

基于系统动力学模型的中国汽车工业 废杂铝回收分析

岳 强, 薛 梦, 张钰洁, 栗树朋
(东北大学 国家环境保护生态工业重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 通过建立系统动力学模型,对我国汽车工业废杂铝的回收情况进行分析.当汽车平均使用寿命为12年时,2025年我国废旧汽车年回收量为2 459.92万辆,汽车年回收铝含量为182.42万t;当汽车平均使用寿命为15年时,2025年我国废旧汽车年回收量为2 172.75万辆,汽车年回收铝含量为134.59万t,通过回收废旧汽车将节约铝土矿354.18万t.若提高汽车含铝加工材回收比例、汽车铸件年回收比例和汽车铸件年再制造比例,使其分别为0.9、0.61和0.3,2025年我国废旧汽车年回收铝含量为160.25万t.回收利用废旧汽车中的废杂铝将在一定程度上缓解我国铝资源短缺问题,同时降低废杂铝对外依赖程度.

关 键 词: 系统动力学;轻量化;废杂铝;回收量;模拟

中图分类号: TF 821 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2020)01-0068-06

Analysis of Waste Aluminum Recovery in China's Automobile Industry Based on System Dynamic Model

YUE Qiang, XUE Meng, ZHANG Yu-jie, LI Shu-peng
(State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: YUE Qiang, E-mail: yueq@smm.neu.edu.cn)

Abstract: Analysis of waste aluminum recovery in China's automobile industry was carried out by a system dynamic model. When the average service life of the automobile assumes to be 12 years, the annual recycling number of the used automobiles in China will be 24.599 2 million and the annual recovered aluminum weight from these automobiles will be 1.824 2 million tons in 2025. It would be 21.727 5 million for the annual recycling number and 1.345 9 million tons for the annual recovered aluminum if the average service life of the automobiles becomes 15 years. Meanwhile, there will be 3.541 8 million tons of bauxite saved from the recycling. After considering that the recycling ratio of aluminum-containing processed materials, the annual recycling ratio of automobile castings and the annual remanufacturing ratio of automobile castings are 0.9, 0.61 and 0.3, respectively, the annual recovered aluminum of the used automobiles can reach 1.602 5 million tons in 2025. It is very helpful to alleviate the shortage of aluminum resources in China and reduce the external dependence of waste scrap aluminum.

Key words: system dynamics; lightweight; waste aluminum; recovery; simulation

随着中国经济的发展和人们生活水平的逐步提高,汽车已成为人们生活中不可缺少的一部分.目前汽车趋于轻量化,由于铝金属具有密度小、抗腐蚀性强等优点,因此铝及其合金成为汽车行业的首选材料.2017年中国铝产量占全球铝产量的56.7%,但铝土矿相对匮乏,不足世界铝土矿的2.5%^[1].铝产量的急剧增长不仅造成了铝土矿等原材料供应的巨大缺口,同时也给资源、环境带来了巨大的压力.面对铝工业的发展现状,需要大量进口铝土矿等原材料,这给国家带来巨大的资源及经济压力,铝土矿的短缺也使我国废杂铝存在较大的市场;中国汽车销售量从2000年的

208.86 万辆增加至 2017 年的 2887.89 万辆. 由于我国汽车的平均使用年限大约为 15 年^[2], 因此未来几年我国报废汽车将大幅度增加, 将产生大量的废杂铝. 回收利用废旧汽车, 将在一定程度上缓解我国铝资源短缺问题.

目前, 许多专家学者对废旧汽车的回收利用进行了研究. Jenseit 等通过对比废旧汽车中塑料的回收方式和方法, 认为废旧汽车的大块塑料应粉碎后再回收, 小块塑料应作为能源进行回收^[3]; Ohno 等根据各国对汽车回收利用率的要求, 通过不断改进汽车回收利用技术, 提高了废旧金属和非金属的回收利用率^[4]; 丁涛等通过对废旧汽车材料以及拆解零部件的分析, 提出了一条适合中国国情的废旧汽车拆解处理的一体化解决方案^[5]; Tian 等利用层次分析法对汽车拆解的经济性进行了分析, 结果显示人工拆解可以有效提高废旧汽车的回收利用率^[6].

