

# 南水北调中线穿黄隧洞工程盾构施工关键技术

周厚贵, 夏云

中国葛洲坝集团公司, 湖北宜昌 443002

**摘要** 南水北调中线穿黄隧洞工程盾构施工具有地质条件复杂、大埋深、高外水压力、长线路、大直径等施工特点及其相应的技术难题。经过在施工实践中的创新与实践,在泥浆配置技术、掘削面稳定控制技术、突破规范的壁后注浆技术、高外水压力条件下的盾构施工防渗技术、端头地层加固技术、大埋深/高外水压力下的带压进舱技术、盾构掘进姿态控制技术、精密的长距离竖井联系测量技术、长距离泥水输送技术、大坡度盾构掘进技术等方面取得了突破与进展,确保了工程的顺利实施。穿黄盾构工程的各项技术指标均达到了理想的效果,相关工程施工技术可供类似工程参考和借鉴。

**关键词** 盾构技术;隧道施工;穿黄隧洞工程;南水北调

**中图分类号** U455.43

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.04.11

## Key Shield Construction Technologies in Middle Route Yellow River-Crossing Project of South-to-North Water Transfer Project

ZHOU Hougui, XIA Yun

China Gezhouba Group Corporation, Yichang 443002, Hubei Province, China

**Abstract** There are many difficult technical problems in the construction of the Yellow River-Crossing Shield Project in the middle route project of the South-to-North Water Transfer Project, due to complicated geological conditions, large buried depth, high groundwater pressure, long tunnel line and large tunnel diameter. In the construction practice, some technologies are developed, to ensure the successful project construction. They include mud configuration technology, excavation surface stabilizing technology, wall-back grouting technology (beyond the current standard practice), shield construction seepage control technology under high groundwater pressure, shield access section ground consolidation technology, hyperbaric operation technology under large buried depth and high groundwater pressure, shield construction attitude control technology, precise long distance shaft connection survey technology, long distance mud transportation technology, high gradient driving technology. Various technical indexes in the Yellow river-crossing shield project are satisfactory, and these technologies would provide some guidance for similar projects in the future.

**Keywords** shield construction; tunnel construction; Yellow River-Crossing Shield Project; South-to-North Water Transfer Project

### 0 引言

盾构施工因其具有占用场地小、对外界影响小、自动化程度高、劳动强度低、施工速度快等特点,成为在软土和软岩内修筑隧洞的重要方式。随着盾构施工相关技术的成熟与完善,正逐步成为国内外大型软土隧洞施工的首选方式而应用日益广泛<sup>[1]</sup>。

南水北调中线穿黄工程经过多方面综合比较分析,采用

泥水加压盾构方式进行隧洞施工。穿黄隧洞施工过程有地质条件复杂、大埋深、高外水压力、长线路、大直径等施工特点及其相应的技术难题,在工程的规划、设计与施工过程中开展了多项有效的研究,提出了有效的实施方案,顺利完成了盾构掘进施工,各项技术经济指标均达到了理想水平,较大地提升了中国在过江越海工程领域的施工技术水平<sup>[2-6]</sup>。

本文从泥浆配置技术、掘削面稳定控制技术、突破规范

收稿日期:2010-10-15;修回日期:2011-01-12

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAB04A11)

作者简介:周厚贵,教授级高级工程师,研究方向为水电工程施工技术与管理,电子信箱:houghui@cggc.cn

的壁后注浆技术、高外水压力条件下的盾构施工防渗技术、端头地层加固技术、大埋深/高外水压力下的带压进舱技术、盾构掘进姿态控制技术、精密的长距离竖井联系测量技术、长距离泥水输送技术、大坡度盾构掘进技术等方面阐述了穿黄盾构施工的技术难点与技术措施<sup>[2]</sup>,以便为国内外相关工程施工提供参考和借鉴。

