

行业视点

考虑回收成本分担的动力电池回收策略研究

许礼刚, 陈磊, 刘荣福

(江西理工大学经济管理学院, 江西赣州 341000)

[摘要] 为提升动力电池回收效率, 破解回收成本分担失衡与回收率低下的困境, 本文以成本分担机制为切入点, 构建了新能源汽车制造商、动力电池供应商和第三方回收商的三方博弈模型, 剖析了三种成本分担情形: 第三方回收商独自承担回收成本(情形 N)、供应商分担回收成本(情形 S)以及制造商分担回收成本(情形 M), 并探究关键参数对博弈主体决策的影响。研究表明: ①在一定范围内, 提高回收成本分担比例能够显著提升回收率, 并优化供应链整体利润; ②回收折损因子会对动力电池回收造成负面影响, 降低回收效率和回收利润; ③从经济效益和环境效益来看, 供应商分担回收成本情形优势显著。本文研究可为新能源汽车动力电池回收策略的制定提供理论依据, 并为相关政策设计提供参考。

[关键词] 废旧动力电池回收; 成本分担; 回收折损; 回收策略

[中图分类号] F416.3; F426

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-2423(2025)05-0001-08

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.05.001

0 引言

随着工业化进程的深入, 我国生态污染和资源短缺问题日益凸显, 新能源汽车以其能耗低、污染小的优点, 在政策与市场的双重推动下得到迅速推广。据中国汽车工业协会公布的数据, 2023年我国动力电池装机量达到 387.7 GW·h^[1]。Wu 等^[2]预测 2030 年废旧动力电池年退役量将达到 70.8 kt。然而, 新能源汽车的快速发展, 也带来了新的环境挑战——大量退役动力电池的妥善处理问题。废弃的退役动力电池不仅会造成锂、钴、镍等稀有金属资源的大量浪费, 还可能对土壤、水体等生态环境造成严重污染^[3]。因此, 建立高效的新能源汽车动力电池回收体系, 已成为新

能源汽车产业可持续发展的重要环节。

目前, 在动力电池回收领域, 大多数学者从回收网络布局与优化的视角进行研究。Savaskan 等^[4]、Ranjbar 等^[5]通过对比制造商回收、零售商回收以及第三方回收等多种回收模式下的回收率与批发价格, 探索不同条件下最优回收模式。马亮等^[6]则另辟蹊径, 构建了新能源汽车制造商与零售双渠道回收模型, 剖析不同回收契约对回收决策和利润的影响。郝硕硕等^[7]和 Liu 等^[8]基于回收成本, 构建动力电池回收模式, 发现当回收市场成熟后, 以动力电池生产企业、第三方回收企业主导动力电池回收的效果最佳。还有部分学者从政府补贴的角度研究动力电池回收。徐中辉等^[9]和 Zeng 等^[10]剖析了政府回收补贴对回收策略的抉择所产生的影响。马亮等^[11]和徐水太等^[12]运用博弈论等方法, 构建数学模型, 研究政府补贴对电池制造商与汽车制造商的决策影响。许礼刚等^[13-14]以奖惩机制为核心, 耦合演化博弈和前景理论, 建立动力电池制造商、非正规回收商和政府的三方演化博弈模型。

在当前动力电池回收研究中, 存在两个主要问题: 首先, 在成本分担方面, 新能源汽车制造商、动力电池供应商和第三方回收商之间的成本分担情况未得到足够重视; 其次, 在回收折损方面, 当前研究大

[收稿日期] 2025-06-24

[作者简介] 许礼刚(1980—), 男, 安徽桐城人, 博士, 副教授, 主要研究方向为资源经济与管理。

[引用格式] 许礼刚, 陈磊, 刘荣福. 考虑回收成本分担的动力电池回收策略研究[J]. 绿色矿冶, 2025, 41(5): 1-8, 33.

XU Ligang, CHEN Lei, LIU Rongfu. Research on power batteries recycling strategies considering recycling cost sharing[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(5): 1-8, 33.

多忽略回收折损的影响。事实上,在回收过程中,废旧动力电池持有者对回收渠道和回收过程缺乏信任,不愿意主动将废弃电池交给回收商,影响回收经济效益和资源利用率^[15],而现有研究对这种状况有所忽视,影响回收策略的精准性与有效性。

鉴于此,本文构建新能源汽车制造商、动力电池供应商和第三方回收商的三方博弈模型,分别探讨回收商分担、供应商分担以及制造商分担三种回收成本分担情形,旨在探讨最优的回收成本分担机制,为新能源汽车动力电池回收策略的制定提供理论依据,促进回收产业的健康发展。本文创新点在于:首先,以回收成本分担机制为切入点,构建动力电池回收模型;其次,分别考虑回收成本分担和回收折损对回收决策的影响;最后,从经济效益和环境效益探讨最优回收成本分担机制。

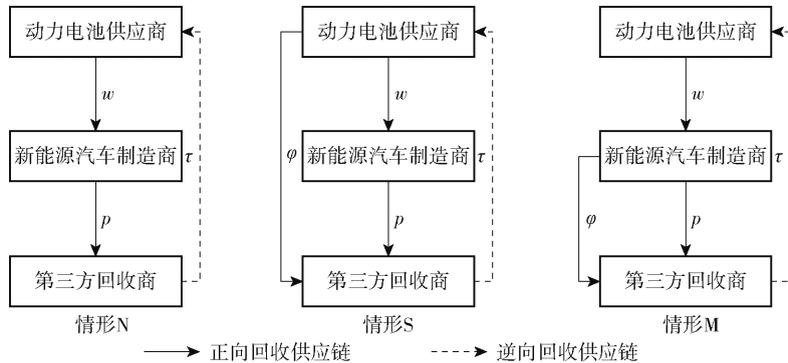


图1 不同回收成本分担机制结构(图中字母意义见表1)