基于汽车轻量化趋势, 铝金属在汽车中的比重越来越大, 因此将会产生大量废杂铝, 回收利用废杂铝有利于缓解我国资源短缺问题, 减少环境污染, 同时可以节约生产成本, 减少物料的消耗. 由于影响汽车销量以及废杂铝回收量的因素较多, 本文将通过系统动力学方法建立复杂的流位、流率系统, 形成反馈回路, 通过建立各因素之间的函数关系式, 分析各因素对我国未来汽车销量、废旧汽车以及废杂铝回收量等的影响, 为废旧汽车中废杂铝的回收提供科学依据.

1 系统动力学模型的建立

1.1 系统边界

本研究主要分析报废汽车中废杂铝的回收情

况, 并且通过模型预测未来废旧汽车回收量以及废杂铝的回收量. 模型设定的时间为 2000 年 ~ 2025 年, 因为从 2000 年开始数据较为完整, 能保证数据的准确性. 2014 年以来新能源汽车在我国汽车中使用比重越来越大, 但由于汽车的平均使用寿命约为 15 年, 相比于传统动力型汽车, 到 2025 年只有少量的新能源汽车报废, 可以忽略不计, 因此本文研究对象主要为传统动力型汽车. 时间步长的选取决定了系统求解的精度: 时间步长越小, 精度越高, 但是如果时间步长太小, 会浪费计算资源, 选择合适的时间步长对系统的模拟至关重要. 时间步长一般选取 0.1 ~ 1 倍的最小时间常数(最小常数的倒数), 本模型中最小常数为 0.19, 因此时间步长选取 1 年.

1.2 建立流位、流率系统

系统动力学是美国麻省理工学院的福瑞斯特(Forrester)教授在 1956 年提出的, 最早应用于工业管理方向, 被称为“工业动力学”. 系统动力学是通过对实际系统进行建模, 形成高阶次、多回路和非线性的反馈结构, 并根据此模型进行仿真模拟的过程^[7].

废旧汽车的回收利用系统主要由汽车的年回收量、汽车年回收铝含量等相关因素构成, 共同决定了汽车年回收铝量, 其流量图如图 1 所示. 该模型中主要包括水平变量、速率变量、表函数、延迟函数、辅助变量以及常量, 各个变量之间存在一定的函数关系, 其函数关系如表 1 所示.

1.3 系统主要参数确定

对于汽车的平均使用寿命, 由于汽车的报废并不是集中于某一时间完成的, 而是较为分散的, 通过统计我国汽车的报废年限(即基于汽车使用寿命的报废高峰期), 汽车的使用寿命符合威布

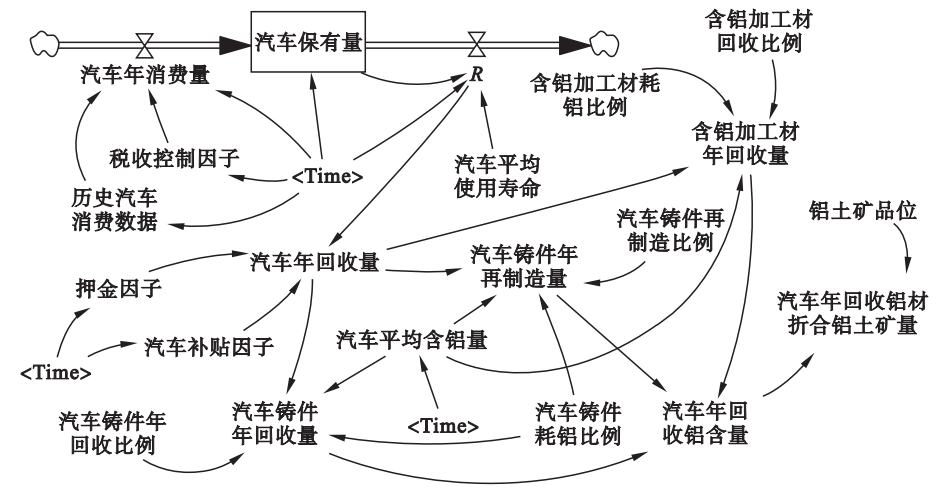


图 1 汽车回收利用系统流量图
Fig. 1 System flow diagram of the automobile recycling

表 1 汽车回收利用系统的变量名称及函数关系式
Table 1 Variables and functions in the automobile recycling system

