

基于绿色施工理念的水电站大坝工程碳足迹核算与减排策略

李 勇

中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310030

[摘要]水电站大坝施工规模大、材料用量大、工期较长,它的建造过程中所释放出来的碳排放量也相当可观,在这里笔者以西南地区某大型水电站大坝为例,基于绿色施工的理念展开对水电站大坝施工阶段的碳足迹测量及碳减排措施的研究,建立了施工碳排放计算体系,在材料生产运输、机械设备能源消耗、材料施工过程损耗、施工工艺差异四个方面对施工阶段的碳排放进行了定量化计算并编制出施工碳排放清单,找出主要的影响因素;最后从材料节约、工艺革新、设备节能化、组织管理精细化、信息化技术的应用等方面提出了相应的减排措施。研究结果可以作为同类型大型水电工程的低碳施工的理论借鉴及经验参考。

[关键词]绿色施工;水电站大坝;碳足迹;碳排放核算;减排策略

DOI: 10.33142/hst.v9i4.19612

中图分类号: TV742

文献标识码: A

Carbon Footprint Accounting and Emission Reduction Strategy for Hydropower Dam Engineering Based on Green Construction Concept

LI Yong

Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310030, China

Abstract: The construction scale of hydropower dams is large, the amount of materials used is large, and the construction period is long. The carbon emissions released during the construction process are also considerable. Here, the author takes a large hydropower dam in the southwest region as an example, and based on the concept of green construction, conducts research on the carbon footprint measurement and carbon reduction measures during the construction stage of hydropower dams. A construction carbon emission calculation system is established, and the carbon emissions during the construction stage are quantitatively calculated in four aspects: material production and transportation, mechanical equipment energy consumption, material construction process losses, and construction process differences. A construction carbon emission inventory is compiled to identify the main influencing factors; Finally, corresponding emission reduction measures were proposed from the aspects of material conservation, process innovation, equipment energy-saving, refined organizational management, and the application of information technology. The research results can serve as theoretical and experiential references for low-carbon construction in similar large-scale hydropower projects.

Keywords: green construction; hydroelectric dam; carbon footprint; carbon emission accounting; emission reduction strategies

引言

伴随着我国“双碳”战略的不断深入实施,水电作为一种可再生能源,在能源结构调整过程中扮演着重要角色。但水电站大坝修建过程有大量建筑材料生产和运输、机械设备运转、现场施工等活动产生,具有工程量庞大、用料较多、工期较长的特点,水电站建设阶段产生的碳排放量也不容小觑。针对水电的低碳发展问题,探讨水电碳足迹的影响因子以及水电碳足迹的空间分布特征的研究是十分必要。比如以西南部的一座大型水电站堆石坝为例,最大坝高达近 300m,总填筑量超过 4300 万 m^3 ,装机容量

3000 万 kW h,规模巨大,施工中的碳排放量巨大。当前水电工程碳足迹核算的标准正在逐步健全起来。在 2024 年年底之前,《温室气体产品碳足迹量化方法与要求水力发电》国家标准化计划已经正式批准发布,它会给出水电工程碳足迹核算的操作程序、全生命周期每一个环节的排放系数及计算方式等内容。水电碳足迹主要是由于水电建设过程中的建筑材料生产和工程施工,还有电站运行过程中设备使用的能源消耗造成的碳排放量较大,是其减排的重点任务。本文选取西南地区一座大型水电站大坝作为研究对象,在绿色施工的原则之下建立了一个施工碳排放的

核算体系,制定了碳排放清单,找出了重要影响因子并提出了系统的减排措施,希望能够对类似工程的低碳化建设起到借鉴作用。

1 水电站大坝工程碳排放特点

水电站大坝项目和其他土建工程项目比较而言,其碳排放具有明显的差异性特征,从工程体量方面来说,以西南一个特大型水电站堆石坝为例,整个大坝工程填筑量约为 4300 万 m^3 ,而且混凝土使用量极大,仅主体工程材料使用量就高达几百万甚至上千万吨级的规模,这些巨大的材料使得建筑材料生产和运输的过程中产生的碳排放成为主要矛盾点,材料生产和运输过程中产生的碳排放往往占据总排放量的 80% 以上。从业主环境方面考虑,水电站大坝一般位于崇山峻岭之间,工作区域比较狭小,道路崎岖不畅通,大量的材料需要远距离运输,运输环节产生的碳排放较多。施工机械方面,土石坝工程涉及挖掘机、自卸车、推土机、压路机等大量的施工机械设备,长时间连续运转造成极大的能源消耗。另外大坝建设期长,临时生产生活设施运行、施工用水用电等各种过程性消耗也是很重要的碳排放源。施工过程中又涉及不同工艺流程的选择问题,例如常压与智能碾压方式、常规运输与新能源运载等,不同的工艺其碳排放强度相差甚远,可以作为降低工艺排放量的空间。