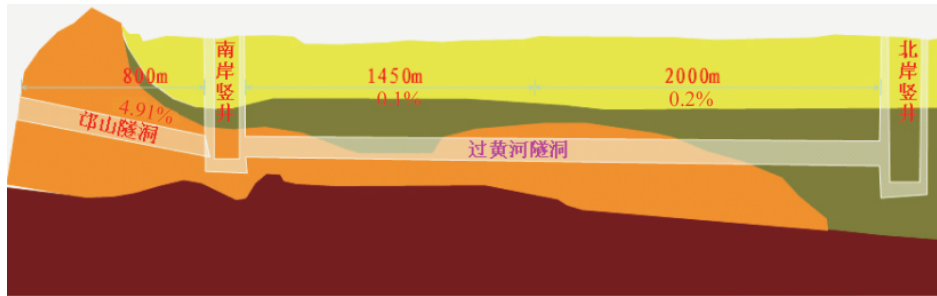


图 1 南水北调中线穿黄工程盾构隧洞剖面图

Fig. 1 Section of middle route Yellow river-crossing shield of South-to-North Water Transfer Project

其南岸竖井、北岸竖井和临建工程等。穿黄工程盾构隧洞最大开挖直径为 9.03m,管片衬砌外径为 8.7m。隧洞采用双线形式,上下游隧洞中心线之间相距 28m,单条隧洞长 4250m,其中过黄河段隧洞长 3450m,邙山隧洞水平投影长 800m。

## (2) 施工难点

穿黄隧洞工程盾构施工的主要难点包括以下方面。

① 隧洞沿线地质条件复杂。过黄河隧洞的洞身地层类型多样,包括全土层、全砂层、复合层、砂砾石层(泥砾层)、钙质结核土层等类型。其中砂性土层的透水性强,掘削面自稳性差;钙质胶结砂岩呈坚硬状,强度较高,抗压强度达 16.5MPa。且掘进线路上含有粒径大于 15cm 的块石和卵石、孤石、古树。上述复杂的地质条件对盾构施工中的泥浆配置、掘削面稳定控制、施工防渗、刀盘刀具的选型与配置都提出了更为严格的要求,加大了施工过程的控制难度。

② 隧洞埋深大、外水压力高。穿黄隧洞埋深为 23~35m,隧洞区域水压高达 0.45MPa。在高外水压力条件下进行泥水加压平衡盾构施工,需要提高刀盘主轴承和盾尾密封的防水性能、管片接缝防渗指标、止水材料的防渗特性,以及带压进舱时掘削面的压力。高外水压力也加大了控制掘削面稳定的难度。为此,穿黄隧洞施工需要研究盾构自身防护、隧洞外衬防水、管片接缝防水、盾构始发与到达施工防渗等技术,建立有效的穿黄隧洞掘进防渗体系。

③ 隧洞线路长。过黄河隧洞段长达 3450m,长距离的盾构施工对刀盘刀具的刚度、强度、耐疲劳性、抗磨性等提出了更高的要求,且需要进行带压进舱换刀操作。过黄河隧洞泥水输送的距离约为 4000m,如此长距离的泥水输送在系统功率、流量、防封堵、防沉积、防泄漏等方面性能有严格要求。此外,长距离隧洞掘进显著提高了隧洞线路的控制难度,加大了通风、防灾等施工管理难度。

## 1 工程概况与施工难点

### (1) 工程概况

穿黄工程是南水北调中线一期控制性工程,位于郑州市以西、黄河上游约 30km 的河段上,南起郑州市李村村西,北至河南焦作市温县陈沟村西。如图 1 所示,穿黄隧洞工程的主要施工项目包括:穿黄隧洞(含过黄河隧洞和邙山隧洞)及

## 2 盾构选型研究

为有效解决以上施工难点,设备选型成为盾构施工顺利实施的首要条件和基础。在穿黄盾构选型中,主要考虑了长距离掘进、大直径掘进、高外水压力及不良地质条件对盾构施工的特殊要求。