变量名称	单位	方程及参数
Time	年	2000 ~ 2025 年
汽车年回收铝量	万 t	含铝加工材年回收量 + 汽车铸件年再制造量 + 汽车铸件年回收量
汽车年回收铝材折合铝土矿量	万 t	汽车年回收铝含量 × 铝土矿品位 ⁻¹
汽车平均含铝量 ^[8]	t·辆 ⁻¹	WITHLOOKUP(Time) ([(1990,0) — (2025,0.5)], (1990,0.05), (1995,0.076 6), (2000,0.1), (2005,0.15), (2010,0.18), (2015,0.24), (2020,0.264), (2025,0.301))
汽车保有量	辆	INTEG(IF THEN ELSE(Time < = 2010, 汽车年消费量 - R, 1.2 × (汽车年消费量 - R)) (6 253 300))
汽车年消费量	辆	IF THEN ELSE(Time < = 2017, 汽车年消费量历史数据, 10 000 × (0.147 9 × (Time - 2000) ³ + 11.675 × (Time - 2000) ² - 61.934 × (Time - 2000) + 443.33) × 税收控制因子)
速率变量 R	—	IF THEN ELSE(Time < = 2020, 汽车保有量 × 汽车使用寿命 ⁻¹ , 1.2 × 汽车保有量 × 汽车使用寿命 ⁻¹)
汽车年消费量历史数据 ^[8]	辆	WITHLOOKUP(Time) ([(2000, -400 000) — (2025,4e + 7)], (2000,2.088 62e + 6), (2001,2.363 67e + 6), (2002,3.248 03e + 6), (2003,4.390 81e + 6), (2004,5.071 06e + 6), (2005,5.758 19e + 6), (2006,7.215 97e + 6), (2007,8.791 5e + 6), (2008,9.381 5e + 6), (2009,1.364 48e + 7), (2010,1.806 19e + 7), (2011,1.850 51e + 7), (2012,1.930 64e + 7), (2013,2.198 41e + 7), (2014,2.349 19e + 7), (2015,2.459 76e + 7), (2016,2.802 82e + 7), (2017,2.887 89e + 7))
税收控制因子 ^[9]	—	WITHLOOKUP(Time) ([(2000,0) — (2025,2)], (2000,1), (2005,1), (2010,1), (2015,0.9), (2020,0.9), (2025,0.8))
押金因子 ^[9]	—	WITHLOOKUP(Time) ([(2000,0) — (2025,1)], (2000,0.3), (2005,0.3), (2010,0.3), (2015,0.43), (2020,0.48), (2025,0.55))
汽车补贴因子 ^[9]	—	WITHLOOKUP(Time) ([(2000,0) — (2025,1)], (2000,0.3), (2005,0.3), (2010,0.3), (2015,0.56), (2020,0.61), (2025,0.63))
汽车年回收量	万 t	IF THEN ELSE(押金因子 > = 汽车补贴因子, 押金因子 × R, 汽车补贴因子 × R)
含铝加工材年回收量	万 t	DELAY1I(含铝加工材耗铝比例 × 含铝加工材回收比例 × 汽车平均含铝量 × 汽车年回收量, 15, 2000)
汽车铸件年回收量	万 t	DELAY1I(汽车铸件耗铝比例 × 汽车平均含铝量 × 汽车年回收量 × 汽车铸件年回收比例, 15, 2000)
汽车铸件年再制造量	万 t	DELAY1I(汽车铸件耗铝比例 × 汽车平均含铝量 × 汽车年回收量 × 汽车铸件年再制造比例, 15, 2000)

注: WITHLOOKUP(Time) 为表函数; INTEG(IF THEN ELSE...) 为水平变量; DELAY1I 为延时函数。

尔分布模型^[9]:

$$f(t) = \lambda \beta (\lambda t)^{\beta-1} \exp(-(\beta t)^\beta), \quad (1)$$

$$\lambda = T^{-1} \exp(\beta^{-1} \lg(\frac{\beta-1}{\beta})). \quad (2)$$

式中: T 为汽车平均使用寿命; λ 为尺度参数; β 为形状参数。

在威布尔分布模型中, 根据我国汽车寿命的分布对 β 进行取值, 由于我国的汽车寿命呈负偏山状^[10], 因此取 β 大于 3.6, 本研究取 β 等于 4^[10-11]. 通过威布尔分布模型以及数据调研可知, 当汽车的平均使用寿命为 15 年时, 汽车使用过程的能耗以及排放对环境的影响较小. 在本研究中将分析平均使用寿命对废杂铝回收量及铝金属消

耗的影响.