2 大坝施工阶段碳足迹核算分析

2.1 材料生产与运输阶段碳排放核算

材料生产和运输是工程建设过程中碳排放的最大来源。按照 ISO 14067 碳足迹量化标准评估程序来看,材料的碳排放需要考虑原料挖掘、生产和转运三个过程;建筑材料生产环节在整个物化过程中碳排放量最大,建筑材料使用对于项目的物化过程中的碳排放量有着直接的影响,这一点在大坝工程中表现得更为明显。比如对混凝土来说,水泥熟料煅烧时碳酸盐的分解造成的工艺碳排放较多,碎石挖掘加工是以能耗间接排放为主。材料转运中的碳排放量由运输的距离、运输的方式以及装载量决定。运用《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366-2019)附录 E 中的建筑材料运输碳排放因子来统计,公路运输的碳排放因子大概在 0.05~0.10 $kgCO_2e/(t \cdot km)$ 。西南地区某一特大型水电站大坝处于山高谷深之地,骨料料场离坝址很远,砂石骨料的运输距离经常大于 50km,每天运输的数量庞大,因此运输的碳排放量也很高^[1]。所以在编制碳排放清单时要准确记录每种材料运输的距离以及数量。

2.2 施工机械设备能耗碳排放分析

施工机械的耗能碳排放是工程建设期间重要的排放

来源。大坝建设过程中使用的各种高消耗机械设备有自卸汽车、挖掘机、装载机、推土机、压路机、塔吊等,依据《建筑工程碳排放计算规范》附录 C 常用施工机械设备台班能源消耗数量的数据进行计算,对于不同类型的设备进行碳排放量计算:碳排放量=设备台班数量×单位台班能耗值×燃油碳排放系数。以自卸汽车为例,电站大坝在高强度填筑期间,几十辆自卸车全天候作业,耗油量很大。拉哇水电站大坝填筑过程中,将 85 辆自卸汽车替换为新能源自卸车辆,预计可减少柴油消耗量约 2027.77 万 L,减排二氧化碳排放量约 6.4 万 t。此数据显示出机械能消费二氧化碳排放仍存在较大的改进余地,在施工降碳方案中有着重要作用。

2.3 施工过程能耗与资源消耗分析

除了材料生产和设备能源消耗之外,工程施工阶段的过程性能耗及资源使用也应引起重视,在大坝工程现场的临时设施建设、施工现场供水排水系统、施工现场照明、混凝土搅拌系统运转等方面都会带来间接碳排放,其中混凝土搅拌站的运转能耗主要是由搅拌主机、物料供应装置以及冷却装置所提供消耗,尤其是针对一些高寒地带的大坝建设,混凝土温度控制标准较高,在进行混凝土搅拌时进行骨料预冷或者拌合加冰等控温方式都会大幅度提升电能耗损。施工现场的用水、用电、用油等资源都对相应应的隐性碳排放量。建筑化阶段低碳发展以材料生产的减少为主,但是对于工程施工过程中的能耗管理也是必不可少的工作环节。施工现场照明选择节能 LED 灯泡,拌和站使用变频节能技术,对施工供水系统进行合理调控,都可以在保持工程施工进度的同时减少过程能耗碳排放。

2.4 不同施工工艺碳排放对比

不同的施工工艺的二氧化碳排放量也有很大的差别,在施工工艺上进行减排有很大的空间,比如对于大坝填筑碾压工艺而言,传统的碾压方法需要经过反复碾压才能达到设计的压实度要求,智能化碾压系统可以实时检测到当前的压实情况,从而减少碾压次数、节约能源消耗以及减少二氧化碳排放;智能化碾压不仅可以节约工程用时还可以节约柴油使用和产生的尾气污染,优化大坝截面形状减少土石方填充量,减少工程开挖量也是一种很好的减少二氧化碳排放的方法。而且在砼浇筑过程中,选用胶结砂砾石筑坝代替普通混凝土,因为水泥用量大幅度下降,所以碳排放也能够削减大约 20%~30%。不同施工工艺碳排放的系统对比分析,为工艺选择提供了定量依据。