### (1) 长距离掘进对盾构设计与制造要求

① 刀盘具有足够的刚度、强度和耐疲劳性;通过耐磨措施对刀盘进行磨损和变形防护。

② 先行刀和切刀均采用双层碳化钨合金钢高耐磨刀具,以适应卵石、孤石或枯树地层掘进;不同区域的切刀配置刀具磨损自动监测系统,以加强刀具磨损监控、分析与评价。

③ 配备精确导向系统,保持盾构姿态和隧洞线形一致。

④ 具备长距离掘进所需要的带压进舱功能,以便处理换刀等进舱作业。

### (2) 大直径掘进对盾构设计要求

① 采用间接控制型气压复合模式泥水盾构,以有效控制泥水压力波动、稳定支护开挖面土层并有效控制地表变形。

② 盾壳刚度满足盾构掘进作业和承受高水压和土压的要求,盾壳厚度不小于 70mm。

③ 泥水分离系统有足够的处理能力和储备系数,与最快的掘进速度和地质条件相匹配,能有效分离泥浆中的碴土。

④ 刀盘具备防止中心区域结泥饼和泥水仓底部沉碴的技术措施。

### (3) 高水压条件下掘进对选型的要求

① 盾构设计时,确保刀盘主轴承和盾尾密封的防水性能可以承受 0.6MPa 高水压。

② 主轴承内外密封系统均采用 5 道唇形密封系统,并采用自动润滑方式;可以通过泄漏室对密封状况进行检测,并具有连锁保护功能。

③ 盾尾止水装置采用 4 道钢丝刷密封,并在第 2 道与第 3 道钢丝刷密封之间设计紧急止水密封,可在隧洞内安全更换前 2 道盾尾密封。

(4) 孤石、枯树等不良地质对选型的要求

① 配置双层先行式碳化钨撕裂刀,撕裂刀超前切刀布置,先行切削地层,对卵石地层、钙质结核地层和枯树进行破碎和切削,并保护切刀。

② 在泥水平衡仓底部配置破碎设备,对刀盘上未能破碎的较大粒径(180~500mm)卵石进行破碎,防止排泥管堵塞。

③ 配备双气路的双室人仓,具备带压进仓功能。

④ 沉浸墙设置安全闸门,破碎机堵塞时,将沉浸墙关闭,可在常压下进入泥水平衡仓,进行排堵或维修破碎设备。

在穿黄盾构施工实践中所采用盾构机的性能充分考虑了以上因素,为后续的掘进施工创造了良好的条件。所选盾构机整体结构如图 2 所示。



图 2 盾构机整体结构

Fig. 2 Integral structure of shield machine

### 3 盾构施工关键技术

在穿黄隧洞盾构施工中,通过工程建设各方研究与实践,针对因复杂地质条件、大埋深、高外水压力、长线路等引起的施工技术难题,建立了有效的盾构施工技术体系,圆满地解决了相关技术难题。施工中采用的关键技术主要如下。

#### 3.1 泥浆配置技术

在穿黄隧洞盾构施工过程中,基于泥水平衡盾构施工方法的基本原理和基本要求,紧密结合地层特性、地下水特点、刀盘与刀具设计方案,针对泥浆配置与性能优化问题展开了针对性的研究,为穿黄盾构掘进提供了性能优良、有针对性的泥浆配置方案。

(1) 通过调整泥浆的配置方案,使泥浆的密度、浓度、黏性、屈服值、含砂率、粒度分布、过滤特性等满足泥膜形成时间、厚度和稳定性,以及刀具磨损等方面的要求。

(2) 通过调整泥水特性参数,实现对泥膜成膜时间、厚度、稳定性的有效控制。根据试验和施工前期获取的相关参数,针对黏粘土/粉粒土和细砂土等黏土地层、砂地层(中、细砂)和粗砂/砾石等间隙较大地层,制定相应的泥水配比方案。

(3) 根据不同地层的特性,选择合适的泥浆相对密度和泥浆黏度。在黏土层掘进时的黏度、密度偏高,重点降低泥浆密度,密度控制在  $1.03\text{g}/\text{cm}^3$ ,黏度控制在 23s;砂砾石层掘进

