

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.07.006

基于轻量化的铸铝发动机罩生命周期评价

李书华^{1,2}, 贝璟^{1,2}, 吴钊陶^{1,2}, 汪永嘉^{1,2}, 张代胜^{1,2}

(1. 合肥工业大学汽车与交通工程学院, 安徽合肥 230009; 2. 合肥工业大学智能制造技术研究院, 安徽合肥 230051)

摘要:为实现汽车轻量化,验证熔模精密铸造产品的节能减排效果,文章对发动机罩进行生命周期评价。结合熔模铸造工艺设计出满足刚度和模态性能要求的发动机罩,建立发动机罩全生命周期评价模型;追踪生命周期能耗和温室气体(greenhouse gases, GHG)排放,并进行敏感性分析。结果表明:通过一体化集成设计使铸铝发动机罩的质量减轻 17.87%,全生命周期能耗降低 10.18%,GHG 排放减少 7.12%。该铸铝发动机罩生命周期评价结果满足节能减排要求,研究为汽车绿色低碳化设计提供了理论依据。

关键词:轻量化;发动机罩;全生命周期评价;中国轻型客车试验循环(CLTC-P);敏感性分析

中图分类号:U465.22 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)07-0900-06

Lightweight-based life cycle assessment of cast aluminum engine hood

LI Shuhua^{1,2}, BEI Jing^{1,2}, WU Yitao^{1,2}, WANG Yongjia^{1,2}, ZHANG Daisheng^{1,2}

(1. School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Intelligent Manufacturing Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230051, China)

Abstract: In order to achieve automotive lightweight and verify the energy saving and emission reduction effect of investment casting products, this paper conducted a life cycle assessment of the engine hood. Based on the investment casting process, a hood that meets the requirements of stiffness and modal performance was designed, a hood full life cycle assessment model was established to track the life cycle energy consumption and greenhouse gases (GHG) emissions, and the sensitivity analysis was performed. The results show that the integrated design reduces the mass of the cast aluminum hood by 17.87%, the life cycle energy consumption by 10.18%, and the GHG emissions by 7.12%. The life cycle assessment results show that the cast aluminum hood meets the energy saving and emission reduction requirements, providing a theoretical basis for the green and low-carbon design of the vehicle.

Key words: lightweight; engine hood; full life cycle assessment; China light-duty vehicle test cycle-passenger (CLTC-P); sensitivity analysis

2020年,我国提出二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和^[1]。“双碳”目标会对未来汽车产业产生深刻影响,逐步引领汽车产业进入清洁低碳的新发展阶段。研究显示,汽车质量每减少10%,油耗可降低6%~8%^[2]。因此,以轻量化设计为基础,追踪产品从

原材料获取、加工制造、使用直至寿命末端的能源消耗和温室气体(greenhouse gases, GHG)排放,是判断产品生命周期内能否实现节能减排目标的重要依据。

国内外学者对汽车零部件的生命周期评价做了大量研究。文献[3]用铝替代钢制发动机、引擎

收稿日期:2022-11-16;修回日期:2022-12-07

基金项目:安徽省新能源汽车暨智能网联汽车创新发展工程资助项目(IMIZZ2019004)

作者简介:李书华(1989—),女,安徽淮北人,博士,合肥工业大学讲师,硕士生导师;

张代胜(1962—),男,安徽青阳人,合肥工业大学教授,硕士生导师,通信作者, E-mail: daishengzhang2000@163.com.

盖、散热器等部件评估整车的节能和 GHG 减排效果,结果表明,在设定的 2×10^5 km 生命周期内,油耗减少了 1 447~1 590 L;文献[4]比较了高强度钢、铝合金和碳纤维 3 种材质发动机罩生命周期的能耗和 GHG 排放,结果表明,在车辆寿命内铝合金发动机罩的能耗和 GHG 排放最低;文献[5]以福特某汽车的副车架为研究对象,评估不同材质副车架的环境影响,结果表明,碳纤维副车架在生命周期内 GHG 排放比传统钢制副车架高 9%,一次能源需求比钢制副车架高 17%,盈亏平衡距离比假定的车辆寿命距离(257 488 km)高 68%。为实现轻量化,各大车企致力于轻量化材料的应用研发,但对熔模铸造工艺及其轻量化产品的节能减排效果关注较少。

