

特约专栏

# 汽车用金属材料的生态设计实践

孙博学, 刘 骁, 龚先政, 高 峰

(北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100124)

**摘 要:** 通过综合使用性能、环境负荷和经济成本 3 个因素, 建立了基于模糊矩阵理论的金属材料生态设计多指标评价模型, 并应用于钢铁、铝合金、镁合金 3 种典型车用金属材料的生态设计。研究结果显示, 就性能而言, 钢铁材料的综合性能优于铝合金材料和镁合金材料, 其性能单一化指标分别比二者高 8.25% 和 3.89%; 就环境负荷而言, 铝合金材料的生命周期环境负荷低于镁合金材料和钢铁材料, 其环境负荷单一化指标分别比二者低 10.68% 和 22.59%; 综合考虑不同设计因素, 针对汽车前端部件制造, 铝合金材料的生态设计实施效果优于钢铁材料和镁合金材料。

**关键词:** 钢铁; 铝合金; 镁合金; 生态设计; 汽车

**中图分类号:** X820.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2016)03-0197-07

## Practicing Eco-Design in Metal Materials for Automobile

SUN Boxue, LIU Xiao, GONG Xianzheng, GAO Feng

(College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124)

**Abstract:** Through integrating three designing factors, i. e., physical performance, environmental load, and economic cost, this study tentatively established a fuzzy-matrix theory based eco-design model for metal materials, and applied this model to the eco-design of three typical metal materials for automobile, i. e., steel, aluminum, and magnesium. The results show that, regarding the physical properties, steel is more advantageous than aluminum and magnesium towards the demand of automobile industry, and steel's integrated indicator of physical-performance is 8.25% and 3.89% higher than those of aluminum and magnesium, respectively; with respect to the environmental load, aluminum is more advantageous than steel and magnesium, and the single score of life cycle assessment of aluminum is 10.68% and 22.59% lower than those of magnesium and steel, respectively; in general, integrating various designing factors, the eco-design implementation effect of aluminum is more conspicuous than those of steel and magnesium towards the application in automobile industry.

**Key words:** steel; aluminum alloy; magnesium alloy; eco-design; automobile

### 1 前 言

在当代“绿色”与“循环”的发展宗旨下, “选材革命”已经成为汽车行业实现可持续发展的必经之路。汽车前端部件制造的耗材以钢铁材料为主, 而铝合金和镁合金也正在逐步被视为可应用于汽车前端部件制造的轻型金属材料<sup>[1-4]</sup>。

若以物理性能为设计因素, 则钢铁的强度较高, 铝合金的可加工性较好, 而镁合金以密度最低为其优

势<sup>[5-8]</sup>; 若以环境表现为设计因素, 相关研究表明<sup>[9-12]</sup>, 钢铁在生产阶段的环境负荷最低, 镁合金在使用阶段的环境负荷最低, 而铝合金的环境优势则体现在部件的回收阶段。由此可知, 即使参照单一因素(性能与环境), 设计过程已涉及难以在物理层面或其它学科层面统一的多元化指标(如, 材料强度、可加工性、密度), 如若综合考虑不同设计因素以满足实际应用中的各项基本需求, 设计情况将更为复杂。对这种复杂性的解决体现了生态设计的核心思想与关键技术。

本文的研究目的是建立轻量化金属材料生态设计的规范模式, 以对不同设计指标与设计因素进行综合统筹, 从而实现环保性、实用性、经济性并存的选材设计。

收稿日期: 2015-09-22

基金项目: 国家 863 计划(2013AA031602)

第一作者: 孙博学, 男, 1985 年生, 助理研究员, Email: sunboxuexx@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2016.03.05

2 方法与数据

2.1 金属材料生态设计方法

2.1.1 材料性能指标表征

性能是材料满足实际应用需求的最根本保证；设计的实质即是将产品对性能的需求“明确化”，而具体的各类材料则是对产品性能需求的满足或者说是性能需求的“实体化”。材料的各种性能在不同应用情景下所发挥的作用亦不相同，其相互间的重要程度也会随之发生变化；例如，铝合金在用作断桥门窗框架时，应当选取耐腐蚀性能作为首要设计指标，而将其应用于汽车制造时，则应首先考虑力学性能。此外，对材料性能的需求程度也因应用情境不同而异，例如道路建设与大坝建设

