

1

喷射混凝土国际会议文集

喷射混凝土 在地下工程支护中的应用

冶金工业出版社



喷射混凝土在地下工程 支护中的应用

(喷射混凝土国际会议文集)

(第一集)

美国混凝土学会等 主编
长沙矿山研究院四室 情报室 译
张 维 罗 邦 兆 校

冶金工业出版社

内 容 提 要

本书(第一集)收集了1973年7月在美国召开的“喷射混凝土在地下工程支护中的应用”的会议论文23篇,它们反映了美国等一些国家在喷射混凝土方面的工艺水平和研究现状,包括喷射混凝土的施工及其质量控制、新工艺、新材料、新机具设备、力学性能的测定方法、安全及污染控制以及设计中的有关问题等,反映了当前国外喷射混凝土的新水平和新的发展。

本书可供矿山、隧道、军工和“人防”工程中从事喷锚支护的科研、设计和施工人员,以及有关院校师生参考。

USE OF SHOTCRETE FOR UNDERGROUND
STRUCTURAL SUPPORT
ACI and ASCE
1974

喷射混凝土在地下工程支护中的应用

(喷射混凝土国际会议文集)

(第一集)

美国混凝土学会等 主编
长沙矿山研究院四室 情报室 译
张 维 罗 邦 兆 校

冶金工业出版社出版
新华书店北京发行所发行
冶金工业出版社印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 7 1/4 字数 192 千字
1979年5月第一版 1979年5月第一次印刷
印数00,001~10,400册
统一书号: 15062·3413 定价(科三) 0.70元

第一集 原 序

在喷射混凝土用于地下工程有了若干年的经验后，美国开垦局工程师们于1972年提出了召开喷射混凝土会议的建议。他们认为，其它单位也存在同样的问题，对喷射混凝土的成效也抱怀疑，并且感到举行一次会议，可为这方面的专家们提供一次充分地交流经验和见解的机会。通过这样的会议，对影响喷射混凝土用作地下工程支护的一些关键因素会认识更深。

在 S.C. 柯尔博士的指导下，工程基金会为开好这样一次会议做了组织工作并提供了会址。1973 年初成立了会议筹备委员会，接着便拟订了旨在最后能开成一个非常成功的会议的计划。在筹备委员会中忘我工作的工程师和采矿工作者们协助会议主席做了很有价值的工作。

1973年7月，代表着许多训练有素的技术人员和几个国家的八十五名与会者，花了五天时间，交流喷射混凝土的经验、知识和研究资料。来自美国、加拿大、墨西哥、秘鲁、意大利、瑞士、瑞典和西德的与会者，使这次会议带有国际会议的色彩，并为他们搜集关于地下喷射混凝土目前工艺水平的新看法提供了一次好机会。“用事实说话”的口号贯穿整个会议。

会议休会前，与会者一致决议：会议中所作的报告和论文应尽可能地予以出版。作者所作的答疑很精辟，大部分论文和总结报告都收集在本书中。会议的两个联合发起单位美国混凝土学会和美国土木工程师学会，在整理出版会议资料时在各方面都给予了协助。为了减少开支，将作者所提交的照相底片拿来复制。

J.R. 格拉汉

1973年11月

目 录

一、喷射混凝土在华盛顿地下铁道建筑中的应用	1
二、喷射机械手及联合喷射机组	14
三、在困难岩层中用喷射混凝土支护隧道	24
四、喷射混凝土的体积配料法	34
五、湿法喷射混凝土及其速凝剂的添加	36
六、喷射混凝土施工中的几个问题	42
七、喷射混凝土的安全及环境控制	50
八、喷射混凝土作为临时支护的选择与设计	58
九、喷射混凝土设计时地质条件的考虑	69
十、使用调凝水泥的喷射混凝土及普通喷射混凝土 的实验室试验	86
十一、新梅洛内斯工程中喷射混凝土的质量控制和施工	110
十二、喷射混凝土现场测试方法的新发展	117
十三、陆军工兵部队在喷射混凝土方面的研究	129
十四、喷射混凝土的早期强度特性	139
十五、用仪表观测喷射混凝土支护系统的性能	154
十六、喷射混凝土的强度和耐久性	168
十七、调凝水泥喷射混凝土和钢丝纤维喷射混凝土 现场试验	174
十八、用喷射混凝土修复隧道	187
十九、喷射混凝土用作粘土隧道永久衬砌的实地探索性 试验	196
二十、高产安全的遥控喷嘴	200
二十一、聚合物喷射混凝土	211
二十二、聚合物喷射混凝土的火灾问题	222
二十三、美国喷射混凝土的现状 & 未来 (会议总结)	224