本文基于 GREET 软件建立生命周期评价模型,分析钢制冲压发动机罩和熔模铸造铝合金发动机罩的生产制造、使用和回收阶段的能耗和 GHG 排放,并对影响结果的煤电比例、再生材料生产占比和行驶里程 3 个因素进行单因素敏感性分析,根据敏感性分析结果提出相应建议。

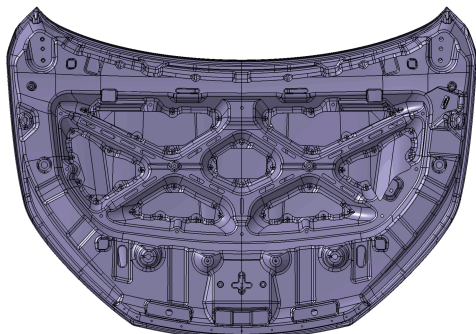
1 熔模精密铸造发动机罩

1.1 熔模精密铸造工艺

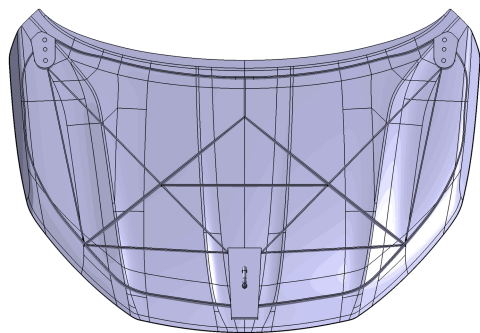
随着汽车轻量化技术的发展,铝合金在汽车上的应用逐渐广泛。熔模铸造在铸造复杂的薄壁时能保持较高的尺寸精度,且铸件可以省下机械加工的操作,进而大幅节约金属原材料,提高生产效率,很多国家将其作为铸造机械零件的首选工艺^[6]。汽车部件经过熔模铸造加工后不仅可以实现轻量化,还能满足部件的刚度和安全性能要求。

1.2 发动机罩性能参数

本文研究对象为长安 CS15 发动机罩,原钢制发动机罩如图 1a 所示。根据发动机罩的外板尺寸形貌,采用“材料-工艺-结构-性能”一体化集成设计方法,设计出铸铝发动机罩,如图 1b 所示。



(a) 原钢制发动机罩



(b) 铸铝发动机罩

图 1 发动机罩结构示意图

该铸铝发动机罩的材料为 ZL205A,其主要化学成分为铝元素(质量分数 94.0%)和铜元素(质量分数 4.9%),弹性模量为 7.3×10^4 MPa,泊松比为 0.32。通过 HyperMesh 仿真计算得出发动机罩的刚度和模态性能,见表 1 所列。由表 1 可知,该铸铝发动机罩的性能指标满足要求,且刚度性能和一阶弯曲模态均得到了提高。

表 1 钢制发动机罩与铸铝发动机罩的性能参数对比

参数	钢制发动机罩	铸铝发动机罩
质量/kg	14.10	11.58
抗凹形刚度/(N/mm)	57.47	377.36
正向弯曲刚度/(N/mm)	15.13	17.10
侧向弯曲刚度/(N/mm)	50.00	55.01
中部扭转刚度/(N/mm)	56.50	78.86
一阶扭转模态/Hz	54.31	35.17
一阶弯曲模态/Hz	59.13	65.26

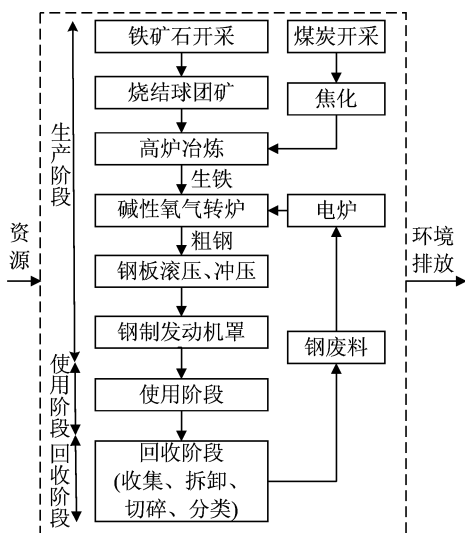
2 汽车发动机罩的生命周期评价

生命周期评价可以分析产品从“摇篮”到“坟墓”整个过程中的环境影响。评估范围包括材料的提取、加工、制造、运输、使用、再利用、维护以及寿命终止回收。本文通过追踪生命周期系统的输入和输出,同时识别和量化不同工艺过程的能耗和 GHG 排放,进而分析发动机罩全生命周期的环境影响。