对混凝土材料的强度需求（即需求程度）间存在明显差异。综上所述，对材料性能的表征应当以实际应用情景为导向。

本研究通过构建需求-性能矩阵表示二者间的相互关系。如表 1 所示， $W_{ij}$  为性能  $P_j$  对需求  $R_i$  的贡献，如果某种性能对某种需求并无贡献（如材料的耐腐蚀性能与产品对材料力学性能的需求），则  $W_{ij}=0$ ； $aP_j$  为性能  $P_j$  对产品需求的标准化数值， $wR_i$  表示不同性能需求在具体生态设计中的权重因子（相对重要程度）。公式（1）与公式（2）为各参数的计算过程。

$$aP_j = W_{1j} \cdot wR_1 + W_{2j} \cdot wR_2 + \cdots + W_{nj} \cdot wR_n \quad (1)$$

$$wP_j = \frac{aP_j}{aP_1 + aP_2 + \cdots + aP_j + \cdots + aP_m} \quad (2)$$

表 1 材料的性能-需求矩阵  
Table 1 Performance-requirement matrix of materials

	Weighting factor	Performance 1 ( $P_1$ )	Performance 2 ( $P_2$ )	Performance 3 ( $P_3$ )	...	Performance $N$ ( $P_N$ )
Demand 1 ( $R_1$ )	$wR_1$	$W_{11}$	$W_{12}$	$W_{13}$	...	$W_{1N}$
Demand 2 ( $R_2$ )	$wR_2$	$W_{21}$	$W_{22}$	$W_{23}$	...	$W_{2N}$
Demand 3 ( $R_3$ )	$wR_3$	$W_{31}$	$W_{32}$	$W_{33}$	...	$W_{3N}$
...	...	...	...	...	...	...
Demand $N$ ( $R_N$ )	$wR_N$	$W_{N1}$	$W_{N2}$	$W_{N3}$	...	$W_{NN}$

2.1.2 材料环境负荷指标的表征与生产成本

生命周期评价 (Life Cycle Assessment, LCA) 是国际上通用的材料环境负荷量化工具，也是生态设计的重要依托方法。LCA 起源于上世纪 60 年代，发展至 90 年代时，逐渐出现若干国际标准 (ISO14040-14049)，使其成为确定产品环境影响潜力的权威方法<sup>[13]</sup>。国际标准化组织 (ISO) 与国际环境毒物学和化学学会 (SETAC) 对 LCA 的定义是：汇总和评估产品、服务在整个生命周期内的资源投入与污染排放所造成的潜在环境影响的方法，其中生命周期的含义是与产品或服务相关的，从原材料获取、加工制造、投入使用直至最终废弃的前后衔接的一系列生产消费过程。根据 ISO14040 所定义的技术框架，一项完整的 LCA 研究应包括目标与范围的确定、清单分析、影响评价以及结果解释 4 个阶段<sup>[14]</sup>，如图 1 所示。

开展生命周期评价研究意在通过量化材料从“摇篮”到“坟墓”过程的环境影响，识别出重点污染类型与污染环节，从而为制定相关环境政策提供理论依据与数据支持。与此不同，在生态设计中，除了要确定环境负荷指标外，还要综合分析材料的使用性能与经济成本因素，从而做出面向应用的最优选择<sup>[15]</sup>。由此可见，生

