

基于 LCA 方法的二氧化碳爆破环境影响分析^①

许小泉

(中国铁建港航局集团有限公司 武汉分公司, 湖北 武汉 430000)

摘 要: 为了考察二氧化碳爆破的环保性能,采用生命周期评价(LCA)方法分析了从原材料和能源生产、致裂器加工组装、现场爆破和最终废弃物处置全阶段所造成的环境影响,定量地得出了生命周期影响评价结果。结果表明,二氧化碳爆破生命周期对海洋生态毒性方面的环境影响程度最高,其次是淡水生态毒性、淡水富营养化、金属资源枯竭以及人类毒性。在二氧化碳爆破整个生命周期中,主要污染环节是包括钢铁生产过程和电能生产过程在内的原材料和能源生产阶段,对环境影响的贡献占比超过 50%。通过与传统爆破方法生命周期评价对比发现,二氧化碳爆破并不比传统爆破方法更清洁环保,反而对水体造成了巨量污染,需要引起重视并进一步改进。

关键词: 二氧化碳爆破; 生命周期评价; 定量分析; 环境影响; 液态二氧化碳相变破岩

中图分类号: X751

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2022.03.008

文章编号: 0253-6099(2022)03-0036-05

Environmental Impact Analysis of Carbon Dioxide Blasting Based on LCA Method

XU Xiao-quan

(CRCC Harbour and Channel Engineering Bureau Group Co Ltd, Wuhan 430000, Hubei, China)

Abstract: To investigate the environmental impact of carbon dioxide blasting, life cycle assessment (LCA) method was used to analyze the environmental impact caused during the full process, from raw materials and energy production, manufacturing and assembly of cracker to on-site blasting and final disposal of wastes. Then, LCA results were obtained quantitatively. It is shown that the life cycle of carbon dioxide blasting has brought the greatest influence to marine environment in terms of ecotoxicity, followed by freshwater ecotoxicity, freshwater eutrophication, metallic resource depletion and human toxicity. In the whole life cycle of carbon dioxide blasting, the main pollution comes from raw materials and energy production stages during processes of steel and iron production and electric energy generation, which accounts for more than 50% of total environmental impact. Compared with the life cycle of traditional blasting, it is found that carbon dioxide blasting is not cleaner and more environmentally friendly, even can bring huge pollution to water, which needs to cause attention and be further improved.

Key words: carbon dioxide blasting; LCA; quantitative analysis; environmental impact; rock breaking by liquid carbon dioxide phase transformation

爆破作为一种高效实用的破岩方式,在现代工业发展中发挥着重要作用,且人们对爆破安全性和环境影响的关注度逐渐提高^[1-2]。二氧化碳爆破是近年来高速发展并应用的一种新型爆破技术,又称二氧化碳相变致裂技术^[3]。该技术由英国 Cardox 公司在 20 世纪初首次开发,并在 20 世纪 80 年代得到突飞猛进的发展,广泛用于钢铁、水泥、电力以及基坑开挖、矿山开

采等领域^[4]。相比于西方国家,中国对二氧化碳爆破的研究要晚得多,初期研究主要集中于煤层致裂开采、增透、瓦斯开发等方面^[5]。直到 2015 年,随着发热管技术门槛的降低,以 CARDOX 致裂管为原型仿制液态二氧化碳相变致裂设备的机械厂家日益增多,同时关于液态二氧化碳相变破岩振动幅值和能量分布规律的相关研究逐渐深入,为液态二氧化碳相变破岩技术的

① 收稿日期: 2021-12-12

基金项目: 中国铁建港航局集团有限公司科技研究开发计划项目(2021-C47)

