

高压水射流破除混凝土技术研究及 在地铁车站施工中的创新应用

张津铭

中铁隧道局集团有限公司 广东 广州 511458

【摘要】：高压水射流破除混凝土技术是一种水力破拆技术，是利用高压水作用在混凝土上以达到将其破碎、清除的目的，具有经济、高效、环保等优点。本文结合其在地铁车站施工中的创造性实践介绍了其工作机理、设备组成和影响作业效率的技术参数等，总结了其特点和优势，并对其推广应用前景进行了分析。

【关键词】：高压水射流；混凝土破除；地铁车站施工；应用

引言

建设大型基础设施的施工过程中往往需要进行大量的局部混凝土破除工作，目前破除混凝土主要采用人工风镐和破碎锤机械破碎，该工艺有粉尘多、震动大、易损坏临近结构等缺点，并且工人长时间手持振动工具作业会带来手臂振动综合症等职业健康问题。

近年来，欧洲国家开始采用高压水射流代替传统人工风镐清除因施工质量、火灾、腐蚀等原因造成的混凝土建筑物的劣化部分，除去局部的劣化混凝土露出钢筋后重新浇筑，在不影响原有结构的情况下实现短时间内完成施工，使原结构修复如新，更加牢固和安全，延长建筑物的使用寿命，节省大量投资和重建成本。这种技术后来被进一步扩展到路桥的加固改造、码头和大坝的翻新等工程中，但均系建筑物维修，未见在大型基础设施建设工程中的应用。

本文结合高压水射流破除混凝土技术在新加坡地铁爱德华太子路建造过程中的探索性实践，介绍了高压水射流破除混凝土技术的机理和设备，对其可行性、作业效率等进行了研究，总结了其技术特点，展望了其在大型基础设施建设工程中的应用前景。

1 技术机理

高压水射流破除混凝土技术，是一种水力破拆技术。

由于混凝土是非均质准脆性材料，对其进行水力破拆涉及的因素较多，影响因素的作用规律比较复杂，作用机理仍未被准确揭示，但根据 Andreas W.Momber(2006),Shah and Ouyang(1993)的研究，水力破拆的宏观作用机理可表述如下：

利用高压水射流冲击混凝土，水流的穿透作用激化并加宽了混凝土结构表面上预先存在的微裂纹，高压水流钻入混凝土表面的既有微裂纹中，充填裂纹空间，产生水楔作用，

如同在混凝土中楔入一个楔子，使前方混凝土结构发生断裂。导致断裂的主要机制是混凝土表面裂纹在高压水作用下在自身尖端与临近裂纹桥接，裂纹边缘的摩擦，以及裂尖前方形成新的微裂纹。而后裂纹迅速发展、扩大、交汇，当裂纹在射流处呈交叉状分布时混凝土成块、大面积剥落，最终劈裂清除混凝土。典型破碎过程如下图所示：

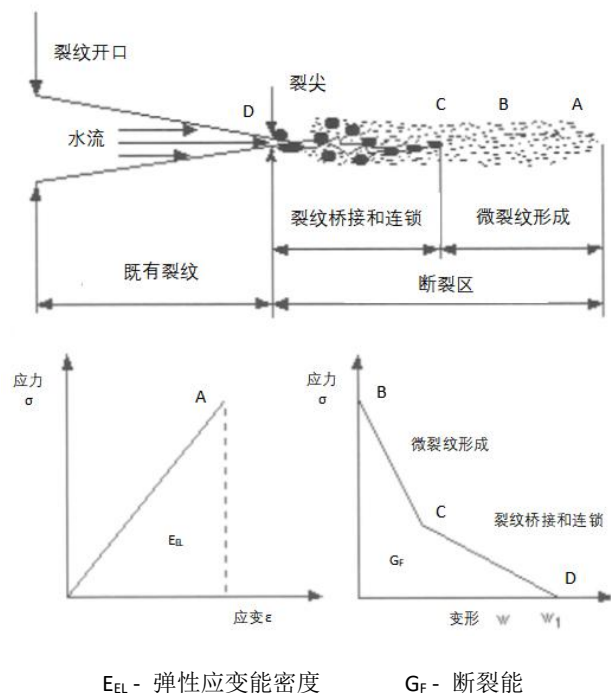


图1 水力破拆的混凝土破碎过程[Andreas W. Momber(2006)]