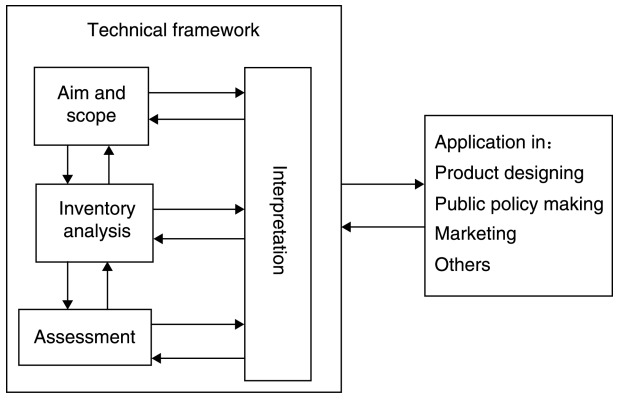


图 1 LCA 的实施过程及技术框架

Fig. 1 Implementation procedure and technical framework of LCA

态设计在利用“生命周期”这一概念的同时也对其进行了拓展：传统材料的生命周期包括从制造到投入使用以及报废的各个阶段，而生态设计将材料的生命周期延伸到了使用结束后对设计方案的改进，通过对生态设计方案的不断反馈来完善产品的前端设计，最终得到最可行的生态设计实施方案。

除环境指标与性能指标外，产品的生产成本亦应在产品设计阶段予以考虑。经济成本的核算项主要包括材料生命周期过程所消耗的矿物、能源以及其它工业中间

产品,如公式(3)所示。此外,在进行生命周期成本核算时无需考虑与环境影响相关的经济成本,以避免与环境负荷指标的重复考虑。

$$C = C_e + C_r + C_o \quad (3)$$

式中,  $C_e$ ——能源消耗总成本;

$C_r$ ——资源消耗总成本;

$C_o$ ——其他消耗总成本。

## 2.2 功能单位与系统边界

### 2.2.1 功能单位的选取

本研究的功能单位选取为整车重为 1 445 kg 汽车的前端部件,设定汽车的报废公里数为 200 000 km;以铝合金、镁合金和钢铁生产该汽车前端部件的材料消耗量分别为:61 kg、45.2 kg、82.2 kg。

### 2.2.2 系统边界的规范

如图2所示,不同金属材料的系统边界可统一规范为开采阶段、生产阶段、使用阶段与回收阶段;其中,不考虑汽车前端部件在行驶过程中的部件损耗与更换。

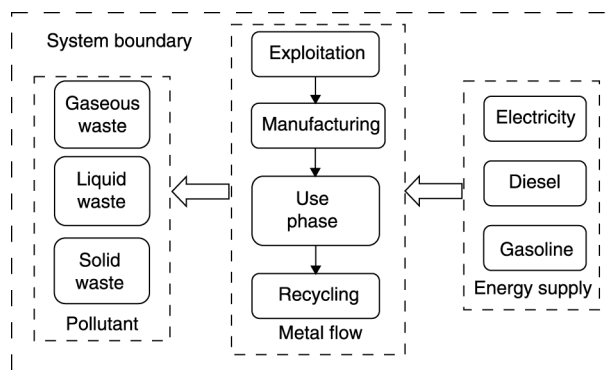


图2 本研究系统边界

Fig.2 System boundary of this study

## 2.3 数据来源

### 2.3.1 材料生产、回收阶段的清单数据

本研究中,材料生产阶段与回收阶段的清单数据源自北京工业大学自主开发的材料生命周期工程数据库<sup>[16]</sup>;清单数据均为企业调研数据,质量较高,能够反映我国材料工业的真实生产水平。

镁合金锭的生产工艺选取为气体保护法,数据范围涵盖原镁生产、合金制备以及能源生产,镁合金铸锭的成材率约为30%~40%,取其平均值35%;铝合金生产工艺选取为锻造,数据范围涵盖原铝生产、铝合金熔铸以及能源生产,铝合金铸锭的成材率约为60%~70%,取其平均值65%;钢铁生产的清单数据范围包括铁矿石开采、矿石精选、铁矿石烧结、高炉炼铁、炼钢、轧钢以及能源生产,钢铁材料的成材率取为97%。

### 2.3.2 材料使用阶段清单计算方法

汽车行驶过程的耗油量与汽车部件的重量呈线性关

系,其解析式如式(4)所示<sup>[17]</sup>:

$$F(L) = L \times FE_{(0)} \times [(1 + S_w) \times (M_{PO} - M_{PL})/M_{VO} \times df/dm]^{-1} \times [M_{PL}(M_{VO} - (1 + S_w) \times (M_{PO} - M_{PL}))] \quad (4)$$

式中,  $F(L)$ ——汽车零部件行驶一定距离所消耗的汽油量(1);