2.5 碳排放关键影响因素识别

确定碳排放的主要因子是提出有针对性地减少碳排

放方法的基础,在此过程中分析出影响大坝建设碳排放的主要因素有工程规模因子(坝高与填方量)、材料类型(水泥强度等级、骨料产地)、运输环境(距离和运输工具)、机械设备(能效系数、新能源利用率)、施工方案(碾压方法、温控手段)、施工管理(施工作业效率、资源配置)等等。其中工程规模大小决定着碳排放量级的最大范围,它是不能够被控制的因素,建筑材料的选择、机械的选择、施工方案、施工管理等都是可以控制的,并应成为减少碳排放的重点措施。

2.6 碳排放清单与总量计算

通过对各排放源计算结果进行总结编制出施工碳排放清册。从计算结果可以看到,材料生产环节碳排放比例最大,在材料生产中水泥制造又是最大的单项排放源,碳排放主要是由于碳酸盐分解以及燃料燃烧,施工设备燃油消耗也是第二大排放源。我国水电项目全生命周期碳足迹因子约为 0.0143kgCO₂e/kWh,但是施工过程中的单位工程量碳排放量远大于该值,说明施工阶段的碳排放非常集中在短时间内,而此清册的制定也为之后减排措施的效果评判提供参考依据。具体的碳排放清单及总量计算结果见下表。

3 基于绿色施工的减排策略研究

3.1 材料优化与低碳替代技术

材料改进是施工期减碳的第一步。水泥是最为严重的建材碳排放源之一,使用低碳水泥代替普通硅酸盐水泥是减少碳排放的重要措施,在大体积混凝土中掺入粉煤灰、矿渣粉等工业废弃物来部分取代水泥,既解决了建筑固体废弃物问题,又能减轻单位体积混凝土的碳排放量;在大

坝填筑过程中,优先利用工程自弃土用于填筑,减少专用料场的需求,能大大减少开采加工及运输过程中的碳排放。用胶结砂砾石做坝体,水泥用量比一般混凝土减少大约30%~50%,碳排放量大幅度下降。

3.2 施工工艺优化与节能措施

施工工艺改进直接影响着整个施工过程中的能源消耗及二氧化碳排放量的高低,在填筑施工阶段采取智能化压实能够有效避免多余碾压次数的发生,节省燃油15%~20%,在大体积混凝土温度控制上合理选择配合比以减少发热量,在精心组织施工避开高温时段浇筑,可以节省大量的保温设备所需的能源;对于土石方开挖,合理选择开挖方式以及均衡调配可以有效降低二次倒运的距离,从而减轻运输过程中的碳排放^[2],采用低能耗水泥,改良原材料配比,减少运输过程中的碳排放是降低现浇混凝土碳排放较为直接的办法。

3.3 施工设备绿色化与能源优化配置

施工机械绿色化是大坝建设减少碳排放的主要切入点,雅砻江流域集水风光一体项目正在努力创建“零碳”的建筑工地,大规模采用电动重卡以及电动挖掘机等新型绿色施工机械,加快工程建设向绿色低碳转变的步伐;新能源自卸车运行过程中不会产生二氧化碳的排放,可以很好地解决传统燃料机械带来的扬尘与噪声的问题。绿色机械设备的的应用不但减少了工程建设项目对传统化石能源的依赖,还能根据施工现场的清洁能源(水电、光伏)建立相应的绿色供能系统,并且还可以借助智能化传感器以及物联网系统监测设备耗电量并调整运输路线以及工作任务,进一步提升能量利用率。

表1 施工碳排放清单与总量计算表

排放源类别	具体项目	活动数据	单位	排放因子	碳排放量 (tCO ₂ e)	占比 (%)
材料生产	水泥	80 万	t	0.735tCO ₂ /t	58,800	34.5
材料生产	钢材	5 万	t	2.38tCO ₂ /t	11,900	7.0
材料生产	砂石骨料	600 万	t	0.016tCO ₂ /t	9,600	5.6
材料运输	建材运输	8000 万	t km	0.08kgCO ₂ /(t · km)	6,400	3.8
施工机械	柴油消耗	8000	t	3.16tCO ₂ /t	25,280	14.8
施工机械	汽油消耗	500	t	2.93tCO ₂ /t	1,465	0.9
施工过程	电力消耗	5000	万 kWh	0.57tCO ₂ /万 kWh	2,850	1.7
施工过程	供水消耗	300 万	m ³	0.23kgCO ₂ /m ³	690	0.4
合计	-	-	-	-	116,985	100

