

基于生命周期评价的机械装备再制造环境评价模型

时君丽, 王雅君, 樊双蛟, 金海华, 刘环宇

(大连工业大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 大连 116034)

摘要: 基于生命周期评价(LCA)理论方法,运用基于过程的清单分析方法、物质流分析方法以及切削比能的能耗计算方法,设计了机械装备再制造系统边界,建立机械装备再制造环境影响评价模型。分析机械装备再制造生命周期内的原材料和能源消耗清单数据,并进行特征化和标准化处理,得到机械装备再制造生命周期内环境影响综合指标。将WD615.87型柴油发动机作为研究案例,对再制造生命周期各工艺阶段环境影响进行评价,分析再制造过程的资源、能源消耗和环境排放,提出节能减排途径。

关键词: 机械装备;再制造;生命周期评价;环境影响

中图分类号: X76

文献标志码: A

文章编号: 1674-1404(2019)02-0146-06

Environment impact evaluation model of mechanical equipment remanufacturing based on LCA

SHI Junli, WANG Yajun, FAN Shuangjiao, JIN Haihua, LIU Huanyu

(School of Mechanical Engineering and Automation, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: Based on the life cycle assessment (LCA) theory, the boundary of the remanufacturing system of mechanical equipment was designed and the life cycle impact analysis model of the remanufacturing of mechanical equipment was established through the process-based life cycle inventory, the material flow analysis method and the energy consumption calculation method based on the cutting energy. The list data of raw materials and energy consumption in the remanufacturing life cycle of mechanical equipment were analyzed, and characterized as well as standardized to obtain the comprehensive index of environmental impact in the remanufacturing life cycle of mechanical equipment. WD615.87 diesel engine was taken as a case study to assess the environmental impact of each process stage in the remanufacturing life cycle. The resource, energy consumption and environmental emissions in the remanufacturing process was analyzed, and methods of energy conservation as well as emission reduction were proposed.

Key words: mechanical equipment; remanufacturing; life cycle assessment; environmental impact

0 引言

对废旧机械装备进行再制造是一种节约资源、降低能耗、保护环境的优秀生产模式,被称为

当今世界最具前景的技术领域之一,具有显著的经济效益和社会效益^[1-2]。再制造产品的重要特征是质量和性能不低于新品,甚至超过新品,而成本仅是新品的50%左右,实现能源节约60%左

收稿日期: 2017-08-28.

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(20170540080).

作者简介: 时君丽(1978-),女,讲师.

右,原材料节约70%以上,对保护环境贡献显著。

对于机械装备再制造企业而言,数量庞大的废旧零部件退役并回收以后,要面临3个方面问题:一是能不能再制造;二是怎样再制造;三是值不值得再制造。这3个问题决定了废旧产品继续进行再制造的可能性,必须给出准确、系统性的回答。对于第一个问题,以大连理工大学张洪潮教授为首席科学家研究的国家重点基础研究发展计划973项目(机械装备再制造的基础科学问题2011CB013400)课题一研究了“再制造对象跨尺度损伤演变规律及可再制造性评价理论”,考虑再制造对象的损伤程度及其剩余寿命等多方面因素,建立了可再制造临界阈值的评判准则,对废旧零部件“能不能再制造”做出了科学系统的回答^[3-4];对于第二个问题,该973项目课题三研究了高能束流(激光、等离子、电弧)键合修复技术、先进嵌合修复技术(电沉积、热喷涂等)、低应力精密后加工技术等,针对再制造毛坯损伤部位,通过增材成形,恢复尺寸及精度,重新赋予其服役能力,在修复技术上解决了“怎样再制造”的难题^[5-6]。然而,废旧机械零部件的再制造可能性被肯定、服役性由再制造修复技术实现以后,在环境表现方面“值不值得再制造”,这是面临的第三个重要课题。

目前由于数据资料的缺乏,难以对产品再制造的能源、资源节约和环境污染排放进行量化,本研究基于生命周期评价(life cycle assessment, LCA)理论方法,运用基于过程的清单分析方法、物质流分析方法及切削比能的能耗计算方法,建立机械装备再制造环境影响评价模型,计算废旧机械装备再制造过程中产生的资源、能源消耗和环境排放数据,合理选择环境影响类型、参数和特征化模型,分析评价机械装备再制造工艺过程中的环境影响。