$L$ ——汽车行驶距离(km);

$FE_{(0)}$ ——燃油消耗因子( $L/100$  km);

$S_w$ ——二次轻量化,即由于某种零部件质量的减轻或材料的变动所引起的其它零部件变化(无量纲);

$M_{PO}$ ——零部件的原质量,即使用替代材料前的质量(kg);

$M_{PL}$ ——零部件的质量(kg);

$M_{VO}$ ——车辆的总质量(kg);

$df/dm$ ——燃油效率与质量变化的关系。

根据设定的功能单位,行驶距离  $L$  为 200 000 km,  $FE_{(0)}$  选取为普通轿车燃油因子的平均值 10.6 L/100 km,  $S_w$  选取为 0.5,  $M_{VO}$  为 1 445 kg;在汽车行驶过程中汽车质量每减少 10%, 平均燃油消耗率降低 6.5%, 相应的  $df/dm$  值为 0.65。

## 2.4 性能-环境-经济指标的统一

### 2.4.1 模糊矩阵评价原理

模糊综合评价法是运用模糊变换原理,对某一对象进行全面客观的分析,从而解决传统评价方法难以统一多维度指标的问题<sup>[18]</sup>。

构建评价对象的因素集合  $U = (U_1, U_2, \dots, U_n)$ , 评价集合  $V = (V_1, V_2, \dots, V_n)$ 。集合  $V$  中的元素是对集合  $U$  中相应评价标准的分级,即参与评价的  $n$  个因子的数值指标。依据集合因素中的模糊信息,建立模糊矩阵,见式(5):

$$R_i = \begin{pmatrix} r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中,  $r_{ij}$  为元素  $v_j$  对元素  $u_i$  的隶属度,  $R_i$  为因素集合  $U_i$  的单因素评价矩阵。

相应一级模糊综合评价结果可表示为式(6):

$$S_i = A_i \times R_i \quad (6)$$

式中,  $A_i$  表示  $U_1, U_2, \dots, U_n$  中各因素的权重。

依据最大关联度原理,最终评价结果中的最大值  $S_{\max}$  即为最优实施效果。

### 2.4.2 因素间权重因子的确定

对于不同设计要素之间的相互重要程度,本文采用层次分析法(The Analytic Hierarchy Process, AHP)<sup>[19]</sup>确

定几种生态设计要素的权重因子。该方法可以紧密地和决策者的主观判断与客观推理相结合,确保最终设计方案的客观性与合理性。

通过对研究目标的理解与认识,建立一个可将系统分为若干个层次的多级递阶结构。一般而言,每一层次所包含元素的数量不超过 9 个,如表 2 所示。

表 2 AHP 中各标度的含义

Table 2 Implication of each indicator in AHP

Indicator	Implication
1	Equally important
3	Slightly more important
5	Significantly more important
7	Absolutely more important
9	Extremely more important
2	Grade between 1 and 3
4	Grade between 3 and 5
6	Grade between 5 and 7
8	Grade between 7 and 9

基于元素间两两比较的标度,可进一步确定相应的权重系数。本研究选用连乘法对其进行计算,具体过程如式(7)~(9)所示:

$$\bar{w}_i = \sqrt[m]{\prod_{j=1}^m b_{ij}} \quad (7)$$

$$w_i = \bar{w}_i / \sum_{i=1}^m \bar{w}_i \quad (8)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(BW)_i}{W_i} \quad (9)$$

式中,  $b_{ij}$ ——第  $i$  行,第  $j$  列的矩阵因子;

$m$ ——选取的类别个数;

$\bar{w}_i$ ——评价得分;

$w_i$ ——归一化结果,即权重;

$B$ —— $n \times n$  阶判断矩阵;

$W_i$ ——权重向量;

$(BW)_i$ ——矩阵  $B$  与向量  $W$  相乘所得列向量中的第  $i$  个元素;

$\lambda_{\max}$ ——最大特征值。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 环境负荷指标分析