2 地铁车站工程中的创新应用

2.1 概况

新加坡地铁爱德华太子路是环线第六期的三个新建车站之一，采用盖挖逆作法施工，地下连续墙围护结构。内衬墙形式为叠合墙。叠合墙施工必须破除地下连续墙背土面

的钢筋保护层，露出预埋的拉结钢筋，将其扳出与内衬墙钢筋连接。

爱德华太子路站内衬墙施工区域共有面积超过10000m²，厚度75mm至150mm的地连墙表面混凝土需要破除。若采用传统方法人工风镐破除，不仅易损坏预埋拉结筋，而且浪费大量人工，成本高，进度慢，工期风险大。

在经过研究比选后，工程团队创造性的引入高压水射流破除混凝土技术，取得了良好效果。

2.2 高压水射流设备

爱德华太子路站使用高压水射流机器人系统来实现高效的混凝土破除作业，该系统主要由高压泵站和智能机器人组成。

2.2.1 高压泵站

高压泵站由大功率柴油机驱动的三柱塞泵、水过滤系统、控制系统等组成，集成安装在底架拖车上。其作用是将清水加压后输送给智能机器人。

表1 超高压泵站设备参数

设备类型	高压三缸柱塞泵
行程	5.2"
最大压力	140MPa
最大流量	120L/min
减速比	4.09:1
动力机	工程机械用柴油机
制造商	沃尔沃
动力系统描述	直列六缸四冲程涡轮增压柴油机
功率	500hp
最高转速	2100rpm
启功马达	7kw,24V

2.2.2 智能高压水射流机器人

智能机器人的作用是执行定位，喷射出高速水流作用于混凝土结构。爱德华太子路站采用瑞典阿科杰特（Aquajet Systems AB）公司的AQUA CUTTER 710V型高压水射流机器人。

表2 阿科杰特(Aquajet)机器人技术参数

设备型号	AQUA CUTTER 710V
------	------------------

总重	2350kg
长度	2.57-2.82m
最小宽度	1.03m
作业高度	7m
水枪角度	±45°
喷射宽度	0-2.45m
加长喷射宽度	0-4.45m
动力	柴油机, 18kW / 1600-2600 rpm
最大射流压力	250MPa

710V型机器人融合了高压水射流技术和智能化技术，具有智能化软件系统和操作界面，配备坐标定位系统。该型设备由柴油机驱动，自带橡胶履带，固定在机身上的塔架可以延长来扩大作业范围。由喷枪定位系统、移动式等距喷枪系统和陶瓷喷嘴组成的高压水喷射机构可沿着塔架移动，使作业高度达到7m。喷枪能够倾斜±45°以控制水流方向，喷枪周边用橡胶板遮拦以防被清除的物料四处飞溅，操作员使用无线遥控器远程控制机器人。

该机器人的主要特点为：

- (1) 作业效率高，可靠性强。
- (2) 自动化程度和智能化水平高，清除深度可以进行预先设定，全自动化操作，不致产生超挖情况。
- (3) 多角度作业，可以破除任意角度和高达7m的混凝土结构，而不需要额外搭建工作平台。

2.3 作业步骤

(1) 作业参数设置和机器人就位：将破除区域的形状坐标输入智能机器人，并设定喷枪运动速度、喷射角度和喷距等参数。机器人走行使喷枪靠近待破除的地下连续墙表面。

(2) 启动泵站，调整水压和流量。

(3) 操作机器人开始破除作业。喷枪按照设定的作业参数在塔架上往复运动，从陶瓷喷嘴中喷出高压水进行混凝土破除。操作员可随时通过无线遥控器调整所有作业参数：射流压力、流量、喷枪往返运动速度、喷距、喷射角度等，来实现对破除深度和宽度的即时控制。