1.2 模型符号与假设

1.2.1 模型符号

本文用到相关符号与含义说明见表1。

表1 模型相关参数定义

符号	符号说明
p	新能源汽车产品零售价格
w	动力电池产品批发价格
D	市场对动力电池的需求数量
α	潜在的市场规模
c	动力电池单位生产成本
τ	第三方回收商废旧动力电池的回收率($0 < \tau < 1$)
Δ	供应商回收单位动力电池获得收益
a	供应商每回收单位动力电池向回收商支付的转移价格
r	回收商回收动力电池单位电池的费用(不考虑其他因素影响)
k	废旧动力电池回收规模参数
φ	回收成本分担比例
ψ	动力电池回收数量的折扣因子
$\pi_M^i, \pi_S^i, \pi_{3PR}^i$	制造商、供应商、回收商在 <i>i</i> (<i>i</i> 为N/M/S)模式下的利润

1 模型假设与构建

1.1 模型描述

在由制造商、供应商、回收商和消费者构成的动力电池回收供应链体系中,供应商作为斯塔克尔伯格(Stackelberg)模型的领导者主导决策进程,制造商与回收商则作为跟随者作出相应决策。其回收成本分担呈现三种模式(图1):①情形N,回收商独自承担回收成本,此时回收商需独立应对回收拆解费用等各项成本压力,在决策回收率时需充分考量成本回收与收益获取;②情形S,供应商分担回收成本,供应商在确定批发价格以及自身运营策略时需平衡分担成本与盈利目标;③情形M,制造商分担回收成本,制造商在确定产品售价等决策时要将分担的回收成本纳入考量范围,这会对其整体利润规划与市场策略制定。

1.2.2 模型假设

本文用到的基本假设如下:

假设1:假设市场对新能源汽车动力电池的需求量 D 与产品零售价格 p 呈线性关系,即为 $D = \alpha - \beta p$ ^[16],式中 α 为市场潜在最大需求量, β 表示价格弹性系数,为简化模型的均衡解以方便比较分析,不失一般性,本文假设 $\beta = 1$ 。

假设2:参考文献^[17],回收商回收废旧汽车需要进行设备投资,该投资成本为回收率的凹函数,投资成本为 $\frac{1}{2}k\tau^2$ 。

假设3:本文只考虑第三方回收,第三方回收动力电池费用为 r 。第三方将回收拆解后的动力电池转卖给动力电池供应商,供应商每回收单位动力电池获得收益 Δ ,并向第三方回收商支付单位费用 a 。为保证回收动机,保证 $\Delta > a > r$ 。

假设4:参考De Giovann^[18]的研究,在回收过程中,废旧动力电池持有者对回收渠道和回收过程

缺乏信任,不愿意主动将废弃电池交给回收商。因此,回收方回收过程存在折损,用 ψ 表示回收数量的折扣因子。

假设5: π_i^j 表示情形 j 下 i 的利润,其中 $i = S, M, 3PR$, 分别表示电池供应商、汽车制造商、回收商; $j = N, S, M$, 分别表示回收商独自承担回收成本情形、供应商分担回收成本情形和制造商分担回收成本情形。

假设6: 为保证回收动机,应保证 $\Delta > a > r$ 且 $2a < r + \Delta$ 。此外,为保证不同情形下回收率均不大于1,假设 $k > \frac{(a-r)(-2a+2\Delta+(a+r-2\Delta)\varphi)(1-\varphi)^2}{4(1-\varphi)^2}$ 成立,该假设能够同时保证所得均衡解均具有现实意义。

1.3 模型构建

本文将分析上述三种回收成本分担情形,且各种情形下的决策顺序为:首先,供应商决策批发价格 w ;其次,制造商决策零售价格 p ;最后,回收商决策回收率 τ 。

1.3.1 回收商承担回收成本情形(N)

回收商独自承担回收成本,适用于回收商具有较强的资金实力和市场主导权的情况。此时供应商和制造商以及回收商的利润见式(1)~(3)。

$$\pi_S^N = (w - c)D + \tau(\Delta - a)D(1 - \psi) \quad (1)$$

$$\pi_M^N = (p - w)D \quad (2)$$

$$\pi_{3PR}^N = (a - r)\tau D(1 - \psi) - \frac{1}{2}k\tau^2 \quad (3)$$

1.3.2 供应商分担回收成本情形(S)

供应商分担回收成本,适用于供应商在供应链中占据主导地位,且希望通过分担成本提升回收率的情况。此时供应商、制造商和回收商的利润见式(4)~(6)。

$$\pi_S^S = (w - c)D + \tau(\Delta - a)D(1 - \psi) - \frac{1}{2}\varphi k\tau^2 \quad (4)$$

$$\pi_M^S = (p - w)D \quad (5)$$

$$\pi_{3PR}^S = (a - r)\tau D(1 - \psi) - \frac{1}{2}(1 - \varphi)k\tau^2 \quad (6)$$

1.3.3 制造商分担回收成本情形(M)

制造商分担回收成本,适用于制造商希望通过分担成本提升回收率并优化供应链利润的情况。此时供应商、制造商和回收商的利润见式(7)~(9)。

$$\pi_S^M = (w - c)D + \tau(\Delta - a)D(1 - \psi) \quad (7)$$

$$\pi_M^M = (p - w)D - \frac{1}{2}\varphi k\tau^2 \quad (8)$$

$$\pi_{3PR}^M = (a - r)\tau D(1 - \psi) - \frac{1}{2}(1 - \varphi)k\tau^2 \quad (9)$$

