

厄瓜多尔 CCS 项目 TBM 管片结构设计研究

陈勇, 王生

(中国水利水电第十工程局有限公司, 四川 成都 610072)

摘要:根据国内外隧洞掘进机的设计理论和经验,针对厄瓜多尔 CCS 项目输水隧洞功能、结构设计的具体情况,对双护盾 TBM 所采用的管片进行了详细的探讨和分析,研究了管片的选型、类型、分块模式及分块依据、封顶块位置、管片内径、环宽、楔形量、连接方式、组装方式等构造设计的原理以及经验,详细地介绍了 CCS 项目 TBM 管片的设计原则和理念。

关键词:CCS 项目;TBM;管片选型;管片分块;封顶块;楔形量;结构设计

中图分类号:TV7;TV554+.2;TV545;TV22

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2014)04-0007-05

1 概述

厄瓜多尔 CCS 项目为引水式电站,装机容量为 1 500 MW,输水隧洞总长约 24 km,开挖洞径为 9.11 m,在其进口、中间和出口分别设置有 4 个转弯半径为 500 m 的弯道。根据项目前期地质勘查得知,输水隧洞围岩主要由安山岩和凝灰岩组成,大部分为 II 类和 III 类岩石;输水隧洞出口段有大约 2.2 km 处于浩林(Hollín)地层,主要由砂岩和页岩组成,大部分为 III 类和 IV 类岩石。同时,通过地质勘察得知,隧洞沿线可确定的断层有 30 个,最大和最小埋深分别为 700 m 和 40 m,平均埋深 462 m。最终决定选用地质适应性最高、适用于中厚埋深、中高强度的双护盾 TBM 进行掘进。

2 管片选型

管片选型的原则有两个,第一:适合隧洞设计

轴线;第二:适应 TBM 的姿态。

2.1 隧洞设计轴线

管片的主要类型有:

(1)单一型管片,适合于无弯道隧洞衬砌;

(2)曲、直组合型管片,该组合采用直线环、左转弯环和右转弯环 3 种管片形式,在直线段均采用直线环拼装,曲线段按需要安装左转弯环或右转弯环。此种管片组合模式可用于有弯隧洞,但需 3 套模具才能完成管片的预制生产;

(3)分为左环和右环楔形管片,每环各片管片纵轴线长度不一致,但左环和右环相互组合即为直线。施工时通过左、右环管片之间的交替安装衬砌直线段隧洞,通过连续安装左环或连续安装右环实现衬砌转弯,此类管片需要两套模具进行管片的预制生产(图 1);

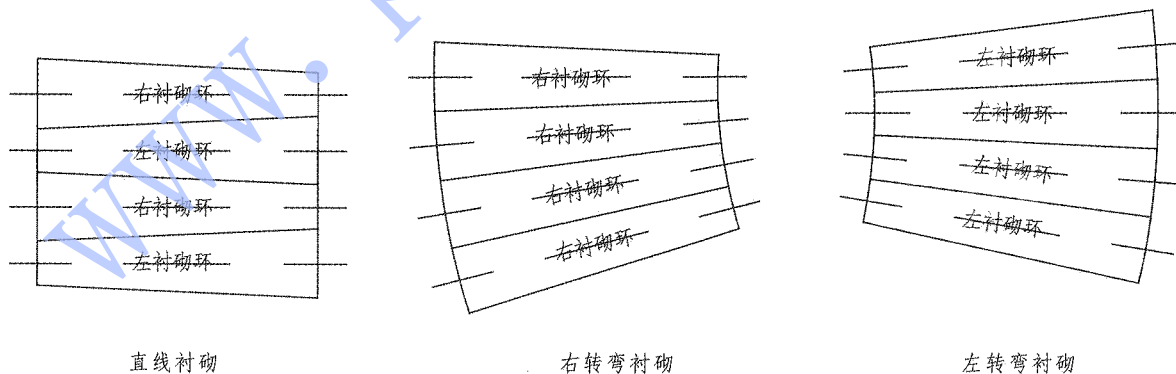


图 1 左、右环楔形管片拼装图

(4)通用型管片。该型管片采用一种类型的楔形衬砌环,在施工过程中根据需要对管片进行适当旋转,以实现直线段和曲线段的衬砌。此类

管片只需要一套模具进行管片的预制生产,但实际施工过程中需事先计算和模拟转弯段管片组合模式、转换角度,同样,其对管片安装手的操作水平要求较高,管片安装速度较慢。

收稿日期:2014-07-07

CCS 项目输水隧洞设有 4 个转弯半径为 500 m 的弯道且其对掘进速度要求较高,考虑到管片预制的投入和施工效率,最终决定采用上述(3)型——设有左、右环的楔形管片进行衬砌。

