

文章编号: 1000-7598-(2007) 增刊-0465-04

# 大断面开挖成型控制技术在三峡工程中的应用

尹俊宏<sup>1</sup>, 陈敦科<sup>2</sup>

(1. 水电十四局三峡项目部, 湖北 宜昌 443000; 2. 长江勘测规划设计研究院, 武汉 430070)

**摘要:** 开挖成型控制是在大断面地下洞室开挖施工中的一项关键技术, 开挖成型控制得好, 既能降低后续施工的成本, 又能提高工程的安全。在三峡工程某大型地下厂房开挖施工中, 通过对造孔设备选型、精度控制及精细化装药等方面的研究和实践, 取得了顶拱平均超挖 8.5 cm、边墙平均超挖 5.3 cm、岩锚梁平均超挖控制在 2 cm 以内的结果, 远低于规范所要求的小于 20 cm 的标准, 并且开挖平整度小于 10 cm, 爆破半孔率达到了 95 % 以上, 在成型质量控制方面较以往工程有了突破性的进展, 具有较高的应用及参考价值。对具体控制过程予以分析总结, 供类似工程借鉴工程实例。

**关键词:** 大断面地下洞室; 开挖成型控制; 三峡工程; 应用

**中图分类号:** TU 443

**文献标识码:** A

## Application of the excavation controlling techniques of large-section in the Three Gorges project

YIN JUN-hong<sup>1</sup>, CHEN DUN-ke<sup>2</sup>

(1. Three Gorges Project Department, 14<sup>th</sup> Hydropower Bureau, Yichang 443000, China;

2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Excavation controlling is a key technique in the process of large-section underground excavation, we can not only reduce costs of follow-up construction, but also enhance security if we control the underground excavation well. Selecting equipments of drilling holes, controlling the holes precision and refinement of charging are researched into and practiced in a large-scale underground powerhouse of Three Gorges project. Good results show that we can work additional 8.5 cm for the roofs and 5.3 cm for the sidewalls than standard in average, and control the extra-mining of cantilever crane beam in 2 cm, much lower than 20 cm which is the standard of criterion. The flatness of excavation is less than 10 cm, and the half holes rat of blasting is more than 95 %. A breakthrough in the controlling of forming quality is achieved, and it is highly value able in application. This paper will analyze and aggregate the specific process of controlling to provide example for similar projects.

**Key words:** large-section underground excavation; controlling the quality of forming shapes; Three Gorges project; application

## 1 前言

随着科学技术的发展, 地下洞室的规模在逐渐扩大, 且数量也越来越多。由于大跨度、高边墙导致的顶拱、边墙及岩锚梁开挖成型质量控制难度加大, 带来质量、安全隐患及后续施工(如喷混凝土、浇混凝土)成本的增加, 现代施工对开挖成型技术也提出了越来越高的要求。

长江三峡水利枢纽地下电站布置于右岸白岩尖山体内部, 装机 6 台, 单机容量为 700 MW, 总装机容量为 4 200 MW, 主厂房尺寸(长×宽×高)311.3

m×32.6 m×87.5 m, 是三峡水利枢纽的永久性建筑物之一, 其顶拱为圆弧形, 由顶拱处一个半径为 20 m 的大圆弧及两拱座部位半径为 4.18 m 的小圆相切而成。地下厂房岩性为花岗岩, 以 I、II 类围岩为主。自上而下共分 10 层开挖, 最小分层高度为 3.5 m, 最大分层高度为 8~9 m。

本工程通过对造孔设备选型、造孔精度控制、爆破参数制定几方面进行了综合研究和分析, 在顶拱及薄层开挖中采用手风钻造预裂或光爆孔, 高边墙开挖采用改进型轻型潜孔钻直接在高边墙上造预裂孔, 并采用尾线或样架定位导向技术, 通过科学

试验总结分析爆破参数,从而取得了顶拱平均超挖 8.5 cm、边墙平均超挖 5.3 cm、岩锚梁平均超挖控制在 2 cm 以内的结果,远超于规范要求(20 cm),开挖平整度小于 10 cm,且爆破半孔率达到了 95% 以上。

## 2 造孔设备选型

### 2.1 顶拱及薄层边墙造孔设备选择

目前国内隧洞顶拱大部份为圆弧形,本文所针对薄层边墙主要是小于 4 m 的边墙。在钻爆开挖中,主要采用两种常用钻孔设备:凿岩台车和手风钻。台车造孔的主要优势是机械化程度高、安全隐患少,其缺点是运行成本较高、造孔外偏角较大;手风钻的优点为成本较低、易操作、造孔外偏角较小,其缺点为工作面环境条件差。按造孔 3 m 控制,手风钻与台车相比,台车要比手风钻多超挖 5~6 cm。通过国内水布垭电站、龙滩电站等几个大型地下厂房开挖成型情况比较,并综合考虑成本及施工成型质量问题,本工程选择手风钻钻孔开挖。

