

DOI: 10.5846/stxb201507301605

王昶, 魏美芹, 姚海琳, 左绿水. 我国 HEV 废旧镍氢电池包中稀贵金属资源化利用环境效益分析. 生态学报, 2016, 36(22): - .

Wang C, Wei M Q, Yao H L, Zuo L S. Environmental Benefit Analysis of Resource Utilization of Precious Metals in HEV Spent Ni-MH Battery Packs in China. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): - .

我国 HEV 废旧镍氢电池包中稀贵金属资源化利用环境效益分析

王 昶^{1,2}, 魏美芹¹, 姚海琳^{1,2,*}, 左绿水¹

1 中南大学商学院, 长沙 410083

2 中南大学金属资源战略研究院, 长沙 410083

摘要: 废旧动力电池包中含有丰富的镍、钴、稀土等稀贵金属, 其资源化利用是实现混合动力汽车 (Hybrid Electrical Vehicle, 简称 HEV) 全生命周期绿色化管理的重要内容之一。随着 HEV 的不断发展, 动力电池包将在未来几年逐渐进入批量报废阶段, 其资源化利用的环境效益成为值得关注的问题。鉴于此, 以丰田混合动力汽车镍氢电池包为研究对象, 利用 GREET 模型和 LIME 值法测算出, 相比于原生矿开采, 单位废旧镍氢电池包中稀贵金属资源化利用所产生的环境效益为 1083 元; 根据报废周期, 对我国市场上现存的 HEV 镍氢电池包的将来报废情况进行预测。结果表明, 这些电池包将从 2018 年开始迎来报废, 在 2021 年达到报废高峰, 至 2024 年基本完成报废; 预计其稀贵金属资源化利用的环境效益, 可累计达 9421 万元。最后, 提出了加强废旧动力电池回收体系和资源化利用体系建设的政策建议。

关键词: HEV 废旧镍氢电池包; 稀贵金属; 环境效益; GREET 模型; LIME 值法

Environmental Benefit Analysis of Resource Utilization of Precious Metals in HEV Spent Ni-MH Battery Packs in China

WANG Chang^{1,2}, WEI Meiqin¹, YAO Hailin^{1,2,*}, ZUO Lushui¹

1 Business School, Central South University, Changsha 410083, China

2 Institute of Metal Resources Strategy, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: In recent years, the Chinese government has committed to promoting the use of energy-saving and alternative energy vehicles, aiming to reduce dependency on oil imports and address the air pollution problem. Hybrid electric vehicles (HEV) have been developed in China since 2012. As a key component of hybrid electric vehicles, Ni-MH batteries have entered its mature period and should be replaced 2—3 times during the life of a HEV. Spent Ni-MH power battery packs contain a wealth of rare metals (e.g., nickel, cobalt and rare earth). The green utilization of these spent Ni-MH batteries is important because of their environmental value. With the gradual popularization of the HEV, the volume of spent Ni-MH power battery packs will increase over the coming years. The environmental benefits of utilizing waste Ni-MH power batteries will therefore become an important topic. Many studies have explored the environmental impact of utilization of power batteries, but few of them have conducted quantitative research on the environmental benefits of the utilization of precious metals from these batteries. For this reason, they cannot recommend specific policies for use in the future development of the HEV industry in China. To fill this gap, this study calculated the energy-saving and emission reduction effects of resourceful

基金项目: 国家社会科学基金重大项目 (14ZB136); 国家社会科学基金项目 (13BGL105, 13CJY029, 14BGL196); 湖南省软科学项目 (2013ZK2003, 2013ZK3025)

收稿日期: 2015-07-30; 修订日期: 2016-03-24

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yaohailin14703@163.com

utilization of three precious metals (nickel, cobalt, rare earth) from HEV Ni-MH battery packs, with the application of the GREET model proposed by the Argonne National Laboratory in the United States. In this paper, energy consumption, greenhouse gas, acid gas, and dust particles were used as indexes to calculate energy-saving emission reduction effects. The Ni-MH battery pack of the Toyota HEV was selected as a representative model, as it is currently dominating the market. The results reveal that the per unit resourceful utilization of the three precious metals in the HEV Ni-MH battery pack can save 5777 MJ of energy and prevent the emission of 435,627 g of greenhouse gas, 18,584 g of acidic gas, 138 g PM_{2.5}, and 304 g PM₁₀, when compared to primary ore mining. This saved energy and reduced emissions can be converted into environmental benefits of 1083 Yuan using the LIME value method. We took 2012 as a baseline year for predicting the number of spent HEV Ni-MH battery packs in China because China's HEV industry has developed rapidly since 2012, and many Ni-MH batteries have been put on the market since then. Based on sales of HEV Ni-MH battery packs from 2012 to 2015 and their life cycle, the quantity and distribution of spent battery packs were predicted using the market supply A model. The resulting predictions show that these battery packs will start to be scrapped from 2018, reaching a peak in 2021, and be out of the market in 2024. If precious metals in these battery packs were recycled and transformed into resources, the environmental benefit could be considered to be worth a remarkable 94.21 million Yuan. Finally, we proposed recommendations for the Chinese government for the improvement of policies and regulation concerning China's HEV spent battery recycling and utilization industry. First, we suggest that an extended producer responsibility (EPR) system for problematic recycling should be established and the reverse logistics network should be optimized. Implementation of economic incentives (e.g., the policy of trade-in, deposit-refund, and ecological compensation mechanism) to foster spent battery recycling should be introduced. Finally, it is important to create technical specifications and standards for dismantling and recycling.

