

高拱坝关键施工技术

杨忠兴

(葛洲坝集团第二工程有限公司,四川成都 610091)

摘要:介绍了高拱坝山体开挖出渣和高地应力基岩开挖技术、高升层混凝土施工技术、大仓面缆机群浇筑技术、温控防裂技术、全年封拱灌浆技术、岸坡段固结灌浆和高深帷幕灌浆技术等,采用这些技术,确保了高拱坝安全快速施工,保证了高拱坝施工质量,为今后类似工程施工提供了经验,值得借鉴。

关键词:高拱坝;施工;技术

中图分类号:TV642;TV52

文献标识码: B

文章编号:1001-2184(2012)02-0024-04

1 概述

拱坝是一种在平面上拱向上游,将荷载主要传递给两岸的曲线形坝。按照设计规范,坝高高于70 m的拱坝属于高拱坝。在坝址河谷狭窄、地形地质条件基本对称,坝基坝肩岩体坚硬完整的情况下适合修建高拱坝。高拱坝具有超载能力强,抗震能力好,坝体混凝土工程较省等特点,已成为具有竞争力的坝型。近十年来,我国混凝土高拱坝施工技术得以飞速发展,已成为大型水利枢纽的主要坝型之一。

2 高拱坝施工特点及难点

(1)出渣难度大,高地应力大。高拱坝两岸山体陡峻,施工道路布置困难,土石开挖出渣难度大;高拱坝一般处于高地应力区域,开挖揭露出来的基岩卸荷变形比较突出。

(2)坝体上升速度要求快。为了与需提前发挥效益的建筑施工相协调,并受汛期洪水导流的影响,要求高拱坝快速上升,及早具备挡水蓄洪条件,施工强度高。

(3)温控防裂要求高。因拱坝陡坡坝段多,基础约束区大;已封拱的坝体对上部约束作用大;坝体底部仓位大,混凝土标号高,温控要求高。

(4)坝体要具备全年封拱条件。拱坝坝体由于受悬臂高度限制,为确保大坝连续均衡上升,坝体要具备全年封拱接缝灌浆条件。

(5)坝肩岸坡段固结灌浆对坝体施工干扰大。帷幕灌浆工程量大,灌浆压力大。

3 高拱坝施工技术

随着小湾、溪洛渡、锦屏一级、拉西瓦等超高拱坝的相继开工和完建,高拱坝施工关键技术已取得突破性进展。

3.1 高拱坝土石方开挖出渣施工技术

高拱坝两侧山体险峻,施工道路布置困难。为了满足山体开挖出渣要求并尽量减少对山体植被的破坏,减少对土地的占压,一般采取以下合理的出渣方案:

(1)山体缆机平台以上开挖主要利用山顶道路和山体内开挖的施工隧道配合出渣。

(2)缆机平台至坝顶间山体开挖主要利用山体内部开挖的施工隧道、坝顶进场公路、设置集渣平台以及缆机配合出渣。

(3)坝肩开挖主要设置溜渣竖井,利用交通洞出渣。

通过以上多种出渣方式相结合,解决了高拱坝开挖出渣施工难的问题,降低了施工成本,满足了绿色环保施工要求。

3.2 高拱坝基岩高地应力开挖技术

高拱坝开挖一般地应力较高,开挖揭露出来的基岩卸荷变形比较突出,为解决高地应力开挖问题,多采用以下先进技术:

(1)坝基高地应力光滑反弧形开挖技术。

该技术是指由边坡到河床按反弧形光滑过渡曲线开挖,不仅减少了开挖工程量,且应力集中强度降低,坝基回弹变位减少,卸荷松动范围减小,基岩质量得到了保证和提高。

拉西瓦水电站坝基地应力达30~70 MPa,其开挖采用了该施工方法,根据监测成果,坝基槽内

收稿日期:2012-03-13

卸荷回弹变位比计算值小很多,并且保护了基岩质量,坝基物探波速较高,因开挖出的岩体质量较好,最终使建基面抬高了2 m。

(2) 坝肩应力释放孔和缓冲孔技术。

高应力边坡开挖过程中,为防止岩爆发生,可提前钻设一定数量的应力释放孔并向孔内注水;另外,在深孔预裂孔与主爆孔之间,根据开挖梯段设置缓冲孔,采用孔内填充黄土、岩粉等介质以减少孔壁的压力,达到爆破时对开挖边坡减震的目的,利用爆破作用释放应力。这样实施所形成的高边坡在开挖过程中只做简易支护,即可保持稳定;边坡形成后,预裂面较平整,半孔率在90%以上,中高边坡保持稳定。