在造孔方向上,顶拱圆弧基本上均采用了水平孔方式。薄层边墙造孔方向可采用水平孔,也可采用垂直孔。台车造孔仅适应于水平光爆孔。对手风钻而言,垂直孔较水平孔难度要大些,但通过控制,其造孔的平整度要比水平孔好,且垂直预裂还可超前主爆孔施工,进度可加快。本工程经过综合比选,顶拱开挖采用水平孔造孔方式,薄层边墙采用垂直孔造孔方式。

### 2.2 高边墙造孔设备选择

目前国内大断面隧洞高直边墙的开挖均采用梯段爆破进行开挖,层高一般为 8~10 m。造孔多采用轻型潜孔钻和履带潜孔钻,由于机型特点,两种钻机均不能靠边施工,因此,在开挖中均采用了先中部预裂并梯段拉槽、最后预留保护层开挖的方式。保护层开挖采用手风钻或台车进行光面爆破的方式进行施工,如龙滩地下厂房及水布垭地下厂房等。部分地下厂房也采用了用手风钻薄层逐层下挖的方式进行,如小湾地下厂房就采用 4 m 分层方式。在三峡地下厂房高边墙开挖中,采用改进型轻型潜孔钻直接靠边预裂,层高 8~10 m,一方面减少施工分序,使施工程序简单化;另外一方面还可使主厂房减少开挖分层,加快进度,同时在边墙开挖的错台、平整度、超欠挖控制方面均有了很大提高。该型号钻机的最大优点是:对厂房高边墙开挖技术提出新的思路,可直接靠边造孔施工,解决了常规钻机无法靠边的难题,排炮错台少,超挖少,进

度加快,且施工成本较低,施工质量显著提高。

## 3 造孔精度控制技术

在地下洞室施工中,钻孔是开挖成型质量控制的最关键环节,而钻孔质量的好坏主要受钻孔位置、钻孔方向,钻孔倾角 3 个因素的影响。以往传统施工方法也在开挖轮廓面采用测量放线控制钻孔点,由于事先规划设计的较少,且钻孔方向及钻孔倾角控制基本上由钻工凭经验控制,标准化、程序化控制手段较为有限,开挖质量不太稳定,要高质量开挖很困难。本工程通过一系列研究、试验与技术创新,首次在工程中采用了标准化定位及导向控制手段,既减少了人为因素的影响,又提高了开挖质量,取得了较大的成功。

标准化定位及导向技术的主要原理及方法是:事先设计爆破孔位及孔间距来确定钻孔点,然后采用测量仪器精确放样钻孔点,最后通过几种标准化导向手段控制钻孔人员按规定的孔位及方向进行钻孔,从而达到通过精确控制孔位及孔向来提高开挖质量的目的。

### 3.1 顶拱水平孔造孔精度控制

采用尾线定位及导向技术,即事先设计顶拱的爆破孔位及孔间距(本工程设计间距为 50 cm),确定钻孔点,然后采用测量仪器精确放样,作出标识,并在钻孔点的尾部逐一放出导向点,同时在相邻先钻孔中放置控制倾角及方向的参照导向管。利用钻孔标识点、尾部导向点、相邻参照导向管、顶拱爆破残孔多种手段来达到控制钻孔精度的目的,如图 1 所示。

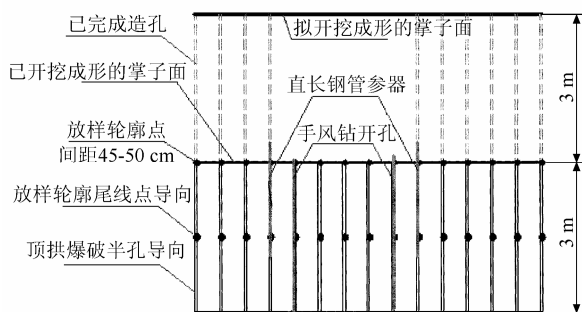


图 1 顶拱开挖钻孔导向展示图

Fig.1 Arch roof excavation and boring holes

### 3.2 边墙钢管定位及导向技术

钢管定位及导向技术就是在边墙钻孔条件明显好于顶拱的情况下,仍然事先设计开挖轮廓线上的爆破孔孔位及孔间距,确定钻孔点,然后采用测量

仪器精确放样，作出标识，并沿钻孔点安装定位及导向钢管，通过在定位及导向钢管内或固定钢管样架上钻孔达到控制钻孔质量的目的。图 2 为垂直孔开挖定位导向样架典型示意图。