Key Words: HEV spent Ni-MH battery pack; precious metals; environmental benefits; GREET model; LIME value method

随着我国汽车行业的快速发展,交通行业已成为中国最大的石油消耗行业^[1]。我国环保部 2011 年《中国机动车污染防治年报》的统计结果显示,机动车污染日益严重,已经是大气环境最突出、最紧迫的问题之一。为缓解石油进口依赖和解决日益严重的大气污染问题,节能与新能源汽车的推广应用引发我国高度重视。从 2012 年开始,我国节能与新能源汽车得到大力发展,现已形成了以混合动力、纯电动、燃料电池三大技术路线为代表的电动汽车研发和推广格局,其中混合动力汽车(Hybrid Electrical Vehicle, 简称 HEV)成为目前及未来一段时间的发展重点。动力电池是 HEV 的重要组成部分,也是推动 HEV 市场化的关键部件^[2],主要包括锂电池和镍氢电池。其中,镍氢电池已经进入成熟期,实现了规模化生产^[3],目前在市场上占有主导地位。按照 HEV 镍氢电池寿命大概为 6 到 8 年测算^[4],预计我国 HEV 废旧镍氢电池包将从 2018 年开始批量出现。HEV 镍氢电池包中含有大量的镍、钴、稀土等战略性稀贵金属。钴是我国对外依存度最高的有色金属,2013 年我国的镍对外依存度也高达 70%。我国虽为稀土储量大国,却承担了世界 90% 以上的市场供应。因此,废旧动力电池包的资源化利用具有资源与环境的双重价值,也是实现推动汽车全生命周期绿色化管理的重要内容之一。

目前国内外学者对动力电池环境影响方面的研究中,主要集中在以下两个方面:一方面,对动力电池全生命周期的环境影响的研究。汪琪等^[5]采用生命周期评价法(LCA)和生命周期成本分析法对锂离子正极材料环境价值进行分析;Notter^[6]利用 LCA 对动力锂电池进行研究发现,电池产生的环境影响占整车的环境影响只有 15%,电池使用阶段是全生命周期中造成环境影响的主要阶段;吉林大学的卢强^[7]等利用 LCA 法,参考 GREET 模型中部分相关数据,研究了动力磷酸铁锂电池和镍氢动力电池从“摇篮到使用”温室气体排放情况;Matheys^[8]、Majeau-Bettez^[9]、Van Autenboer^[10]和韩业斌^[11]等人利用 LCA 法对不同的动力电池全生命周期的

环境影响进行评估与比较。另一方面,对动力电池资源化利用环节的环境影响的研究。高洋^[12]利用 Gabi 软件计算了镍氢动力电池和锂离子动力电池资源化利用的环境影响;Dewulf^[13]研究发现,对动力电池中镍和钴金属进行资源化利用,可减少 51.3% 的自然资源消耗,包括减少 45.3% 的矿石消耗和 57.2% 的化石能源消耗。Kushnir^[14]指出,回收废旧动力电池可以减少对金属能源的开采,降低电池的生产成本。此外,余海军^[15]总结了近年来国内外锂离子电池和镍氢电池资源化利用的方法。

从已有研究成果来看,目前对动力电池环境影响的相关研究主要关注电池在使用过程中带来的节能减排效果,对其资源化利用环节的环境效益研究较少,缺乏对废旧动力电池包中稀贵金属资源化利用环境效益的研究。为此,本文对我国市场上现存的 HEV 镍氢电池包中的稀贵金属未来资源化利用的环境效益进行测算,为国家及早期应对大规模动力电池的报废管理提供科学依据,以促进汽车产业的绿色发展。