1.4 均衡解分析

对上述博弈模型进行求解,可得不同情形下的均衡解,如表2所示。

表2 不同回收成本分担情形下的均衡解

参数	情形 N	情形 S	情形 M
w	$\frac{ck + \alpha(k + (a-r)(a-\Delta)(1-\psi)^2)}{2k + (a-r)(a-\Delta)(1-\psi)^2}$	$\frac{E}{4F}$	$ck(1-\varphi)^2 + \alpha(3k(1-\varphi)^2 + 2a^2(1-\psi)^2 + 2r(\Delta + r\varphi - \Delta\varphi)(1-\psi)^2 - 2a(r + \Delta + r\varphi - \Delta\varphi)(1-\psi)^2) - a^2(-2 + \varphi)(1-\psi)^2 + r(2\Delta + r\varphi - 2\Delta\varphi)(1-\psi)^2 - 2a(r + \Delta - \Delta\varphi)(1-\psi)^2$ C
p	$\frac{1}{2}a + \frac{ck + \alpha(k + (a-r)(a-\Delta)(1-\psi)^2)}{4k + 2(a-r)(a-\Delta)(1-\psi)^2}$	$\frac{1}{2}a - \frac{E}{8F}$	$\frac{(1-\psi)^2 - 2a(r + \Delta + r\varphi - \Delta\varphi)(1-\psi)^2}{C}$
τ	$\frac{(a-r)(\alpha-c)(1-\psi)}{4k + 4(a-r)(a-\Delta)(1-\psi)^2}$	$\frac{(a-r)(\alpha-c)(1-\varphi)(1-\psi)}{A}$	$\frac{(a-r)(a-c)(1-\varphi)(1-\psi)}{C}$
π_S	$\frac{k(c-\alpha)^2}{8k + 4(a-r)(a-\Delta)(1-\psi)^2}$	$\frac{k(c-\alpha)^2(1-\varphi)^2}{B}$	$\frac{k(c-a)^2(1-\varphi)^2}{D}$
π_M	$\frac{k^2(c-\alpha)^2}{4(2k + (a-r)(a-\Delta)(1-\psi)^2)^2}$	$\frac{k^2(c-\alpha)^2(1-\varphi)^4}{B}$	$\frac{k(c-a)^2(1-\varphi)^2(2k(1-\varphi)^2 + (a-r)^2\varphi(1-\psi)^2)}{D}$
π_{3PR}	$\frac{k(a-r)^2(c-\alpha)^2(1-\psi)^2}{8(2k + (a-r)(a-\Delta)(1-\psi)^2)^2}$	$\frac{(k(a-r))^2(c-a)^2(1-\varphi)^3(1-\psi)^2}{B}$	$\frac{k(a-r)2(c-a)^2(1-\varphi)^3(1-\varphi)^2}{D}$

其中: $A = 4k(1-\varphi)^2 - a^2(-2 + \varphi)(1-\psi)^2 + r(2\Delta + r\varphi - 2\Delta\varphi)(1-\psi)^2 - 2a(r + \Delta - \Delta\varphi)(1-\psi)^2$ (10)

$B = -8k(1-\varphi)^2 + 2a^2(-2 + \varphi)(1-\psi)^2 - 2r(2\Delta + r\varphi - 2\Delta\varphi)(1-\psi)^2 + 4a(r + \Delta - \Delta\varphi)(1-\psi)^2$ (11)

$C = 2(2k(1-\varphi)^2 + a^2(1-\psi)^2 + r(\Delta + r\varphi - \Delta\varphi)(1-\psi)^2 - a(r + \Delta + r\varphi - \Delta\varphi)(1-\psi)^2)$ (12)

$$D = 8(2k(1-\varphi)^2 + a^2(1-\psi)^2 + r(\Delta + r\varphi\Delta\varphi)(1-\psi)^2 - a(r+\Delta+r\varphi-\Delta\varphi)(\psi)^2) \quad (13)$$

$$E = 2c + 2a - \frac{2(a-r)\alpha(a-\Delta)(-1+\psi)^2}{k(-1+\varphi)} + \frac{(a-r)2\alpha\varphi(-1+\psi)^2}{k(-1+\varphi)^2} \quad (14)$$

$$F = -1 + \frac{(a-r)(-2a+2\Delta+(a+r-2\Delta)\varphi)(-1+\psi)^2}{4k(-1+\varphi)^2} \quad (15)$$

2 结果比较与分析

2.1 均衡决策分析

命题 1: $\frac{\partial w^N}{\partial \varphi} = 0$, $\frac{\partial w^M}{\partial \varphi} < 0$, 当 $0 < \varphi < \frac{r+2\Delta-3a}{2\Delta-a-r}$ 时, $\frac{\partial w^S}{\partial \varphi} < 0$, 反之, $\frac{\partial w^S}{\partial \varphi} > 0$; $\frac{\partial p^N}{\partial \varphi} = 0$, 当 $0 < \varphi < \frac{r+\Delta-2a}{\Delta-r}$ 时, $\frac{\partial p^M}{\partial \varphi} < 0$, 反之, $\frac{\partial p^M}{\partial \varphi} > 0$; 当 $0 < \varphi < \frac{r+2\Delta-3a}{2\Delta-a-r}$ 时, $\frac{\partial p^S}{\partial \varphi} < 0$, 反之, $\frac{\partial p^S}{\partial \varphi} > 0$; $\frac{\partial \tau^N}{\partial \varphi} = 0$, $\frac{\partial \tau^M}{\partial \varphi} > 0$, $\frac{\partial \tau^S}{\partial \varphi} > 0$ 。