据统计, 目前我国汽车含铝加工材回收比例、汽车铸造年回收比例和汽车铸件年再制造比例分别为 72%、61% 和 19%, 我国的废杂铝的回收量不足整车铝含量的 80%^[12], 与发达国家的回收利用效率相差较大. 本文将分析不同的回收比例对废杂铝回收量的影响.

由于受 Vensim 软件本身的限制, 模型在运行过程中存在误差^[13], 早在 1961 年, 对系统动力学模型进行检验的方法就被提出^[14]. 为确保模型运行结果与实际数值相符合, 本文运用所构建模型进行了汽车保有量的实际值、理论值及偏离度的精度检验, 计算偏离值 (- 7.9% ~ 8.5%) 均介于

-10% ~10% 之间,证明该模型的吻合性较好,符合实际情况,适合用于废旧汽车的回收利用分析.以汽车使用寿命为例,通过计算汽车年回收量和年回收铝量可知,各个年限的灵敏度均集中于 0.4 ~0.8 之间,而且汽车使用寿命的改变,对系统因变量的灵敏度影响基本一致.因此认为该模型具有正确性和可操作性,能够用来分析汽车在整个生命周期中铝金属的代谢情况.

2 情景模拟结果与分析

由中国汽车工业年鉴可知,2000 ~2017 年我国汽车销售量逐年增加,并且从 2005 年开始增长幅度明显加快;通过系统动力学模型预测可知,我国汽车数量将呈持续增长的趋势,汽车的销量主要受税收因子、汽车千人保有量等相关因素的影响,通过研究发现我国的汽车保有量沿着龚伯斯 (Gompertz) 曲线的轨迹变化^[15],汽车保有量模型为

$$V(t) = V^* \times \exp(-b \times \exp(-c \times (t - t_0))). \quad (3)$$

式中: V^* 为汽车千人保有量的饱和值; b 为刻画曲线形状的参数; c 为刻画曲线斜率的参数; t_0 为参考时间.

汽车保有量受经济、环境、政策等多种因素影响,我国汽车千人保有量范围为 150 ~ 500 辆, Gompertz 拟合曲线中 $b=4.7, c=0.07$ ^[9]. 我国汽车年消费量主要受政策、经济、人口等相关因素影响.由于受众多因素影响,因此汽车的年销售量将处于动态区间中,假设在模型中汽车的生产量无存量,即产量等于销量,其模拟结果如图 2 所示,2025 年我国汽车销量将处于 4 251.40 万辆 ~ 6 802.23 万辆之间.

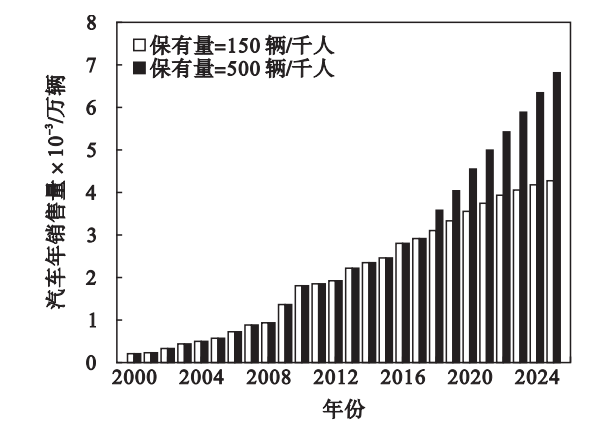


图 2 我国 2000—2025 年汽车消费情况
Fig. 2 Automobile consumption in China during the period of 2000—2025

2.1 平均使用寿命对废杂铝回收及铝金属消耗的影响

汽车平均使用寿命是影响废旧汽车报废量的主要因素,并且直接影响我国废旧汽车的回收数量,同时也会增加我国汽车的产销量.本文分别取汽车平均使用寿命为 $T=12$ 和 $T=15$,分析其对我国废旧汽车年回收量和废旧汽车年回收铝含量的影响,如图 3 所示.