2.2 盾尾间隙

双护盾 TBM 施工时,最后一环衬砌的管片处于 TBM 盾尾之内(通常将盾尾与管片之间的间隙叫盾尾间隙),这是管片选型非常重要的依据。

当管片安装轴线与 TBM 掘进轴线不一致时,盾尾间隙将出现一侧增大,而另一侧对应减小的现象。如果盾尾间隙过小,盾壳上的力可直接作用在管片上,则 TBM 在掘进过程中盾尾将会与管片发生摩擦、碰撞;轻则增加盾构机向前掘进的阻力,降低掘进速度,重则造成管片错台、破损。同时,盾尾间隙增大的一侧则会造成盾尾刷密封不严,致使后部灌浆易渗漏。

CCS 项目输水隧洞 TBM 掘进洞径为 9.11 m,衬砌后管片外径为 8.8 m,开挖掘进轴线和管片安装轴线平行时四周均有 15.5 cm 的间隙,可以有效地避免盾尾间隙过小的问题。

2.3 油缸行程

当双护盾 TBM 伸缩护盾收死、采用辅助油缸反推已安装的管片进行掘进时,就必须考虑管片楔形量与辅助油缸行程之间的关系。由于管片楔形量的存在,辅助油缸在推进时将产生行程差,当该差值过大时,推进油缸的推力就会在管片环的径向产生较大的分力,从而影响已拼装好的隧道管片以及掘进姿态,严重时会造成 TBM 掘进歪斜和已安装管片错台。同时,也可以看出,该差值过大时将影响下部的盾尾间隙。

3 管片构造设计

3.1 每环管片的片数

管片分块要考虑管片生产、储运、安装、纠偏以及对渗漏水 and 结构刚度的影响等。管片分割数目愈少愈好,但应考虑到搬运与组装的施工方便,一般情况下,小断面隧道(如市政管道等)分 4~5 块,中至大断面隧道(如地铁、公路隧道等)分 6~10 块,而且从有利于管片运输、拼装和减小 TBM 千斤顶的行程考虑,一般采用小封顶块,其他块则体积、重量均较为类似。CCS 项目输水隧洞洞径较大,采用 7 块分块模式。

3.2 封顶块位置

理论上封顶块在任何位置都是可行的,但当封顶块位于拱腰以下部位时,两侧管片拼装后,由于自重原因会挤向最后拼装的封顶块预留空间,如此拼装封顶块时需增大千斤顶的推力,容易对管片造成挤压损坏,因而封顶块一般位于拱腰以上部位。

封顶块的拼装形式主要有径向楔入、纵向插入两种:

(1) 径向楔入其半径方向的两边线必须呈内八字形或至少是平行,受荷后有向下滑动的趋势,受力不利;

(2) 纵向插入形式的封顶块受力情况较好。受荷后,封顶块不易向内滑移;其缺点是在封顶块管片拼装时,需要加长盾构千斤顶行程。

CCS 项目采用的封顶块位于正顶拱两侧,封顶块安装时先径向搭接约三分之二管片长度,然后纵向插入剩余的三分之一长度成环。

3.3 管片分片

采用带有楔形量的左右环管片,环与环之间一般采用螺栓连接,螺栓孔的个数及位置是确定每环分片的重要依据。

CCS 项目管片输水隧洞洞径较大,采用 7 分块的管片模式。考虑到管片安装的稳定牢固、避免发生错台,除在封顶块设置一个连接螺栓孔外,其他 6 块均设置了 3 个连接螺栓孔,则整环共有 19 个螺栓孔。按照已建和在建项目经验,为实现连接螺栓受力均匀,左右环管片交替安装过程中螺栓孔的连接及螺栓孔的位置均按圆周均匀分布,则螺栓孔分布角度 φ 为:

$$\varphi = 360^\circ / 19 = 18.948^\circ$$

按照各片所占螺栓孔的个数和螺栓孔在管片内均匀分布的原则,将图 2 中所有管片螺栓孔径向分布线按照 $\varphi/2$ 的角度旋转后根据封顶块的位置和各片管片所占螺栓孔的数量得到图 3 所示的管片分片图。