时的泥浆黏度、密度偏低,适当补充新鲜浆液并加增黏剂,使进浆密度控制在  $1.05\text{g}/\text{cm}^3$ ,黏度控制在 30s 以内。

#### 3.2 掘削面稳定控制技术

穿黄盾构工程地质条件复杂,掘进过程需要穿越不同的地层,施工中采取了多项措施确保掘削面的稳定。

(1) 根据不同地层条件、不同埋深及外水压力通过计算和反复试验设定开挖舱压力。

(2) 根据不同的地质条件,选择适当推力、掘进速度、贯入度等掘进参数,控制掘削量,减小掘进时对掘削面地层的扰动。全砂层掘进速度一般控制在  $35\text{mm}/\text{min}$  左右,全土层控制在  $10\text{mm}/\text{min}$  以内,送排泥浆流量差在  $50\sim 70\text{m}^3/\text{h}$ 。

(3) 及时调整泥浆的黏度、比重,控制泥水参数使其成膜时间短于刀盘转速对应的掘削时间间隔,不同的地层采用不同的泥浆参数。

(4) 施工中详细记录实际掘削面压力波动范围并加以分析归纳,为后续施工提供借鉴和参考。

#### 3.3 突破性的壁后注浆技术

《盾构法隧道施工与验收规范》(GB 50446—2008)中规定,充填系数为 1.30~2.50。穿黄工程设计方案中的壁后注浆材料为双液浆。但经过充分论证研究,采用单液浆注浆,充填系数控制在 1.05 以上的施工方案。

(1) 根据国内相关工程施工经验,双液浆易堵塞注浆管。

(2) 穿黄工程主要为直线隧洞,超挖量小,在单一黏土地层中则更少。在此前提下,注浆压力需要大于外水压力与静止土压力之和( $>0.6\text{MPa}$ ),才能在一定的空腔内注入更多的压缩系数极小的填充材料。

(3) 穿黄工程盾构机允许的最大注浆压力为  $0.6\text{MPa}$ ,当压力超过这一标准时,将损坏盾尾密封并由此引起一系列相关问题,并可能导致管片的变形或破坏。

因此,穿黄盾构施工中采用如下的注浆施工技术方案:

① 壁后注浆材料选用单液浆,初凝时间通过外加剂的掺量控制,并根据实际需要进行调节,同时需要满足便于施工的要求;② 最高注浆压力控制在  $<0.6\text{MPa}$ ,填充系数  $>1.05$ 。这两项参数都已突破了规范的限制。

施工实践证明,① 虽然单液浆的胶凝时间较长,浆液初凝之前的隧洞稳定性和防渗效果相对较差,强度偏低。但浆液凝固后强度较高且均匀,对于隧洞衬砌的最终稳定及防渗起到重要作用;② 穿黄工程中采用的砂浆固结率大,砂浆凝固后体积收缩较小,现场试验测取的砂浆固结率为 95%~98%,在管片与地层之间形成了高强度的固结体,对隧洞稳定及防渗起到了应有的作用,满足了设计要求。

#### 3.4 高外水压力条件下的盾构施工防渗技术

穿黄盾构掘进需要穿越饱和含水砂层,水头压力高达  $0.45\text{MPa}$ ,在饱和砂层掘进时易引起突发性涌水和流沙,并存在大范围塌陷的风险。因此,安全掘进对穿黄盾构施工防渗提出了严格的要求。掘进过程中通过盾构自身的防护、隧洞外衬防水、管片接缝防水、盾构始发与到达施工防渗等多项