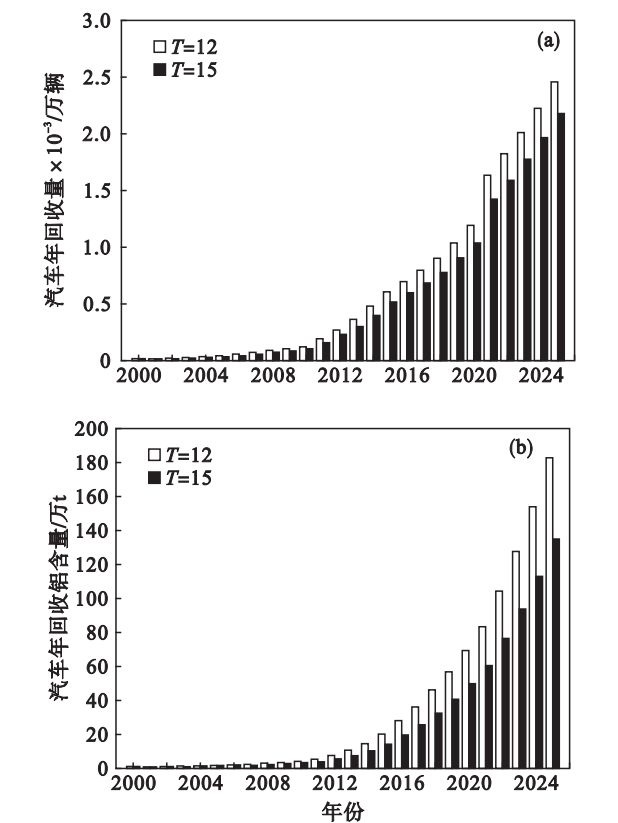


图 3 平均使用寿命对废旧汽车年回收量及废旧汽车回收铝含量的影响
Fig. 3 Influences of average service life on the annual recycling amount and aluminum content of used automobiles
(a)—汽车年回收量; (b)—汽车年回收铝含量.

当汽车平均使用寿命为 12 年时,到 2025 年我国废旧汽车年回收量为 2 459.92 万辆,汽车年回收铝含量为 182.42 万 t;当汽车平均使用寿命为 15 年时,到 2025 年我国废旧汽车年回收量为 2 172.75 万辆,汽车年回收铝含量为 134.59 万 t,假设铝土矿的品位为 0.38,因此将节约铝土矿 354.18 万 t.若将汽车平均使用寿命缩短为 12 年,到 2025 年汽车的报废量将增加 287.17 万辆,相当于我国汽车生产量将增加 287.17 万辆,消耗金属铝为 86.44 万 t;而缩短汽车平均使用寿命,汽车年回收铝含量仅增加了 47.82 万 t,因此延长汽车使用寿命更有利于节约资源和能源.

2.2 回收/再制造比例对废杂铝回收的影响

由上述分析可知,汽车平均使用寿命越长,越有利于节约资源和能源. 设汽车的平均使用寿命 $T=15$ 年,通过改变汽车含铝加工材回收比例、汽车铸件年回收比例以及汽车铸件年再制造比例,分析其对我国汽车年回收铝含量影响. 假设模式一为汽车含铝加工材回收比例 $=0.72$ 、汽车铸件年回收比例 $=0.61$ 、汽车铸件年再制造比例 $=0.19$;模式二为汽车含铝加工材回收比例 $=0.9$ 、汽车铸件年回收比例 $=0.61$ 、汽车铸件年再制造比例 $=0.3$. 在系统动力学模型中,分别分析两种模式对汽车年回收铝含量的影响,如图 4 所示.