1 研究方法 with 数据说明

1.1 研究方法

本文首先运用 GREET 模型计算出,对单位 HEV 废旧镍氢电池包中的稀贵金属镍、钴、稀土进行资源化利用和原生矿开采的能量消耗和气体排放情况,进而计算出相应的节能减排量;其次,利用 LIME 值法将减排的气体转化为环境效益;最后,利用市场供给 A 模型对我国市场上现存的 HEV 镍氢电池包未来的报废情况进行预测,进而计算出对其蕴含的稀贵金属进行资源化利用的环境效益,计量模型如图 1 所示。

1.1.1 环境影响测算方法

本文拟采用美国阿贡实验室开发的 GREET 模型作为研究工具,对 HEV 废旧镍氢电池包中稀贵金属资源化利用与原生矿开采的环境影响进行测算。目前该模型已经开发出 1 系列(燃料循环模型)和 2 系列(车辆循环模型)。其中 1 系列在 1995 年提出,基于车用燃料生命周期开发的用于计算各种车用燃料能源消耗和空气污染物排放的模型^[16]。2 系列针对整车开发,可用于评价和汽车相关的矿物的开采、原材料运输、汽车零部件加工、整车装配以及汽车报废回收在内的整个车辆生命周期的能源消耗和污染物排放,包括动力电池包中稀贵金属资源化利用及原生矿开采的能量消耗和气体排放情况。GREET 模型中气体排放因子主要采用的是平衡法计算,如二氧化碳的排放因子采用的是碳平衡法计算。在使用该模型的过程中,本文对其中的相关数据进行本土化处理后再进行模拟。

GREET 模型能耗计算基本原理为:对于特定的上游某一阶段,用能量效率来计算每产出 1 千焦(KJ)能量输出所需要的能量输入,即:

$$\text{Energy}_{\text{in}} = \frac{1}{\text{efficiency}} \quad (1)$$

式中, $\text{Energy}_{\text{in}}$ 代表所有的能量输入, efficiency 表示能量效率。

该模型中,某种燃料生产过程中气体排放情况的基本计算原理如下:

$$EM_{i,j} = \sum_j (EM_{cm,i,j} + EF_{up,i,j}) \times EC_j \quad (2)$$

式中, $EM_{i,j}$ 为某阶段生产 1KJ 的燃料 j 所排放的第 i 种污染物的量(g), $EM_{cm,i,j}$ 是为生产 1KJ 过程燃料 j 所排放的第 i 种污染物的量(g), $EM_{up,i,j}$ 是生产 1KJ 过程燃料 j 上游所排放的第 i 种污染物的量(g), EC_j 是生产

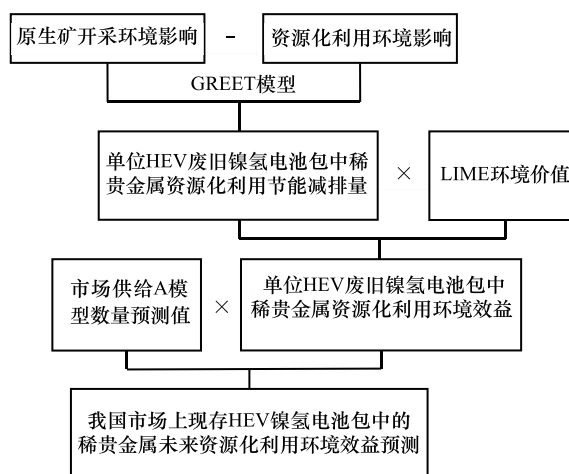


图 1 HEV 废旧镍氢电池包中稀贵金属资源化利用环境效益计量模型

Fig.1 The measurement model of environmental benefits of resource utilization of precious metals in HEV spent Ni-MH battery pack

1KJ 能量过程燃料 j 的消耗量 (KJ)。

对于本文计算的动力电池包中稀贵金属原生矿开采或资源化利用过程中气体排放的计算原理如下:

$$EM_{t,i,j} = \sum_j (e_j + EM_{i,j}) \times EC_{t,j} \quad (3)$$

式中, $EM_{t,i,j}$ 为动力电池包中某种稀贵金属原生矿开采或资源化利用过程中消耗的燃料 j 排放的第 i 种污染物的量 (g), e_j 为燃料 j 的燃烧排放因子 (g/KJ), $EC_{t,j}$ 为动力电池包中某种稀贵金属原生矿开采或资源化利用过程中燃料 j 的总消耗量 (KJ)。