1 LCA 技术框架

生命周期评价是对产品全生命周期内(原材料提取与制造、产品加工、包装运输、产品销售与使用、废品回收与掩埋)资源利用、环境影响和生态健康等进行评估和分析的过程,它是研究产品在生命周期内环境影响最有效的工具^[7]。

根据ISO14040标准,LCA包括4个阶段:

(1)目标定义与范围界定:LCA评价的第一步,主要确定研究目标范围和功能单位等内容,范

围界定要考虑预先选定的边界是否能够满足目标的要求,还要明确陈述产品的系统边界、功能单位及各种数据类型条件等内容。

(2)清单分析(life cycle inventory, LCI):分析、量化产品、工艺或系统整个生命周期内原材料、能源、气体排放、固体废弃物排放、水污染排放及其他类型排放的数据清单的过程。

(3)影响评价(life cycle impact analysis, LCIA):辨别和分析清单分析的结果,划分生态环境负荷影响类型,并根据其影响类型特征化因子进行描述与评价,影响评价一般包括分类、特征化与标准化几个步骤。

(4)结果解释:LCA分析的最后一步,主要是分析清单数据和影响评价的结果,并得到相应的结论,为管理者的决策提供科学依据。

2 基于 LCA 机械装备再制造环境影响评价模型

2.1 研究目标与系统边界

研究目标:分析机械装备再制造过程中所涉及的资源、能源消耗以及环境污染排放,识别机械装备再制造生命周期过程中主要环境影响类型,计算环境影响指标,分析再制造各工艺过程的环境影响,提出节能减排措施。

系统边界:产品或系统与外界环境之间的界限,对于机械装备再制造系统边界规定如下:

(1)再制造各阶段包括:废旧产品回收,整机拆解,清洗分类,检查与分类,无损检测,再制造修复、替换、装配。

(2)由于再制造产品的质量要求是达到甚至超过新品,原始制造和再制造产品的使用条件相同,则两种制造方式在产品包装、销售和使用阶段所消耗的资源相同,产生的环境影响也相同。因此,再制造产品的包装、销售、使用阶段不在生命周期系统边界范围之内。

(3)假定机械装备原始制造和再制造的最终处理方式及环境影响均相同,使最终处理阶段不在生命周期系统边界范围之内。

根据研究目标和以上假设条件,再制造产品的生命周期系统边界如图1所示。

功能单位:对在一定时间内、在特定环境下完成某项工作的产品或系统功能的测量,功能(或性能特征)必须是明确规定且可测量。功能单位可为单台再制造汽车发动机、机床、压缩机等。

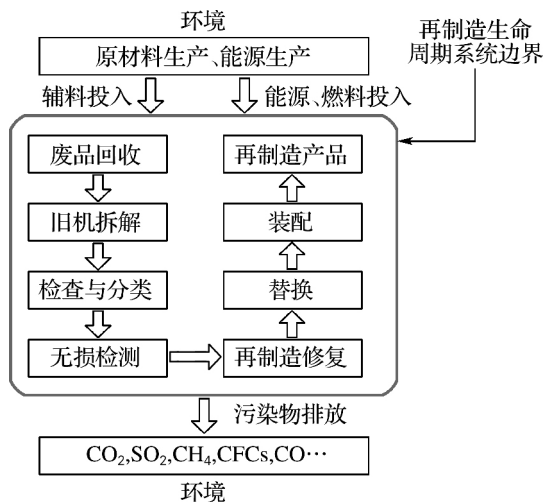


图 1 机械装备再制造生命周期系统边界

Fig. 1 System boundary of remanufacturing life cycle for mechanical product

2.2 生命周期清单分析

环境排放数据均来自中国基础数据库 (chinese life cycle database, CLCD) 由四川大学与亿科环境联合开发, 是目前唯一一个可公开获取的中国本土生命周期评价的基础数据库^[8]。数据清单获取说明:

(1) 原材料加工数据: 零部件原材料消耗数据由物料清单、企业调研和文献查阅确定;