拉西瓦水电站左岸消能区边坡开挖之后将形成落差达220 m的高边坡,具有较高的地应力,岩性变化大,开挖过程中采用了该施工技术,确保了开挖后的边坡质量。

(3) 先锚后挖技术。

该技术是指在地应力区域保护层开挖时,为防止建基面岩体卸荷松弛,在保护层开挖前先用埋入式锚杆或锚筋束对建基面岩体进行锚固,然后再进行保护层开挖的技术。

锦屏一级水电站坝肩开挖时设有3~5 m保护层,保护层开挖时采用了先锚后挖的施工技术。

3.3 高升层混凝土施工技术

高升层施工技术主要是指高升层模板技术、多层冷却水管铺设技术、混凝土高强度入仓技术等,具体如下:

(1) 高升层模板施工技术。

为满足枢纽工程提前发挥效益和导流度汛的需要,高拱坝需要快速上升,采取高升层是一种切实可行的办法。经过小湾和锦屏一级水电站的试验,高升层施工技术已趋成熟。

锦屏一级水电站研制了4.5 m高升层双撑杆悬臂大型平面模板,高拱坝特殊部位如牛腿采用了液压提升模板,电梯井采用液压滑模等,这些模板操作简单,满足大坝高升层施工;同时,利用现代化的编程技术开发监测软件,使用全站仪与开发的软件相配合,模板安装就位时,在短暂的数秒内即可判断出模板的偏差,为实现大坝快速上升提供了充分的快速检测保障。

(2) 多层冷却水管铺设技术。

目前拱坝最高施工升层为4.5 m,一般铺设三层冷却水管:第一层冷却水管铺设在已浇筑高程顶面,第二、三层冷却水管在混凝土浇筑过程中进行铺设;当混凝土浇筑到铺设该层冷却水管时,混凝土边浇筑边铺设,确保不影响下一坏层混凝土浇筑。为了加快浇筑层中冷却水管的铺设速度,一般采用内径28 mm、外径32 mm的HDPE塑料水管,水管的接头采用膨胀式防水接头,采用 $\phi 6 \sim 8$ 圆钢固定。考虑到二期冷却需要,并为获得坝体同一高程沿坝厚方向的温度梯度,冷却水管垂直水流方向铺设,如采取一根主管配2~3根支管时宜采取同高程布置。冷却水管布置精确定位,力求在平面投影重合并提供全部冷却水管布置图,以用于指导灌浆和钻孔取样。对铺设的水管加以保护,避免冷却水管移位或被破坏。

(3) 混凝土高强度入仓施工技术。

为满足拱坝高升层高强度入仓要求,须采取配套的砂石加工、运输系统、拌和楼供料系统、浇筑混凝土缆机群及仓面配备平仓、振捣设备等资源,才能确保混凝土高强度入仓。

砂石加工、运输系统必须根据工程所在地的地形特点、砂石料源特点以及工程所需要的最大强度的原材料,建立合理的砂石加工、运输系统。

目前,由于强制式拌和机拌合的混凝土不仅质量好,而且拌合时间短,很多拱坝都建立了适合本工程的强制式拌合系统。

拱坝施工一般采用多台30 t缆机挂吊罐浇筑。为了提高缆机的利用率,加快混凝土入仓强度,在配套设施充足的情况下,常采用无间隙转仓浇筑技术和双仓浇筑技术。小湾水电站大坝工程采用无间隙转仓方案,日平均强度为 $6\ 313.5\ \text{m}^3/\text{d}$,日最高强度为 $7\ 019\ \text{m}^3/\text{d}$,实现了连续高强度混凝土浇筑高峰期。

3.4 大仓位混凝土缆机群浇筑入仓施工技术

高拱坝一般只设横缝,不设纵缝,故拱坝底部仓面较大。为了减少混凝土坏层的覆盖时间,加快混凝土入仓强度,确保大仓位的混凝土浇筑质量,多采用缆机群分区、分条带、平铺法浇筑的施工技术。

缆机群浇筑大仓面混凝土时,由于缆机轴线与大坝仓面有一定的夹角,按照缆机控制轴线进行仓面浇筑分区,避免了缆机间的干扰;同区内分

条带下料时,避免了缆机频繁行走大车导致对位困难而降低效率。配置配套浇筑机械设备时,一般一台缆机配置一台平仓机和一台振捣机;铺料方向原则上自上游向下游铺料,平仓机在铺料条带上平仓,振捣机在下游侧进行振捣。由于仓内平仓、振捣设备较多,必须合理的分区及规范仓面浇筑工艺,加强仓面协调,确保夏季浇筑混凝土过程中能及时覆盖保温被,防止混凝土温度倒灌。