以上方法是以右环为例进行说明。按照同样的方法,将封顶块位置置于顶拱右侧,即可得到左环分片图。

3.4 环宽设计

管片环宽主要取决于隧洞洞径的大小和管片的厚度,同时,管片宽度同样决定了 TBM 油缸行程、管片安装器千斤顶顶推重量和行程等制作参

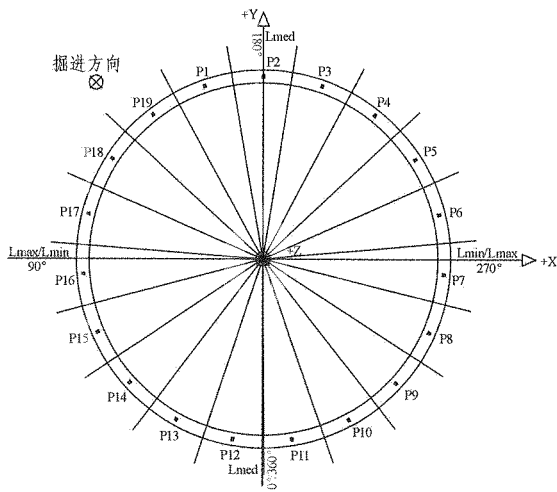


图 2 螺栓孔径向分布图

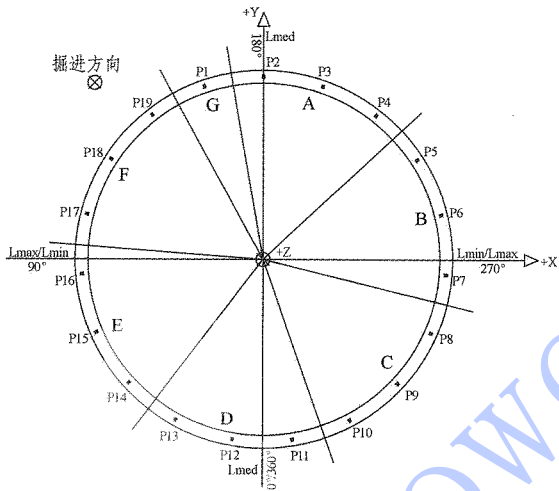


图 3 管片分片图

数。从另一方面考虑,由于 TBM 管片安装器顶推重量是有限度的,因此,管片的环宽和厚度由于重量因素是相互制约的。

从结构防水、提高施工进度、节省防水材料和管片连接件看,管片加宽是明显有利的;从结构受力方面考虑,管片加宽后区间隧洞接缝减少,有利于提高结构的整体性;从施工速度方面考虑,管片加宽可以减小同等掘进长度下管片的安装数量,提高施工效率和施工速度。但管片加宽将造成 TBM 长度增加、油缸行程增大,同样,在管片厚度不变的情况下管片安装器顶推重量增加。同时,由于管片宽度增大,致使 TBM 掘进每个循环行程增大,出渣量增多,导致所配备的出渣皮带或其他出渣设备增大或增多。因而管片环宽需综合考虑洞径大小、隧洞转弯半径大小、TBM 及其出渣配

套设备选型、月掘进强度等相关参数。目前,国内外隧洞所采用的管片环宽主要介于 1.2 ~ 1.8 m 之间。CCS 项目输水隧洞开挖洞径达 9.11 m,转弯半径为 500 m 且月掘进强度需达到 600 m,因而选择 1.8 m 环宽的管片进行隧洞衬砌。

4 管片楔形量的设计与拼装方式

4.1 管片楔形量的计算

楔形量是左右环楔形管片的主要参数之一,主要取决于隧洞转弯处的最小转弯半径,并采用盾尾间隙等参数进行复核。根据对已建施工项目进行的统计得知,当管片外径为 5 ~ 7 m 之间时,楔形量为 30 ~ 50 mm;当管片外径为 8 ~ 10 m 之间时,楔形量为 40 ~ 80 mm。