作者简介: 许小泉(1981-),男,陕西眉县人,高级工程师,主要研究方向为工程管理。

振动安全理论研究提供了科学支撑,进一步促进了二氧化碳爆破在非炸药破岩工程领域的应用^[6]。

因爆破前主机与爆破器材分离、爆破过程中无火花外露、爆破后无需验炮等特点,二氧化碳爆破具有极高的安全性^[7-8]。但在环保方面,对二氧化碳爆破的研究往往局限于现场粉尘、炮烟等的产生状况,而忽略了设备生产、废弃等相关环节,仅从简单的现场排放对比就定性地认为二氧化碳爆破更为环保显然是不合理的。本文采用生命周期评价(LCA)方法对二氧化碳爆破所涉及的环境污染进行全面分析,并与传统爆破进行对比,用定量研究结果指出二氧化碳爆破在环保方面的优势与不足之处。

1 二氧化碳爆破生命周期评价模型

1.1 生命周期评价方法

采用生命周期评价(LCA)方法对二氧化碳爆破“从摇篮到坟墓”(cradle to grave)全生命周期过程进行建模分析。LCA是一种定量的环境评价方法,可以对某个产品、过程或工艺各个生命周期阶段所造成的潜在环境影响进行识别并评估^[9]。本文选用国际领先的生命周期评价软件 SimaPro(内置 Ecoinvent 3 等生命周期数据库)和 ReCiPe 中点方法进行研究。ReCiPe 包含 18 个“问题导向”的环境影响类型,涵盖了大部分当今社会因生产所造成的环境问题^[10]。

1.2 目标和范围确定

本次研究的目的是:① 从全生命周期角度解释二氧化碳爆破所造成的环境污染,定量得出各种环境影响类型相关的特征化指标值;② 在结构上分析所建立的生命周期评价模型,探查造成严重环境影响的关键过程,并提出科学合理的优化方法;③ 与传统爆破方法进行对比,定量指出其环保优势及不足之处。

以原材料和能源生产、致裂器加工组装、现场使用、回收或废弃 4 个主要过程组为基础,确定研究范围,各个过程组包括多个单元过程。研究的系统边界如图 1 所示,为保证模型的质量与可行性,过程之间的物质流和能量流都涵盖在内,而对一些结果影响不大的过程予以舍弃。例如,对于产品的生产设备,因其极高的可重复使用性,一套设备系统往往对应大量的产品生产,设备制造及保养维修阶段产生的环境影响分配到单一产品时微乎其微,可以在一定程度上予以舍弃。本文选用单支二氧化碳致裂器爆破 1 次为功能单位,并基于该功能单位的生命周期确定各单元过程的输入和输出,进行建模、计算,得出评价结果。

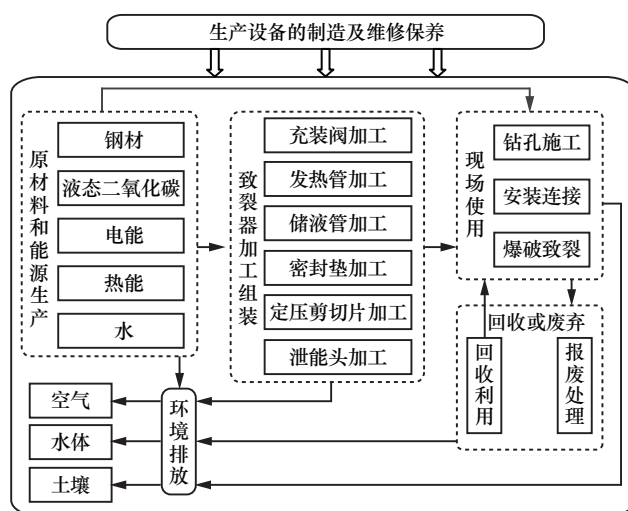


图1 系统边界及物质/能量流

2 清单分析

2.1 清单数据来源

二氧化碳致裂器加工组装相关清单数据由湖南某生产厂家提供,并在实际工程应用中测得现场排放情况。二氧化碳致裂器结构如图 2 所示,其型号为 95 型,即外径 95 mm、管体长度 1 m。所用二氧化碳充装量 2.8 kg、充装压力 9 MPa、致裂峰值压力 350 MPa,足以应对绝大多数工程现场使用。上游原材料和能源生产、下游回收或废弃等背景生命周期数据来自于行业领先的 Ecoinvent 数据库,经过本土化处理以满足各单元过程的建模使用。