##### 3.1.1 材料生产阶段环境负荷的对比

就生产阶段而言,不可再生资源耗竭潜力(ADP)、全球变暖潜力(GWP)、酸化效应(AP)最大的是镁合金,铝合金与钢铁材料所造成的上述 3 环境影响分别比镁合

金低 98.90% 和 99.21%、59.41% 和 94.87%、64.25% 和 99.50%;光化学烟雾(POCP)、人体健康损害(HTP)最大的是铝合金,镁合金与钢铁材料所造成的这两类环境影响分别比铝合金低 36.06% 和 99.62%、48.13% 和 99.92%。总体而言,在材料生产阶段,镁合金所造成的环境负荷最高,其次是铝合金,钢铁最低分别比镁合金、铝合金低 97.17% 与 57.20%,如图 3 所示。

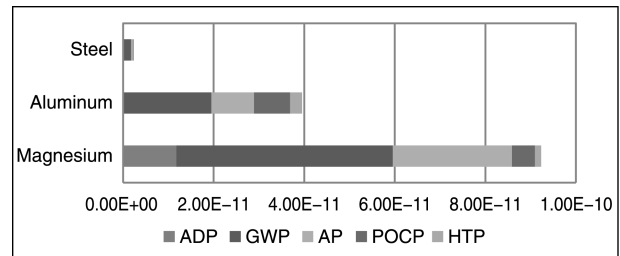


图 3 金属材料生产阶段环境负荷对比

Fig. 3 Comparison of environmental load between the three metals in the manufacturing phase

##### 3.1.2 部件使用阶段环境负荷的对比

由于钢铁制部件的重量大于铝合金和镁合金部件,所以在部件使用(即汽车行驶)阶段,钢铁制部件的耗油量高于铝合金制和镁合金制部件的耗油量,由此造成的环境负荷也高于铝合金制和镁合金制部件,如图 4 所示。

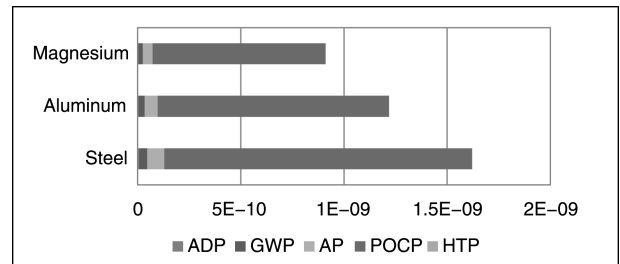


图 4 3 种金属材料使用阶段环境负荷对比

Fig. 4 Comparison of environmental load between the three metals in the use phase

由图 4 可知,钢铁制部件在使用阶段所造成的各单一类型环境影响与总环境影响均最大。镁合金制与铝合金制部件在使用阶段所造成的 POCP、ADP、GWP、AP、HTP 分别比钢铁制部件低 43.86% 和 25.01%、44.02% 和 24.94%、43.85% 和 24.71%、42.54% 和 24.89%、44.61% 和 24.89%;此外,钢铁制部件在使用阶段所造成的总环境影响比铝合金制与镁合金制部件分别高 78.40% 和 33.10%。

##### 3.1.3 部件回收阶段环境负荷的对比

回收阶段环境负荷最高的是镁合金制部件,这是因为镁合金中含有氧化物成分,因此,在镁合金废料再使



用前必须进行成分调整,以满足相应的使用需求。在回收处理过程中,无论是熔剂法熔炼还是无熔剂法熔炼都需要使用 $\text{SF}_6$ 、 $\text{SO}_2$ 等含硫保护气体防止熔体氧化,而这些防护物质的使用会对环境产生极大的损害。总体而言,镁合金的回收再生过程比铝合金和钢铁更为复杂,其相应环境负荷也远高于二者。铝合金与钢铁在回收阶段所造成的环境负荷分别比镁合金低80.44%和89.82%,如图5所示。

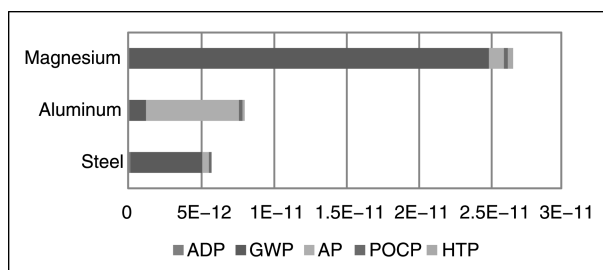


图5 3种金属材料回收阶段环境负荷对比

Fig. 5 Comparison of environmental load between the three metals in the recycling phase