由命题 1 可知: 从供应商角度, 若制造商分担回收成本, 批发价格随分担比例上升而下降; 若供应商分担回收成本, 当 $0 < \varphi < \frac{r+2\Delta-3a}{2\Delta-a-r}$ 时, 分担比例增加, 供应商批发价下降, 反之上升。从制造商角度, 自身分担成本时, 当 $0 < \varphi < \frac{r+\Delta-2a}{\Delta-r}$ 时, 零售价格随分担比例上升而下降; 当供应商分担成本时, 当 $0 < \varphi < \frac{r+2\Delta-3a}{2\Delta-a-r}$ 时, 零售价格随分担比例上升而下降。对回收商来说, 回收率随着分担比例上升而提高。由此可见, 供应商批发价格和制造商零售价格与分担对象和与分担比例有关; 而回收商的回收率不受分担对象影响, 只随着分担比例上升而上升。

命题 2: $\frac{\partial \pi_S^N}{\partial \varphi} = 0$, 当 $0 < \varphi < \frac{r+\Delta-2a}{\Delta-r}$ 时, $\frac{\partial \pi_S^M}{\partial \varphi} > 0$, 反之, $\frac{\partial \pi_S^M}{\partial \varphi} < 0$; 当 $0 < \varphi < \frac{r+2\Delta-3a}{2\Delta-a-r}$ 时, $\frac{\partial \pi_S^S}{\partial \varphi} > 0$, 反之, $\frac{\partial \pi_S^S}{\partial \varphi} < 0$ 。 $\frac{\partial \pi_M^N}{\partial \varphi} = 0$, 当 $0 < \varphi < \frac{r+2\Delta-3a}{2\Delta-a-r}$ 时, $\frac{\partial \pi_M^M}{\partial \varphi} > 0$, 反之, $\frac{\partial \pi_M^M}{\partial \varphi} < 0$; 当 $0 < \varphi < \frac{r+2\Delta-3a}{2\Delta-a-r}$ 时, $\frac{\partial \pi_M^S}{\partial \varphi} > 0$, 反之, $\frac{\partial \pi_M^S}{\partial \varphi} < 0$ 。 $\frac{\partial \pi_{3PR}^N}{\partial \varphi} < 0$; $\frac{\partial \pi_{3PR}^M}{\partial \varphi} = 0$, $\frac{\partial \pi_{3PR}^S}{\partial \varphi} > 0$, $\frac{\partial \pi_{3PR}^S}{\partial \varphi} > 0$ 。

由命题 2 可知: 从供应商角度, 制造商分担回收成本且 $0 < \varphi < \frac{r+\Delta-2a}{\Delta-r}$ 时, 供应商利润随分担比例

上升而上升; 供应商自身分担成本且 $0 < \varphi < \frac{r+2\Delta-3a}{2\Delta-a-r}$ 时, 供应商利润随分担比例上升而上升, 反之供应商利润下降。从制造商角度, 若其自担成本且 $0 < \varphi < \frac{r+2\Delta-3a}{2\Delta-a-r}$ 时, 利润增长; 若供应商分担成本且 $0 < \varphi < \frac{r+2\Delta-3a}{2\Delta-a-r}$ 时, 利润上升, 反之利润下降。无论谁分担成本, 回收商利润均随分担比例上升而上升。可见, 当分担比例在一定范围时, 供应链各成员利润增加。

命题 3: $w^N > w^S > w^M$; 当 $\varphi > 1 - \frac{a-r}{\Delta-a}$, $p^S < p^N < p^M$, 当 $0 < \varphi < 1 - \frac{a-r}{\Delta-a}$, $p^S < p^M < p^N$; $\tau^S > \tau^M > \tau^N$ 。

由命题 3 可知: 供应商独自承担回收成本时均衡批发价格最高, 在供应商分担时最低; 制造商批发价格与分担比例有关, 当 $0 < \varphi < 1 - \frac{a-r}{\Delta-a}$ 时, 供应商分担成本时的批发价格最低, 制造商独自承担回收成本的批发价格最高; 当 $\varphi > 1 - \frac{a-r}{\Delta-a}$ 时, 供应商分担成本的批发价格最低, 制造商分担成本的批发价格最高; 回收商的回收率随着分担比例提高而提升。可见, 回收成本分担比例越高, 回收率提高。

2.2 经济效益分析

命题 4: 当 $0 < \varphi < 1 - \frac{a-r}{\Delta-a}$, $\pi_S^N < \pi_S^M < \pi_S^S$; 当 $\varphi > 1 - \frac{a-r}{\Delta-a}$, $\pi_S^M < \pi_S^N < \pi_S^S$; $0 < \varphi < 1 - \frac{a-r}{\Delta-a}$, $\pi_M^N < \pi_M^M < \pi_M^S$; $\pi_{3PR}^N < \pi_{3PR}^M < \pi_{3PR}^S$ 。

由命题 4 可知: 不同主体在回收成本分担模式下利润表现各异。从供应商利润看, 回收成本分担比例低时, 供应商自担成本的利润最高, 回收商独自承担回收成本时利润最低; 比例升高后, 供应商自担成本的利润仍最高, 制造商分担成本时其利润最低。这表明不同分担模式对供应商利润影响显著, 特定条件下自担成本更有利。从制造商利润看, 供应商承担回收成本时, 制造商利润最高, 回收商独自承担回收成本时利润最低, 这凸显了供应商分担决策对

其利润的引领作用。从回收商利润看, 供应商分担成本时利润最高, 回收商独自承担回收成本时最低。这说明二者利润呈正向联动关系, 为回收产业链利润分配研究提供重要依据。总的来看, 分担回收成本对于供应链各成员收益具有正向作用。