本文在考虑环境影响时,主要考虑全球变暖潜值 (GWP)、酸化潜值 (AP) 及粉尘颗粒 ($PM_{2.5}$ 、 PM_{10})。对 GWP 的评价过程中以 CO_2 为标准物,包括 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 。对 AP 的评估过程以 SO_2 为标准物,主要考虑 NO_x 和 SO_x 两种气体。对不同的气体进行归一化:

$$EM_{GWP} = GWP_{CO_2} \times EM_{CO_2} + GWP_{CH_4} \times EM_{CH_4} + GWP_{N_2O} \times EM_{N_2O} \quad (4)$$

$$EM_{AP} = AP_{SO_x} \times EM_{SO_x} + AP_{NO_x} \times EM_{NO_x} \quad (5)$$

式中, EM_{GWP} 、 EM_{CO_2} 、 EM_{CH_4} 、 EM_{N_2O} 分别代表温室气体质量、 CO_2 质量、 CH_4 质量和 N_2O 质量, GWP_{CO_2} 、 GWP_{CH_4} 、 GWP_{N_2O} 分别为 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 的二氧化碳当量温室效应影响因子。 EM_{AP} 、 EM_{SO_x} 、 EM_{NO_x} 分别代表酸性气体质量、 SO_x 质量和 NO_x 质量, AP_{SO_x} 、 AP_{NO_x} 分别为 SO_x 、 NO_x 的二氧化硫当量酸性效应影响因子。

1.1.2 环境价值测算方法

所谓污染物的环境价值,是指减排单位量的污染物所避免“污染物经济损失”的价值量,国际上广泛采用环境成本对环境价值进行量化^[17]。本文拟采用日本综合产业技术研究所生命周期评估研究中心 2005 年开发的 LIME 值法测算污染物的环境价值。LIME 值法运用了生态学、环境工程学等自然科学知识,将气体对人类、自然资源等相关的多个领域造成的损害进行建模和评估。其基本原理是将不同种类的环境负荷物所造成的人类健康损害量在共同的端点汇总,通过灵活运用 LIME 的单一指标,把产品给环境带来的各种影响转换为货币价值,并且在指标合并时考虑各端点数之间的重要性。LIME 依据层次分析法和结合法确定各终端的重要性清单,详细划分地球温暖化、臭氧层破坏、大气污染等 11 个环境领域中的 1000 种环境物质,以其为评价对象,通过下式求得单一货币化指标^[18-19]:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I S_i \times DF_{ij} \times WTP_j = \sum_{i=1}^I S_i \times \left[\sum_{j=1}^J DF_{ij} \times WTP_j \right] \quad (6)$$

式中, S_i 表示物质 i 的生命周期清单, DF_{ij} 表示物质 i 对保护对象 j 的损害系数, WTP_j 代表保护对象 j 的 i 指标单位损害回避意愿支付额。

1.1.3 动力电池包报废数量预测方法

从国外的研究经验看,动力电池包报废数量的估算可以借鉴电子废弃物产生量的估算模型^[18]。Simon 等人总结的 7 种主要的电子废弃物报废量估算模型中,市场供给 A 模型适用于预测 HEV 镍氢电池包的报废量,因此,本文拟采用市场供给 A 模型,对 HEV 废旧镍氢电池包的报废数量进行预测。具体如下:

$$Qw = \sum_i S_i \times P_i \quad (7)$$

式中, Qw 为 HEV 镍氢电池包报废量, S_i 为从该年算起 i 年前 HEV 镍氢电池包的销售量, P_i 为寿命为 i 年的 HEV 镍氢电池包的百分比, i 为 HEV 镍氢电池包的实际寿命。

1.2 数据说明

1.2.1 HEV 镍氢电池包成分参数

从全球范围看,截至 2015 年 7 月底,丰田混合动力车的全球累计销量已经突破 800 万辆;从我国汽车市场研究会 (CPCA) 的 HEV 销售数据来看,丰田 HEV 在我国 HEV 市场上占有绝对的优势。因此,本文选取丰田 HEV 废旧镍氢电池包为研究对象,该电池包也是 HEV 电池包的主要类型,其相关成分参数如表 1 所示。

表 1 丰田 HEV 镍氢电池包相关成分参数

Table 1 The related parameters of Ni-MH battery pack of Toyota HEV

成分 Composition	重量 Weight/kg	比例 Proportion/%
镍 Nickel	28.16	33
氧化钴 Cobalt oxide	1.24	1.45
稀土 Rare earth	2.75	3.22
总电池包 The total weight of battery pack	85.33	100