隧洞转弯时由管片衬砌而成的柱体平面方向在洞轴线两侧形成两个转弯半径的弧线,管片采用这两个同心不同径的转弯半径进行计算,按照“弯曲隧道梯形环管片楔形块位置选择, RETC 2005, Samuel Swartz”,计算附图及公式见图 4。

CCS 项目输水隧洞 $L_0 = 1800$ mm, $D_{ext} = 8800$ mm, $r = 500$ m, 计算时考虑掘进误差,按 $r = 400$ m 进行计算,则:

$$L_{left} = 1820 \text{ mm}$$

$$L_{right} = 1780 \text{ mm}$$

式中 L_{left} 为左边长度; L_{right} 为右边长度; L_0 为管片标准长度; D_{ext} 为管片外径; r 为转变半径。

按照计算,CCS 项目管片楔形量为 40 mm,即每一环 0 ~ (+/-)20 mm 的长度变化,管片展开情况见图 5。

4.2 管片拼装方式

从结构角度看,错缝拼装能使衬砌圆环接缝刚度的分布趋于均匀,减少结构变形,可取得较好的空间刚度,增强结构的整体稳定性,使管片抗变形能力得到了增强,提高了防水效果。

CCS 项目所采用的楔形左右环管片分别在每环管片腰线位置设置楔形量,通过环宽渐变实现顶端和底端均为标准环宽。其中:

- (1) 左环为左侧腰线环宽最小、右侧腰线环宽最大,则连续安装左环时隧洞可实现左转弯;
- (2) 右环左侧腰线环宽最大、右侧腰线环宽最小,则连续安装右环时隧洞可实现右转弯;
- (3) 两种管片交替安装时实现互补,即为直线。

