

引文格式:李嘉豪,习明星,沈奕,等.基于SimaPro的公路隧道建造阶段碳排放计算与构成评估[J].现代隧道技术,2023,60(6):20-28.

LI Jiahao, XI Mingxing, SHEN Yi, et al. Calculation and Composition Assessment of the Carbon Emission in the Construction Phase of Highway Tunnels Based on SimaPro[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(6): 20-28.

基于SimaPro的公路隧道建造阶段碳排放计算与构成评估

李嘉豪¹ 习明星² 沈奕¹ 刘安² 朱合华¹

(1.同济大学土木工程学院地下建筑与工程系,上海 200092;

2.江西省交通投资集团有限责任公司,南昌 330001)

摘要:为准确定量计算和评估公路隧道各个建设阶段的二氧化碳排放,明确碳排放的主要来源和影响机制,基于生命周期评价(LCA)方法,从公路隧道碳排放核算边界划分、清单分析、计算模型建立等方面提出标准化的核算流程。结合工程实例,利用生命周期评价工具SimaPro对不同围岩条件下的每延米隧道建设碳排放进行计算和对比分析。结果表明,随着围岩条件的劣化,每延米隧道在材料生产阶段和施工建造阶段的碳排放量显著增长;公路隧道建设中材料生产阶段的碳排放量占比最高,其中二次衬砌材料生产阶段的碳排放量占比较大,改进材料生产技术、开展衬砌结构碳减排设计研究是减少公路隧道建设碳排放总量的重要路径。

关键词:公路隧道;碳排放;生命周期评价;计算模型;清单分析

中图分类号:U459.2

文献标志码:A

1 引言

中国交通基础设施的建设促进了国家和区域经济的发展。根据交通运输部发布的交通运输行业发展统计公报,截至2022年底,中国公路隧道总长26 784 km,总里程和年增长速度均居世界第一位。大规模的公路隧道建设势必会产生大量的资源消耗与碳排放,为实现我国“2030年碳达峰、2060年碳中和”的目标,控制隧道建设施工产生的碳排放尤为重要^[1]。碳排放的计算和评估是推动行业绿色低碳转型的重要依据^[2],计算和评估隧道各个建设阶段的二氧化碳排放,明确碳排放的主要来源和影响机制已成为全球研究人员广泛关注的问题^[3]。

近年来,国际上已建立起基于生命周期评价理论(Life Cycle Assessment, LCA)的碳足迹核算标准、数据库体系和管理制度体系^[4,5],并应用于土木工程

领域的研究^[6]。然而,公路隧道LCA碳排放研究仍处于起步阶段,现有的隧道碳排放研究范围涵盖建材生产、运输、施工建造、运营维护和拆除的部分或全部阶段。Huang等^[7]研究了钻爆法隧道洞身开挖过程的碳排放及其他环境影响,但没有考虑围岩支护与衬砌的碳排放。Li等^[8]研究了公路隧道施工过程中的碳排放,对中国西部某隧道建设过程中施工设备使用化石燃料产生的碳排放量进行了建模计算。郭春等^[9]通过案例研究分析了隧道施工阶段的碳排放水平,并对施工关键工序的碳排放影响因素进行了探究。周裕等^[10]对上海市某隧道物化阶段的碳排放总量进行了计算,并针对隧道节能减碳技术的减碳效果进行了分析。陈灵均^[11]在计算重庆某公路隧道运营期碳排放时考虑了车辆运行产生的碳排放。郭亚林等^[12]以深圳轨道交通部分隧道区间的土建工程为例,计算了盾构法、钻爆法施工区间隧道

收稿日期:2023-10-10

修回日期:2023-11-10

基金项目:江西省交通运输厅科技项目(2022C0003)。

作者简介:李嘉豪(1997-),男,博士研究生,主要从事隧道与地下工程低碳理论、无损检测分析方法的研究工作,E-mail: 1910354@tongji.edu.cn。

通讯作者:沈奕(1988-),男,工学博士,助理研究员,主要从事隧道与地下结构分析与计算领域的研究工作,E-mail: evanedinburgh@163.com。

的碳排放,并对其碳减排潜力进行了分析评估。目前,隧道碳排放的计算和评估缺乏统一的系统边界,不同研究的碳排放核算边界大相径庭,降低了不同研究之间的可比性^[13]。

开展公路隧道 LCA 碳排放计算研究,对公路隧道项目生命周期的输入、输出进行清单分析,可对不同设计施工条件下公路隧道各个建设阶段的二氧化碳排放开展定量研究,识别二氧化碳排放的主要来源和影响机制,用于量化相关节能降碳技术措施的实际效益^[14]。其中,碳排放核算边界的划分和碳排放因子的选取等差异会显著影响计算结果和结论,而主流生命周期评价工具和数据库的应用可以减少相关误差^[15]。

从边界划分、清单分析、计算模型建立等方面提出标准化的公路隧道碳排放核算流程,结合江西省典型公路隧道项目实例,基于生命周期评价工具 SimaPro 和 LCA 方法进行碳排放量计算和评估,获得具有可比性的公路隧道碳排放指标和分析结果,为形成统一的公路隧道碳排放计算评价体系提供理论支撑。