(2) 运输数据: 主要通过实际调研获得, 根据按照实际运输的距离 (单位: km)、运输工具的参数 (货车或轮船, 柴油或汽油; 单车吨位) 作为运输阶段清单分析的输入信息;

(3) 零部件加工及装配数据: 再制造零部件加工过程的主要有关数据, 如: 资源、能源、燃料的消耗等; 零部件加工的能耗如式 (1)^[9] 所示。

$$E_{\text{ner}} = \sum_{i=1}^n e_i \times r_i \times (m_2 - m_1) \quad (1)$$

式中: E_{ner} 为零件加工总能耗; n 为零件加工工序数; e_i 为第 i 工序的比能耗; r_i 为第 i 工序材料去除率; m_1 为第 i 工序零件加工后质量; m_2 为第 i 工序零件加工前质量。

(4) 环境排放数据: 根据生命周期各个阶段的输入信息 (物料及能源消耗), 对于污染物排放信息 (如 CO_2 、 CFCs 、 SO_2 、 CH_4 、 NO_x 、烟尘) 参照 CLCD 数据库的实际数值, 进行分类、特征化和标准化等后续的计算。

2.3 生命周期环境影响评价

根据 SETAC 关于生命周期影响评价的基本思路, 建立机械装备再制造主要工艺过程的环境

影响评价模型, 如图 2 所示。

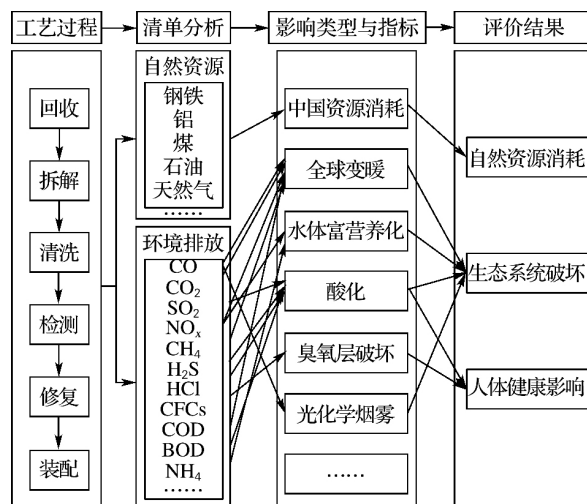


图 2 机械装备再制造环境影响评价模型

Fig. 2 LCIA model of mechanical equipment remanufacturing

2.3.1 分类

根据 ISO 14042 标准, 考虑机械装备再制造过程中资源消耗与环境排放清单数据具体情况, 选择中国资源消耗 (chinese resource depletion potential, CRDP)、全球变暖 (global warming potential, GWP)、富营养化 (eutrophication potential, EP)、酸化 (acidification potential, AP)、臭氧层破坏 (ozone depletion potential, ODP) 和光化学烟雾 (photochemical ozone creation potential, POCP) 6 种环境影响类型。其中 CRDP 主要由煤、石油、天然气、钢铁、铝等不可再生资源 and 能源消耗来决定; GWP 由 CH_4 、 CO_2 、 CO 、 NO_x 等的排放决定; ODP 主要由 CFCs 排放来决定; AP 由 SO_2 、 NO_x 、 H_2S 、 HCl 等气体排放决定; POCP 主要由 CO 的排放来决定; EP 由 NO_x 、 NH_4 、 COD 等大气、水污染排放决定。

2.3.2 特征化

采用当量因子法^[10], 根据不同物质对同一种环境类型的影响潜在程度, 将其中一种物质作为基准物质, 取其影响潜值取为 1, 相同质量的其他物质影响潜力与该基准物质影响潜值的比值作为当量因子, 见公式 (2)。

$$f(S) = S_k = \sum_{i=1}^n O_i \times EP(i) \quad (2)$$

式中: S_k 为第 k 种环境影响潜值的特征化结果; O_i 为每单位投入或排放 i 物质的清单数量; $EP(i)$ 为第 i 物质的环境影响当量因子。

2.3.3 标准化

数据标准化是将特征化结果根据所选参照年的标准进行量化,即对各种影响类型的数值大小提供参照比较的标准,标准化因子参照 CML2002 标准^[11],计算方法如公式(3)。