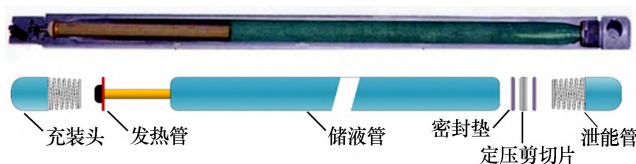


图2 95型二氧化碳致裂器结构

2.2 生命周期清单

所有生命周期清单数据都是以功能单位即单支二氧化碳致裂器爆破 1 次为基准进行收集,涵盖其整个生命周期。该致裂器属于可重复使用型,只需更换发热管和定压剪切片,重新填装液态二氧化碳后即可再次使用,单管可重复使用 3 000~5 000 次。具体数据详见表 1。

3 生命周期影响评价

3.1 中点方法计算结果

基于生命周期清单,在 SimPro 软件上即可建立二

表 1 二氧化碳爆破生命周期清单

过程组	物质	单位	数值
原材料和能源消耗	钢铁	kg	46.0
	液态二氧化碳	kg	2.8
	水	kg	298.4
	热能	MJ	110.6
	电能	kWh	9.8
致裂器加工 组装	热轧工艺(材料消耗总量)	kg	37.9
	冷轧工艺(材料消耗总量)	kg	6.7
	机械加工(材料消耗总量)	kg	44.6
现场使用	柴油燃烧	L	1.9
	直接排放(二氧化碳)	kg	4.5
	直接排放(粉尘)	g	52.8
回收或废弃	钢材废弃	kg	6.7
	钢材回炉	kg	1.4
	部件再利用 ¹⁾	kg	37.9

1) 致裂器中部分组件可重复使用约 4 000 次。

氧化碳爆破 LCA 模型。采用软件内置的 ReCiPe 中点方法计算模型评价结果(LCIA)。ReCiPe 中点方法涵盖了气候变化、臭氧消耗、陆地酸化、淡水富营养化、海洋富营养化、人类毒性、光化学氧化剂形成、颗粒物形成、陆地生态毒性、淡水生态毒性、海洋生态毒性、电离

辐射、农业土地占用、城市土地占用、自然土地转化、水资源枯竭、金属资源枯竭和化石能源枯竭等环境影响类型,每个环境影响类型都有其相应的特征化指标与当量因子,用以衡量不同物质对同一种影响类型的贡献大小。例如,气候变化环境影响类型以千克二氧化碳排放作为特征化指标进行量化,二氧化碳特征化因子为 1,甲烷特征化因子为 25,即每排放 1 kg 甲烷对气候变化造成的影响相当于排放 25 kg 二氧化碳。

经计算,单支二氧化碳致裂器爆破 1 次“从摇篮到坟墓”全生命周期阶段所造成的各类环境影响如表 2 所示。除累计值外,每个主要过程组所造成的影响也一一列出。值得一提的是,二氧化碳致裂器使用后,部分组件参与重复利用,抵消了因生产加工所造成的环境影响,故报废或回收过程组的特征化指标值为负,即该阶段产生环境正效益。LCIA 中点方法计算结果表明,原材料和能源生产过程组所造成的环境影响远大于其他组,这也说明了与二氧化碳爆破相关的污染不仅存在于自身生命周期当中,更多地由上游产品生产所致。