2 公路隧道生命周期碳排放计算方法

2.1 生命周期评价工具 SimaPro

生命周期评价是评价一种产品或一类设施从“摇篮到坟墓”全过程的总体环境影响,并从区域、国家乃至全球的广度和可持续发展的角度来审视问题,其应用可追溯至 20 世纪 60 年代^[16]。随着温室效应的出现,生命周期评价方法开始用于各类产品生产活动过程中温室气体排放量的计算及对环境的影响评价,为治理温室效应提供参考^[17]。

荷兰 Leiden 大学环境科学中心研发设计的生命周期评价工具 SimaPro 被全球多个国家的部门、研究机构以及顾问公司使用,Simapro 具有庞大的数据库系统,可以兼容整合不同来源的数据库,可通过数据不确定性分析、敏感度分析、贡献度分析等对过程数据和评估方法的准确性和完善度进行验证,保证计算和评估结果的准确与适用性。近年来,Simapro 已逐渐被用于土木建筑行业,有关数据库也被纳入软件数据库中,如包含与建筑相关的 100 多种材料及 250 个工艺生产的能源数据及其运输数据的数据库 IVAM,与水泥和混凝土原材料物化、运输和加工相关的数据库 Dutch concrete^[18]。利用其对公路隧道碳排放进行计算和分析,可得到较全面的评价结果。

2.2 隧道碳排放计算目标及边界

提出一种基于 LCA 的公路隧道碳排放计算方法,用于分析隧道施工和材料生产运输过程中的碳排放。一般来说,公路隧道的设计寿命为 100 a,服务年限时间跨度大。随着节能减排技术的发展以及运营管理理念革新,隧道在运营期的能耗有望持续下降。因而,后续运营维护阶段、拆除和回收阶段的碳排放难以有效估计,基于当前设计进行碳排放量预测可能误差极大,难以得到具有可信度的计算结果。因而,本文并非包含全生命周期的 LCA 研究,仅包括隧道上游建设材料的生产、运输和隧道施工阶段。系统边界包含 3 个部分:材料生产阶段、材料运输阶段、施工建造阶段。

中国公路隧道广泛使用钻爆法施工,一般包含超前支护、洞身开挖、挂金属网、施作锚杆、架钢架和模筑衬砌施工等工序。为便于形成具有可比性的计算结果,将碳排放计算的功能单位设定为“每延米隧道的开挖与支护活动”。详细的阶段划分与边界定义如图 1 所示。

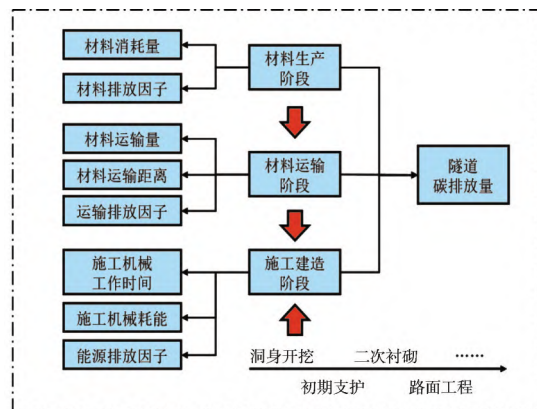


图 1 公路隧道碳排放计算边界

Fig.1 Carbon emission calculation boundary of highway tunnels

2.3 清单分析

清单分析采用过程法,数据分为前景数据和背景数据两部分。前景数据是指从直接测量或基于源头直接测量的计算中获得的单位过程或活动的定量值,包含材料及能源的消耗量,数据来源于标书、设计数据、技术手册或相关机构的统计数据等。基于勘察资料和设计工程预算定额体系获取前景数据,即从勘察资料中获取每延米隧道的工程量,通过《公路工程预算定额》(JTG/T 3832—2018)计算获得每延米隧道施工消耗的材料和机械台班数据,预

算定额是施工图设计阶段采用的定额,通过施工图纸和工程量计算法则计算出工程量。工程预算定额涵盖人工、材料和机械台班消耗,具体包括路面工程、隧道工程、材料采集加工和运输等过程。获得机械台班数据后,可根据《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T 3833—2018)获取施工机械的单位台班能耗,获得各类机械的燃料消耗量。

背景数据指间接测量、计算或获得单位过程的量化值,包含各类建材和能源的碳排放因子,可从IPCC、生命周期数据库、现有文献和规范中获取。通过调研 Ecoinvent、SimaPro、VegLCA、CLCD 数据库,以及相关标准和以往的研究^[19,20],比选建立了符合我国山区公路隧道工程特点的主要碳排放因子数据库。

在完成清单分析之后,根据碳排放计算模型,将材料生产和能源消耗产生的碳排放累加,得到隧道各个过程的全部排放,用于评估隧道生命周期的碳排放水平。碳排放量采用国际通用单位二氧化碳当量(Carbon Dioxide Equivalent, CO₂eq),包含甲烷、氧化亚氮等非二氧化碳温室气体排放量,以表征温室气体总排放量。

2.4 隧道碳排放计算模型

采用IPCC(政府间气候变化专门委员会)推荐的排放系数法^[21],该方法将清单分析得到的材料能源数据与单位活动的碳排放因子相结合,碳排放因子不仅包含建材生产的直接碳排放,还包含了上游产品的间接碳排放,由此计算得到各项能源活动对应的碳排放量。根据定义的碳排放计算边界,公路隧道碳排放的来源主要包括材料生产、材料运输和施工机械。