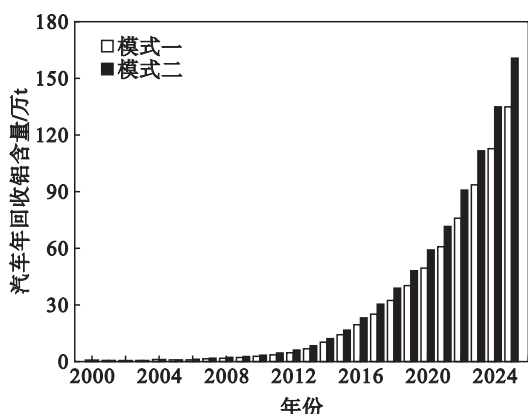


图 4 我国 2000—2025 年汽车年回收铝含量

Fig. 4 Annual recovered aluminum weight from the used automobiles during the period of 2000—2025 in China

由图 4 可知,在模式一下,到 2025 年我国的废旧汽车年回收铝含量为 134.59 万 t;在模式二下,到 2025 年我国的废旧汽车年回收铝含量为 160.25 万 t. 相比较两种模式,模式二回收废杂铝量比模式一多 25.66 万 t,假设铝土矿的品位为 0.38,因此模式二将节约铝土矿 67.52 万 t. 因此,提高废旧汽车含铝加工材回收比例以及汽车铸件年再制造比例等将会增加废杂铝的年回收量,可以有效减少铝土矿的消耗量,并且可以减少铝土矿开采造成的环境污染以及开采成本.

2.3 分析与讨论

通过分析可知,增加汽车的平均使用寿命将减少我国汽车工业对铝土矿的使用量,达到节约资源、能源,减少成本的目的. 但是,汽车的使用寿命受诸多因素的影响,由于汽车的老化,汽车的动力性能、经济性等都会下降,并且汽车的排放将会超标. 如果无限制地延长汽车平均使用寿命,汽车耗油量将增加,并且维修次数也会大幅度增加,增加了其成本的损耗,同时会造成严重的环境问题和噪音问题. 面对汽车老化问题,我国应该通过提

高科技水平,提高汽车发动机的使用性能,增强轮胎的耐磨系数等,以此提高我国汽车的平均使用寿命,达到节约资源、能源,保护环境的目的. 当汽车的使用寿命一定时,通过改变汽车含铝加工材的回收比例以及汽车铸件年再制造比例等,以增加我国废旧金属的回收量,减少资源和能源的浪费.

本研究主要以传统动力型汽车为主,但由于资源与环境形势变得越来越严峻,因此新能源汽车已成为低碳经济的重要组成部分,新能源汽车的使用能够有效推动经济的可持续发展,改善环境,解决能源的供需矛盾. 新能源汽车的发展主要涉及动力电池和汽车轻量化材料两个方面^[16],随着新能源汽车的推广,将会给我国铝工业带来更大的压力. 2016 年我国新能源汽车产量已达 51.7 万辆,在政府不断出台补贴政策的情况下,我国新能源汽车将会保持年复合增速约 35%,预计到 2025 年,我国新能源汽车将会达到 770 万辆. 由于使用轻金属可以有效减轻汽车质量,预期每辆新能源汽车用铝量将达到 630 kg,其铝含量远远高于传统动力型汽车,由于汽车的使用寿命有限,汽车报废后将会产生更多的废杂铝,回收再利用废旧汽车将有效缓解我国铝资源短缺问题.

3 结 语

通过模拟分析得到,提高汽车的平均使用寿命将有效减少我国铝资源的消耗,并且提高回收以及再制造比例能够有效增加我国废杂铝的回收量. 当汽车平均使用寿命为 12 年时,2025 年我国废旧汽车年回收量为 2 459.92 万辆,汽车年回收铝含量为 182.42 万 t;当汽车平均使用寿命为 15 年时,2025 年我国废旧汽车年回收量为 2 172.75 万辆,汽车年回收铝含量为 134.59 万 t. 若提高汽车含铝加工材回收比例、汽车铸件年回收比例和汽车铸件年再制造比例,使其分别为 0.9、0.61 和 0.3,2025 年我国废旧汽车年回收铝含量为 160.25 万 t.