1.2.2 基于 GREET 模型的环境影响测算数据

运用 GREET 模型进行模拟时,计算能量消耗和气体排放时需要涉及到燃料的原料及来源、技术份额、排放因子、燃料的加工效率、密度、低热值、碳含量、硫含量、运输方式、运输距离等数值。本文使用 GREET 模型中设定的 2012 年的模拟数据,对其中部分数据的修改参考来源于《中国能源统计年鉴》、《中国交通运输统计年鉴》、《中国电力年鉴》及欧训民^[19]、齐天宇^[20]、李书华^[21]等学者的研究,详见表 2 所示,其他数据均参考了 GREET 模型中的内置数据。此外,GREET 模型中采用的单位与我国标准不同,本文的换算关系为:1Btu = 1053.864J。

本文中的 CO₂、CH₄、N₂O 的二氧化碳当量温室效应影响因子 GWP_{CO₂}、GWP_{CH₄}、GWP_{N₂O} 的取值参考大气环境变化国际政府间工作组 (IPCC) 推荐的数据,分别为 1、25、296。对于 SO_x、NO_x 的二氧化硫当量酸性效应影响因子 AP_{SO_x}、AP_{NO_x} 的取值分别为 0.7 和 1^[22]。

表 2 GREET 模型中相关参数中国情况表

Table 2 The related parameters of China in GREET-model

燃料 Fuel	能源转换效率 Efficiency	开采及加工过程燃料使用占比 Proportion of fuel use in mining and processing	运输方式占比及运输路程/km Transport mode proportion and transport distance
煤炭 Coal	97.50%	原煤 80.1%,天然气 0.4%,汽油 0.5%,残油 0.1%,柴油 3.5%,电力 15.6%	铁路 70.6% (640),公路 10.3% (179),水运 19.1% (1255)
原油 Oil	95.70%	原煤 6.0%,原油 52.6%,汽油 1.9%,残油 2.5%,柴油 14.4%,电力 22.7%	铁路 14.7% (917),水运 51.9% (1806),管道 33.4% (428)
天然气 Natural gas	88.50%	原煤 2.1%,天然气 83.4%,汽油 0.7%,残油 0.9%,柴油 5.0%,电力 7.9%	管道 100% (428)
汽油 Gasoline	90.60%	原煤 48.9%,天然气 3.8%,残油 11.9%,柴油 1.7%,电力 33.8%	铁路 65.0% (913),水运 24% (1806),管道 11% (300)
残油 Residual oil	94%	煤炭 20%,电力 12%,柴油 1%,汽油 1%,原油 50%,残油 4%	铁路 50% (900),管道 15% (160),水路 25% (1200),公路 10% (50)
电力 Electricity	煤炭发电效率 46.1%,天然气发电效率 45.0%,残油发电效率 32.8%,生物质发电效率 20.8%,核电发电效率 35%,电力损耗 6.74% 火力发电 78.72% (燃煤发电 74.41%,燃油发电 0.11%,燃气发电 2.19%,生物质发电 0.39%,垃圾发电 0.24%,余温、余气等发电 1.19%),水力发电 17.16%,核能发电 1.97%,风力发电 2.07%,地热、潮汐、太阳能等 0.08%		

1.2.3 基于 LIME 值法的环境价值测算数据

本文根据日本发布的环境损害综合系数表可查得 CO₂、SO₂、粉尘 (PM_{2.5}、PM₁₀) 的 LIME 系数值,然后通过人民币与日元之间的汇率将 LIME 值折算成人民币,进而测算出 HEV 废旧镍氢电池包中稀贵金属资源化利用和原生矿开采的温室气体、酸性气体和粉尘颗粒的环境价值,如表 3 所示。

1.2.4 基于市场供给 A 模型的数量预测数据

随着我国《乘用车燃料消耗量限值》第三阶段标准的出台,政府从 2012 年开始加大对 HEV 的发展。在相关政策的刺激下,从 2012 年开始 HEV 成批投放市场。因此,本文选取 2012 年为起始点,预测我国市场上现存的 HEV 镍氢电池包未来的报废情况。从 2012 年至目前 (2015 年 10 月),我国的 HEV 销售量如图 2 所示。

表 3 污染物环境价值

Table 3 The environmental value of pollutants

污染物 Pollutants	LIME 值(日元/kg) LIME value	汇率 Exchange rate	环境价值(元/kg) Environmental value
CO ₂	1.74	0.052	0.09
SO ₂	1010	0.052	52.52
PM _{2.5}	4030	0.052	209.56
PM ₁₀	2450	0.052	127.4