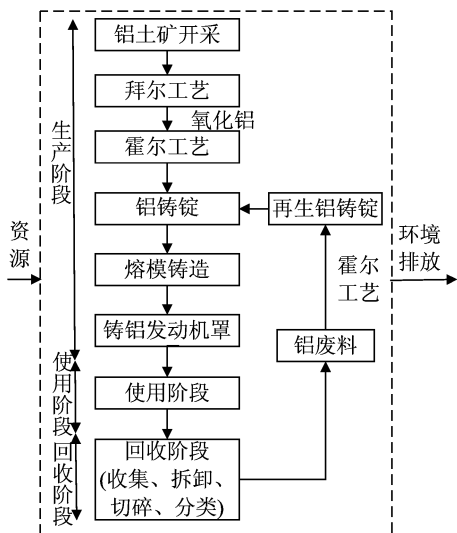
2.1 研究目标和范围

量化发动机罩全生命周期能耗和 GHG 排放,分析轻量化前、后环境影响差异,进而确定不同材质和工艺发动机罩的真实节能减排效果^[7]。

原钢制发动机罩和铸铝发动机罩生命周期系统边界如图 2 所示,包括生产阶段、使用阶段和回收阶段。发动机罩运输和维修阶段不予考虑。在系统边界内,各个阶段通过平行的物质流动相互联系。



(a) 原钢制发动机罩生命周期系统边界



(b) 铸铝发动机罩生命周期系统边界

图 2 发动机罩生命周期系统边界

2.2 生产阶段

发动机罩的生产阶段主要为金属材料的加工和成型过程,在此阶段主要消耗电能、天然气和煤炭。2020 年中国电力能源结构^[8]见表 2 所列。

表 2 2020 年中国电力能源结构

能源种类	发电量/(GW·h)	占比/%
煤炭	5 001 122	64.23
石油	10 799	0.14
天然气	218 242	2.80
生物发电	113 961	1.46
核能	366 247	4.70
水电	1 334 859	17.14
地热能	125	0.01
太阳能	269 718	3.46
风能	471 175	6.05

钢制冲压发动机罩的生产过程如下:将开采

出的铁矿石进行烧结,然后与焦炭一同进入鼓风机氧化,将精炼钢和回收钢热挤压加工成型为板材,再冲压、焊接、粘接、翻边制造出钢制发动机罩。基于以上流程通过 GREET 计算可得,生产单位质量的钢制发动机罩能耗为 36 MJ,GHG 排放量为 3.679 1 kg。

铸铝发动机罩的生产过程如下:将开采的铝土矿经过拜尔工艺提炼,再通过霍尔工艺进行氧化铝的还原获得初级铝锭,最后将初级铝锭与二次回收的铝锭进行熔模铸造,获得铸铝发动机罩。基于以上流程通过 GREET 计算可得,生产单位质量的铸铝发动机罩能耗为 218 MJ,GHG 排放量为 20.202 1 kg。

2.3 使用阶段

汽车行驶过程消耗 E10 燃油并产生尾气排放,发动机罩生命周期的使用阶段存在质量诱导燃油消耗及相应的温室气体排放^[9]。

2.3.1 CLTC-P

本文选用中国轻型客车试验循环(CLTC-P)来量化车辆行驶的燃油消耗量。CLTC-P 共包含 11 个短行程(包括低速阶段的 7 个短行程、中速阶段的 3 个短行程和高速阶段的 1 个短行程)和 12 个空闲段,总持续时间为 1 800 s。