我国应该提高汽车发动机的使用性能,提高轮胎、齿轮等的耐磨系数以提高汽车的使用寿命,进而减少铝资源的消耗量;其次我国政府应该建立健全废旧汽车回收利用法律法规,将废旧汽车回收利用纳入正轨,同时,我国政府应该鼓励汽车行业生产易拆卸零件,并且要求汽车制造厂能够回收利用其零部件,以提高汽车铸件的回收率以及年再制造比例,提高废旧金属的回收量.

参考文献：

[1] International Aluminium Institute. Statistics [EB/OL]. (2018 - 08 - 15) [2019 - 01 - 15]. <http://www.world-aluminium.org/statistics>.

[2] Yue Q, Wang H M, Lu Z W, et al. Analysis of anthropogenic aluminum cycle in China [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, 24 : 1134 - 1144.

[3] Jenseit W, Stahl H, Wollny V, et al. Recovery options for plastic parts from end-of-life vehicles; an eco-efficiency assessment [EB/OL]. (2003 - 03 - 12) [2018 - 01 - 16]. <https://www.oeko.de/oekodoc/151/2003-039-en.pdf>.

[4] Ohno H, Matsubae K, Nakajima K, et al. Unintentional flow of alloying elements in steel during recycling of end-of-life vehicles [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2014, 18 (2) : 242 - 253.

[5] 丁涛, 曾庆禄. 基于资源再生的废旧汽车回收利用研究 [J]. 环境工程, 2014 (sup1) : 721 - 724.
(Ding Tao, Zeng Qing-lu. Study on recycling and utilization of scrap automobile for resource reusing [J]. *Environmental Engineering*, 2014 (sup1) : 721 - 724.)

[6] Tian J, Chen M. Assessing the economics of processing end-of-life vehicles through manual dismantling [J]. *Waste Management*, 2016, 56 : 384 - 395.

[7] Zhang T L, Zheng M Q, Zhang Z M. Quantitative study on characteristics of the Weibull distribution [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1999, 8 (4) : 357 - 363.

[8] 中国汽车技术研究中心. 中国汽车工业年鉴 1991—2018 [M]. 北京 : 中国汽车工业协会, 2018.
(Chinese Automotive Technology & Research Centre. China automotive industry yearbook 1991—2018 [M]. Beijing : China Automotive Industry Association, 2018.)

[9] 黄宁宇. 中国汽车行业钢铁动态物质流代谢研究 [D]. 北京 : 清华大学, 2012.
(Huang Ning-ning. Iron and steel material flow metabolism in China automobile industry [D]. Beijing : Tsinghua University, 2012.)

[10] Brunner P H, Rechberger H. Practical handbook of material flow analysis [M]. Boca Raton : Lewis Publishers, 2004 : 15 - 19.

[11] Melo M T. Statistical analysis of metal scrap generation; the case of aluminium in Germany [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 1999, 26 (2) : 91 - 113.

[12] 谢林明. 汽车报废回收阶段生态评价及其软件开发 [D]. 长沙 : 湖南大学, 2017.
(Xie Lin-ming. Ecological assessment of recycling of end-of-life vehicles and the relevant software development [D]. Changsha : Hunan University, 2017.)

[13] Peterson D W, Eberlein R L. Reality check; a bridge between systems thinking and system dynamics [J]. *System Dynamic Review*, 1994, 10 (2/3) : 159 - 174.

[14] Ford D N, Sterman J D. Dynamic modeling of product development processes [J]. *System Dynamics Review*, 1998, 14 (1) : 31 - 68.

[15] 赵红梅. 基于 Gompertz 曲线模型之上的中国千人汽车保有量中长期预测 [J]. 工业技术经济, 2012 (7) : 7 - 23.
(Zhao Hong-mei. The medium and long term forecast of China's vehicle stock per 1000 person based on the Gompertz model [J]. *Journal of Industrial Technological Economics*, 2012 (7) : 7 - 23.)

[16] 李龙, 夏承东, 宋友宝, 等. 铝合金在新能源汽车工业中的应用现状及展望 [J]. 轻铝合金加工技术, 2017, 45 (9) : 18 - 26.
(Li Long, Xia Cheng-dong, Song You-bao, et al. Application status and outlook of aluminum alloys in new energy vehicles [J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2017, 45 (9) : 18 - 26.)