### 3.1.4 部件全生命周期环境影响分析

如图6所示,在整个生命周期过程中,钢铁制部件的环境负荷最大,其次是镁合金制部件,铝合金制部件的环境负荷最小,分别比镁合金和钢铁低10.68%和22.59%。

几种环境影响类型的大小如下关系:  $\text{POCP} > \text{GWP} > \text{AP} > \text{ADP} > \text{HTP}$ 。在镁合金的生命周期环境影响中, POCP

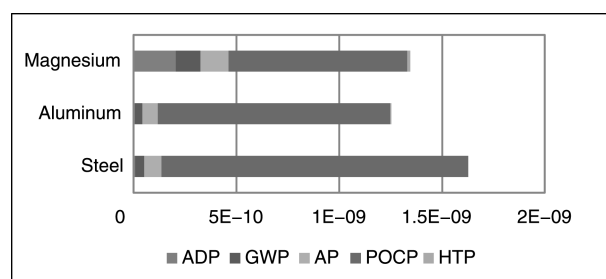


图6 不同环境影响类型间的对比

Fig. 6 Comparison of different environmental impact categories

占总环境影响的56.84%, GWP 占总环境影响的22.78%, AP 占总环境影响的15.30%, ADP 总环境影响的4.57%, 其余部分是HTP。在铝合金的生命周期环境影响中, POCP 占总环境影响的82.77%, GWP 占总环境影响的7.84%, AP 占总环境影响的9.33%, ADP 与HTP 均较小。在钢铁材料的生命周期环境影响中, POCP 占总环境影响的84.44%, GWP 占总环境影响的7.19%, AP 占总环境影响的8.22%, ADP 与HTP 均较小。

### 3.2 性能指标分析

#### 3.2.1 性能-需求矩阵的建立

根据汽车对材料性能的基本需求,确定了汽车前端部件的不同需求 $R_i$ 及其在生态设计中的相对重要程度 $wR_i$ ,从而建立了可表示二者间相互关联的需求-性能矩阵,如表3所示。

表3 汽车前端部件需求与材料性能的对应权重

Table 3 Weighting factors between requirement and performance towards automobile front part

	Weighting factor	Density	Elasticity modulus	Tensile strength	Yield strength	Poisson ratio	Extensibility
Deformation resistance	50%	—	20%	30%	30%	10%	10%
Light-weighting	20%	100%	—	—	—	—	—
Durability	15%	—	60%	—	—	20%	20%
Machine-shaping	15%	—	20%	—	—	40%	40%
Performance factor	100%	20%	22%	15%	15%	14%	14%

#### 3.2.2 单一化性能指标的对比

通过由性能-需求矩阵所获得的权重因子对模糊化后的各项性能数据进行加权求和,得到铝、钢、镁3种金属材料用于汽车前端部件的单一化性能指标分别为0.715、0.774、0.745,如图7所示。就应用于汽车前端部件而言,钢铁材料的综合性能优于铝合金和镁合金,其单一化的性能指标分别比铝合金和镁合金高8.25%和3.89%。

### 3.3 零部件生态设计结果

#### 3.3.1 基于模糊矩阵的生态设计结果

为了使3个矩阵能够在同一维度上进行定量比较与

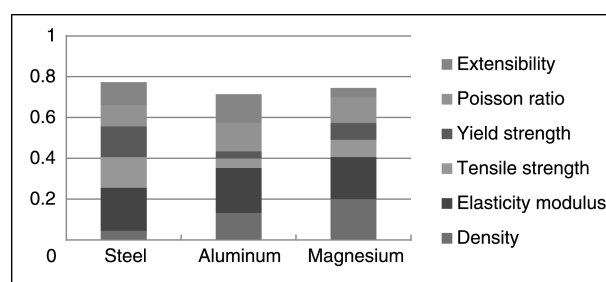


图7 3种金属材料的综合性能指标值对比

Fig. 7 Comparison of the integrated performance indicator between the three metals