一、喷射混凝土在华盛顿地下铁道建筑中的应用

K. S. 巴 瓦

(一) 引 言

最近四年，在华盛顿地区正在建筑一条有轨快速运输系统，称为“都市地铁”。该运输线完工后将达161公里长，可为首都及附近城镇服务。现在约有30%的里程正在施工，其余部分打算分阶段完成。计划于1980年前后建成，投资30多亿美元。

凡是一般能达到快速运输目的的各种各样建筑型式，该运输线几乎都包括了。约有一半的线路将建在地下，其中包括25.6公里的岩石隧道，16公里的土质隧道以及33.8公里的土质明沟回填道。其余82公里则计划建筑在地平面或架高结构上。这个系统有86个车站，其中53个将建于地下。有12个地下车站是建在岩石中的大峒室，而其它的地下车站将用明沟回填法建在土质中。这样，这一系统约有五分之一的线路是设计在岩石中的地下建筑物（包括行车隧道和车站峒室）。

早在1966年，在准备作岩石隧道的一般设计时，我们就意识到，岩石隧道特别是岩石峒室如采用常规混凝土衬砌则费用将很大。当时的研究表明：这种建筑物如果采用喷射混凝土加锚杆作衬砌将更经济，并且在不良的岩石条件下施工其危险性也将最小。这样，研究出了使用喷射混凝土作岩石隧道永久支护的典型设计。在对预期的岩石条件作了研究后提出了这样的设想：对于轻度破碎至中等破碎的岩层（RQD为60~70以上●），采用锚杆加

① 岩性指标RQD表示岩芯的一种回收率（%），RQD接近于100%则表示岩性极好，低于50%则表示岩性不好。——校者

15厘米的喷射混凝土就足以作为永久性的支护。一种作为永久支护的典型喷射混凝土衬砌如图1—1所示。采用喷射混凝土提供了机动灵活性，例如在爆破后的短短几小时内即喷上第一层混凝土就可当作临时支护，它取代了通常为此而使用的昂贵的钢支架。实际上，在使用喷射混凝土时，所谓临时支护和永久支护的概念

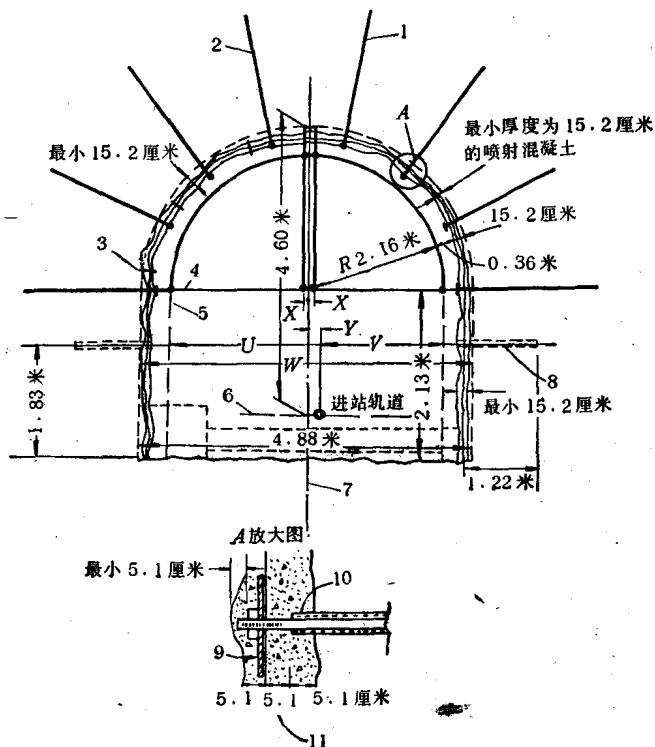


图 1—1 喷射混凝土和锚杆用作永久支护的典型设计
(单轨岩石隧道)