命题5: $\pi_1^S = \pi_S^S + \pi_M^S + \pi_{3PR}^S$, $\pi_1^M = \pi_S^M + \pi_M^M + \pi_{3PR}^M$, $\pi_1^N = \pi_S^N + \pi_M^N + \pi_{3PR}^N$; 当 $\frac{6a-2r-4\Delta}{3a+r-4\Delta} < \varphi < 1$, $\pi_1^M < \pi_1^N < \pi_1^S$; 当 $0 < \varphi < \frac{6a-2r-4\Delta}{3a+r-4\Delta}$, $\pi_1^N < \pi_1^M < \pi_1^S$ 。

由命题5可知: 当 $0 < \varphi < \frac{6a-2r-4\Delta}{3a+r-4\Delta}$ 时, 供应商分担回收成本情形下, 供应链总收益最高, 其次是制造商分担回收成本情形, 最后是回收商独自承担回收成本情形; 当 $\frac{6a-2r-4\Delta}{3a+r-4\Delta} < \varphi < 1$ 时, 供应商分担回收成本情形下, 供应链总收益最高, 其次是回收商独自承担回收成本情形, 最后是制造商分担回收成本情形。显然, 当供应商分担回收成本时, 可提高供应链总收益。

2.3 环境效益分析

本部分探讨回收商独自承担回收成本情形和供应商、制造商回收成本分担两种情形下的环境效益。参考 Esenduran 等^[19]的研究, 将产量(即需求)和回

收率纳入环境效益, 并构建环境影响函数:

$$E = D - \lambda\tau \quad (16)$$

式中, E 为环境影响, E 越大, 说明回收对环境的影响越深; λ 是回收率对环境效益的影响系数, 即回收活动降低环境影响的效率, 简称为环境效率, 且 $\lambda > 1$ 。

命题6: $E^M < E^S < E^N$ 。

由命题6可知: 在动力电池回收成本分担的不同情形下, 环境影响存在差异。相较于回收商独自承担回收成本, 供应商或制造商分担回收成本时, 对环境的影响均更低。不过, 供应商分担回收成本时的环境影响高于制造商分担回收成本的情况。由此可知, 回收成本分担有助于减少环境影响。

3 数值仿真分析

3.1 回收成本分担对经济和环境效益的影响

本小节主要通过数值仿真对相关结论进行分析和验证: ①剖析回收成本分担比例对均衡决策、最优利润以及环境效益的影响; ②探究回收折损因子在这三方面的作用。参照文献^[20]等的参数设置, 并结合《中国动力电池回收产业发展报告(2024)》, 将相关参数项设为: $\alpha = 100, c = 50, a = 9, r = 4, \Delta = 20, k = 200, \psi = 0.3, \lambda = 15$ 。具体仿真结果如图2、图3和图4所示。

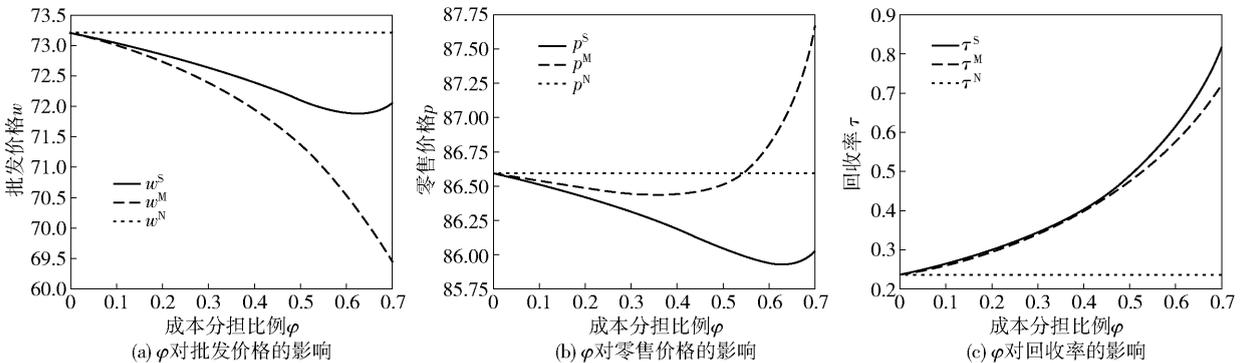


图2 φ 对供应链成员决策的影响

由图2(a)、(b)、(c)可知: ①当 $0 < \varphi < \frac{r+2\Delta-3a}{2\Delta-a-r}$ 时, 随着分担比例上升, 制造商或供应商承担回收成本时, 供应商批发价格均下降。超出该区间, 制造商分担时批发价仍降, 供应商自担则批发价上升; ②当 $0 < \varphi < \frac{r+\Delta-2a}{\Delta-r}$ 时, 无论是制造商亦或供应商分担成本, 制造商零售价格随分担比例升高而下降; ③与回收商独自承担回收成本相比, 制造商或供应商承担回收成本时, 回收率均更高, 供应商分担时回收率最突出。由此可见, φ

不仅能影响批发价格和零售价格, 还可以促进回收率提升。

由图3(a)、(b)、(c)可知: ①与回收商独自承担回收成本相比, 当 $0 < \varphi < 1 - \frac{a-r}{\Delta-a}$ 时, 制造商、供应商分担成本的两种情形均会导致供应商利润增加, 超过该区间后, 利润回有所下降, 但整体利润高于回收商独自承担回收成本情形; ②制造商利润变化趋势与供应商类似, 当 $0 < \varphi < 1 - \frac{a-r}{\Delta-a}$ 时, 其利润提升, 反之, 利润下降; ③回收商利润与分担比例同向变动, 且供