CLTC-P 全程以及各阶段的参数^[10]见表 3 所列。

表 3 CLTC-P 全程以及各阶段参数

参数	全程	低速阶段	中速阶段	高速阶段
时间/s	1 800	674	693	433
行驶里程/km	14.48	2.45	5.91	6.12
最高速度/(km/h)	114.00	48.10	71.20	114.00
最大加速度/(m/s ²)	1.47	1.47	1.44	1.06
最大减速度/(m/s ²)	-1.47	-1.42	-1.47	-1.46
平均速度/(km/h)	28.96	13.09	30.68	50.90
平均行驶速度/(km/h)	37.18	20.19	38.24	53.89
平均加速度/(m/s ²)	0.45	0.42	0.46	0.46
平均减速度/(m/s ²)	-0.49	-0.45	-0.50	-0.54
加速阶段占比/%	28.61	22.26	30.45	35.57
减速阶段占比/%	26.44	21.51	28.43	30.95
巡航阶段占比/%	22.83	21.07	21.36	27.94
怠速阶段占比/%	22.11	35.16	19.77	5.54

2.3.2 燃油消耗量的计算

本文以长安 CS15 钢制发动机罩和铸铝发动机罩为研究对象,采用文献[11]的方法计算 2 种发动机罩的质量诱导燃油消耗。为了确定汽车的燃油消耗量,先确定汽车沿行驶方向的运动状况,即作用于汽车的驱动力和行驶阻力。汽车在水平

道路上行驶需要克服的行驶阻力有滚动阻力 F_R 、空气阻力 F_L 和加速阻力 F_j , 分别计算如下:

$$F_R = mgf_R \quad (1)$$

$$F_L = C_D A \rho u_r^2 / 2 \quad (2)$$

$$F_j = \delta m \frac{du}{dt} \approx ma \quad (3)$$

其中: m 为汽车的质量; g 为重力加速度; f_R 为滚动阻力系数; C_D 为空气阻力系数; A 为迎风面积; ρ 为空气密度(一般 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$); u_r 为相对速度; δ 为汽车旋转质量换算系数 ($\delta > 1$); du/dt 为行驶加速度。

由于 CLTC-P 速度-时间曲线不能用简单的函数表达式描述, 因此在计算汽车行驶的功时需要将低速阶段、中速阶段和高速阶段的各段位移进行求和。

$$W_R = \sum (F_{R,i} \Delta s_i) = mgf_R \sum \Delta s_i \quad (4)$$

$$W_L = \sum (F_L \Delta s_i) = \frac{1}{2} C_D A \rho \sum \Delta u_r^2 s_i \quad (5)$$

$$W_a = \sum (F_j \Delta s_i) = m \sum (a_i \Delta s_i) \quad (6)$$

W_L 与汽车质量无关, 因此 W_L 可忽略不计。考虑到在加速完成时汽车本身会有较大的动能, 在减速时这些动能将用来克服滚动阻力和空气阻力。CLTC-P 整个测试中有 26% 的减速阶段, 因此克服滚动阻力的功也会减少 26%。

由式(4)和式(6)可以得出 1 个行驶周期消耗的功 W_{sum} 为:

$$W_{\text{sum}} = 0.74W_R + W_a = m \left[0.74gf_R \sum \Delta s_i + \sum (a_i \Delta s_i) \right] \quad (7)$$

因此, 在 CLTC-P 中每百千克的汽车行驶 100 km 时, $W_{\text{sum}(100 \text{ kg}, 100 \text{ km})}$ 为:

$$W_{\text{sum}(100 \text{ kg}, 100 \text{ km})} = \left(\frac{100 \text{ km}}{14.48 \text{ km}} \right) \times 100 \text{ kg} \times (0.74 \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.01 \times 14480 \text{ m} + 0.45 \text{ m/s}^2 \times 4142.73 \text{ m}) = 2.01339 \text{ MJ} \quad (8)$$

长安 CS15 内燃机为四缸涡轮增压发动机, 根据 1.5 L 发动机 Willans 线算术平均值可得四缸涡轮增压发动机效率为 0.273 1 L/(kW·h), 换算为 0.076 1 L/MJ^[12]。设汽油的密度 $\rho_{\text{gas}} = 0.725 \text{ kg/L}$, 汽油的热值 $H_{\text{gas}} = 43.5 \text{ MJ/kg}$, 则发动机运转时的效率 η_d 为:

$$\eta_d \approx \frac{1}{0.076 \text{ 1 L/MJ}} \times \frac{1}{\rho_{\text{gas}} H_{\text{gas}}} \approx 40\% \quad (9)$$