1—全部锚杆径向安装；2—直径19毫米、长2.13米灌浆锚杆(纵向间距1.52米)；3—预埋测钉(间距1.52米)；4—起拱线；5—要求的隧道内表面；6—轨顶；7—隧道对称轴；8—直径51毫米泄水孔，孔深1.22米，间距3.05米，两侧均有；9— $203 \times 203 \times 19$ 毫米垫板，加螺帽或丝孔板；10—直径19毫米灌浆锚杆；11—喷射混凝土

似乎已趋于消失，因为被称为“临时支护”的初次喷射混凝土层实际上也就是永久支护的第一个分层。

在作喷射混凝土衬砌设计时，就已经考虑了开展喷射混凝土工作的做法，包括编制施工规范及施工前和施工过程中的试验方法。应着重提出：这里所用的“喷射混凝土”一词的含义是指采用干式法喷敷的快凝的粗集料的用作支护结构的混凝土。它不同于美国混凝土学会的广义的定义，后者还包括细集料混合物和非结构性用途的喷射。

本文概述了使用喷射混凝土的基本步骤，包括在实施施工规范过程中所获得的经验。

(二) 规 范

约六年前，在讨论作为本工程永久衬砌用的喷射混凝土施工规范时，尽管当时也有一些文献谈到了喷射混凝土各种各样的应用，但却没有一个能符合我们要求的标准规范。因此，我们编制了一套施工规范，这算是第一套完整的喷射混凝土用作岩石隧道永久支护的施工规范。

与规范有关的一个重要问题是早期和28天强度值的选定问题。喷射混凝土的早期抗压强度被定为：8小时为35公斤/厘米²；28天为352公斤/厘米²。众所周知，现在只要加入适当的速凝剂就可很容易地达到这样高的早期强度，而高的后期强度将主要取决于水泥用量和水灰比。不过，很高的早期强度和高的后期强度之间是矛盾的，只好合理选定。究竟需要多少早期强度主要取决于岩石条件和淋水情况。如预料爆破后岩石稳定期较短，或者预料会有过量的淋水，则要求早期强度高。在这里有必要指出，喷射混凝土早期强度高往往会降低它的后期强度。但是为了稳定不良的岩石或阻止大量水的流入，必须要有高的早期强度，这时就不得不牺牲后期强度。虽然有时从结构上分析，为了减少厚度，需要较高的28天的强度，但后期强度主要是根据耐久性来考虑的。因此，应按最佳效果来选取早期强度和后期强度值。

(三) 组分的选择

虽然选择喷射混凝土组分的一般要求与选择优质混凝土的要求大致相似,但也有一些不同之处,现列举如下:

1. 集料

粗集料的最大粒径主要是由喷射混凝土设备的处理能力来决定的。集料粒径较大会造成不经济的回弹,而集料粒径较小则需要水泥量过多,由此增加了收缩裂坏的可能性。此外,能否在当地得到价廉的所要求的某种粒径也使集料的选择受到限制。除了某些限定的施工是采用碎石之外,地铁绝大部分工程所采用的是花岗岩质的坚硬砾石(图1—2)。虽然规定了两种最大粒径(19毫米和13毫米),但绝大部分地铁喷射混凝土中所用的是13毫米集料,这是因为有这种粒径的现存料。

细集料基本上是符合美国材料试验所(ASTM) C-33规定的混凝土用砂(硅砂)(图1—2)。该砂来源于波托麦克河及一些陆地砂源。从陆地采得的砂要经过适当的筛洗,使之符合级配要求。