3.5 高拱坝温控防裂施工技术

高拱坝由于受坝体悬臂高度限制,底部已浇混凝土需及时进行封拱灌浆形成一个整体,而已封拱的坝体对上部约束作用大,因此全坝定义为约束区,温控标准高。坝基两岸边坡陡峻,陡坡坝段多,基岩和坝体孔口约束区多,这些部位的基础温度应力大,基础温差控制要求严。坝体混凝土设计强度高,相应胶凝材料用量大,混凝土水化热温升高,温控难度大。高拱坝混凝土施工一般不设纵缝,仓面尺寸大且为窄长块,混凝土温降过程缓慢,内外温差引起的内部约束时间长,易产生表面裂缝并可能导致贯穿裂缝,从而影响大坝结构的安全,所以拱坝施工温控防裂难度较大。为减少温度应力,防止或减少拱坝裂缝的产生,在拱坝施工中,对原材料加工、混凝土配比、拌合、运输、入仓浇筑、冷却通水等采取了一系列温控措施。其中配置高性能混凝土、加强冷却通水在高拱坝温控防裂措施中尤为突出。

(1) 配置高性能混凝土。

高性能混凝土是指具有“高强度、高极限拉伸值、低水化热、温升慢、低弹模、收缩小”性能的混凝土。高拱坝混凝土一般选用复合掺用优质的粉煤灰、减水剂和引气剂,以改善混凝土的性能,在条件允许的情况下提高粉煤灰的掺量,以减少混凝土硬化过程中的温度升高值,使拱坝混凝土的力学、变形、抗裂性、耐久性、温控等性能满足拱坝要求,

(2) 分阶段合理加强冷却通水,使坝体混凝土达到设计温控要求。

加强通水冷却是控制混凝土最大温升和将坝体温度冷却到满足封拱要求的重要措施。不同阶段采取不同的通水策略,控制单个仓位的降温速率,使混凝土内部温度在上升阶段缓慢上升且最高温度不超过设计要求,在下降阶段缓慢均匀下

降,以达到拱坝的稳定温度要求。同时,在竖向保持合理的温度梯度,有助于提高拱坝混凝土的抗裂性能。

大坝冷却通水按照功能和时段一般分为初期冷却、中期冷却和后期冷却三个阶段。初期冷却分为控温和降温两个阶段。控温阶段是控制混凝土内部最高温度不超过设计值;降温阶段是从最高温度缓慢降温至稳定温度;初期冷却时段降温幅度一般不超过 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$,降温速率 $\leq 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。中期冷却控制混凝土初期冷却结束到后期冷却前的温度保持缓慢下降,不回升,降温速率 $\leq 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。后期冷却分为降温、控温两个阶段。降温阶段要求将坝体温度降低至设计封拱温度;控温阶段要求将混凝土温度维持在封拱温度附近($+0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$),使混凝土满足接缝灌浆要求,降温速率 $\leq 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。混凝土冷却通水过程中,除按照分期逐步冷却外,同时还应对坝体进行温度梯度控制,使不同高程各区的温度、降温幅度形成合适的梯度,以减小混凝土梯度应力,防止混凝土开裂。

为了满足冷却通水要求,结合高拱坝的特点,近年来多采用布置在坝后的移动式冷水机组,通过合理布置冷却水主管以及智能通水等措施,确保了坝体冷却通水效果。其中智能通水是通过现场采集通水温度、流量等数据以及混凝土的内部温度数据,自动传输至后台处理系统,结合混凝土温控要求,通过处理分析,制定每一组冷却水管的下一步通水计划,并通过电磁阀实现自动调控,从而实现混凝土内部温度真正均匀缓慢下降。

3.6 高拱坝全年封拱灌浆施工技术

混凝土拱坝通常设有横向接缝,间距 $15\sim 20\text{ m}$,当这些接缝周边混凝土冷却到规定温度并进行灌浆后,水平方向拱圈就成为整体,可以承受荷载。由于高拱坝较高,施工工期较长,为不影响坝体均衡上升,要防止坝体悬臂高度过高,需要及时封拱灌浆;另外,考虑到大坝分阶段挡水蓄洪要求,需要及时封拱灌浆。由于接缝灌浆工程量较大,且随着坝体上升而增加,按照施工进度安排,如果接缝灌浆仍安排在低温季节进行,已不能满足拱坝快速施工和挡水蓄洪的要求。为满足要求,经研究提出了坝体封拱灌浆温控梯度要求,自下而上顺序分为已灌区、灌浆区、同冷区、过渡区和盖重区等五区进行温度控制,以确保接缝灌浆