假设动力传输到变速箱中能量损耗 2%, 则每百千克汽车行驶 100 km 质量诱导燃油消耗为

0.156 3 L。

2.3.3 燃油的提取与生产

为了比较不同材料工艺发动机罩的能耗与 GHG 排放, 需考虑燃料生命周期的影响。燃料生命周期主要包括以下阶段: 原料提取、运输和储存; 燃料生产、分配、运输和储存; 车辆加油及燃料的消耗。基于 GREET 软件对以上阶段的参数进行设置, 国内原油的开采效率为 93%, 开采阶段的能耗占比^[14]见表 4 所列。

表 4 开采阶段能耗占比

能源种类	占比/%	能源种类	占比/%
电力	37.8	煤炭	10.2
天然气	23.5	柴油	8.2
原油	20.4		

原油开采后的运输方式如下: 铁路 917 km, 占比 14.7%; 管道 428 km, 占比 33.4%; 水路 1806 km, 占比 51.9%。石油精炼汽油时转换效率为 90.6%^[12], 消耗能源比例^[14]见表 5 所列。

表 5 石油精炼能源消耗比例

能源种类	占比/%
电力	35.7
原油	51.7
煤炭	12.6

汽油运输到储油站的运输方式如下: 铁路 913 km, 占比 65.0%; 水路 1806 km, 占比 24.0%; 管道 300 km, 占比 11.0%。汽油从储油站通过公路运输 80 km 到加油站^[12]。

2.3.4 车辆行驶的能耗和 GHG 排放

假设该汽车生命周期的行驶里程为 300 000 km。行驶过程的燃油消耗量与质量诱导燃油消耗量紧密相关, 单位质量的发动机罩百公里能耗的计算方法如下:

$$E_{\text{Drive}} = H_{\text{gas}} \rho_{\text{gas}} V_{100 \text{ kg, CLTC-P}} / 100 \quad (10)$$

汽车行驶过程中每百公里产生的 GHG 计算方法如下:

$$Q_{\text{GHG}} = V_m E_m \eta_m N n_c \quad (11)$$

其中: V_m 为标准汽油体积; E_m 为标准汽油体积燃烧排放的 GHG 量; η_m 为燃烧效率; N 为 CO_2 的摩尔质量; n_c 为碳的摩尔质量。

2.4 回收阶段

回收阶段的输入和输出与原材料的循环利用率紧密相关。铝材和钢材都属于可回收材料, 发

动机罩经过拆解切碎后,材料均可以再利用。本文假设废钢和废铝的回收率为 95%。废钢料进入高炉中,经棒材轧制后再次制造成型,假设钢制发动机罩再生产由 26.4%的再生钢和 73.6%的精炼钢生成。废铝料切碎后,投入到电炉中获得再生铝锭,假设铸铝发动机罩再生产由 85.0%的再生铝和 15.0%的原铝生成。其余数据来源于 GREET2021 数据库。