粗、细集料经过混合后的两种级配要求为:

美国标准筛筛号	1号级配	2号级配
1英寸	100	
3/4英寸	95~100	
1/2英寸	75~95	100
3/8英寸	65~88	95~100
N ₂ 4	48~74	72~85
N ₂ 8	34~57	52~73
N ₂ 16	22~44	36~55
N ₂ 30	12~31	20~38
N ₂ 50	5~20	7~20
N ₂ 100	2~10	2~12
N ₂ 200	0~5	0~5

配合级配是按最大密度设计的。把当地所产的标准粒径集料

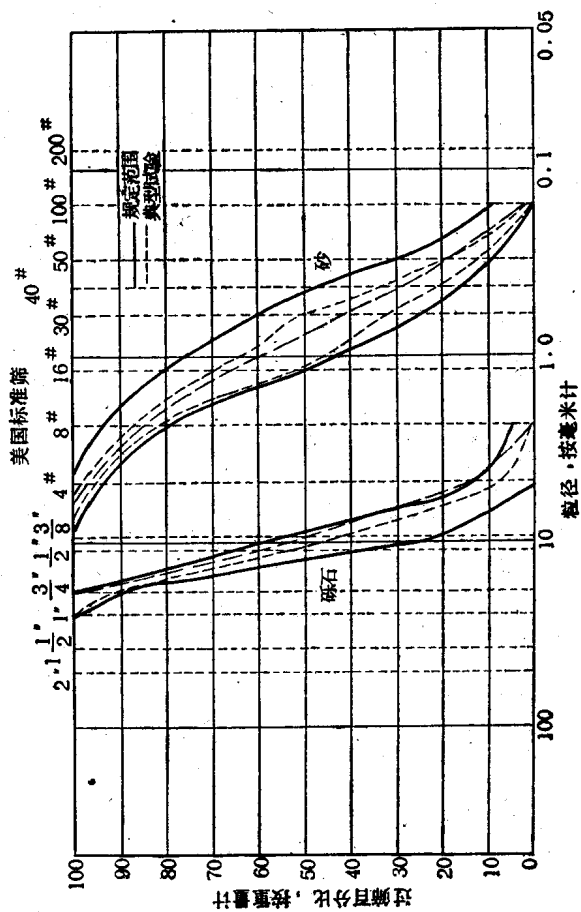


图 1—2 用于喷射混凝土的砂石级配

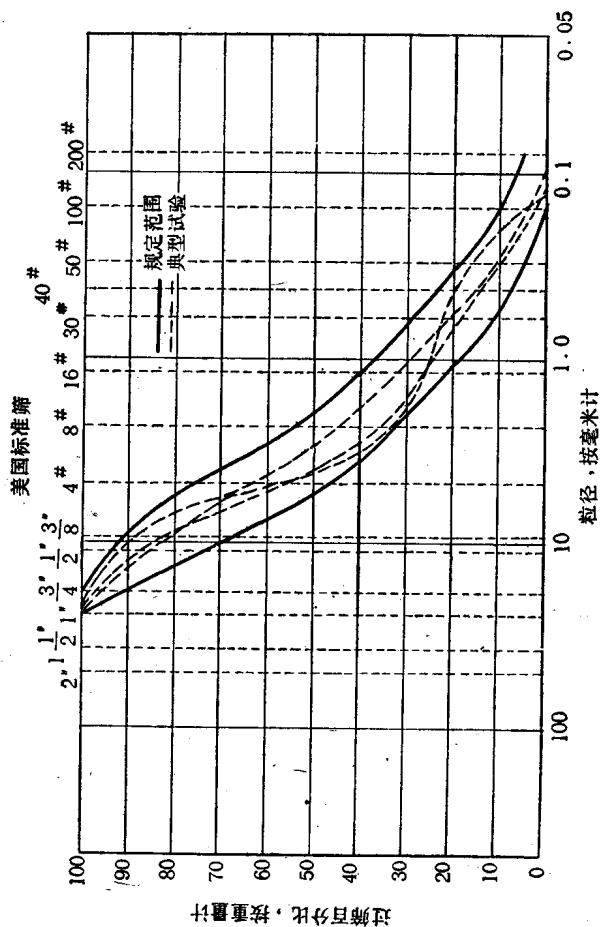


图 1—3 喷射混凝土的混合集料级配 (1号级配)