技术措施,有效解决了穿黄盾构掘进的防渗问题。

(1) 采用具有自动顺滑功能、自动密封功能、自动检测密封工作状态的功能以及磨损后可继续使用等功能的主驱动密封,并在掘进过程中及时补充密封及顺滑油脂。

(2) 在4道盾尾钢丝刷形成的3道空腔内注入足量的WR89油脂,达到盾尾的密封效果并减小钢丝刷与管片间的摩擦,防止盾尾密封损坏。

(3) 在盾构掘进过程中控制好盾构机的姿态,同时根据盾构机的姿态正确地进行管片拼装,使管片与盾尾间隙均匀,从而保护盾尾密封。

(4) 严格控制管片的生产、养护、运输、止水条黏贴和管片拼装等道工序的施工质量,避免因管片质量或人为损坏降低隧洞的防渗能力。

(5) 通过高喷、塑性混凝土墙、洞门周围注浆、冷冻等多项措施加固始发端和出口端地层;并调整泥浆性能、控制掘进速度,以利于地层的稳定。做好始发端头及到达端头的地基处理及降水工作,确保洞门钢环及洞门密封的精确安装。

### 3.5 端头地层加固技术

根据穿黄工程两岸的地质条件,为确保盾构施工的顺利进行,需要对北岸竖井(盾构始发井)、南岸竖井两侧地层、邛山隧洞进口(盾构出口)地层进行加固,以防止渗漏和坍塌。端头地层加固施工中采取了以下综合技术措施。

(1) 高喷加固:选用XY-2型岩芯钻机成孔、优质泥浆护壁防止塌孔。选用三重管高喷机进行高压喷浆,施工中保证各工序之间的衔接,防止中断、喷嘴堵塞、爆管等事故,出现异常情况及时处理。

(2) 素混凝土墙加固:在北岸竖井地下连续墙背部设置一道C10塑性混凝土墙;在南岸竖井地连墙外部的到达洞口和始发洞口处都布设一道C10的素混凝土墙。

(3) 冷冻固结:在始发井C10塑性混凝土墙外侧另设一道1.9m厚的冷冻帷幕。在盾构始发前洞门凿除过程中持续冷冻。待盾构机推进至掌子面,形成泥水平衡,洞门密封发挥效果后,冻结土体解冻。

(4) 注浆加固:在始发洞门周围间隔1m布置2排孔,采用水泥水玻璃双液浆灌浆。

### 3.6 大埋深、高外水压力下的带压进舱技术

虽然在设计时考虑了刀盘和刀具的耐久性,但受地质条件和线路长度的影响,掘进过程中仍需更换刀具。为此,在穿黄工程隧洞掘进中建立了带压0.3MPa进舱换具的施工技术,确保了隧洞掘进的顺利实施。该项技术主要如下。

(1) 刀具磨损监测与预报:通过刀具磨损监测系统监测刮刀的磨损情况,系统实现数据采集、数据分析、磨损情况判断、分析结果可视化等的集成。该系统为进舱换刀提供了前提条件。

(2) 带压进舱前的准备工作:主要包括工程地质稳定性评估、刀盘刀具检查和换刀工作计划的制定、人员准备、设备/工具/物资准备、设备检查与维修等工作。

(3) 施工工艺措施:主要包括泥浆护壁密封掌子面、降低开挖舱液位、泥水压力调整与设置、泥水舱密封效果检查、带压进舱作业的系列技术措施。

(4) 安全、质量与突发事件处理措施:进舱人员进行严格身体检查和系统培训;相关设备试运行,确保其功能正常;建立详尽的突发事件人员救助与工程处理体系。

### 3.7 盾构掘进姿态控制技术

穿黄盾构线路长、地质类型多样,需要在掘进过程中严格控制盾构姿态,确保掘进方向按照设计线路前进。施工中主要通过以下技术措施实现。

(1) 根据各段地质情况对上仰角、掘进速度、刀盘转速、千斤顶各分区推力等掘进参数进行适时调整。

(2) 选择合理的管片类型,避免人为因素对盾构机姿态造成过大的影响,严格管片拼装质量,避免因此而引起的对盾构机姿态的调整。

(3) 偏差纠正时密切注意盾构机的姿态、管片的选型及盾尾的间隙等,保持盾尾与管片四周的间隙均匀。纠偏过程中放慢掘进速度,并注意避免纠偏时因单侧千斤顶受力过大对管片造成的破损。