(4) 检查破除效果，若地连墙中的预埋拉结钢筋已充分暴露，即可控制机器人走行至下一段循环作业。

(5) 清理崩落的碎片后即可进行下一步内衬墙钢筋施

工。

2.4 作业参数和破除效率

影响高压水射流破除混凝土效率的作业参数如下：

(1) 主要参数

两个关键的控制参数是喷射压力和流量。为了提高水射流的挤压和摩擦微裂纹的破碎效果，需要提高喷射压力；而提高水射流的崩裂、剥离及冲运效果，则要在保证足够压力的情况下，增加射流的水流量。从理论上讲，压力和流量越大效率越高，但是为了达到更大的压力和流量需要配备更高功率的增压泵和与之匹配的高压输水管、机器人等，更高功率的设备也带来了更高的能源消耗，造成总成本的提升。因此在实际工程实践中需要综合考虑效率和成本以达到最优平衡。根据实践经验，破除厚度 100mm 左右的混凝土，压力范围在 80~200MPa，流量范围约 100~250L/min 为最佳。

(2) 次要参数

除压力和流量以外，破除效率还受以下参数的影响。

①喷距，即喷嘴到混凝土面的距离。高压水流离开喷嘴后动能随距离增大急速衰减，因此较小的喷距能实现更高的效率。作业中须操纵机器人向前移动以减小随破除深度增加而逐渐增大的喷距。

②喷枪的往返运动速度。喷枪作往返运动，其速度越慢，在某点停留的时间越长，破除的深度越大；速度越快则单位时间扫过的面积越大。

③喷射宽度，即喷枪的往返运动范围。

④喷枪的往返次数。与往返速度正相关，喷射宽度负相关，在同样的压力、流量下，单位时间次数越多效率越高。

⑤喷射角度，指喷嘴的倾斜角度。一般采用 0 度，即水流垂直于混凝土面，此时作用在混凝土结构上的能量最大，效率最高。若需破除钢筋后的混凝土，则可倾斜喷嘴以使水流避开钢筋。

根据爱德华太子路站的实践，破除标号 C40 厚度 75mm 至 150mm 的混凝土，当射流压力 140MPa，流量 120L/min 时，工效可达 0.8m³/h。参数和效率的关系如下表所示：

表 3 爱德华太子路站高压水射流破除地下连续墙混凝土工作参数和破除效率关系表

水压(MPa)	流量(L/min)	喷枪的往返速度(m/min)	破除效率(m ³ /h)
80	200	5	0.3

		7	0.31
		10	0.31
		5	0.33
100	200	7	0.4
		10	0.37
		5	0.46
140	120	7	0.8
		10	0.61

注：喷射角度=0°，喷距≈50mm。

3 高压水射流破除混凝土技术的特点

3.1 优点

与传统施工方法相比，其突出优势有：

(1) 不损伤原结构和钢筋

传统方法人工风镐、破碎锤等，震动大，对原结构造成不同程度的破坏，易损伤预埋钢筋。而高压水射流不产生剧烈振动，不会造成延伸性损伤，属于保护性破拆。其主要原理是利用水楔作用使带有裂纹的混凝土被大面积破碎清除，由于钢筋表面密实，没有微孔，高压水无法钻入，所以钢筋毫无损伤，还能起到除锈作用，无须更换预埋钢筋，节省了植筋的费用和时间。

(2) 工效高，节约工期和人力成本

高压水射流机器人系统的破除效率约为人工风镐的 20 倍，施工速度快，破除后的表面粗糙、无灰尘，无须凿毛和清洗，节省工期。且其显著减少的人工消耗，在人力成本不断上涨的大背景下，必会带来良好的经济效益。