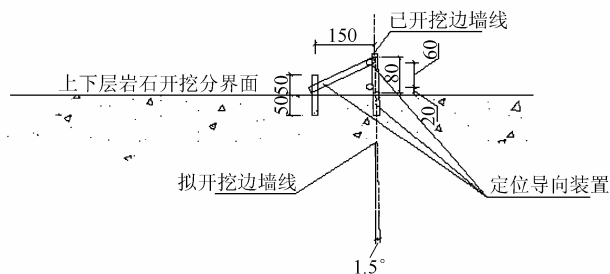


图 2 边墙垂直孔开挖定位造孔示意图

Fig.2 Side wall vertical hole excavation

## 4 爆破参数选择

地下洞室施工中，对开挖成型影响最大的就是周边预裂孔或光爆孔的装药参数，本文仅介绍周边孔爆破参数确定上的一些经验。在爆破参数确定方面目前已总结出了许多成熟的理论及经验公式，但爆破参数由于受岩性、岩层走向、节理、断层等因素的影响，各个工程均有一定差异，即使同一个工程同一个部位，其爆破参数由于受不同地质条件的影响，变化幅度也较大，如何确定出适宜于不同岩性的爆破参数，是开挖成型控制成败的关键。本工程从两个方面进行考虑。

### 4.1 科学试验

在规模施工前，根据经验提前确定爆破参数，并进行有目的的科学试验，可避免在初期探索阶段所造成的一切不必要的损失及质量潜在隐患。在三峡地下电站主厂房顶拱开挖中，利用中导洞进行爆破试验，最终确定了顶拱周边孔爆破参数见表 1。

表 1 三峡地下厂房周边孔典型爆破参数表

Table 1 Typical blasting parameter table of perimeter hole in Three Gorges project underground cavern

| 炮孔类别    | 孔径 / mm | 孔深 / cm | 孔距 / cm | 药径 / cm | 堵塞长度 / cm | 单孔药量 / g    | 线装药密度 / g · m <sup>-1</sup> |
|---------|---------|---------|---------|---------|-----------|-------------|-----------------------------|
| 顶拱光爆孔   | 50      | 300     | 40~50   | 25      | 80        | 420~540     | 140~180                     |
| 大梯段预裂孔  | 80      | 8~10    | 60~70   | 35      | 200       | 3 200~4 900 | 400~490                     |
| 薄层梯段预裂孔 | 50      | 300~350 | 35~40   | 25      | 80        | 660~800     | 220~240                     |
| 薄层梯段光爆孔 | 50      | 300~350 | 35~40   | 25      | 80        | 420~540     | 140~180                     |

在高边墙垂直预裂施工中，利用了中部拉槽部位进行预裂试验，表 1 就是通过试验后所总结出的各类型爆破参数。另外，在岩锚梁开挖中，进行了 4 次试验，其中一次是在中槽部位，表 2 为岩锚梁开挖试验及实施阶段爆破参数优化情况。

表 2 各阶段爆破参数优化情况

Table 2 Optimization of blasting parameter at every stage

| 试验阶段/次 | 线装药高度 / g · m <sup>-1</sup> |         |          |        |
|--------|-----------------------------|---------|----------|--------|
|        | 完整岩石                        |         | 节理裂隙发育岩石 |        |
|        | 垂直孔                         | 斜面孔     | 垂直孔      | 斜面孔    |
| 1      | 120~130                     | 110~120 | 100~110  | 90~100 |
| 2      | 105~120                     | 90~110  | 80~90    | 65~75  |
| 3      | 90~105                      | 80~95   | 55~65    | 30~40  |
| 4      | 75~90                       | 60~80   | 25~40    | 10~25  |
| 实施阶段   | 75~90                       | 65~80   | 24~36    | 12~24  |

从表 2 可以看出，在试验阶段，爆破参数一直在调整，到第 4 次试验后基本趋于稳定，找到了适应于各种岩体的相关爆破参数。可以说，由于围岩的特殊性，没有固定不变的爆破参数，各工程需结合围岩特点因地制宜通过试验选择。

### 4.2 个性化的装药

如何针对不同的岩性进行个性化装药，这是一个精细化的施工过程。本工程爆破设计分两次，第 1 次是在试验阶段初拟爆破参数，通过试验总结并优化爆破参数，第 2 次是在排炮开挖前在现场根据开挖揭露的地质情况进行爆破设计。表 3 为本工程在岩锚梁上游侧 0+110~0+143 m 桩号进行个性化设计的典型案例。