(4) 当盾构机偏离设计轴线较大时,不能矫枉过正,避免往相反方向纠偏过大或盾尾与管片摩擦导致管片破裂。

穿黄隧洞盾构施工中采用盾构姿态实时控制系统,工作界面如图3所示。

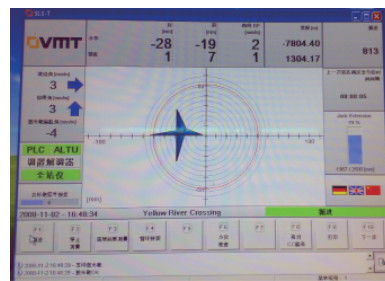


图3 盾构掘进姿态控制工作界面

Fig. 3 Interface of shield construction attitude control

### 3.8 精密的长距离竖井联系测量技术

根据穿黄隧洞倒虹吸结构型式,平面坐标和方位只能通过北岸竖井进行一井定向传递到隧洞内控制掘进施工,贯通区间达3450m。如采用传统的竖井联系测量方式,贯通偏差将超出允许值,为此采用精密的长距离竖井联系测量技术。

(1) 选用直径0.5mm的高强单股钢丝、重35kg悬浮状态阻尼性能良好的正三角棱柱形重锤、黏度适中的清洁机油等测量用具和材料,保证观测过程中钢丝的稳定。

(2) 洞内平面控制网点平行对称布设在隧洞底部轴线的两侧,洞内控制导线网采用复合导线形式布设施测。

(3) 利用竖井内衬预埋件牢固焊装钢丝吊架,人行架与钢丝吊架分体,移动钢丝时尽可能减小人为扰动。

(4) 采用钢结构观测标墩和强制对中的形式,将对中误差控制在0.2mm以内。

### 3.9 长距离泥水输送技术

过黄河隧洞段长 3450m, 考虑北岸竖井高度 (48.1m) 以及弯管、闸门和分离站高度的影响, 泥水输送的距离约为 4000m, 在长距离的水平输送和高扬程的垂直输送的条件下, 采取以下措施:

(1) 送泥泵和排泥泵分别采用 2 台和 3 台大功率、大扬程、大排量的重型泥浆泵, 其流量和扬程均具有较大的储备系数; 泥浆泵设计有大管径的排浆通道, 能够泵送的最大砾石尺寸为 180mm; 对泥浆泵的转轴进行了耐磨保护, 以适应在磨损性地层中的排泥需要。

(2) 主排泥泵安装在盾构后配套拖车上, 接力泵安装在竖井底部, 当掘进到过河隧洞的中间时在隧道内安装 1 台中继排泥泵。

(3) 在泥水平衡仓的底部配置破碎机, 对较大的砾石进行破碎; 破碎机的后部设置拦石格栅, 避免大砾石进入排泥管。

(4) 泥浆系统安装电磁控制球阀和相应的旁通管路, 可以实现进排浆管中进行反循环, 防止在黏土地层中发生堵塞; 通过 PLC 软件对泥水系统进行自动控制。

(5) 在气仓的底部设计 2 个电磁球阀。在开挖模式下, 可以在泥水平衡仓的上部实现反循环, 以便清理在破碎机和仓室底部的沉积物。

(6) 配备泥浆管线延伸系统, 保证盾构在正常掘进过程中的管线延伸, 防止发生泥浆泄漏。

### 3.10 大坡度盾构掘进技术

邛山隧洞最大上坡坡度达 4.9107%, 要求盾构有较强的爬坡能力和方向控制能力, 同时对运输系统也提出了更高的要求。为保证施工质量和安全, 采取了如下对策:

(1) 盾构设计时, 总推进力配备为直线段的 1.3~1.5 倍。为防止盾构低头, 加大底部油缸分组的个数, 为盾构爬坡提供足够的推力。

(2) 盾构掘进时, 加强盾构机和管片姿态监测, 严格控制盾构纠偏量, 避免发生“上抛”现象。

(3) 隧洞内水平运输采用大吨位变频牵引机车, 且具有安全可靠的制动装置。

(4) 盾构后配套拖车装配防脱落的下滑装置。在盾构后配套及运输列车停车的运输轨道上及时设置可靠的制动装置。

(5) 加强轨道线路的维保力度, 保证运输线路安全可靠。

## 4 成效与结论

虽然受穿黄盾构工程不良地质条件、高外水压力、长线路、大埋深、大直径等施工条件的影响, 但经过如上施工技术的创新与实践, 顺利解决了各项施工技术难题, 取得了良好的工程施工成效。

(1) 穿黄盾构工程施工进度、施工质量等均满足或优于设计要求及相关标准, 整体质量优良。

(2) 穿黄隧洞过黄河段的贯通误差横向为 1.8cm, 纵向为 2.2cm, 远低于规范和设计要求的允许值 (10cm 和 5cm), 实现

了精准贯通。

(3) 采用单浆液、0.6MPa 最高注浆压力、1.05 填充系数的壁后注浆技术突破了现行技术标准。形成的砂浆的固结率为 95%~98%, 在管片与地层之间形成了高强度的固结体, 对隧洞稳定及防渗起到了应有的作用, 满足了设计要求, 效果良好。

(4) 在国内没有相关标准和经验的条件下, 带压进舱 300 余舱, 成功更换刀具 300 余件。进舱压力高达 0.3MPa, 远大于一般的 0.18MPa; 进舱人员减压吸氧时, 人员舱内的氧含量控制在 19.4%~23.5%, 严于海军的潜水减压标准值 19.4%~27.5%。穿黄盾构施工在带压进舱作业方面取得了新的突破。

总之, 经过南水北调中线穿黄盾构工程的施工技术创新与实践, 在泥浆配置技术、掘削面稳定控制技术、突破规范的壁后注浆技术、高外水压力条件下的盾构施工防渗技术、端头地层加固技术、大埋深/高外水压力下的带压进舱技术、盾构掘进姿态控制技术、精密的长距离竖井联系测量技术、长距离泥水输送技术、大坡度盾构掘进技术等方面取得了一定的突破和发展, 确保了穿黄盾构施工的顺利进行, 也为今后类似的工程施工提供了参考和借鉴。

### 参考文献 (References)

- [1] 张凤祥, 傅德明, 杨国祥, 等. 盾构隧道施工手册 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 5-20.  
Zhang Fengxiang, Fu Deming, Yang Guoxiang, et al. Shield construction manual[M]. Beijing: China Communications Press, 2005: 5-20.
- [2] 南水北调中线干线工程建设管理局, 中国葛洲坝集团股份有限公司. 穿黄工程盾构施工关键技术研究[R]. 北京: 南水北调中线干线工程建设管理局, 宜昌: 中国葛洲坝集团股份有限公司, 2010.  
Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, China Gezhouba Group Corporation. Key shield construction technology in yellow river-crossing project [R]. Beijing: Construction and Administration Bureau of South-to-North Water Diversion Middle Route Project, Yichang: China Gezhouba Group Corporation, 2010.
- [3] 韩黎明, 李舜才. 盾构技术与穿黄隧洞施工 [J]. 南水北调与水利科技, 2004, 2(6): 41-43.  
Han Liming, Li Shuncai. Technology of shield boring and tunnel construction under Yellow River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2004, 2(6): 41-43.
- [4] 陈悦华, 肖劲松, 赵锋. 穿黄输水隧洞盾构施工进出洞地基加固技术研究[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2007, 40(4): 81-84.  
Chen Yuehua, Xiao Jinsong, Zhao Feng. Research on ground consolidation method for shield access sections of tunnel across Yellow River[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(4): 81-84.
- [5] 苏华, 李珍, 汪在芹. 南水北调中线穿黄隧洞盾构注浆浆材试验[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(1): 28-32.  
Su Hua, Li Zhen, Wang Zaiqin. Grouting experiment of shield tunnel crossing Yellow River in middle route of South-to-North Water Diversion Project [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(1): 28-32.
- [6] 于澎涛. 南水北调中线穿黄隧洞盾构始发技术[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(4): 54-57.  
Yu Pengtao. Starting up construction technology with shield machine in the Yellow River crossing tunnel of the middle route Project of South-to-North Water Diversion[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(4): 54-57.