3 结果与分析

3.1 发动机罩全生命周期能耗分析

钢制发动机罩和铸铝发动机罩能耗分析对比如图 3 所示。

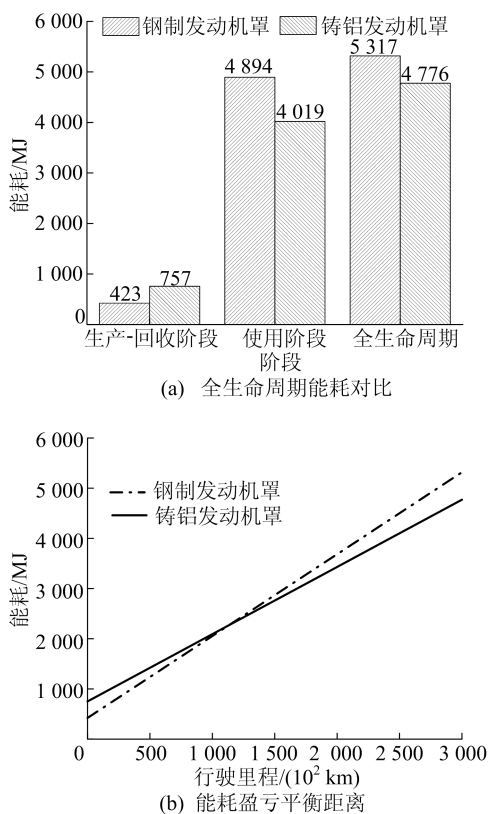


图 3 钢制和铸铝发动机罩能耗分析对比

由图 3a 可知:铸铝发动机罩相较于原钢制发动机罩在全生命周期能耗降低 1 082 MJ,节能 10.18%。使用阶段的能耗在生命周期中所占份额最大,约占全生命周期能耗的 90%。由于铝是能量密集型材料,在生产-回收阶段铸铝发动机罩能耗较高,但在使用阶段铸铝发动机罩比钢制发动机罩能耗降低 875 MJ。

为了研究轻量化设计产生的环境效益,根据生产、使用和回收阶段的能耗进行盈亏距离计算,结果如图 3b 所示。随着生命周期行驶里程的增

加,铸铝发动机罩节能效果愈加明显。与钢制发动机罩相比,铸铝发动机罩能耗盈亏平衡距离为 112 904 km,即汽车生命周期行驶里程超过该盈亏平衡距离后,铸铝发动机罩将实现净能耗收益。

3.2 发动机罩全生命周期 GHG 排放分析

钢制和铸铝发动机罩生命周期内的 GHG 排放如图 4a 所示。由图 4a 可知,铸铝发动机罩比原钢制发动机罩全生命周期 GHG 排放量减少了 41.48 kg, GHG 减排 7.12%。由于铝是能量密集型材料,在生产-回收阶段,铸铝发动机罩 GHG 排放量比钢制发动机罩 GHG 排放量增加了 23.7 kg;但在使用阶段,铸铝发动机罩 GHG 排放量比钢制发动机罩 GHG 排放量减少了 44.44 kg。

根据生产、使用和回收阶段的 GHG 排放进行盈亏平衡距离计算,结果如图 4b 所示。由图 4b 可知,铸铝发动机罩 GHG 排放盈亏平衡距离为 160 038 km,即生命周期行驶里程超过该盈亏平衡距离后,使用熔模铸造铝合金材料的发动机罩将实现净 GHG 排放效益。

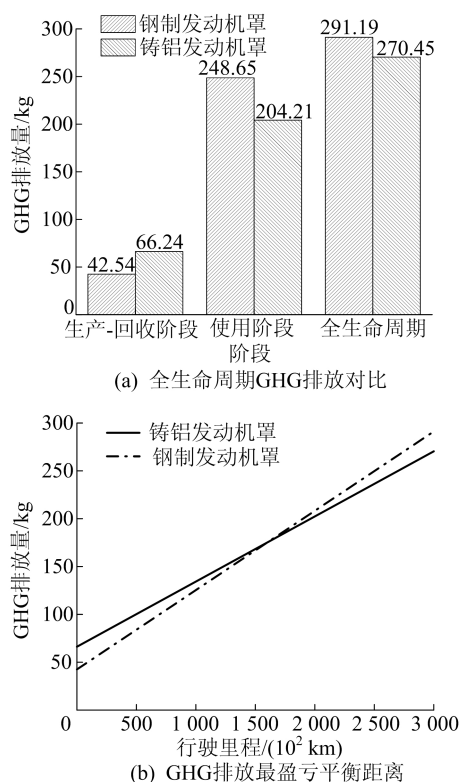


图 4 钢制和铸铝发动机罩 GHG 分析对比

因此,熔模铸造工艺生产的铸铝发动机罩在满足轻量化和性能要求的基础上,实现了全生命周期内节能减排目标。

3.3 敏感性分析

敏感性分析是指研究制约评价指标的有关因

素在特定条件下发生变化时对评价指标影响程度的系统分析方法^[13]。本文以煤电比例、再生材料生产占比和汽车行驶里程作为生命周期评价参数,参数分别与生命周期的生产阶段、回收阶段和使用阶段的输出相关联,并采用单因素敏感性分析方法研究该参数对生命周期能耗和 GHG 排放的影响。单因素敏感性分析结果见表 6 所列。