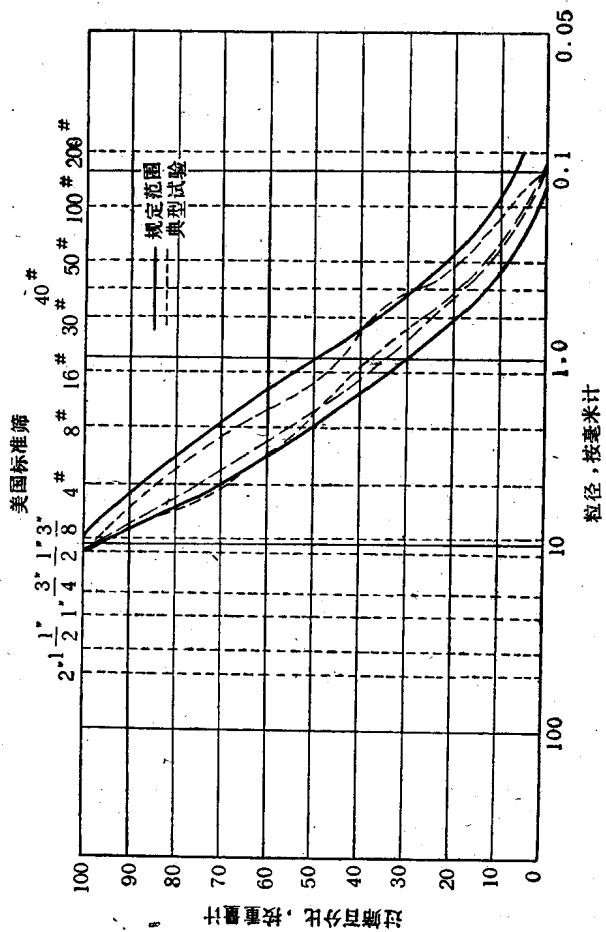


图 1—4 喷射混凝土混合集料级配 (2 号级配)