(3) 破碎范围和深度精确控制

操作员通过调整压力、水量、喷枪运动等作业参数，控制机器人逐层破碎混凝土到任意深度，每层深度可精确到 3mm，破碎范围界面清晰，边缘整齐，实现对破碎深度和范围的精确控制，减少破碎废料的数量，避免超挖。

(4) 作业范围大，作业空间不受限制

射流机器人具有橡胶履带和可延伸塔架，无须搭设作业平台即可实现大范围作业。

高压水射流能轻松实现水平面、垂直面、顶面和狭小空间的作业。只要水流能够触及的空间，破除作业就可以逐层完成，传统方法显然不具备这样的优势。

(5) 安全环保

传统方法风镐、破碎锤等，沙尘飞扬，高压水射流采用水作为介质，完全无粉尘。机器人自动化远距离遥控作业，安全性更高。

3.2 不足之处和应对措施

(1) 用水量较大

高压水射流破除所使用的水可以是河水、井水、自来水，根据混凝土结构不同，所需用水量各异，但一般不少于100L/min。

建议在作业区周围设置简易挡水矮墙和集水坑，将使用后的废水抽至污水处理设备，净化处理后重复利用。

(2) 噪音

作业过程中噪音大，在地下工程等密闭空间中尤其严重。操作员需要佩戴隔音耳罩以保护听力，在附近区域的人员也要佩戴耳塞。

(3) 碎片飞散

虽然射流机器人喷枪四周覆盖的橡胶板可以遮挡大部

分崩落的碎片，但偶尔仍会有个别碎片飞散出来。作业时必须严禁无关人员靠近。操作员保持10m以上距离远程操控，佩戴专用头盔和护目镜以防被碎片击伤。

综上所述，瑕不掩瑜，高压水射流破除混凝土技术不失为一项高效、经济、安全、环保，并且对原结构没有损伤的先进施工技术，该技术有传统破碎方法无法比拟的优势，具有较强的适用性与较大的可行性。

4 应用展望

高压水射流破除混凝土技术是一种发展前景广阔的新技术，除了破除地下连续墙之外，还可应用于如隧道洞门破除、混凝土支撑梁破除、桩头破除、隧道拱顶不密实混凝土的破除等各种场景，用它取代传统落后的作业方式，可大幅度地提高工效，减少人工消耗，降低生产成本。

目前，此技术最为关键的设备方面，压力高于100MPa，流量大于200L/min的高压大流量泵较为稀缺，射流机器人也只有少数欧洲厂商的产品，价格昂贵。若能实现高压水射流设备全面国产化，其相对传统方法的优势会更加巨大，在工程实践中必大有可为。

参考文献:

- [1] Andreas W. Momber, Hydrodemolition of Concrete Surfaces and Reinforced Concrete Structures (2006).
- [2] Surendra P. Shah, Stuart E. Swartz, Chengsheng Ouyang. Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials (1995).
- [3] Aquajet Systems AB, Training Program - Aqua Cutter 710V evolution 2.0.
- [4] 罗孙一鸣,张君,王家赫.基于裂纹长度测定求解混凝土拉伸软化关系[J].材料研究学报,2014,11(28).
- [5] 曹昊翔.建筑混凝土体水铣技术及其应用[J].建设机械技术与管理,2001(7).
- [6] 杜晓琳,杨林.混凝土路面水铣技术及应用[J].北方交通,2011.
- [7] 祝爽.清除混凝土的水铣技术及其应用效果[J].矿业研究与开发,2002,12,22(6).
- [8] 李建涛,李冰.桥梁防撞墩水铣及挂网喷锚快速修复工艺在南三环大修工程中的应用[J].混凝土世界,2020,2(128).
- [9] 张小俊,杨林,庞稳.磨料水铣混凝土的效能研究[J].筑路机械与施工机械化,2014(3).