表 3 典型部位个性化装药情况表

Table 3 Condition form loading of dividually in typical section

| 部位  | 装药参数 (孔数/线装药密度) / g · m <sup>-1</sup> |         |         |         |         |         |         |
|-----|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 孔类  | 0+110                                 | 0+122.6 | 0+125.6 | 0+129.5 | 0+132.5 | 0+136.4 | 0+138.5 |
|     | 122.6                                 | 0+125.6 | 0+129.5 | 0+132.5 | 0+136.4 | 0+138.5 | 0+143   |
| 垂直孔 | 42/76                                 | 10/24   | 13/36   | 10/76   | 13/33   | 7/70    | 12/33   |
| 斜面孔 | 42/73                                 | 10/12   | 13/24   | 10/73   | 13/12   | 7/24    | 12/12   |

从表 3 中可见，该段岩台一次爆破长度为 33 m，共有 8 种线装药密度，最大为 76 g/m、最小为 12 g/m，采用药卷直径有  $\phi 25$  mm， $\phi 20$  mm， $\phi 15$  mm 三种， $\phi 25$  mm 和  $\phi 20$  mm 药卷主要用于垂直孔， $\phi 15$  mm 药卷主要用于斜面孔，其中最小的线装药密度 12 g/m 是采用两根导爆索绑 5 cm 长  $\phi 15$  mm 药卷（由  $\phi 25$  mm 改装）制作而成。通过个性化的

爆破设计,适应了各种围岩条件下的爆破设计要求。

5 开挖效果

三峡地下电站主厂房主开挖方量为 62 万方,共分 9 层开挖,从 2005 年 3 月 1 日开挖,截止到目前,厂房 5 层以上已全部开挖结束,已累计爆破开挖 45 万方,完成总工程量的 73 %,通过测量资料分析,其顶拱平均超挖为 8.5 cm,边墙平均超挖均小于 9 cm,岩锚梁平均超挖小于 6 cm,远超于规范控制要求(超挖小于 20 cm),开挖平整度小于 9 cm,且爆破半孔率达到了 95 %以上,以上爆破开挖质量指标已处于国内领先水平,从爆破开挖成型外观看,所有爆破孔呈平、直、齐均匀分布,排炮台坎小,平整度高,开挖外观非常漂亮。同时通过施工期监测,截止到 5 层开挖完,主厂房顶拱最大变形控制在 3 mm 以内,边墙局部点最大变形在 13 mm 以内,大部分地方最大变形在 7 mm 以内。围岩的爆破松动圈在 40~80 cm 之间,爆破对围岩的损伤较小,围岩整体稳定,三峡地下电站主厂房施工被国务院质量专家组评价为施工质量优良,称为罕见的精品工程,因此可以说,采取以上一些爆破开挖控制手段是行之有效的。表 4 为三峡地下主厂房爆破开挖成型质量情况统计表。

6 结 语

本工程通过地下厂房不同部位的特点,针对性的采取了适宜的造孔设备,使钻孔工艺趋向于标准化,进行了个性化的装药,并通过一系列科学试验,

表 4 三峡地下主厂房开挖成形质量统计表  
Table 4 Quality statistics of Three Gorges underground power excavated molding

| 施工部位  | 开挖层<br>高/ m | 高程范围<br>/ m  | 平均超挖<br>/ cm | 平整度<br>/ cm | 爆破半<br>孔率/ % |
|-------|-------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
| 主厂房①层 | 12          | 105.30~93.30 | 8.5          | 8           | 95.4         |
| ②-1 层 | 3.2         | 93.30~90.10  | 5.76         | 6.3         | 99           |
| 岩锚梁上游 | 2.3         | 90.1~86.8    | 4.92         | 5.3         | 99.2         |
| 岩锚梁下游 | 2.3         | 90.1~86.8    | 5.84         | 5.8         | 98.8         |
| ②-2 层 | 3.8         | 86.8~83.00   | 4.84         | 5.85        | 98           |
| ③-1 层 | 3           | 83.00~80.00  | 7.95         | 6.3         | 99.5         |
| ③-2 层 | 7.2         | 80.00~72.80  | 7.85         | 5.5         | 99.8         |
| 主厂房④层 | 7.3         | 72.80~65.5   | 7.55         | 7           | 98.05        |

集中体现了三峡三期工程追求精品的意识,体现了技术先行、预防为主的思想,体现了先试验待成功后大面积推广、持续改进的态度。施工过程中质量完全受控,使整个开挖爆破施工工艺向规范化、程序化、标准化发展,有效地提高开挖质量,将对地下洞室的施工质量控制起到很好的指导及参照作用。

参 考 文 献

[1] 全国水利水电施工技术信息网. 水利水电工程施工手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
[2] DL/T5099—1999, 水工建筑物地下开挖工程施工技术规范[S].