2.4.1 材料生产

公路隧道的材料生产多在施工现场外完成,常用材料包括钢铁、水泥、沥青、混凝土等。其碳排放计算如式(1)所示:

$$E_m = \sum_{i=1}^n (mf_i \times V_i) \quad (1)$$

式中: i 为材料类别; mf_i 为材料类别 i 的碳排放因子; V_i 为材料类别 i 的消耗量。

2.4.2 材料运输

公路隧道施工材料在从生产地到施工现场的运输过程中,运输机械将消耗各类能源,进而产生碳排放,常见运输使用的移动机械包括自卸车、装载机、混凝土搅拌车等。其碳排放计算如式(2)所示:

$$E_t = \sum_{i=1}^n (tf_i \times V_i \times L_i) \quad (2)$$

式中: i 为材料类别; n 为材料总数; tf_i 为材料类别 i 的运输方式下,单位重量单位运输距离的碳排放因子; V_i 为材料类别 i 的运输量; L_i 为材料类别 i 的运输距离。

2.4.3 施工机械

公路隧道的施工机械种类复杂,包括混凝土搅拌站、挖掘机、凿岩台车、混凝土喷射机、交流电焊机等。其碳排放计算如式(3)所示:

$$E_e = \sum_{i=1}^n (ef_i \times e_i \times t_i) \quad (3)$$

式中: i 为施工机械类别; n 为施工机械总数; ef_i 为机械类别 i 消耗能源对应的碳排放因子; e_i 是机械类别 i 的单位时间的能源消耗量; t_i 是机械类别 i 的工作时间。

2.4.4 碳排放总量

综上所述,将材料生产、运输和施工机械的碳排放累加即得到边界内的公路隧道碳排放总量,如式(4)所示:

$$E_{\text{total}} = E_m + E_t + E_e \quad (4)$$

式中: E_{total} 是公路隧道碳排放总量; E_m 是材料生产过程产生的碳排放量; E_t 是材料运输过程产生的碳排放量; E_e 是施工过程中机械产生的碳排放量。

3 工程实例分析

3.1 项目概况

以江西省特长山区公路隧道工程沱川隧道(江西段)为研究对象,工程属德州至上饶高速公路赣皖界至婺源段新建工程,隧道采用双向四车道设计,设计速度为100 km/h。隧道全长2 601 m,采用钻爆法施工。隧址区属于构造-侵蚀低山地貌,地形起伏大,隧道标准段为双向四车道,按洞口小净距、洞身分离式结构形式布置。

隧道洞身围岩级别为Ⅲ₂~V₂级,将功能单位设定为“每延米隧道的开挖与支护活动”,分别对V级、Ⅳ级和Ⅲ级围岩段的每延米隧道碳排放进行计算。

3.2 碳排放计算

3.2.1 材料生产阶段

材料生产阶段清单分析的前景数据主要来源于施工图设计文件、预算文件以及相关的定额标准等,涉及的材料种类数量繁多。在计算中重点统计使用量较大的材料,包括二次衬砌构件、二次衬砌钢筋网、初期支护构件、初期支护钢筋网、仰拱构件和路面材料等,并分别汇总上述材料在该工程中Ⅲ级、Ⅳ级和V级围岩段的每延米隧道开挖与支护活动中的使用量。V级围岩段的统计结果见表1。

表1 V级围岩段工程材料消耗数量

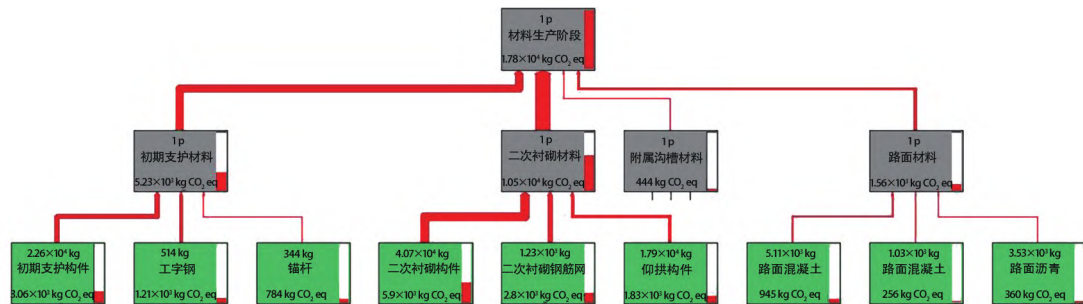
Table 1 Consumption of engineering materials in Grade V surrounding rock section

材料	每延米消耗体积 /m ³	密度 /(t·m ⁻³)	排放因子 /(tCO ₂ e/t)
二次衬砌构件	17.320 0	2.35	0.145
二次衬砌钢筋网	0.157 0	7.85	2.280
初期支护构件	9.630 0	2.35	0.135
初期支护钢筋网	0.010 2	7.85	2.280
仰拱构件	7.620 0	2.35	0.102
路面沥青	1.500 0	2.35	0.102
路面混凝土C20	2.170 0	2.35	0.185
路面混凝土C30	0.860 0	1.2	0.248
左右槽(混凝土)	0.400 0	2.35	0.145
左右水沟盖板	0.240 0	2.35	0.145
工字钢	0.066 0	7.85	2.350
锚杆(钢)	0.043 8	7.85	2.280
水沟钢筋	0.012 6	7.85	2.280

