽, 雄二郎. 日本喷射混凝土技术现状与今后的课题[J]. 隧道译丛, 1992, (2).
- [9] Wood D E, 等. 喷射混凝土支护在隧道工程中的应用及发展[J]. 隧道译丛, 1991, (2).

## A Study on Construction Technology of Machine-Made Gravel Sand Shotcrete in Highway Slope Reinforced Engineering

LI Xiao-qing, YU hai-zhen

(School of Civil Engineering and Mechanics, HUST, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** With the extensive using of the machine-made sand and shotcrete in engineering, the application of the machine-made gravel sand shotcrete is emphasized by constructor. Combined with the reinforced engineering of the machine-made gravel sand shotcrete on the highway slope, the production of machine-made gravel sand and the mixture ratio design and construction technology of the gravel sand shotcrete are studied through the field experiments and the sampling analysis. The beneficial conclusions that are used for reference of the application of the machine-made gravel sand shotcrete are gained.

**Key words:** machine-made gravel sand; shotcrete; construction technology