时上部各灌区温度及降温幅度形成合适的梯度,

见图 1。

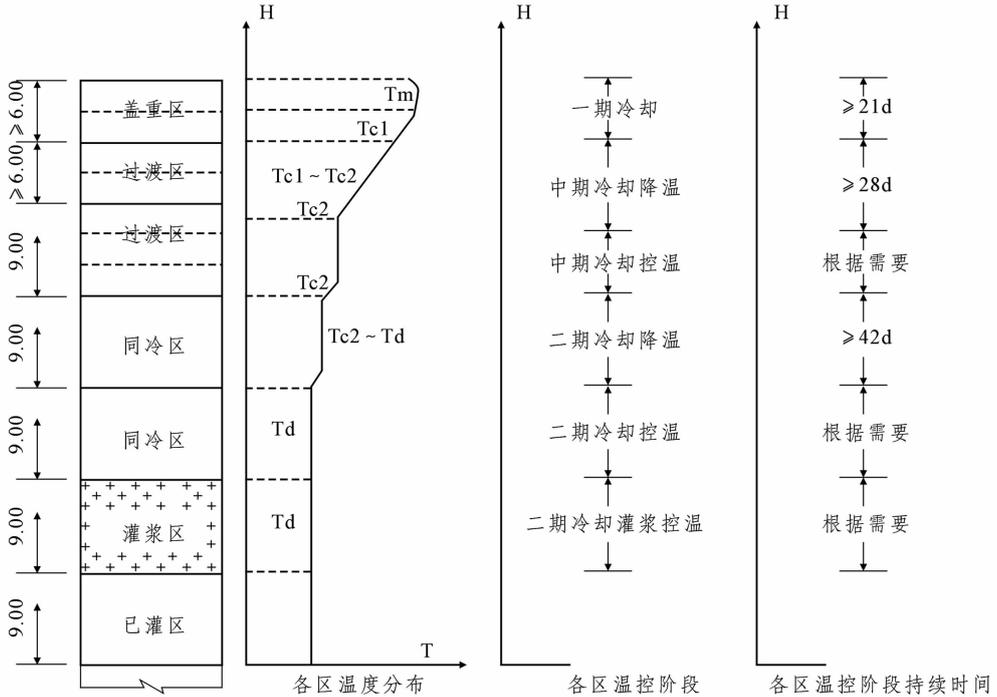


图 1 温度梯度控制示意图

坝体温度控制须通过坝体内冷却通水予以解决。通过研究,找出了拱坝温控要求与通冷却水温度、冷却时间和总制冷水规模的关系,确定了采用移动式冷水机组。移动式冷水机组实现了坝体冷却水流后回收再冷却循环利用,节约了水源,同时,将移动式冷水机组布置在拱坝后随坝升高形成的栈桥上,距坝体较近,减少了冷水温度损失,从而在成本不会增加很大的情况下即可以使大坝在高温季节也能冷却到灌浆温度,使高拱坝全年拱坝接缝成为可能。

3.7 拱坝岸坡段固结灌浆和帷幕灌浆技术

(1) 拱坝岸坡段固结灌浆技术。

拱坝岸坡坝段较多,岸坡段固结灌浆与坝体混凝土施工干扰较大,为减少占压混凝土仓面时间,减少仓面长间歇,不影响大坝混凝土快速上升,岸坡段固结灌浆采用了无盖重固结灌浆和加固灌浆技术。

(2) 拱坝帷幕灌浆施工技术。

拱坝帷幕灌浆在不同高程的多层平洞内进行。按照帷幕灌浆设计布置,一般各层平洞主帷幕深入下层帷幕灌浆平洞以下 10 m,各层主帷幕间采用衔接帷幕形式进行衔接,更好的确保了大坝帷幕防渗的效果。主帷幕工程量大,钻孔深度

大(锦屏大坝帷幕孔深达 175 m),灌浆压力大(锦屏大坝灌浆压力达 6.5 MPa),施工难度大,工期较紧。深孔帷幕灌浆主要采用“孔口封闭、孔内循环、自上而下灌浆”的方式灌浆。衔接帷幕工程量较大,工期较紧,灌浆压力大(溪洛渡工程达 3.5 MPa),仰孔较多,封孔难度大。衔接帷幕一般与主帷幕交叉进行施工,选择潜孔钻机钻孔。施工时,先施工底板的孔,再由侧墙低处向侧墙高处孔推进。葛洲坝集团研发了一种实用新型的灌浆阻塞器,解决了灌浆压力大、阻塞难的问题。采用“循环式”方法对仰孔进行封孔,解决了仰孔封孔难的问题。

4 结语

随着高拱坝关键施工技术的成熟,高拱坝已成为各国在高山峡谷地带修建水电站大坝中最具有竞争力的一个重要坝型。未来高混凝土拱坝施工技术的主要发展趋势将围绕碾压混凝土筑坝技术展开一系列课题研究,并向新型筑坝材料、特大型机械化、信息化、标准化、智能化、节能环保等方向发展。

作者简介:

杨忠兴(1971-),男,重庆忠县人,高级工程师,从事水电工程施工技术工作。

(责任编辑:李燕辉)