表 2 LCIA 中点方法计算结果

环境影响类型	指标单位	特征化指标值				
		原材料和能源生产	致裂器加工组装	现场使用	回收或废弃	全生命周期累计
气候变化	kg CO ₂ eq	224.46	28.24	9.42	-206.84	55.29
臭氧消耗	kg CFC-11 eq	0.000 011	0.000 001 5	0.000 001 2	-0.000 010	0.000 003 1
陆地酸化	kg SO ₂ eq	1.03	0.10	0.053	-0.98	0.21
淡水富营养化	kg P eq	0.077	0.011	0.000 29	-0.076	0.012
海洋富营养化	kg N eq	0.040	0.006 0	0.003 1	-0.040	0.009 1
人类毒性	kg 1,4-DB eq	112.12	8.68	0.37	-109.69	11.49
光化学氧化剂形成	kg NMVOC	0.76	0.075	0.091	-0.71	0.22
颗粒物形成	kg PM10 eq	1.04	0.061	0.043	-0.99	0.16
陆地生态毒性	kg 1,4-DB eq	0.03	0.049	0.000 24	-0.076	0.003 0
淡水生态毒性	kg 1,4-DB eq	14.90	0.58	0.013	-14.67	0.83
海洋生态毒性	kg 1,4-DB eq	15.27	0.54	0.013	-15.02	0.81
电离辐射	kBq U235 eq	10.76	1.99	0.44	-11.3	1.89
农业土地占用	m ² a	11.18	1.22	0.017	-11.42	1.00
城市土地占用	m ² a	3.66	0.20	0.015	-3.45	0.41
自然土地转化	m ²	0.018	0.004 1	0.002 4	-0.018	0.005 8
水资源枯竭	m ³	1.24	0.68	0.013	-1.42	0.51
金属资源枯竭	kg Fe eq	355.53	2.88	0.22	-340.73	17.89
化石能源枯竭	kg oil eq	50.89	6.32	2.29	-46.85	12.64

3.2 归一化结果

归一化是为了对不同环境影响类型进行比较,而将各特征化指标值转化为无量纲常数的一种方法。ReCiPe 中点方法内置有归一化方案,将中点方法计算结果进行归一化后,即可比较二氧化碳爆破生命周期

造成的各类环境影响大小。归一化 LCIA 结果如表 3 所示。结果表明,二氧化碳爆破对海洋生态毒性影响程度最高,其次依次是淡水生态毒性、淡水富营养化、金属资源枯竭以及人类毒性。而对颗粒物形成、化石能源枯竭、气候变化、陆地酸化、光化学氧化物形成的

影响程度较低,其他方面的影响可以忽略不计。将程度较高的 5 种环境影响类型定义为关键环境影响类型,即二氧化碳爆破主要会造成该种环境污染。

表 3 归一化 LCIA 结果

影响类别	归一化结果	影响类别	归一化结果
海洋生态毒性	0.328	光化学氧化剂形成	0.003 8
淡水生态毒性	0.193	电离辐射	0.001 4
淡水富营养化	0.042	海洋富营养化	0.001 2
金属资源枯竭	0.040	城市土地占用	0.000 53
人类毒性	0.035	陆地生态毒性	0.000 51
颗粒物形成	0.011	自然土地转化	0.000 48
化石能源枯竭	0.010	农业土地占用	0.000 18
气候变化	0.008 0	臭氧消耗	0.000 083
陆地酸化	0.005 5	水资源枯竭	—

3.3 过程贡献分析

在确定二氧化碳爆破所造成的环境问题之后,为寻求改善措施,对其生命周期进行结构分析寻找污染源十分必要。

近年来大众广为关注空气污染与雾霾问题,故二氧化碳爆破造成的颗粒物形成也应当被重点研究。加上已定义的 5 种关键环境影响类型,一共 6 种环境影响类型的过程贡献分析如表 4 所示。

表 4 关键环境影响类别过程贡献分析

影响类型	归一化结果	过程贡献结构	
		过程	占比/%
海洋生态毒性	0.328	钢铁生产	72.15
		电能生产	11.88
		轧制工序	8.82
淡水生态毒性	0.193	钢铁生产	68.60
		电能生产	12.82
		轧制工序	9.09
淡水富营养化	0.042	钢铁生产	56.31
		电能生产	22.68
		轧制工序	6.86
金属资源枯竭	0.040	钢铁生产	94.36
		电能生产	2.91
		柴油燃烧	1.21
人类毒性	0.035	钢铁生产	55.35
		电能生产	20.76
		液态二氧化碳生产	8.06
颗粒物形成	0.011	钢铁生产	50.05
		电能生产	18.08
		柴油燃烧	17.50