(责任编辑 朱宇)

# 微生物膜研究方法和潜在的控制技术

陈曦,张洪勋

中国科学院研究生院资源与环境学院,北京 100049

**摘要** 在自然界中,微生物的生物膜模式对其生命循环具有十分重要的意义,已成为当前有关微生物学研究的热点之一,对其研究已引起越来越多的科学工作者的兴趣。然而,由于缺乏针对微生物膜结构的复杂性、多变性和相关的生理生化活性的高效的方法使研究工作受到限制。本文结合微生物膜研究的最新进展,介绍了几种研究微生物膜的发生装置以及检测技术,并概述了几种潜在的控制和去除微生物膜的方法。

**关键词** 微孔板法;共聚焦显微镜;荧光染色;自然抗污损物质

**中图分类号** Q81

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.04.12

## Research Methods and Control Technologies for Microbial Film

CHEN Xi, ZHANG Hongxun

*College of Resources and Environment, Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract** In nature, the biofilm mode of life is of great importance in the cell cycle for many microorganisms and is one of hotspots in microbiology. However, the progress of studies of biofilm due to the complexity and variability of associated physiological activities requires advanced methods with high throughput. In this paper, principles, applications, advantages and disadvantages of several biofilm growing devices and appropriate methods for biofilm analysis are discussed, together with several potential methods for the control and removal of biofilms. Among the biofilm growing devices, the microtiter-plate is the first that has been used in high-throughput testing of biofilms. But it is not possible to assess the biofilm structure only by microscopy. The Calgary Biofilm Device was applied for that purpose. Another high-throughput biofilm forming device is the BioFilm Ring. For the analysis of the structure of the biofilms, the microscopy plays a key role. Coupled with microscopes, some fluorescent dyes such as DAPI, CTC and SYTO 9/PI are used for the assessment of total cells, physiologically-active cells and membrane compromised cells, respectively. For the analysis of the chemical substances of the biofilms, microprobes are usually used for the detection of DO and pH. EPS and Quorum sensing signal molecules are usually measured by extraction methods. Some new methods have been suggested that may be developed to release bacteria from the surfaces, for instance, antifoulants, hydrolases and NO. These would be alternatives to biocides in the future. Recent advances in high-throughput methods to generate and study biofilms have opened the possibility of starting an omics-“biofomics” approach to study these complex structures. The “biofomics” will reach the application stage in areas such as clinical, industrial and environmental microbiology in the next decades.

**Keywords** microtitre plate; confocal microscopy; fluorescence staining; natural antifoulants

### 0 引言

微生物膜是一种特殊的细胞群体结构,由微生物在其自身分泌的多聚物中形成。在自然界中,绝大多数细菌不是以浮游方式生长,而是以微生物膜的方式生长。微生物膜的存

在相当广泛,并在许多方面影响着人类的生产生活,这个影响可以是正面的,也可以是负面的。比如在土壤和水质的净化中,微生物膜在生物修复和净化工艺中常常起到积极作用。但是,由于大约 65%的人类感染是由微生物膜引起的,与

收稿日期:2010-10-12;修回日期:2010-12-19

基金项目:国家科技支撑计划项目(2009BAC57B01-1);国家重大科技专项(2009ZX05039-003-2)

作者简介:陈曦,博士研究生,研究方向为环境微生物技术,电子信箱:chenxi20080808@gmail.com;张洪勋(中国科协所属全国学会个人会员登记号:S289900324M),教授,研究方向为环境微生物技术,电子信箱:hxzhang@gucas.ac.cn