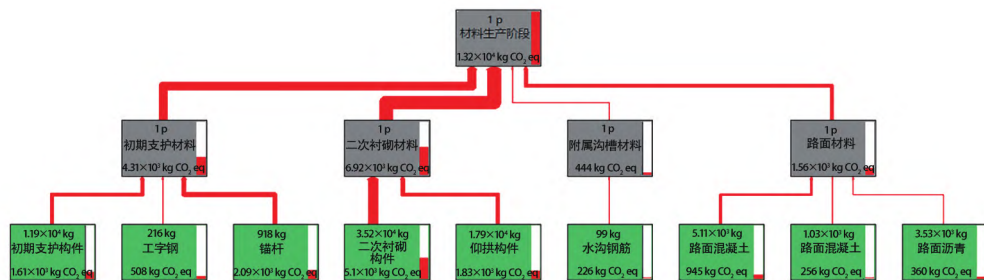
采用SimaPro中的碳足迹测算方法IPCC GWP 100 a,分别计算该工程Ⅲ级、Ⅳ级和Ⅴ级围岩段的每延米材料生产阶段产生的二氧化碳当量特征化指标,得到碳排放量树状图,如图2所示,图中箭头的粗细可直观表示碳排放量在该阶段总量中的占比(后同),碳排放量占比小于1.1%的未在图中显示。

该公路隧道材料生产阶段在不同围岩条件下每延米碳排放量的对比如图3所示。由图3可知,随着围岩条件的劣化,每延米隧道在生产阶段的碳排放量有着较大的增长。材料生产阶段,Ⅴ级围岩段隧道的碳排放量约是Ⅳ级围岩段的1.35倍,约是Ⅲ级围岩段的2.86倍。在该隧道的不同围岩条件下,二次衬砌材料的碳排放量均占比最大,约占材料生产阶段碳排放量的52%~59%。

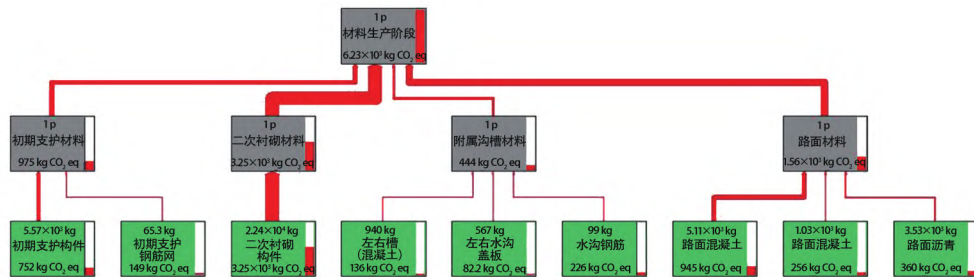
结合图2分析可知,围岩条件还显著影响着材料生产阶段中各类材料的碳排放量占比,随着围岩



(a) V级围岩段



(b) IV级围岩段



(c) III级围岩段

图2 材料生产阶段每延米碳排放量树状图

Fig.2 Tree diagram for carbon emission per linear meter in material production stage

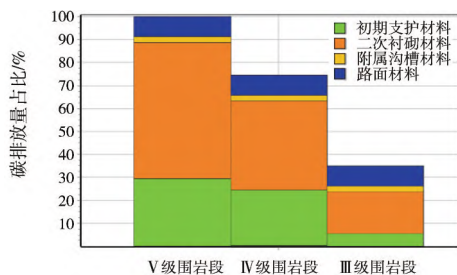


图3 不同围岩条件下材料生产阶段碳排放量

Fig.3 Carbon emission in material production stage under various surrounding rock conditions

条件的劣化,在初期支护中增加了钢支撑和锚杆的用量,以及二次衬砌厚度和配筋量的提高,使得初期支护和二次衬砌材料的碳排放量占比显著提高。

以该公路隧道V级围岩段材料生产阶段的碳排放量为例,材料生产阶段各构件碳排放量如图4所示。由图4可知,V级围岩段每延米总碳排放量约为17.8 tCO₂eq,其中初期支护材料占比29.4%,二次衬砌材料占比59.3%,附属沟槽材料占比2.5%,路面材料占比8.78%。其中二次衬砌构件和初期支护构件占比较大,分别为33.2%和17.5%。

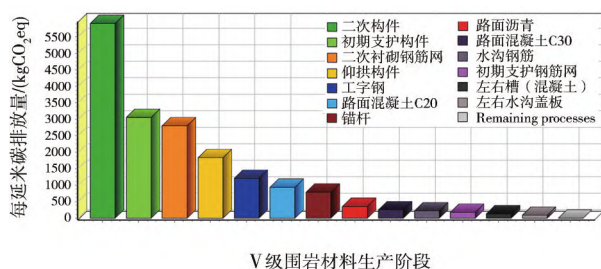


图4 V级围岩段材料生产阶段各构件碳排放量

Fig.4 Carbon emission of the components in the material production stage in Grade V surrounding rock section