注:LIME 是 Life-cycle Impact Assessment Method Based on Endpoint Modeling 的缩写

根据 HEV 镍氢电池寿命大概为 6—8 年 a,假设我国 HEV 动力电池包的平均使用寿命为 7,且产品的实际使用寿命围绕平均使用寿命呈正态分布^[23],大部分电池包在这一平均年限上下一年的时间内报废。尽管有部分 HEV 废旧镍氢电池包经过简单处理后可进行梯次利用,但因数量较少且情况复杂,本文暂未考虑梯次利用的情况。选取 HEV 镍氢电池包的平均使用寿命 7 为 值,则 HEV 镍氢电池包的使用寿命服从正态分布 $N(7,2/3)$,标准化后通过查正态分布表得 HEV 镍氢电池包的寿命分布比例:寿命为 6 年的电池包概率为 11.025%,寿命为 7 年的电池包概率为 38.975%,寿命为 8 年的电池包概率为 38.975%,寿命大于 8 年的概率为 11.025%。即 $P_6 = 11.025\%$, $P_7 = 38.975\%$, $P_8 = 38.975\%$, $P_9 = 11.025\%$ 。

2 结果分析

2.1 基于 GREET 模型的环境影响测算结果

根据表 2 中我国实际情况数据和 GREET 模型中 2012 年的内置数据进行模拟计算得到,单位 HEV 废旧镍氢电池包中的稀贵金属分别进行原生矿开采与资源化利用的环境影响如表 4 所示。

表 4 单位 HEV 废旧镍氢电池包中稀贵金属原生矿开采与资源化利用的环境影响

Table 4 Environmental influence of primary ore mining and resource utilization of precious metals in unit HEV spent Ni-MH battery pack

稀贵金属 Precious metals		能量/MJ Energy	温室气体/g Greenhouse gas			酸性气体/g Acid gas		粉尘/g Dust	
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO _x	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀
原生矿 Primary ore mining	镍 Nickel	5661	387093	1456	5	17957	724	125	262
	氧化钴 Cobalt oxide	249	17048	64	0	32	32	4	10
	稀土 Rare earth	734	48421	156	1	163	86	21	65
	合计 1Total 1	6644	452562	1676	6	18153	842	150	337
资源化 Resource utilization	镍 Nickel	731	44248	258	1	61	84	9	23
	氧化钴 Cobalt oxide	32	1948	11	0	3	4	0	1
	稀土 Rare earth	104	6860	22	0	23	12	3	9
	合计 2Total 2	867	53056	291	1	87	100	12	33

将上述得到的各温室气体和酸性气体代入式(4)、(5),最终得出单位 HEV 废旧镍氢电池包中稀贵金属资源化利用的归一化节能减排情况,如表 5 所示。

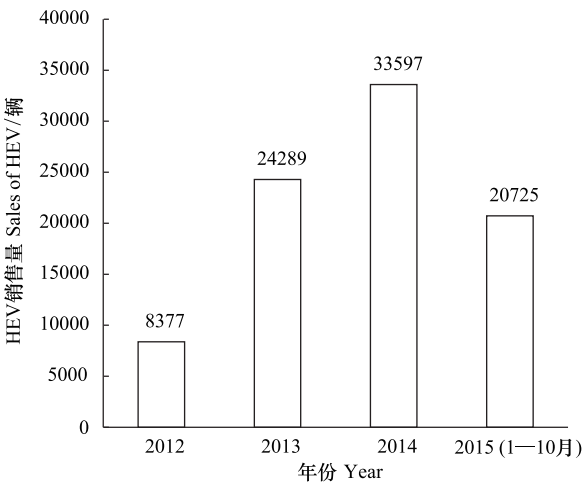


图 2 我国 HEV 销售量(2012—2015)

Fig.2 The sales of HEV in China (2012—2015)

HEV 是 Hybrid Electrical Vehicle 的缩写,指混合动力汽车;数据来源于全国汽车市场研究会及混合动力汽车行业信息情报专家

表 5 单位 HEV 废旧镍氢电池包中稀贵金属资源化利用的节能减排量

稀贵金属 Rare metals	能量/MJ Energy	温室气体/g Greenhouse gas	酸性气体/g Acid gas	PM _{2.5} /g PM _{2.5}	PM ₁₀ /g PM ₁₀
原生矿开采 Primary ore mining	6644	496233	18742	150	337
资源化利用 Resource utilization	867	60606	157	12	33
节能减排量 The energy conservation and emission reductions	5777	435627	18585	138	304

2.2 基于 LIME 值法的环境效益测算结果

将表 5 中各污染物的排放量乘以表 3 中各污染物的环境价值得到,单位 HEV 废旧镍氢电池包中稀贵金属,分别进行原生矿开采和资源化利用的环境成本,二者相减得到其环境效益如表 6 所示,其总的环境效益可以达到 1083 元。

表 6 单位 HEV 废旧镍氢电池包中稀贵金属资源化利用环境效益(元)