表 6 单因素敏感性分析结果 %

参数	增减比例	钢制发动机罩		铸铝发动机罩	
		能耗	GHG 排放	能耗	GHG 排放
煤电比例	+20	+0.81	+2.33	+1.12	+1.49
	-20	-0.93	-2.79	-2.46	-3.10
再生材料生产占比	+10	-0.05	-1.06	-4.70	-7.42
	-10	+0.05	+1.06	+4.70	+7.42
行驶里程	+10	+9.19	+8.54	+8.31	+7.56
	-10	-9.19	-8.54	-8.31	-7.56

结果表明,汽车的行驶里程对生命周期能耗和 GHG 排放有显著的影响。因此适当延长车辆的报废里程,可以显著提高其节能减排效益。当前我国的电力结构以煤炭为主导,随着可再生电能(水电、风电等)的比例增加,生命周期能耗和 GHG 排放均有不同程度的减少,由于电解氧化铝过程耗电量较高,铸铝发动机罩对煤电比例较敏感。再生材料生产占比对铸铝发动机罩的能耗和 GHG 排放有较大的影响,考虑到铝是能量密集型材料,提高回收铝的循环利用率可以减少生产阶段的能源消耗和 GHG 的排放。因此未来将以提高再生材料的生产占比为目标,从而更好地实现节能减排。

4 结 论

1) 本文通过“材料-工艺-结构-性能”一体化集成方法设计出的铸铝发动机罩各项指标均满足性能要求,且相较于原钢制发动机罩质量减轻 17.87%。

2) 基于 CLTC-P 行驶循环分析得出发动机罩使用阶段的能耗和 GHG 排放。在全生命周期(行驶里程为 300 000 km)内,铸铝发动机罩比原钢制发动机罩能耗降低了 10.18%,GHG 排放降低了 7.12%。铸铝发动机罩的能耗盈亏平衡距离为 112 904 km,其 GHG 排放盈亏平衡距离为 160 038 km。

3) 以煤电比例、再生材料生产占比和行驶里

程为变量进行单因素敏感性分析,结果发现,对于熔模铸造铝合金发动机罩,减少煤电占发电的比例、增加再生铝使用比例和使用寿命内适当延长汽车行驶里程均可大幅提高节能减排效益。

[参 考 文 献]

- [1] 中国政府网. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL]. (2020-09-22) [2022-11-11]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5549875.htm.
- [2] JOSEPH C, BENEDY K. Light metals in automotive applications[J]. *Light Metal Age*, 2000, 58(10): 34-35.
- [3] DING N, GAO F, WANG Z, et al. Life cycle energy and greenhouse gas emissions of automobiles using aluminum in China[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(4): 818-827.
- [4] SUN X, LIU J, LU B, et al. Life cycle assessment-based selection of a sustainable lightweight automotive engine hood design[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2017, 22(9): 1373-1383.
- [5] GHOSH T, KIM H C, DE KLEINE R, et al. Life cycle energy and greenhouse gas emissions implications of using carbon fiber reinforced polymers in automotive components: front subframe case study[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2021, 28: e00263.
- [6] 杨旭杰. 基于精密铸造工艺的铸铝发动机盖设计及成型研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2019.
- [7] 王童, 杜轶群, 陈轶高, 等. 基于结构轻量化的城市客车车身生命周期评价[J]. *汽车工程*, 2022, 44(5): 778-788.
- [8] IEA. Data and statistics[EB/OL]. (2022-11-10) [2022-11-11]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=CHINA&energy=Electricity&year=2020>.
- [9] 丁宁, 高峰, 王志宏, 等. 汽车用铸铝零部件的节能减排分析[J]. *汽车技术*, 2012(2): 55-59.
- [10] LIU Y, LIANG Y, YU H, et al. Comparative analysis of China light-duty vehicle test cycle for passenger car and other typical driving cycles[C]//E3S Web of Conferences. [S. l.]: EDP Sciences, 2021: 02002.
- [11] KOFFLER C, ROHDE-BRANDENBURGER K. On the calculation of fuel savings through lightweight design in automotive life cycle assessments[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2010, 15(1): 128-135.
- [12] 施羽, 张华, 于智涵. 电动汽车全生命周期节能减排效益分析及环境影响评价[J]. *资源与产业*, 2021, 23(2): 100-109.
- [13] 李书华. 电动汽车全生命周期分析及环境效益评价[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

(责任编辑 胡亚敏)