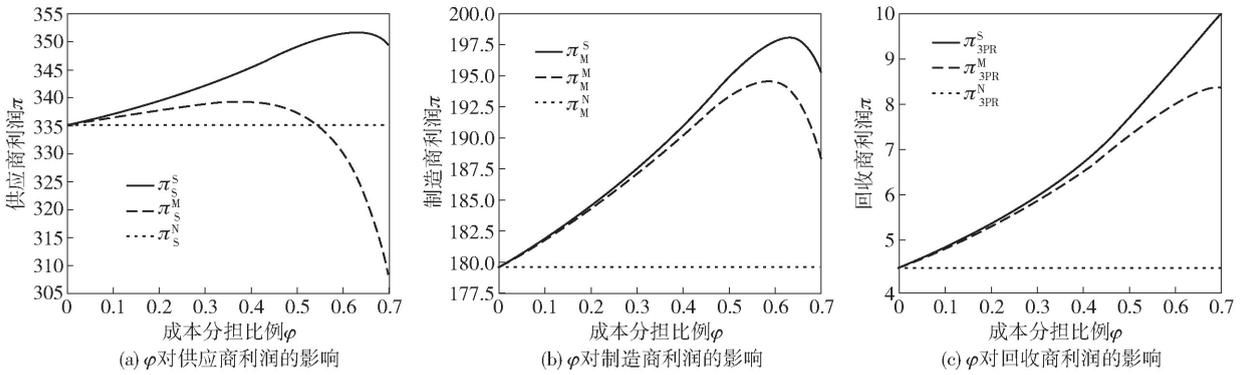


图3 ϕ 对供应链成员利润的影响

应商分担成本时回收商利润更高。可见,适当提升分担比例,可促进供应链各成员利润提升。

由图4可知,在一定回收成本分担比例区间内,随着分担比例的提升,无论是供应商还是制造商分担回收成本,两者对环境的影响均在下降,且两者差距较小。此外,相较于回收商独自承担回收成本的情形,无论是供应商还是制造商分担回收成本,其对环境的影响都要低于独自承担回收成本情形。由此可知,在一定范围内,提高回收成本分担比例,可降低环境影响。

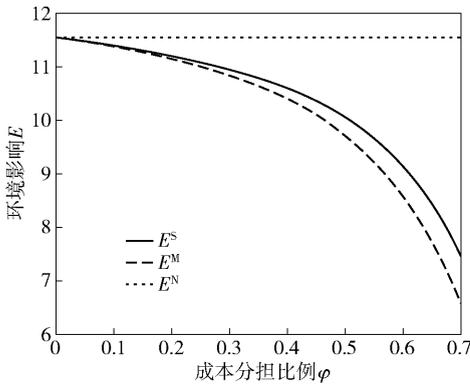


图4 ϕ 对环境的影响

3.2 回收折损因子对经济效益和环境效益的影响

为探究 ψ 对供应链的影响,继续沿用上述参数设置,相关参数项设为: $\alpha = 100, c = 50, a = 9, r = 4, \Delta = 20, k = 200, \phi = 0.6, \lambda = 15$ 。具体仿真结果如图5、图6和图7所示。