由过程贡献结构可知,在二氧化碳爆破生命周期中,钢铁生产会导致多种类型的环境问题,且贡献占比极高,是最具污染的环节;电能生产是除钢铁生产外的第二大污染源,导致了广泛的环境问题。以上两大

污染源被确定为关键过程,为促进行业发展与环境保护的首要优化目标,其余过程因造成的影响程度有限,可在未来寻求适当时机进行相关处理。

4 与传统爆破方法对比

4.1 TNT 当量确定

为了在相同水平上分析二氧化碳爆破方法与传统爆破方法的环境效益,选取 TNT 当量这一客观指标作为参考基准,以理论推算和工程经验相结合的方式得到各方法的 TNT 当量值,并在此基础上进行生命周期评价对比。

由现有的检测结果可知,95 型二氧化碳致裂器参数为管体容积 2.83 L,二氧化碳充装量 2.8 kg,充装压力 9 MPa,致裂峰值压力 350 MPa,则液态二氧化碳相变致裂时所释放的能量为^[11]:

$$E_g = \frac{pV}{K-1} \left[1 - \left(\frac{0.1013}{p} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \times 10^3 \quad (1)$$

式中 E_g 为气体的爆破能量,kJ; p 为容器内气体的绝对压力,MPa; V 为容器的容积,m³; K 为气体的绝热指数,即气体的定压比热与定容比热之比,取 1.295。计算可得 95 型二氧化碳致裂器在启动后释放的能量为 3 351.92 kJ,则其近似 TNT 当量为:

$$W_{TNT} = \frac{E_g}{Q_{TNT}} \quad (2)$$

式中 W_{TNT} 为装置的 TNT 当量,kg; Q_{TNT} 为 1 kg TNT 的爆炸能,取 4 250 kJ/kg。计算可得 95 型二氧化碳致裂器启动时的能量释放等效于 0.79 kg_{TNT}。

在传统爆破中,炸药选型的不同将会导致较大的爆破效果差异,这里选择应用较为广泛的岩石乳化炸药。由相关文献可知,岩石乳化炸药的 TNT 当量系数为 0.61^[12]。计算可得单只二氧化碳致裂器爆破约等效于 1.3 kg 岩石乳化炸药爆破。

4.2 对比结果与讨论

2 种爆破方法的生命周期影响结果如表 5 所示。2 组数据分别以单只二氧化碳致裂器爆破和 1.3 kg 岩石乳化炸药爆破为功能单元,达到相同的 TNT 当量水平。

表 5 结果表明,纵观整个生命周期,二氧化碳爆破方法比传统爆破方法造成了更大的环境污染,主要体现在海洋生态毒性、淡水生态毒性等关键环境影响类型方面,绝大多数作用于水体。结合贡献结构分析可以推断,这与致裂器制造过程中的钢铁生产加工有关,排放了种类多样且数量较大的污染物质。此外,二氧

表 5 二氧化碳爆破与传统爆破 LCIA 结果对比

影响类别	不同爆破方法的 LCIA 评价结果	
	二氧化碳爆破	传统爆破(岩石乳化炸药)
气候变化	0.008 0	0.002 3
臭氧消耗	0.000 083	0.000 021
陆地酸化	0.005 5	0.027
淡水富营养化	0.042	0.012
海洋富营养化	0.001 2	0.007 8
人类毒性	0.035	0.015
光化学氧化剂形成	0.003 8	0.021
颗粒物形成	0.011	0.022
陆地生态毒性	0.000 51	0.000 92
淡水生态毒性	0.19	0.031
海洋生态毒性	0.33	0.052
电离辐射	0.001 4	0.000 37
农业土地占用	0.000 18	0.000 17
城市土地占用	0.000 53	0.000 15
自然土地转化	0.000 48	0.000 18
水资源枯竭	—	—
金属资源枯竭	0.040	0.002 5
化石能源枯竭	0.010	0.002 0