3.2.2 材料运输阶段

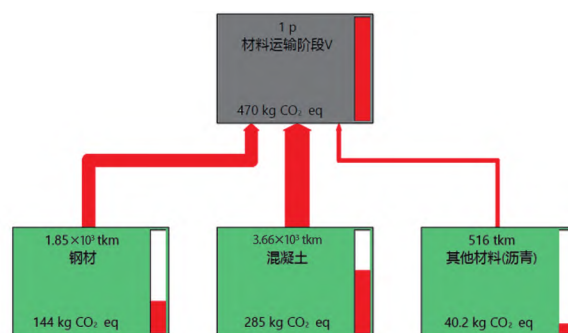
在该公路隧道材料运输阶段的清单分析中,对不同围岩条件下隧道每延米建设用量较大的材料进行分类统计,结果主要归为混凝土、钢材和其他材料3类,统计其总运输量,见表2。根据《建筑碳排放计算标准》(GBT 51366—2019)中的一般规定,将混凝土的平均运输距离值取为40 km,其他材料的平均运输距离值取为500 km。

采用SimaPro中的碳足迹测算方法IPCC GWP 100 a,分别计算该工程III级、IV级和V级围岩段的每延米材料运输阶段产生的二氧化碳当量特征化指标,得到碳排放量树状图,如图5所示。

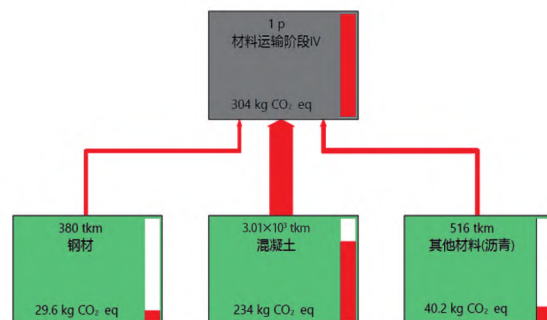
表2 材料运输阶段清单分析

Table 2 List analysis in material transportation stage

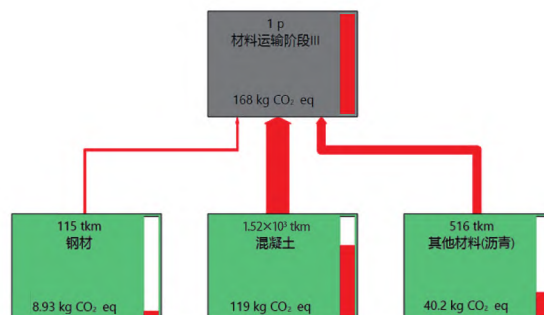
围岩条件	材料	运输量/t	平均运输距离/km
V级	混凝土	91.39	40
	钢材	3.704	500
	其他材料	1.032	500
IV级	混凝土	75.13	40
	钢材	0.760	500
	其他材料	1.032	500
III级	混凝土	38.12	40
	钢筋	0.229	500
	其他材料	1.032	500



(a) V级围岩段



(b) IV级围岩段



(c) III级围岩段

图5 材料运输阶段每延米碳排放量树状图

Fig.5 Tree diagram for carbon emission per linear meter in material transportation stage

结合树状图和清单分析可以看出,在该公路隧道建设中,混凝土材料的用量远大于钢材等其他材料,在3种围岩条件下,混凝土材料在运输阶段的碳排放量占比均为最大,达到60%~77%。而随着围岩条件的劣化,以钢支撑、钢筋网和锚杆等为代表的钢材用量占比显著提高,也使得钢材在运输阶段的碳排放量占比提高。

3.2.3 施工建造阶段

该隧道全长2 613 m,Ⅲ级围岩段长148 m,Ⅳ级围岩段长1 832 m,V级围岩段长633 m,采用钻爆法

施工,正洞采用机械开挖、自卸汽车运输。以隧道定额体系为基础,对该公路隧道施工建造阶段碳排放量占比较大的施工步骤进行清单分析和计算,包括洞身开挖、初期支护施工和二次衬砌施工。各类围岩条件下隧道工程量清单分析结果见表3。

通过《公路工程预算定额》(JTG/T 3832—2018),可将清单中的工程量数据转换为隧道施工消耗的机械台班。以洞身开挖步骤为例,工程施工建造阶段洞身开挖碳排放计算涉及的机械施工定额见表4。

表3 施工建造阶段清单分析

Table 3 List analysis in construction stage

围岩级别	洞身开挖 /m ³	初期支护					二次衬砌		
		喷混凝土 /m ³	型钢 /kg	药卷锚杆 /kg	中空注浆锚杆 /m	钢筋网 /kg	拱墙 /m ³	仰拱 /m ³	钢筋 /kg
Ⅲ级	8 971	245	0	7 334	0	4 197	837	0	0
Ⅳ级	175 474	8 551	699 965	402 740	0	79 199	19 030	11 722	89 352
V级	64 886	3 899	516 419	66 851	73 004	38 537	7 468	6 486	868 694

表4 洞身开挖施工定额

Table 4 Quota of tunnel excavation works

项目	每100 m ³ 自然密实土、石		
	隧道长度3 000 m以内		
	围岩级别		
	Ⅲ级	Ⅳ级	V级
1.0 m ³ 以内履带式液压单斗挖掘机/台班	0.02	0.02	0.02
风动凿岩机/台班	6.43	4.26	3.96
4 t以内载货汽车/台班	0.22	0.22	0.22
20 m ³ /min以内电动空压机/台班	1.47	1.39	1.63