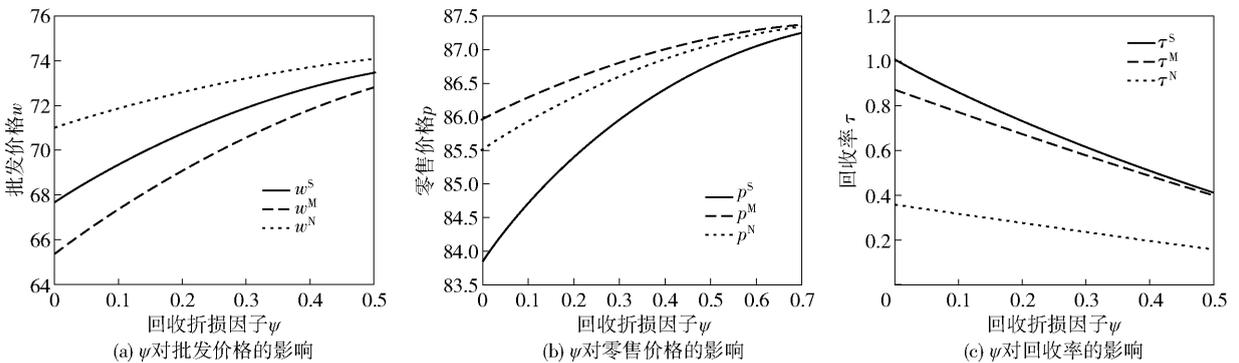


图5 ψ 对供应链成员决策的影响

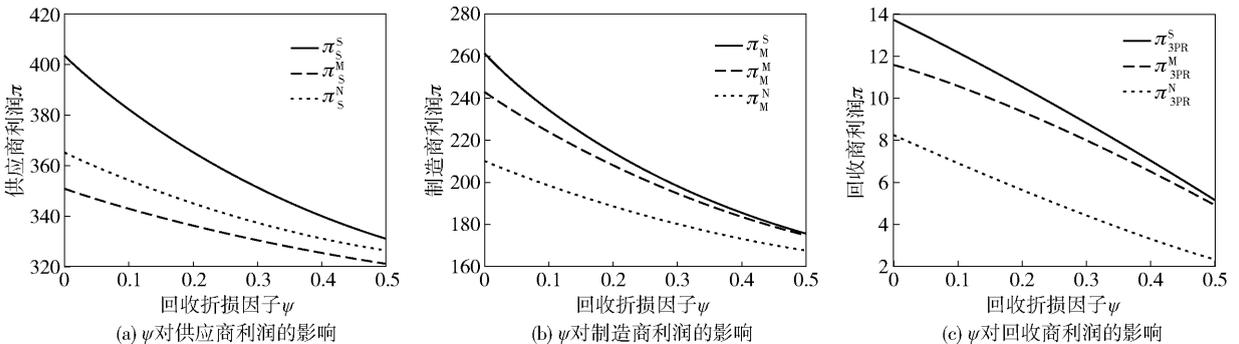


图6 ψ 对供应链成员利润的影响

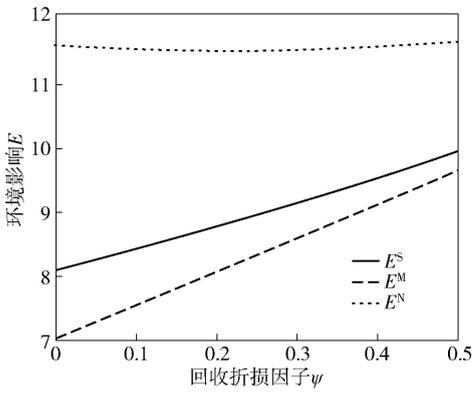


图7 ψ 对环境的影响

由图5(a)、(b)、(c)可知,①供应商批发价格、制造商批发价格与回收折损因子呈正相关,均随着回收折损因子的升高而升高,这是由于回收折损的存在,导致利润下降,供应商和制造商会采取提高价格来避免折损带来的负面效应;②回收商回收率与回收折损因子呈负相关,均随着回收折损因子的升高而降低,这是由于回收数量减少,进而导致回收率下降。可见,回收折损因子会对供应链成员决策产生负面影响。

由图6(a)、(b)、(c)可知,供应商、制造商和回收商的利润均与回收折损因子呈负相关,随着回收折损因子的升高而降低。这是由于回收折损的存在,导致回收商和供应商的利润有所下降,此时供应商会提高批发价格,而制造商作为供应商下游也随之提高零售价格,进而导致需求下降,供应链各成员利润也随之下降。总之,回收折损因子会导致供应链各成员利润下降,供应链总收益也下降。

由图7可知,无论是供应商还是制造商分担回收成本,其对环境的影响都要低于回收商独自承担回收成本情形。但随着动力电池回收折损的提高,制造商分担回收成本情形和供应商分担回收成本情形对环境的影响均在上升。由此可见,回收折损因子会对环境产生负面效应。

4 结论与建议

4.1 结论

1)合理的回收成本分担比例能提升回收率与供应链成员利润。在合理的回收成本分担比例区间内,制造商或供应商分担成本,能让回收率显著提升,供应链各成员利润增长,实现回收效率与经济效益双提升。

2)回收折损因子与价格正相关,与回收率、成

员利润负相关,严重影响回收体系经济效益。当回收折损过高,回收率降低,成员利润也大幅缩水,严重阻碍回收体系的良性运转。

3)从经济效益和环境效益来看,供应商分担回收成本时优势显著。经济上,能让回收商利润更高,供应链总利润超过回收商独自承担回收成本的情况;环境上,对环境的负面影响小于独自承担回收成本时,即便回收折损上升,整体仍更具优势,实现经济与环境效益的双赢。

4.2 建议

1)优化回收成本分担,提升参与积极性。相关部门和行业协会可组织调研,结合市场动态与企业实际,制定科学合理的回收成本分担指导标准。明确在不同市场环境下制造商与供应商的成本分担比例范围,引导企业在此区间内灵活调整。企业间也可建立沟通协调机制,依据自身运营状况与成本承受能力,协商确定合适的分担比例,确保既能提升回收率与成员利润,又能维持供应链的稳定。

2)增强消费者信任,降低回收折损。回收商、制造商和供应商可联合开展宣传活动,利用线上、线下渠道,普及废旧电池危害和回收益处,展示规范回收流程,增强消费者信任。同时建立便捷回收网络,如设置社区回收点、与电商合作上门回收,降低消费者回收难度。

3)强化供应商主导,完善回收体系。政府出台政策鼓励供应商主导回收,给予资金支持和政策倾斜,鼓励供应商主动分担回收成本。例如,政府可通过“回收成本分担专项补贴”或“绿色税收抵免”政策,激励供应商承担更高比例的回收成本。同时,可建立“供应商主导的回收认证体系”,提升消费者对正规回收渠道的信任,间接降低折损水平。

[参考文献]

- [1] 赵梦娜,刘勇,马良. 不确定条件下新能源汽车动力电池回收网络模型及算法[J/OL]. 系统工程, 1-15 [2025-02-23]. <https://http-kns.cnki.net. Jxust.opac.vip/kcms/detail/43.1115.N.20241107.1052.004.html>.
- [2] WU Y, YANG L, TIAN X, et al. Temporal and spatial analysis for end-of-life power batteries from electric vehicles in China[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 155: 1-12.
- [3] 许礼刚,刘荣福,关景文,等. 废旧动力电池回收负外部性量化模型及补偿机制[J]. 绿色矿冶, 2024,