化碳爆破方法在土壤酸化、光化学氧化物形成两个方面环境影响相对较低,是其环保优势。在现场使用过程中,二氧化碳爆破方法不涉及化学物质燃烧,其炮烟里仅含有二氧化碳这一大气中原有且大量存在的物质,不会对空气和土壤造成太大的危害。需要注意的是,尽管炮烟相对清洁,但由于上游生产环节过多且复杂,二氧化碳爆破在颗粒物形成方面并没有展现出优势,其环境影响与传统爆破所差无几。在其他环境影响类型方面,2 种爆破方法造成的污染都十分有限,这里不作为对比内容进行讨论。

5 结 论

基于生命周期评价(LCA)方法,对二氧化碳爆破的整个生命周期进行了分析,并与传统爆破进行了对比,得出以下结论:

- 1) LCIA 中点方法计算结果表明,二氧化碳爆破生命周期过程中会造成多种类型的环境影响,其中大部分影响来自于原材料和能源生产阶段。
- 2) 归一化中点方法计算结果表明,二氧化碳爆破生命周期对海洋生态毒性方面的环境影响程度最高,

其次是淡水生态毒性、淡水富营养化、金属资源枯竭以及人类毒性。

- 3) 由过程贡献结构分析结果可知,钢铁生产过程和电能生产过程是二氧化碳爆破生命周期中最主要的污染源,在众多环境影响类型中贡献占比极高。
- 4) 二氧化碳爆破和传统爆破对比结果表明,从生命周期角度来看,二氧化碳爆破比传统爆破造成了更大的环境污染,主要体现在对水体的影响方面,但其对土壤、空气的影响相对较低。

参考文献:

[1] 杨德强,池恩安,潘玉忠,等. 应用层次分析法分析土石方爆破影响因素的权重[J]. 矿冶工程, 2013,33(5):30-32.

[2] 张袁娟,孔德增. 不同岩性对爆破振动效应影响研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(5):6-8.

[3] 杨永梅,姜光忍,唐宇恒. 二氧化碳气体爆破技术发展及应用[J]. 设备管理与维修, 2019(6):85-86.

[4] 王知深,王海亮. 静态破碎技术在坚硬岩质矿井开挖中的应用[J]. 爆破, 2013,30(3):58-61.

[5] 王兆丰,李豪君,陈喜恩,等. 液态 CO₂ 相变致裂煤层增透技术布孔方式研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015(9):11-16.

[6] 刘小雄,李启月,冯国伟,等. 液态二氧化碳相变破岩振动能量分布研究[J]. 矿冶工程, 2018,38(3):5-10.

[7] 刘 滨,陈 冠,李 易,等. 地下开采爆破振动对地表构建物的影响研究[J]. 矿冶工程, 2017,37(4):1-5.

[8] 李征文,李德杰. 二氧化碳致裂爆破技术在高速公路施工中的应用探究[J]. 中国标准化, 2019(4):64-65.

[9] ISO 14040. Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Frame work[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

[10] Goedkoop M, Heijungs R, Huijbregts M, et al. ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation[M]. Netherlands: PRé Consultants, CML, University of Leiden, RUN, Radboud University Nijmegen, RIVM, Bilthoven, 2013.

[11] 董庆祥,王兆丰,韩亚北,等. 液态 CO₂ 相变致裂的 TNT 当量研究[J]. 中国安全科学学报, 2014,24(11):84-88.

[12] 范俊余,方 秦,张亚栋,等. 岩石乳化炸药 TNT 当量系数的试验研究[J]. 兵工学报, 2011,32(10):1243-1249.

引用本文: 许小泉. 基于 LCA 方法的二氧化碳爆破环境影响分析[J]. 矿冶工程, 2022,42(3):36-40.