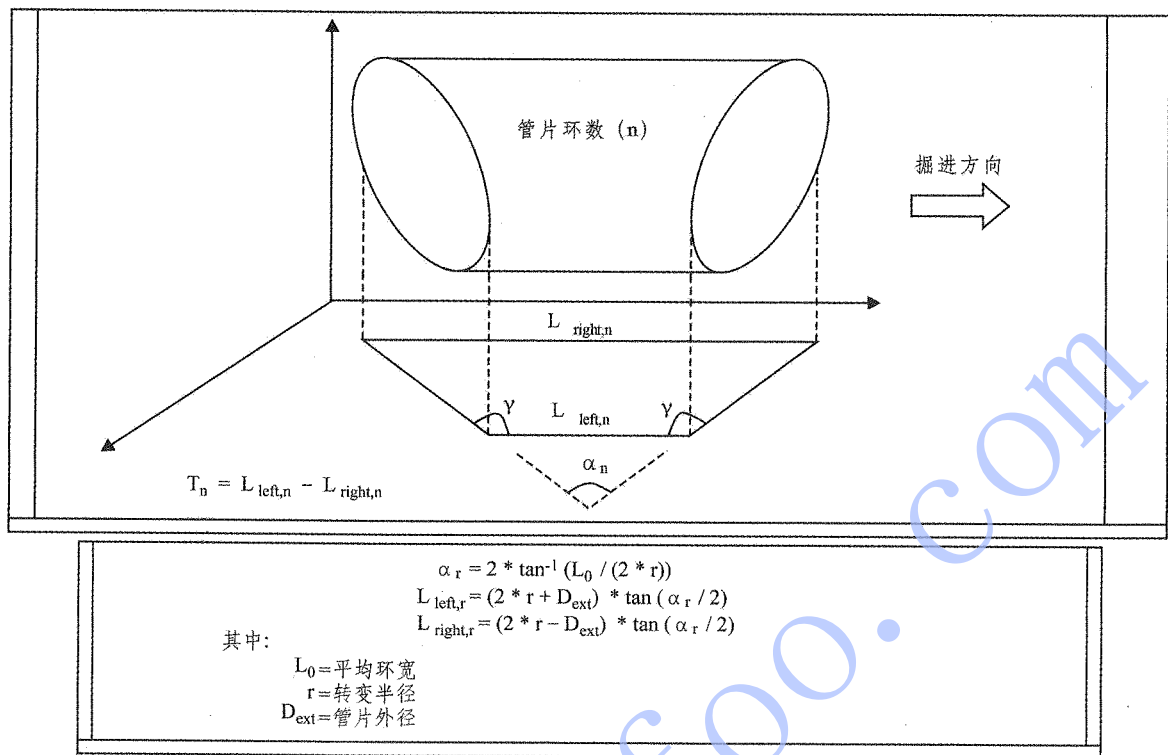


图 4 管片楔形量计算图及计算公式

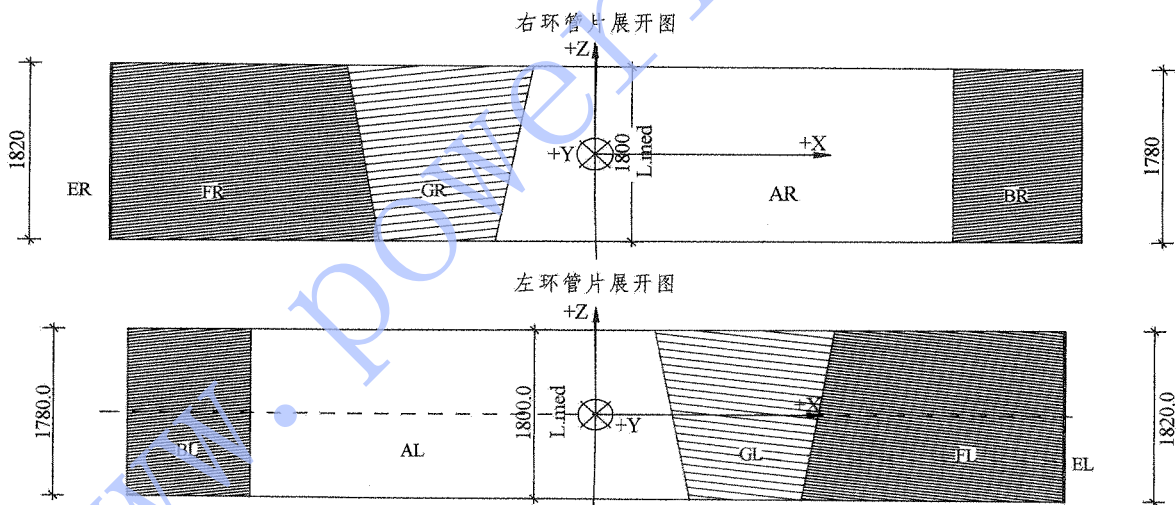


图 5 左右环管片展开图

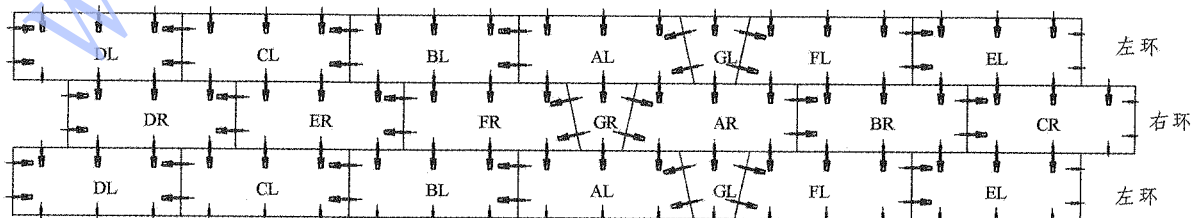


图 6 管片螺栓连接展开图

由于左右环管片楔形块分别位于顶拱左右两侧,且两种管片分片位置不一样,在直线段交替安

装时完美地实现了管片错缝拼装,隧洞转弯段由于连续安装同一类型管片故为通缝连接,但因转

弯段长度仅为 CCS 项目输水隧洞长度的 5%，故可认为隧洞整体均为错缝拼装，有利于结构稳定。

4.3 管片的连接方式

目前常用的螺栓连接形式有直螺栓连接、弯螺栓连接、斜螺栓连接、无螺栓连接（砌块）以及销钉连接等。

无螺栓连接（砌块）和销钉连接的接头间没有连接螺栓，也不能施加预紧力，衬砌的整体刚度小，隧洞的抗震和防水性能较差，不适应 CCS 项目多变的隧洞地质情况。在各类螺栓连接方式中，直螺栓构造较简单，施工方便，只需在管片设计和预制时对应埋设和设置螺栓孔位即可，因此而适合 CCS 项目高强度掘进的需要（图 6）。