- 40(2):35-40.
- [4] SAVASKAN R C, BHATTACHARYA S, VAN WASSENHOVE L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing[J]. *Management Science*, 2004, 50(2): 239-252.
- [5] RANJBAR Y, SAHEBI H, ASHAYERI J, et al. A competitive recycling channel in a three-level closed loop supply chain under different power structures: Pricing and collecting decisions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272: 122623.
- [6] 马亮, 刘玉洁, 朱浩. 闭环供应链视角下新能源汽车电池双渠道回收契约设计[J]. *科技管理研究*, 2021, 41(20): 184-193.
- [7] 郝硕硕, 董庆银, 李金惠. 基于成本核算的废旧动力电池回收模式分析与趋势研究[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(10): 4745-4755.
- [8] LIU K, WANG C. Production and recycling of new energy vehicle power batteries under channel encroachment and government subsidy[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2024, 26(1): 1313-1339.
- [9] 徐中辉, 汤泽京, 马艳丽. 计算机通信行业中小企业在供应链金融模式下的信用风险评价模型研究[J]. *江西理工大学学报*, 2024, 45(6): 56-63.
- [10] ZENG F, LU Z, LU C. Power battery recycling model of closed-loop supply chains considering different power structures under government subsidies[J]. *Sustainability*, 2024, 16(21): 9589-9589.
- [11] 马亮, 仲伟俊, 梅姝娥. 基于续航能力需求的新能源汽车产业链补贴策略研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2018, 38(7): 1759-1767.
- [12] 徐水太, 罗美憬, 石雪飞. 基于政府回收补贴的独立再制造供应链均衡决策分析[J]. *江西理工大学学报*, 2023, 44(6): 49-56, 67.
- [13] 许礼刚, 刘荣福, 陈磊, 等. 基于前景理论的废旧动力电池非正规回收渠道研究[J]. *绿色矿冶*, 2024, 40(5): 7-14.
- [14] 许礼刚, 刘荣福, 陈磊, 等. 前景理论视角下废旧动力电池回收监管演化博弈分析[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2024, 38(1): 290-297.
- [15] 罗中驰远, 李芳. 云平台下考虑企业社会责任的闭环供应链回收模式研究[J]. *江西理工大学学报*, 2022, 43(4): 45-53.
- [16] HONGLU W, MIN Z, HAO Y, et al. The impact of blockchain technology on consumer behavior: a multimethod study[J]. *Journal of Management Analytics*, 2021, 8(3): 371-390.
- [17] 张维月, 刘晨光, 李芳, 等. 渠道权力结构和回收方式对闭环供应链的影响[J]. *系统工程学报*, 2021, 36(4): 495-508.
- [18] De Giovanni P. Blockchain and smart contracts in supply chain management: A game theoretic model[J]. *International Journal of Production Economics*, 2020, 228: 107855.
- [19] Esenduran G, Kemahloğlu-Ziya E, Swaminathan M J. Take-back legislation: consequences for remanufacturing and environment[J]. *Decision Sciences*, 2016, 47(2): 219-256.
- [20] 梁喜, 胡鑫. 考虑区块链和产品回收的绿色供应链定价决策[J]. *计算机集成制造系统*, 2023, 29(11): 3851-3868.

Research on Power Batteries Recycling Strategies Considering Recycling Cost Sharing

XU Ligang, CHEN Lei, LIU Rongfu

(School of Economics and Management, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: To improve the recycling efficiency of new energy vehicle power batteries and address the issues of uneven cost-sharing and low recycling rates, this paper constructed a tripartite game model involving new energy vehicle manufacturers, power battery suppliers, and third-party recyclers, focusing on cost-sharing mechanisms. It analyzed three cost-sharing scenarios: third-party recyclers bearing the recycling costs alone (Scenario N), manufacturers sharing the recycling costs (Scenario M), and suppliers sharing the recycling costs (Scenario S). The study also explored the impact of key parameters on the decision-making of the game participants. The research findings indicate that: ① Within a certain range, increasing the cost-sharing ratio can significantly enhance the recycling rate and optimize the overall profit

(下转第 33 页)

Experimental Study on Direct Current Furnace Smelting of Vanadium Titanium Magnetite

GUO Yaguang, CHEN Kuiyuan, WANG Yun, CHEN Xuegang
(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Regarding the changes in slag and liquid iron composition during the direct current furnace treatment of vanadium titanium magnetite, Based on the analysis of raw material properties, theoretical calculations, basic experiments, and DC furnace expansion experiments were conducted to investigate the changes in slag and metal composition during the melting reduction process of vanadium titanium magnetite. Fe mainly exists in Fe_3O_4 in vanadium titanium magnetite, V and Ti mainly exist in titanium magnetite. Theoretical calculations show that adding lime is beneficial for reduce the melting temperature of the final slag, and increasing temperature is more conducive to reducing the viscosity of the slag. The basic experimental results show that an increase in temperature is beneficial for improving the metal recovery rate. The appropriate ratio of lime and reducing agent has a significant impact on the slag gold separation effect. Under the conditions of temperature 1 580 °C, C/O ratio of 1.0, and lime ratio of 3.3%, the Fe and V contents in the tailings can be reduced to 1.20% and 0.27%; The results of the expanded test of the DC furnace show that when the iron content in the slag decreases to 14.38% ~ 16.21%, the vanadium content is the highest. The Fe and V content in the final slag are 1.89% and 0.39%, respectively. The calculated Fe and V recovery rates are 98.14% and 85.7%, respectively.

Key words: vanadium titanium magnetite; simulated calculation; direct current furnace; titanium slag; vanadium containing molten iron

(上接第 8 页)

of the supply chain; ② Recycling losses negatively affect power battery recycling, reducing recycling efficiency and profits; ③ From the perspectives of economic and environmental benefits, the supplier cost-sharing scenario (Scenario S) demonstrates significant advantages. This paper provides a theoretical basis for formulating recycling strategies for new energy vehicle power batteries and offers references for related policy design.

Key words: spent power batteries reugcling; cost-sharing; recycling losses; recycling strategies