环境效益 Environmental benefit	温室气体 Greenhouse gas	酸性气体 Acid gas	粉尘颗粒(2.5 微米) PM _{2.5}	粉尘颗粒(10 微米) PM ₁₀
原生矿开采环境成本 Environmental cost of primary ore mining	45	984	31	43
资源化利用环境成本 Environmental cost of resource utilization	5	8	3	4
环境效益 Environmental benefits	40	976	28	39
合计 Total			1083	

2.3 基于市场供给 A 模型的环境效益预测结果

运用市场供给 A 模型对我国市场上现存的 HEV 镍氢电池包未来的报废情况进行预测,结果如图 3 所示。由图可以看出,我国市场上现存的 HEV 镍氢电池包将从 2018 逐渐迎来报废,在 2021 年达到报废高峰,至 2024 年基本完成报废。

假设对这些 HEV 废旧镍氢电池包中的稀贵金属进行有效的资源化利用,可产生环境效益累计达 9421 万元,具体情况如表 7 所示。

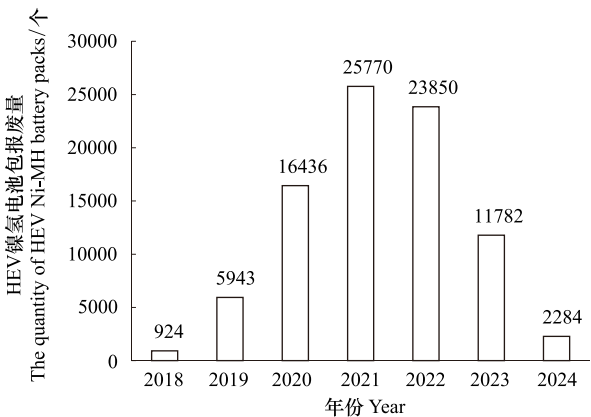


图 3 我国市场上现存 HEV 镍氢电池包报废情况预测
Fig.3 The forecast for the scrap situation of HEV Ni-MH battery packs in China

3 结论与讨论

废旧动力电池包中含有丰富的镍、钴、稀土等稀贵金属,其资源化利用是实现 HEV 全生命周期绿色化管理的重要内容之一。本文以我国市场上现存的 HEV 镍氢电池包为研究对象,对其未来报废后所含稀贵金属资源化利用的环境效益进行了测算,研究表明:

- (1)HEV 废旧镍氢电池包中的稀贵金属资源化利用不仅具有资源价值,而且还有显著的节能减排效果。相对于原生矿开采,单位 HEV 废旧镍氢电池包中的稀贵金属资源化利用可节能 5777MJ,减排的温室气体为 435627g、酸性气体为 18585g、PM_{2.5} 为 138g、PM₁₀ 为 304g。因此,有必要进一步促进汽车厂商履行生产者责任,健全废旧动力电池的回收与逆向物流网络,完善汽车产业全生命周期的绿色管理体系。
- (2)HEV 废旧镍氢电池包中的稀贵金属进行资源化利用具有环境效益的正外部性。相对于原生矿开采,单位 HEV 废旧镍氢电池包中的稀贵金属资源化利用可带来的环境效益为 1083 元。然而,目前我国正规处置

企业大多面临回收难、成本高、效益差等难题,这将会影响未来废旧动力电池的资源化利用。因此,国家需要出台动力电池“以旧换新”、“抵押—返还”政策,完善处置基金制度,建立生态补偿机制。

表 7 中国市场上现存 HEV 镍氢电池包中稀贵金属资源化利用节能减排量及环境效益预测

Table 7 The forecast of energy conservation and emission reduction and environmental benefits from the resource utilization of precious metals in HEV spent Ni-MH battery packs in China

年份 Year	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
节能 Energy conservation/TJ	5	34	95	149	138	68	13
减排温室气体 Greenhouse gas emission reduction/t	403	2589	7160	11226	10272	5133	995
减排酸性气体 Acid gas emission reduction/t	17	110	305	479	443	219	42
减排 PM _{2.5} PM _{2.5} gas emission reduction/t	0	1	2	4	3	2	0
减排 PM ₁₀ PM ₁₀ gas emission reduction/t	0	2	5	8	7	4	1
环境效益 environmental benefits/万元	100	644	1780	2791	2583	1276	247
合计 Total/万元	9421						

(3)随着 HEV 的不断上市,废旧镍氢电池包将在未来几年逐渐进入批量报废阶段。我国市场上现存的 HEV 镍氢电池包将从 2018 逐渐迎来报废,在 2021 年达到报废高峰,至 2024 年基本完全报废。如果能够对其蕴含的稀贵金属进行有效的资源化利用,其环境效益累计达 9421 万元。当前我国已把 HEV 列为《中国制造 2025》重点发展领域,这将刺激 HEV 的消费,并由此带来 HEV 镍氢电池包的大规模使用。因此,我国应在 HEV 镍氢电池包大规模报废来临之前,加快出台拆解及资源化利用的技术规范及标准,实施严格的准入制度,为废旧动力电池的资源化利用提早布局。

参考文献 (References):

[1] Yuan X L, Liu X, Zuo J. The development of new energy vehicles for a sustainable future; a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 298-305.