加权求和, 进行模糊化处理如下: 对性能子矩阵进行归一化处理, 得到矩阵  $U_1 = (U_{11}, U_{12}, U_{13}) = (\text{铝合金}, \text{钢铁}, \text{镁合金}) = (0.320, 0.347, 0.333)$ ; 在生态设计中, 环境负荷与经济成本属于“越小越好”的设计因素, 因此需对二者进行取倒归一化处理(即对其倒数进行归一化), 得到环境影响矩阵  $U_2 = (U_{21}, U_{22}, U_{23}) = (\text{铝合金}, \text{钢铁}, \text{镁合金}) = (0.374, 0.292, 0.334)$ , 经济成本矩阵  $U_3 = (U_{31}, U_{32}, U_{33}) = (\text{铝合金材料}, \text{钢铁材料}, \text{镁合金材料}) = (0.339, 0.313, 0.348)$ 。3 种材料的评价矩阵可统一表示为式(10):

$$U = \begin{pmatrix} 0.320 & 0.347 & 0.333 \\ 0.374 & 0.292 & 0.334 \\ 0.339 & 0.313 & 0.348 \end{pmatrix} \quad (10)$$

对于汽车前端部件这一应用情景, 材料性能对部件需求的满足为设计的首要考虑因素, 其次为环境负荷与经济成本。在这一总原则下, 采用层次分析法对 3 项设计因素进行两两对比, 其结果如表 4 所示。

表 4 生态设计三要素之间的重要性标度

Table 4 Importance indicators of the three eco-design essences in this study

	Physical performance	Environmental load	Economic cost
Physical performance	1	2	2
Environmental load	0.5	1	1
Economic cost	0.5	1	1

以表 4 中的标度为基础, 按照公式(5)、(6)计算得到  $w_1 = (1 \times 2 \times 2) / 3 = 1.58$ ,  $w_2 = (0.5 \times 1 \times 1) / 3 = 0.79$ ,  $w_3 = (0.5 \times 1 \times 1) / 3 = 0.79$ , 以及归一化结果  $A_1 = 0.5$ ,  $A_2 = 0.25$ ,  $A_3 = 0.25$ 。进而得到材料性能、环境影响、经济成本的权重值分别为 0.5、0.25、0.25, 相应综合评价结果可表示为式(11):

$$(S_1, S_2, S_3) = (0.338, 0.325, 0.337) \quad (11)$$

式中,  $S_1$  为铝合金材料生态设计综合评价结果,  $S_2$  为钢铁材料生态设计综合评价结果,  $S_3$  为镁合金材料生态设计综合评价结果。

依据最大隶属度原则可知, 铝合金的生态设计评价结果优于镁合金与钢铁。此外, 若采用等权重方法对各项设计要素进行加权求和, 则计算结果为:  $S = (S_1, S_2, S_3) = (0.345, 0.317, 0.338)$ , 可知  $S_1 > S_3 > S_2$ ; 这一结果同样显示出选用铝合金制造汽车零部件比选用镁合金与钢铁更符合生态设计的理念。

### 3.3.2 基于传统生态设计思想的设计结果

为了表现本研究结果对生态设计方法的敏感性, 在不考虑经济成本的情况下, 采用传统的生态设计方法对

3 种材料进行了定量分析, 选取  $W = P/I$  为评价基准(其中,  $P$  表示材料的使用性能,  $I$  表示材料的环境影响), 其意义为单位环境负荷所产生的性能回报。

镁合金的综合评价指标  $W_1 = P_1/I_1 = 3.18E+09$ , 铝合金的综合评价指标  $W_2 = P_2/I_2 = 3.42E+09$ , 钢铁综合评价指标  $W_3 = P_3/I_3 = 2.88E+09$ 。由此可见, 与基于模糊矩阵的生态设计评价结果相一致, 传统生态设计评价结果也支持了铝合金优于镁合金与钢铁这一趋势。两种设计思想结果的一致性, 增加了选用铝合金制造汽车零部件最符合生态设计理念这一结论的可靠性。