$$f(N) = N_k = S_k / R_k \quad (3)$$

式中: N_k 为第 k 种环境影响指标的标准化结果; R_k 为第 k 种环境影响指标的标准化当量值。

3 实例分析

3.1 研究目标与系统边界

研究目标:分析再制造重卡汽车柴油发动机生命周期资/能源消耗以及环境排放;选择主要环境影响类型指标,分析发动机再制造各工艺过程的环境影响,提出节能减排措施。

功能单位:济南复强动力有限公司再制造 WD615.87 汽车柴油发动机一台,使用时间 5 a,行驶距离 5×10^4 km。

系统边界:发动机原始制造与再制造系统边界见图 1。

3.2 生命周期清单分析

废旧发动机的回收:根据实际调查,重汽在国内 4S 店有 100 多家,计算每个店回收的废旧发动机的数量与运输的距离,得到回收一台旧机的运

输路程平均为 800 km,通过卡车运输,汽油为燃料,载重量为 10 t。

废旧发动机的拆解:废旧发动机运输到车间后,首先进行机械拆解,一台发动机拆解工时约为 300 min,每台发动机拆解过程中需要消耗的标准煤约为 1.2 kg^[12]。

发动机零部件再制造:以发动机曲轴和缸体的再制造为例,包括清辅料生产、旧件回收、产品拆解、零件清洗、缺陷检测、表面修复、产品装配几个主要工艺过程。

辅料的生产:通过企业调研、实验等方式可知,发动机再制造过程中的辅料主要有钢、铸铁、铝、煤油等。

发动机再制造各阶段物资、能源消耗及环境排放数据清单如表 1 所示。以上关于单位原材料(钢、铁、合金等)、能源(电能)、运输等能耗及环境排放数据可查 CLCD 基础数据库。

3.3 生命周期环境影响评价

分别从中国资源消耗、大气污染、土壤污染、水体污染角度对发动机再制造清单数据进行了特征化、标准化及加权处理,结果如表 2 所示;发动机再制造生命周期各阶段环境影响数据及百分比结果如表 3 所示。

表 1 发动机再制造生命周期数据清单

Tab. 1 Life cycle inventory of engine remanufacturing in different stages

环境影响	清单物质	辅料生产	回收	拆解	清洗	检测	修复	装配	总计
主要 自然 资源	$m(\text{钢、铸铁})/\text{kg}$						22.100		22.100
	$m(\text{铝})/\text{kg}$						12.050		12.050
	$m(\text{煤油})/\text{kg}$				9.020				9.020
	$m(\text{煤})/\text{t}$	0.120	0.102	0.014	0.061	0.013	0.326	0.038	0.582
	$m(\text{石油})/\text{kg}$	45.000	20.900	0.088	0.367	0.075	1.940	0.225	68.580
	$m(\text{天然气})/\text{kg}$	2.180	0.150	0.132	0.546	0.112	2.890	0.336	6.350
空气、 土地 污染 排放	$m(\text{CO})/\text{kg}$	0.576	11.800	0.005	0.002	0.004	0.115	0.013	12.560
	$m(\text{CO}_2)/\text{kg}$	235.000	94.700	23.000	95.600	19.600	507.000	58.800	1 033.630
	$m(\text{SO}_2)/\text{kg}$	8.880	0.160	0.080	0.333	0.068	1.760	0.205	11.490
	$m(\text{NO}_x)/\text{g}$	210.000	380.000	66.400	176.000	56.500	1 160.000	149.000	2 197.900
	$m(\text{CH}_4)/\text{g}$	1 460.000	140.000	68.100	283.000	57.900	1 500.000	174.000	3 680.000
	$m(\text{H}_2\text{S})/\text{g}$	427.000	2.660	0.011	0.046	0.009	0.243	0.028	430.000
	$m(\text{HCl})/\text{g}$	45.000	5.000	6.550	27.200	5.560	144.000	16.700	250.000
	$m(\text{CFCs})/\text{mg}$	0.212	0.291	0.007	0.031	0.006	0.166	0.019	0.733
	$m(\text{烟尘})/\text{g}$	4.440	2.910	25.500	34.000	8.490	84.900	17.000	0.177
水污 染排放	$m(\text{BOD})/\text{g}$	785.000	65.000	1.310	5.430	1.110	28.800	3.340	890.000
	$m(\text{COD})/\text{g}$	933.000	87.000	1.960	8.150	1.670	43.200	5.010	1 080.000
	$m(\text{NH}_4)/\text{g}$	7.440	11.300	0.043	0.178	0.036	0.943	0.109	20.000