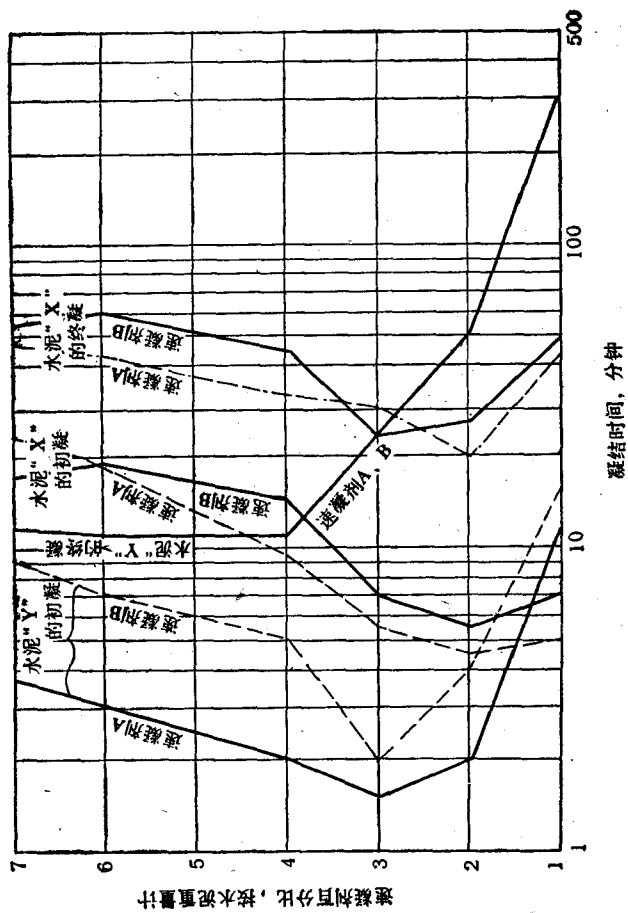


图 1—5 水泥-速凝剂适应性室内试验

按适当的配比混合后，便能经济地得到这两种级配。由于缺乏较小尺寸的集料，故实际上与上述级配有一定偏差。在这种情况下，如果能满足强度要求，这种偏差一般不会出问题。混合集料要求有2~4%的湿度，以便能与水泥充分混合。

2. 水泥和速凝剂

所用的是符合美国材料试验所 C-150 规定的 I 型硅酸盐水泥。虽然也允许采用 II 型水泥，但发现它与所用的速凝剂一般都不太适应。有一个承包单位可以从制造厂获得与速凝剂很适应的特殊水泥，这种水泥被标定为 II-III 型，因为它的性质介于这两型之间。用这种水泥所生产的喷射混凝土一般都能符合要求。选择何种牌号的水泥取决于它与各种速凝剂的适应性试验。如图 1—5 所示，最有希望达到满意的现场效果的是初凝和终凝时间最短的水泥和速凝剂混合物。

速凝剂的选择取决于它能否使计划采用的水泥产生如下表规定的速凝能力。目前地铁工程所常用的速凝剂为西卡化学公司 (Sika Chemical Company) 生产的西古尼特 (Sigunite) 及阿利瓦制造公司 (Aliva Manufacturing Company) 生产的特里柯扎尔 (Tricosal)，均为粉状。规范要求水泥与速凝剂混合物应产生如下速凝效果：

初凝时间	最晚为 3 分钟
终凝时间	最晚为 12 分钟
8 小时的抗压强度	最低为 42 公斤/厘米 ²

速凝时间的测定按美国材料试验所 C-266 规定用吉尔摩 (Gilmore) 针进行，所不同的是加水量按特意选定的 0.4 水灰比加入，速凝剂按喷射混凝土的配比掺入（通常为水泥重量的 2~5%）。其抗压强度的测定则按同样的配比并按照美国材料试验所 C-109 规定进行。

(四) 施工前的试验

施工前试验的目的主要是事先验证一下所选用的组份在混合

以后能否达到所要求的喷射混凝土的早期和后期强度。规定的喷射混凝土强度要求如下：

8 小时后的抗压强度	35公斤/厘米 ²
72小时后的抗压强度	176公斤/厘米 ²
28天以后的抗压强度	352公斤/厘米 ²

如前所述，这些强度指标可随岩石及隧道条件而灵活选定。施工前的试验包括实验室试验及其后的现场试验两个步骤。

实验室试验是为了确定所用组份的最佳配比。实验室所用混合物的配比是按6.5~7.5袋水泥（277~320公斤）、0.4的水灰比及由试验决定了的速凝剂掺量百分比进行。作抗压强度试验采用的是直径76毫米高152毫米的圆柱体试件。还采用少量的 76×76×305毫米的梁试件作抗弯强度试验。抗弯强度应达到 28 天抗压强度值的15%。

继实验室试验后的现场试验是为了验证：按实验室试验所确定的配合比而混合的喷射混凝土混合物，用已定的设备和工艺喷射后能否达到规范的要求。现场试验的作法是将混凝土喷至910×910毫米的水平置放和直立放的木模中，喷成总厚为76毫米的一层或两层，然后按美国材料试验所 C-31 的规定从模中钻取直径为51~76毫米的圆柱体试件和锯出 76×76×305 毫米的梁，再按美国材料试验所C-42和C-78规定作试件试验。

现场试验是开展喷射混凝土工作的重要步骤，因为它提供了一个机会去试验一下喷射混凝土混合物、施工设备和工艺，而尤其重要的是喷嘴工的技术，这是获得优质喷射混凝土的极为关键的因素。