[2] Gaines L, Sullivan J, Burnham A, Belharouak I. Life-cycle analysis for lithium-ion battery production and recycling, paper No.11- 3891 // *Proceedings of the 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington, DC: The Transportation Research Board, 2011: 23-27.

[3] 罗晓梅, 黄鲁成. 燃油汽车与纯电动车能源足迹实证研究. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(9): 84-90.

[4] 黎宇科, 郭森, 严傲. 车用动力电池回收利用经济性研究. *汽车与配件*, 2014, (24): 48-51.

[5] 汪祺, 方利国. 锂电正极材料的生命周期评价. *广州化工*, 2012, 40(5): 53-56.

[6] Notter D A, Gauch M, Widmer R, Wäger P, Stamp A, Zah R, Althaus H J. Contribution of Li-ion batteries to the environmental impact of electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(17): 6550-6556.

[7] 卢强. 电动汽车动力电池全生命周期分析与评价[D]. 长春: 吉林大学, 2014.

[8] Matheys J, Timmermans J M, Van Mierlo J, Meyer S, Van Den Bossche P. Comparison of the environmental impact of five electric vehicle battery technologies using LCA. *International Journal of Sustainable Manufacturing*, 2009, 1(3): 318-329.

[9] Majeau-Bettez G, Hawkins T R, Strømman, A H. Life cycle environmental assessment of lithium-ion and nickel metal hydride batteries for plug-in hybrid and battery electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(10): 4548-4554.

[10] Matheys J, Van Autenboer W, Timmermans J M, Van Mierlo J, Van Den Bossche P, Maggetto G. Influence of functional unit on the life cycle assessment of traction batteries. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2007, 12(3): 191-196.

[11] 韩业斌. 铅酸电池与锂电池全生命周期对比研究. *蓄电池*, 2014, 51(4): 186-189.

[12] 高洋, 王佳, 朱一方, 周玮. 车用动力电池回收利用环境影响研究. *汽车与配件*, 2014, (20): 41-43.

[13] Dewulf J, Van Der Vorst G, Denturck K, Van Langenhove H V, Ghyoot W, Tytgat J, Vandepitteb K. Recycling rechargeable lithium ion batteries: critical analysis of natural resource savings. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(4): 229-234.

[14] Kushnir D, Sandén B A. The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles. *Resources Policy*, 2012, 37(1): 93-103.

[15] 余海军, 谢英豪, 张铜柱. 车用动力电池回收技术进展. *中国有色金属学报*, 2014, 24(2): 448-460.

[16] Levy J K, Hipel K W, Kilgour D M. Using environmental indicators to quantify the robustness of policy alternatives to uncertainty. *Ecological Modelling*, 2000, 130(1/3): 79-86.

- [17] 俞海森,周海珠,裴晓梅. 风力发电的环境价值与经济性分析. 同济大学学报:自然科学版, 2009, 37(5): 704-708.
- [18] Itsubo N, Inaba A. LIME—A comprehensive Japanese LCIA methodology based on endpoint modeling // Proceedings of the 6th International Conference on EcoBalance. Tsukuba, Japan; Research Center for Life Cycle Assessment, 2004; 25-27.
- [19] 肖序,张倩. 氨醇联产企业的资源价值流分析. 化工进展, 2014, 33(2): 263-271.
- [20] 王红梅,刘茜,张晗,马聪丽. 废弃电池的产生量估算. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(11): 249-251.
- [21] Ou X M, Zhang X L, Chang S Y. Alternative fuel buses currently in use in China: life-cycle fossil energy use, GHG emissions and policy recommendations. Energy Policy, 2010, 38(1): 406-418.
- [22] 齐天宇,欧训民,张希良,常世彦. 中国混合动力公交车发展的经济性对比分析. 中国软科学, 2009, (S1): 102-106.
- [23] 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.
- [24] 高玉冰,毛显强,杨舒茜,吴烈,董刚. 基于 LCA 的新能源轿车节能减排效果分析与评价. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1504-1512.
- [25] 李博,杨建新,吕彬,宋小龙. 废弃电器电子产品产生量估算——方法综述与选择策略. 生态学报, 2015, 35(24): 7965-7973.