## 4 结 论

通过对铝、钢、镁 3 种金属材料在典型汽车零部件中应用的性能-环境-经济多设计指标进行综合分析, 本文尝试性地提出了面向实际应用的金属材料生态设计方法及其实践步骤, 所得结论如下:

(1) 3 种材料的性能对比结果显示, 钢铁的综合性能优于铝合金与镁合金, 其性能单一化指标分别比铝合金与镁合金高 8.25% 和 3.89%。

(2) 在所设定的系统边界内, 钢铁的生命周期环境负荷最高, 其次是镁合金, 铝合金的环境负荷最低, 分别比镁合金与钢铁低 10.68% 和 22.59%。

(3) 与钢铁和镁合金相比, 将铝合金应用于汽车前端部件制造更符合生态设计的理念。

## 参考文献 References

- [1] Qian Yi (钱易). *Bulletin of Chinese Academy of Sciences* (中国科学院院刊) [J], 2012, 3: 307-313.
- [2] Chen Qi (陈琦). *Automobile and Parts* (汽车与配件) [J], 2014, 18: 69-71.
- [3] Cai Ming (蔡明), Hu Qiaosheng (胡巧声), Wen Yuanyuan (温媛媛). *Automobile and Parts* (汽车与配件) [J], 2014, 23: 54-57.
- [4] Fan zijie (范子杰), Gui Liangjin (桂良进), Su ruiyi (苏瑞意). *Journal of Automotive Safety and Energy* (汽车安全与节能学报) [J], 2014, 5(1): 1-16.
- [5] Peng Fei (彭斐). *Automobile and Parts* (汽车与配件) [J], 2014, 10: 43-45.
- [6] Shang Xuemei (尚雪梅), Ren Xiaoli (任晓莉), Han Haiyan (韩海燕), et al. *Science and Technology Vision* (科技视界) [J], 2014, 33: 116.
- [7] Dong Li (董丽). *Information of advanced materials* (现代材料动态) [J], 2014, (11): 2.
- [8] Ma Mingtu (马鸣图), Wu Emei (吴娥梅). *Advanced materials industry* (新材料产业) [J], 2014, 7: 15-19.
- [9] Sun B, Nie Z, Gao F, et al. *International Journal of Life Cycle*

- Assessment [J], 2015, 20(8): 1 048-1 060.
- [10] Gao F, Nie Z, Wang Z, et al. *International Journal of Life Cycle Assessment* [J], 2009, 14(5): 480-489.
- [11] Li G, Nie Z, Zhou H, et al. *International Journal of Life Cycle Assessment* [J], 2002, 7(4): 225-229.
- [12] Kim H, Wallington T. *Environmental Science and Technology* [J], 2013, 47: 6 089-6 097.
- [13] ISO International Standard 14040. *Environmental Management-Life Cycle Assessment-Principles and Framework*. International Organization for Standardization (ISO) 2006. Curran MA. Life Cycle Assessment: Principles and Practice. <http://www.Epa.gov/nrmrl/lcaccess/pdfs/600r06060.Pdf>. 2006.
- [14] Saur K. *International Journal of Life Cycle Assessment* [J], 1997, 2(2): 66-70.
- [15] Zeng Jianchun(曾建春), Cai Jianguo(蔡建国). *China Mechanical Engineering*(中国机械工程) [J], 2000, 11(9): 975-978.
- [16] Gong Xianzheng(龚先政), Zhang Qun(张群), Liu Yu(刘宇), et al. *Journal of Beijing University of Technology*(北京工业大学学报) [J], 35(7): 997-1 001.
- [17] Li Feilong(李飞龙), Guo Konghui(郭孔辉), Yang Yanping(杨沿平), et al. *China Mechanical Engineering*(中国机械工程) [J], 2013, 24(5): 681-685.
- [18] Han Li(韩利), Mei Qiang(梅强), Lu Yumei(陆玉梅), et al. *China Safety Science Journal*(中国安全科学学报) [J], 2004, 14(7): 86-89.
- [19] Saaty R W. *Mathematical Modeling* [J], 1987, 9(87): 161-176.
- (编辑 盖少飞)