表 2 发动机再制造生命周期环境影响评价结果

Tab. 2 Life cycle impact assessment result of engine remanufacturing

影响类型	清单物质	<i>m</i> /kg	特征化因子	特征化结果	标准化因子	标准化结果	
中国资源消耗	钢、铸铁	22.10	4.45	kg ce eq	2 607.05	3 959	
	铝	12.05	2.88				
	煤	582.21	1.00				
	石油	68.58	26.40				
	天然气	6.35	12.80				
大气污染	CO ₂	1 033.63	1.00	kg CO ₂ eq	1 854.12	8 700	
	CH ₄	3.68	25.00				
	NO _x	3.20	320.00				
	CO	12.56	2.00				
	ODP	CFCs	7.33×10 ⁻⁷	1.00	kg CFC ₋₁₁ eq	7.33×10 ⁻⁷	0.20
	POCP	CO	12.56	0.03	kg C ₂ H ₄ eq	0.38	0.65
土壤污染	SO ₂	11.49	1.00	kg SO ₂ eq	14.05	36	
	NO _x	2.20	0.70				
	H ₂ S	0.43	1.88				
	HCl	0.25	0.88				
水体污染	NH ₄	0.02	3.44	kg NO ₃ eq	3.28	62	
	NO _x	2.20	1.35				
	COD	1.08	0.23				

表 3 发动机再制造生命周期环境影响数据及百分比

Tab. 3 Life cycle impact assessment data and percentage of engine remanufacturing in different stages

影响种类	CRDP/10 ⁻²	百分比/%	GWP/10 ⁻²	百分比/%	AP/10 ⁻²	百分比/%	EP/10 ⁻²	百分比/%	ODP/10 ⁻⁷	百分比/%	POCP/10 ⁻³	百分比/%
辅料生产	33.700	52.30	3.010	14.31	28.000	68.18	0.500	9.39	10.600	28.92	26.600	4.57
旧件回收	14.200	22.08	2.900	13.79	1.790	4.37	1.580	29.67	14.600	39.70	545.000	93.65
产品拆解	0.475	0.74	0.528	2.51	0.368	0.90	0.146	2.74	0.377	1.03	0.242	0.04
零件清洗	1.970	3.06	2.200	10.46	1.530	3.72	0.605	11.36	1.560	4.26	1.000	0.17
缺陷检测	0.405	0.63	0.450	2.14	0.313	0.76	0.124	2.33	0.320	0.87	0.205	0.04
表面修复	12.500	19.34	11.600	50.41	8.080	19.68	0.020	37.56	8.300	22.65	5.310	0.91
产品装配	1.210	1.88	1.340	6.37	0.939	2.29	0.370	6.93	0.960	2.62	0.618	0.11
总计	64.500	100.00	21.000	100.00	41.000	100.00	5.100	100.00	36.700	100.00	579.000	100.00

3.4 结果解释

根据清单数据及环境影响指标数据的分布,发动机再制造各类别环境影响结果百分比如图 3 所示。

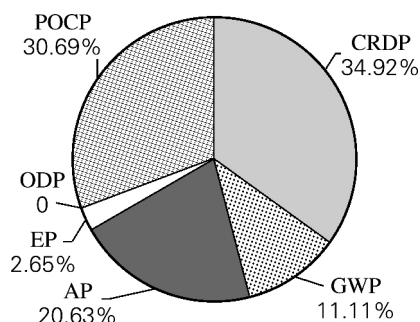


图 3 发动机再制造环境影响结果百分比

Fig. 3 Environmental impacts percentage of engine remanufacturing

根据图 3 和表 1、表 2 与表 3 的比较,对结果解释及建议如下:

(1)发动机再制造各阶段的 ODP 影响最小,说明排放的 CFCs 较少;在“辅料生产”和“回收”和“修复”阶段 CRDP 影响较大,说明这 3 个阶段资源和能源消耗较多;在“辅料生产”和“修复”阶段 GWP 和 AP 影响较大,这是因为在这两个阶段消耗了较多电能和铝,而电能和铝的生产会释放较多 CO₂ 和 H₂S 和 SO₂;在“回收”和“修复”阶段 EP 影响较大,这是因为这两个阶段产生的 NO_x 较多;“回收”阶段产生了大量 POCP,这是因为废旧发动机的回收时运输距离较远,在卡车运输过程中产生了大量的 CO,从而导致了 POCP 指标的升高;“拆解”“清洗”“检测”和“装配”阶段几乎所有的环境类型所占比重都很小,说明这几

个阶段资源消耗和环境排放都很小。

(2) 发动机再制造在 CARP、POCP 和 AP 所占比重大,而 EP 和 ODP 所占比重较小,说明发动机再制造对水体的污染影响较小,而对于空气和土壤污染影响较大。

(3) 在发动机再制造过程中应注意辅料如铝、合金的选择,对于辅料应尽量选择造成环境污染较小的替代材料;在制造阶段,应尽量提高各个环节的生产效率,如修复、拆解等阶段,从而减少电能的消耗;在废旧产品运输过程中,应注意回收物流点的合理设置,尽量减少运输总距离。

4 结 论

应用基于 LCA 的机械装备再制造环境影响评价模型研究可知:发动机修复和辅料生产阶段资源消耗较多,且对土壤的酸化影响较为严重;在废旧产品回收阶段光化学烟雾影响较大,对空气造成污染。因此应在以上各阶段采取必要的措施,将环境影响降低到最小限度。

模型应用过程中需要大量数据,且需保证数据的准确性,数据的微小误差可能导致结果产生较大变化。因此,数据的敏感性分析应作为模型的进一步深化研究。

数据在统计计算过程中较为烦琐,耗时较长,今后的研究工作还应进行模型的信息化研究,从而简化环境评价过程,提高评价效率。

模型还可以应用到其他机械装备(如机床、农用机械、军工产品等)再制造的环境影响评价中,并为决策者提供环境改善建议。

参考文献:

- [1] 徐滨士. 中国再制造工程及其新发展[J]. 今日工程机械, 2012(20): 8.
- [2] ZHOU X, KE Q D, SONG S X, et al. An evaluation

method based on mechanical parts structural characteristics for proactive remanufacturing[J]. Procedia CIRP, 2014, 15: 207-211.

- [3] 孙清超, 石博文, 邓长桥, 等. 一种根据 GBF 区尺寸预测离心压缩机叶轮可再制造性的方法: 2014105096617[P]. 2014-12-24.
- [4] ZHANG M, WANG W Q, WANG P F, et al. The prediction for fatigue strength in very high cycle regime of high strength steel[J]. Strength, Fracture and Complexity, 2016, 9(3): 197-209.
- [5] 梁秀兵, 徐滨士, 郭永明, 等. 一种高速电弧喷涂镍基非晶纳米晶减摩涂层的粉芯丝材: 201210135102. 5 [P]. 2012-04-28.
- [6] 董世运, 徐滨士, 闫世兴, 等. 一种灰铸铁缸盖自动化激光熔覆再制造方法: 201210106025. 0 [P]. 2012-04-12.
- [7] MENOUEFI K, CASTELL A, NAVARRO L, et al. Evaluation of the environmental impact of experimental cubicles using life cycle assessment: a highlight on the manufacturing phase[J]. Applied Energy, 2012, 92: 534-544.
- [8] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型[J]. 环境科学学报, 2010, 30(10): 2136-2144.
- [9] SHI J L, LI T, LIU Z C, et al. Life cycle environmental impact evaluation of newly manufactured diesel engine and remanufactured LNG engine[J]. Procedia CIRP, 2015, 29: 402-407.
- [10] GUINEE J B. Handbook on life cycle assessment: operational guide to the ISO standards[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [11] 杨建新. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [12] 刘志超. 发动机原始制造与再制造全生命周期评价方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

(责任编辑: 刘发盛)