注:表中的排放因子依据的是 IPCC 国家温室气体清单指南以及 GB/T 51366-2019 的规定来获取的;活动数据是通过项目的规模进行类比推算得出。

3.4 施工组织与管理优化策略

施工组织管理改进属软性方法,以系统性的措施来达到降碳目的,在施工组织设计上做好施工区域划分、工序衔接,避免机械长途往返及空载运转,在料场和弃渣处理上做到充分利用资源、土石方平衡,减少弃渣和相应的运输过程中的碳排放;施工工期上避免恶劣气候条件下进行高耗能活动,减少由环境带来的额外损耗。通过优化大坝外形削减堆填体积,减少工程土石方开挖量,从源头上降低原材料消耗;建立施工碳排放监控制度,把碳排放作为一项重要的指标纳入施工管理工作之中,建立长期性的减排管理制度。

3.5 数字化与智能化技术在减排中的应用

数字化、信息化技术给施工低碳化带来了新的技术支持。BIM 建模技术可以用来对施工过程进行数字化仿真,在前期就发现施工方案中的高耗能部位进行调整等。物联网技术能够实现实时监测并分析施工全阶段能耗变化情况,从而作出精准减碳的选择。孟底沟水电站正在借助“通用地质模型”,“智能仿真”,以及“智能灌浆”等手段构建智能系统,使工程项目建设达到“全寿命周期”的智能化管理^[3]。基于数字孪生的施工碳排放监管系统,可以对现场不同类型的污染排放源进行动态监控、预报、指挥调度,做到精确控制及不断修正。这些技术的综合利用会使大坝建设逐渐实现绿色化,智能化以及低碳化。

3.6 减排策略效果评估

综上所述,减碳措施可以从碳排放减少量、经济价值以及环境效益三个角度去评价。材料调整与低碳替代技术能够达到材料制造环节碳排放下降 15%~25%,施工工法改进可以降低施工环节碳排放达 10%~15%,施工装备绿色化如果能够有 50%的机械替换为电气设备,则可减少燃油碳排放 40%,数字化、智能化技术的应用可以做到

对施工阶段能量消耗精确管控,再减少碳排放量 5%~10%。采取多种措施相结合的方法,可以使水电站大坝工程建设期碳排放总量减少 25%~35%。这个减排潜能对西部某巨型水电站大坝来说,相当于可以消减 3~4 万 t 的碳排放,减排效果较为明显。

4 结语

本文以西南地区某一巨型水电站大坝项目为工程建设背景,在绿色施工理念下的施工阶段开展碳排放核算及减排措施研究。通过建立包括建筑材料生产和运输碳足迹、机械使用碳足迹、施工活动碳足迹以及施工方法比较在内的碳足迹计算体系,编写施工碳排放清册,明确施工过程中主要的排放点有水泥制造、燃油消耗、运输材料等。在此基础上从材料选择与低碳置换、施工方案改进、施工装备绿色化改造、施工计划安排与管理、信息化手段运用等方面提出一系列减排措施并进行综合减排效益分析,本文的研究可为水电行业执行绿色施工理念、发展低碳工程提供依据和支持。今后要加强对一些具体工程项目进行碳足迹实测统计,在此基础上建立健全水电项目碳排放因子库,同时也要研究如何利用碳交易等市场手段来降低水电建设环节的碳排放。

[参考文献]

- [1]张晓东,钟鑫.浅谈绿色施工技术在水电站机电安装工程中的运用[J].水电站机电技术,2025,48(11):92-95.
- [2]杨智源.绿色低碳背景下水电站安全运行与生态保护协同发展路径[J].中国科技纵横,2025(22):46-48.
- [3]张秀云.光照水电站绿色能源与生态和谐的创新典范[J].当代贵州,2025(6):34.

作者简介:李勇(1982—),男,毕业于武汉科技大学安全工程专业,现就职于中国水利水电第十二工程局有限公司,项目副经理,高级工程师。