其中,机械台班表示单元机械在8 h内发挥的效能,单位台班的能耗数据可在《公路工程机械台班费用定额》(JTG/T 3833—2018)获得。由此可最终将工程量数据转换为能源消耗量数据,基于排放系数法计算碳排放量。采用SimaPro中的碳足迹测算方法IPCC GWP 100 a,分别计算该工程Ⅲ级、Ⅳ级和V级围岩段的每延米施工建造阶段产生的二氧化碳当量特征化指标,得到碳排放量树状图如图6所示。

以该公路隧道V级围岩下施工建造阶段的碳排放量为例,每延米总碳排放量约为2.49 tCO₂eq,其中洞身开挖占比44.0%,初期支护施工占比48.4%,二次衬砌施工占比7.53%。在3种围岩条件下的隧道

施工阶段中,电力能源使用产生的碳排放量均占比最大。该公路隧道在施工工法和机械的选用中,也主要以电力作为能源。

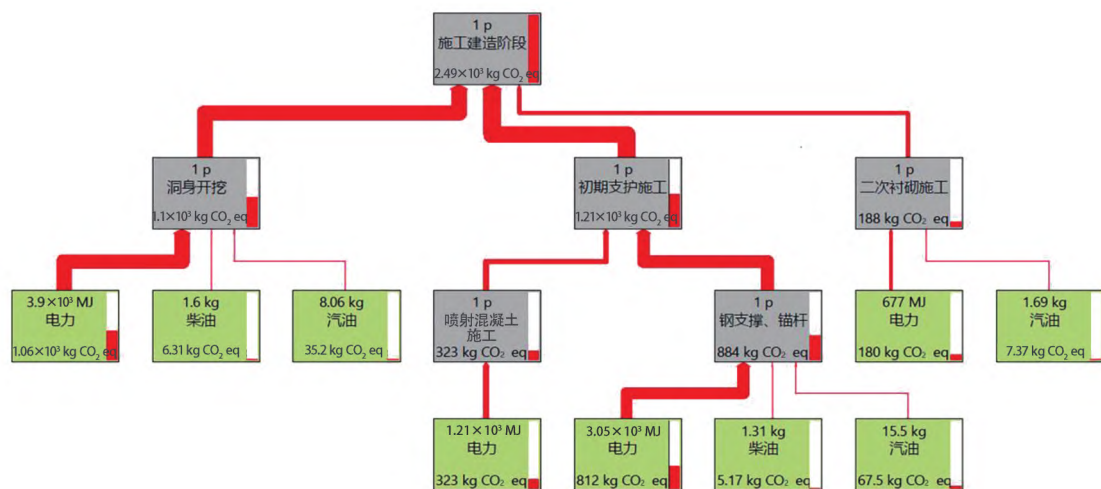
随着围岩条件的劣化,每延米隧道在施工建造阶段的碳排放量有着较大的增长,V级围岩隧道的碳排放量约是Ⅳ级围岩隧道的1.6倍,约是Ⅲ级围岩的3.2倍。

相较于Ⅳ级围岩和Ⅲ级围岩条件,V级围岩条件下初期支护施工的碳排放量有了显著增大,并超过了洞身开挖产生的碳排放量。Ⅲ级围岩条件较好,初期支护未使用钢支撑,碳排放量则主要来源于洞身开挖,其产生的碳排放达到了总排放量的74.3%。

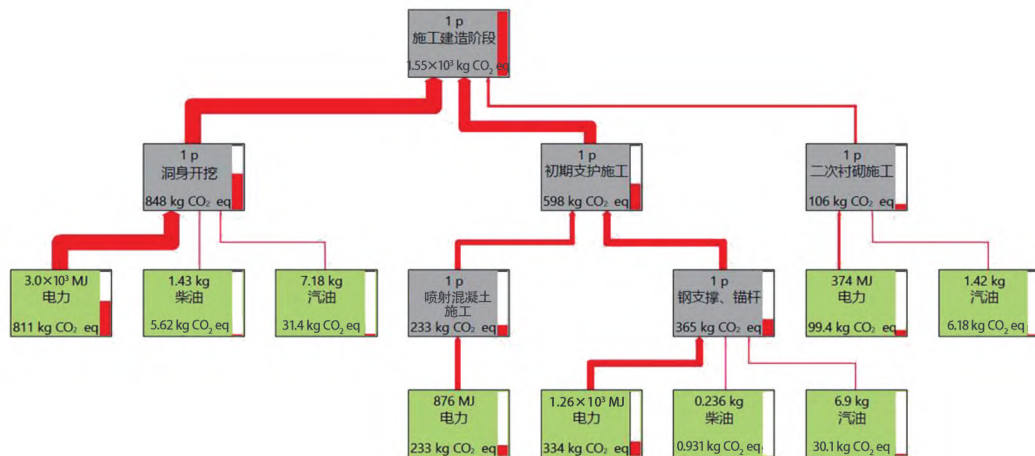
4 结 论

本文基于生命周期评价理论和工具SimaPro建立了公路隧道生命周期碳排放计算模型,划分了碳排放计算边界。并依托典型的特长山区公路隧道实例分别对V级、Ⅳ级和Ⅲ级围岩段的每延米隧道碳排放进行了计算和对比分析。可得到以下主要结论:

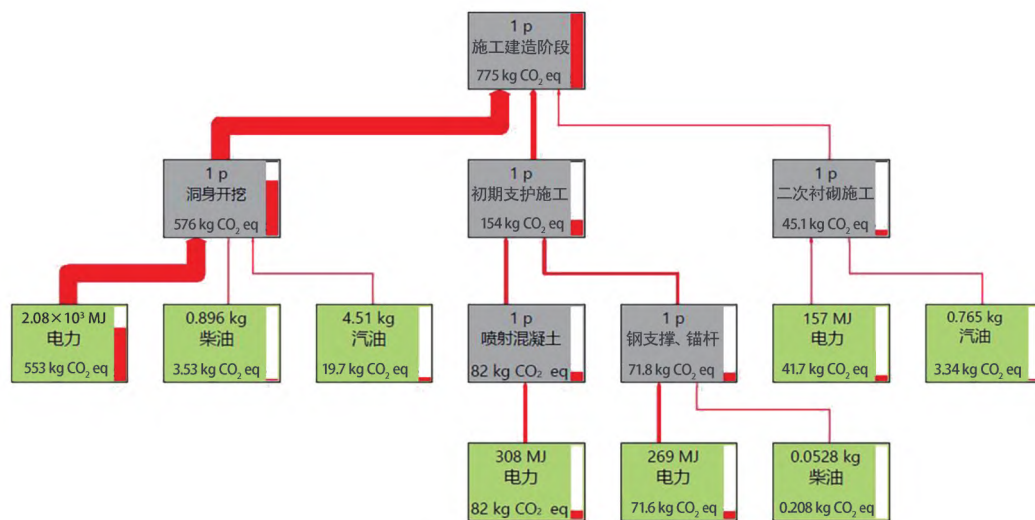
(1) 随着围岩条件的劣化,每延米隧道在材料生产阶段和施工建造阶段的碳排放量有着显著的增长,主要是因为围岩支护材料用量的提升和模筑衬砌施工消耗能源的显著增长。



(a) V级围岩段



(b) IV级围岩段



(c) III级围岩段

图6 施工建造阶段每延米碳排放量树状图

Fig.6 Tree diagram for carbon emission per linear meter in construction stage

(2) 在不同围岩条件下的隧道建设中,材料生产阶段的碳排放量均占比最高,且以混凝土和钢材为主的二次衬砌材料的碳排放量占比均为最大。

(3) 在公路隧道建设的材料运输阶段,各类混凝土材料运输产生的碳排放量占比最大。

在上述结论的基础上,提出减少公路隧道建设碳排放总量的技术发展建议:

(1) 改进材料生产技术。经计算,通过改进混凝土和钢材的生产技术,降低混凝土和钢材碳排放因子10%,可分别降低公路隧道施工总体碳排放约

6.2%和5%,具有很大的碳减排潜力。

(2) 提高清洁能源的发电占比,可有效降低施工建造阶段使用的主要电力能源在生产环节的碳排放因子。

(3) 改善泵送混凝土材料运输条件,减少混凝土材料的运输距离或提升运输效率,可以有效减少材料运输阶段产生的碳排放量。

(4) 提高施工建造阶段中耗能比例水平较高的运输机械、焊接机械和泵类机械的施工效率,采用工作耗能比较小的机械型号。

参考文献

References

- [1] MILIUTENKO S, ÅKERMAN J, BJÖRKLUND A. Energy Use and Greenhouse Gas Emissions during the Life Cycle Stages of a Road Tunnel—the Swedish Case Norra Länken[J]. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2012, 12(1): 39–62.
- [2] WEN Jun, MUGHAL N, ZHAO Jin, et al. Does Globalization Matter for Environmental Degradation? Nexus Among Energy Consumption, Economic Growth, and Carbon Dioxide Emission[J]. *Energy Policy*, 2021, 153: 112230.
- [3] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. *北京工业大学学报(社会科学版)*, 2021, 21(3): 1–15.
HU Angang. China's Goal of Achieving Carbon Peak by 2030 and Its Main Approaches[J]. *Journal of Beijing University of Technology (Social Sciences Edition)*, 2021, 21(3): 1–15.
- [4] WERNET G, BAUER C, STEUBING B, et al. The Ecoinvent Database Version 3 (Part I): Overview and Methodology[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, 21(9): 1218–1230.
- [5] PEÑA C, CIVIT B, GALLEGÓ-SCHMID A, et al. Using Life Cycle Assessment to Achieve a Circular Economy[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2021, 26(2): 215–220.
- [6] VAN DEN HEEDE P, DE BELIE N. Environmental Impact and Life Cycle Assessment (LCA) of Traditional and 'Green' Concretes: Literature Review and Theoretical Calculations[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(4): 431–442.
- [7] HUANG Lizhen, BOHNE R A, BRULAND A, et al. Life Cycle Assessment of Norwegian Road Tunnel[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, 20(2): 174–184.
- [8] LI Xinghua, LIU Jianchang, XU Honglei, et al. Calculation of Endogenous Carbon Dioxide Emission During Highway Tunnel Construction: a Case Study[C]//*Proceedings of 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection*. Xi'an: IEEE, 2011: 2260–2264.
- [9] 郭春, 徐建峰, 张佳鹏. 隧道建设碳排放计算方法及预测模型[J]. *隧道建设(中英文)*, 2020, 40(8): 1140–1146.
GUO Chun, XU Jianfeng, ZHANG Jiapeng. Calculation Methods and Prediction Models of Carbon Emission of Tunnel Construction [J]. *Tunnel Construction*, 2020, 40(8): 1140–1146.
- [10] 周裕, 王鑫, 陈鼎基. 武宁路隧道节能减碳综合技术研究[J]. *现代隧道技术*, 2022, 59(增1): 109–114.
ZHOU Yu, WANG Xin, CHEN Naiji. Study on Comprehensive Energy Saving and Carbon Reduction Technology in Wuning Road Tunnel[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(S1): 109–114.
- [11] 陈灵均. 公路隧道交通碳排放特性与影响机制研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
CHEN Lingjun. Study on the Characteristics and Influence Mechanism of Traffic Carbon Emissions in Highway Tunnel[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [12] 郭亚林, 孙文昊, 许洪伟, 等. 地铁隧道盾构及钻爆法施工碳排放强度对比[J]. *现代隧道技术*, 2023, 60(3): 14–23+64.
GUO Yalin, SUN Wenhao, XU Hongwei, et al. Comparison Between Shield Method and Drill and Blast Method Regarding Carbon Emission Intensity in Subway Tunnel Construction[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2023, 60(3): 14–23+64.
- [13] 郭春, 郭亚林, 陈政. 交通隧道工程碳排放核算及研究进展分析[J]. *现代隧道技术*, 2023, 60(1): 1–10.
GUO Chun, GUO Yalin, CHEN Zheng. Carbon Emission Accounting and Research Progress Analysis of Traffic Tunnel Engineering [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2023, 60(1): 1–10.

- [14] TRUNZO G, MORETTI L, D'ANDREA A. Life Cycle Analysis of Road Construction and Use[J]. Sustainability, 2019, 11(2): 377.
- [15] HOXHA E, VIGNISDOTTIR R R, PASSER A, et al. Life Cycle Assessment (LCA) to Evaluate the Environmental Impacts of Urban Roads: a Literature Review[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 588: 032032.
- [16] GUINÉE J B, HEIJUNGS R, HUPPES G, et al. Life Cycle Assessment: Past, Present, and Future[J]. Environmental Science and Technology, 2011, 45(1): 90–96.
- [17] FINNVEDEN G, HAUSCHILD M Z, EKVALL T, et al. Recent Developments in Life Cycle Assessment[J]. Journal of Environmental Management, 2009, 91(1): 1–21.
- [18] EMAMI N, HEINONEN J, MARTEINSSON B, et al. A Life Cycle Assessment of Two Residential Buildings Using Two Different LCA Database–Software Combinations: Recognizing Uniformities and Inconsistencies[J]. Buildings, 2019, 9(1): 20.
- [19] 刘宏强, 付建勋, 刘思雨, 等. 钢铁生产过程二氧化碳排放计算方法与实践[J]. 钢铁, 2016, 51(4): 74–82.
LIU Hongqiang, FU Jianxun, LIU Siyu, et al. Calculation Methods and Application of Carbon Dioxide Emission During Steel-Making Process[J]. Iron and Steel, 2016, 51(4): 74–82.
- [20] 崔鹏. 建筑物生命周期碳排放因子库构建及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
CUI Peng. The Establishment of a Life-cycle Carbon Emission Factor Database for Buildings and Research[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [21] AHN C, XIE Hua, LEE S, et al. Carbon Footprints Analysis for Tunnel Construction Processes in the Preplanning Phase Using Collaborative Simulation[C]//Proceedings of Construction Research Congress 2010. Banff: American Society of Civil Engineers, 2010: 1538–1546.

Calculation and Composition Assessment of the Carbon Emission in the Construction Phase of Highway Tunnels Based on SimaPro

LI Jiahao¹ XI Mingxing² SHEN Yi¹ LIU An² ZHU Hehua¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092;

2. Jiangxi Communications Investment Group Co., Ltd., Nanchang 330001)

Abstract: In order to accurately and quantitatively calculate and assess the carbon dioxide emission during the construction phases of highway tunnels and ascertain the main sources of carbon emission and their influencing mechanisms, a standard calculation process, based on the life cycle assessment (LCA) method, is devised that covers the aspects including highway tunnel carbon emission calculation boundary, list analysis and calculation model creation. By using engineering examples and the life cycle assessment tool SimaPro, the carbon emission per linear meter of tunnels built under various surrounding rock conditions is calculated and analyzed. According to the results, the carbon emission per linear meter of tunnel increases markedly in the material production stage and construction stage as the surrounding rock is degraded. In highway tunnel construction, the carbon emission in the material production stage takes the largest proportion, particularly the carbon emission in the secondary lining material production stage takes a high proportion. Therefore improvement of the material production technology and research into carbon emission reduction design of lining structure are the key approaches to reducing total carbon emission in highway tunnel construction.

Keywords: Highway tunnels; Carbon emission; Life cycle assessment; Calculation model; List analysis