虽然采用体积配料法曾获得不同程度的成功，但喷射混凝土的组份配料一般还是按重量法进行。混凝土组份经干拌后用专用的混凝土卡车运送至喷射机。由于在细集料中含有3~4%的水份，故干拌很容易进行。

(五) 施 工

在地铁工程中，虽然体积配料法也曾在不同程度上用得成功，但绝大多数的喷射混凝土还按重量法配料。有一个承包单位用一台小型的轻便的工地用重量配料装置（Ross），很能满足生产需要。

使用了多种型式的混凝土喷射机，包括美国的里德（Reed）、瑞士的迈纳迪尔（Meynadier）以及阿利瓦（Aliva）。采用螺旋喂料器将速凝剂添加于喷射机中，不过它需要经常进行校正。至今的工作效果表明，国外的机器能经常保持良好的工作状态，并且故障较少。经验表明，为了使喷射混凝土能均匀地喷出，至为重要的是要保持稳定的水压和风压；而为了达到这一要求，把压力表设在喷嘴附近是合适的。

虽然，为确保优质的施工还牵涉到很多环节，但任何一个环节也莫过于喷嘴工的技术那样重要。由喷嘴工所控制的混合水量、喷射角度及距离，决定了喷射混凝土的均匀程度和回弹的损失。由于我们在寻找有经验的喷嘴工方面存在困难，因此在开始进行喷射混凝土施工时出过一些问题。即使是现在，喷射混凝土用得多了，也还缺乏有经验的喷嘴工。因此，要有一个完整的培训计划，以对他们进行适当的训练。

每立方米喷射混凝土所用的典型配比是：

粗集料（砾石）	848公斤
细集料（砂子）	848公斤
水泥（I型）	390公斤●（7袋）
速凝剂	11.2公斤

在喷射混凝土施工中所遇到的一个大问题是：由于不良的岩石条件或因不适当的爆破方法而造成的大空穴（超挖），要用大量的喷射混凝土去充填。在隧道中使用钢支架的地段，支架与岩

● 原文为165磅，似误；按7袋计为658磅，换算后为390公斤。——校者

石之间的空隙如用喷射混凝土去充填，这时是把它作为“充填”物料来使用的，这实在是滥用了喷射混凝土。因为地铁隧道建筑设计喷射混凝土是一种高强度（价格昂贵）的结构混凝土，把它用作充填料是极大的浪费，往往造成材料用量大大超支。

因此，如果把喷射混凝土与钢支架联合作为隧道支护使用时，以喷射混凝土来充填大凹陷处的这种施工是很不经济的，应予以避免。

（六）施工时的试验

为了控制施工质量，应在隧道中已喷射了混凝土的地段钻取试件，来检验8小时、72小时及28天的抗压强度。各龄期的试件要在即将试验前钻取，也就是在现场养护条件下进行试验。一般都是每喷38米³就按各个试验龄期取一组（至少两个）试件。在施工初期取样次数要多些，但在质量达到所规定的范围时，取样次数就可少些。对每个试块都要用肉眼检查，以确定混合物的分布是否均匀，有无分层现象。试验数据应按美国材料试验所 C-94 规定进行统计分析。规范要求：低于规定强度值的试验次数不得超过20%，而任何连续六次试验的平均值应等于或大于规定强度值。

对于在隧道条件下喷射混凝土强度的小时增长率也作过研究，但由于喷射混凝土本身在几个小时内还太软，不能用常规的钻取法取样，因此进行这项试验遇到了较大的困难。曾对适用于常规混凝土的拔出试验法作了修改，以便用来测定喷射混凝土的小时强度增长率。计划收集拔出试验数据，以便在不远的将来可以应用它。

（七）结 束 语

约在五年前，当地铁首次应用喷射混凝土作为永久衬砌时，对喷射混凝土的组份和试验程序作一些精心的研究是完全必要的。现在，在北美地下工程中使用喷射混凝土有了较多的知识和