5 结 语

CCS 项目输水隧洞管片设计结合国内外设计

与施工经验，先期经过大量的考察论证，所设计选用的管片模式较好地解决了后期施工难度，从而提高了管片预制生产和管片拼装的效率，为大洞径下 TBM 高进尺掘进和管片安装提供了有利保证。同样，在管片选型确定后，跟进的各类结构计算有效地解决了隧洞转弯、适应不同地质情况地层等问题。目前，CCS 项目 TBM 平均月进尺达 650 m，最高月进尺为 1 000.41 m，创造了同洞径掘进速度世界第三的好成绩。

作者简介：

陈 勇(1968-)，男，重庆梁平人，副总经理，高级工程师，学士，从事国示工程项目管理工作；

王 生(1987-)，男，山东潍坊人，助理工程师，学士，从事水利水电工程施工技术工作。

(责任编辑：李燕辉)

（上接第 6 页）

延长管路，增设平台，豆砾石回填跟进尾盾倒数第二环管片回填。（4）根据砂浆运输情况，及时进行一次性灌注砂浆，保证尾盾倒数第二环管片底部均有砂浆。

7.5 掘进速度快而导致回填灌浆跟不上，从而形成二次灌浆

从设计后配套豆砾石回填灌浆的设备配置及实际应用效果看，原后配套水泥灌浆设备配置略显不足，从而造成顶部回填不满或不均匀。另外，由于受掘进速度影响，有些管片来不及回填，TBM 需换步前行，从而形成了二次灌浆。

经验及改进措施：（1）增大后配套水泥灌浆设备配置，采用袋装水泥运输。（2）在满足管片底部砂浆回填的同时，采用泵送砂浆的方式回填顶拱（此法在得到正式批准后应用效果较好）。

8 结论及总结

（1）TBM 施工是一个系统工程。对于 TBM

从设备选型、合同谈判到制造、海运、清关，直至陆运、组装、运行以及后期的配件供应维护等各个环节均要求有较好的组织协调；施工中包括施工资源组织调度、与 TBM 厂家人员的沟通、TBM 各个施工岗位的职责与管理等，均将对 TBM 整个系统工程造成重大影响。

（2）TBM 是集土建、机械、电器、液处于一体的、多专业的团队，每个专业的快速反应与判断对 TBM 高效掘进至关重要。

（3）双护盾 TBM 在适宜的各种复杂的地质条件下确实显示出了其具有的优点，但在遇到大断层时，如何实现刀盘或盾内的固结灌浆仍需要进行认真地总结和改进。

作者简介：

张 国(1978-)，男，湖南洞口人，厄瓜多尔 CCS 项目部总工程师，工程师，从事水利水电工程施工组织与技术管理工作；

陈 勇(1968-)，男，重庆梁平人，副总经理，高级工程师，学士，从事国际工程项目管理工作。

(责任编辑：李燕辉)

国家能源局发布 7 月全社会用电量

8 月 14 日，国家能源局网站发布 7 月份全社会用电量等数据。1 至 7 月，我国累计正式投产水电 1 453 万千瓦，截至 7 月底，我国 6 000 千瓦及以上水电厂发电设备容量达到 25 749 万千瓦。数据显示，7 月份，我国全社会用电量为 5 097 亿千瓦时，同比增长 3%。1 至 7 月份，全国全社会用电量累计 31 374 亿千瓦时，同比增长 4.9%。分产业看，第一产业用电量 557 亿千瓦时，同比下降 2.1%；第二产业用电量 23 094 亿千瓦时，同比增长 4.7%；第三产业用电量 3 754 亿千瓦时，同比增长 6.5%；城乡居民生活用电量 3 968 亿千瓦时，同比增长 5.7%。1 至 7 月，全国发电设备累计平均利用小时为 2 482 小时，同比减少 102 小时。其中，水电设备平均利用小时为 1 853 小时，同比减少 29 小时；火电设备平均利用小时为 2 790 小时，同比减少 55 小时。1 至 7 月，全国电源新增生产能力（正式投产）4 265 万千瓦，其中，水电 1 453 万千瓦，火电 1 875 万千瓦。