

V O L V O



上海交通大學
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

2026

汽车材料

碳中和路径与机遇

The Roadmap to Carbon Neutrality
in Automotive Materials

前言

在全球应对气候变化和推动绿色低碳转型的背景下，汽车行业作为碳排放的重要来源之一，正面临“双碳”发展的挑战与机遇。从全生命周期视角审视：生产新能源汽车相比燃油车会产生更多碳排放，其中原材料获取及材料/零部件加工是主要贡献环节。针对这些环节，降低其碳排放强度、调整其结构将直接影响新能源汽车的减碳潜力。因此，系统识别新能源汽车材料生产加工环节的碳排放来源，构建科学的评估方法，提出可量化且成本可控的减碳技术路径，是当前产业发展和政策制定亟待解决的核心问题。

作为国内首个新能源汽车用材减碳成本的综合性分析，我们以新能源汽车零部件为基础，根据汽车使用材料种类构建了基于全生命周期评价(LCA)的碳排放分析框架，对铝、钢铁、电池、聚合物、铜及电子元器件生产的减排技术、减碳潜力与成本效益进行系统评估。在此基础上，从材料循环、材料替代、绿色能源与技术进步等维度，提出分阶段、可复制的新能源汽车生产减碳实施路径。

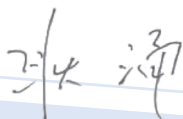
本研究是上海交通大学中英国际低碳学院与沃尔沃汽车联合开展的面向新能源汽车生产减碳议题的产学研实践成果。双方依托各自在低碳技术研究、生命周期评价、汽车工程与制造实践及供应链管理方面的优势，围绕新能源汽车材料碳排放核算、关键排放源识别与减碳技术路径构建，形成了紧密协作的研究机制。此外，该研究工作也得到多家国内材料生产企业、零部件制造厂商及其他整车制造企业专家的支持，确保研究结论具备现实可行性与产业适用性。

1976年，沃尔沃汽车推出配备Lambda传感器®的三元催化转化器，削减了燃油车90%的有害排放，并向行业开源共享。秉承沃尔沃汽车的开源文化和在可持续发展领域的长期承诺，本研究致力于推动汽车产业碳中和路径的深化探索。我们期望研究成果能够为企业碳中和决策、技术布局及政策评估提供方法论支撑和数据参考，助力推动行业高质量、低碳化快速发展。

耿涌

上海交通大学中英国际低碳学院院长
世界工程组织联合会工程与环境委员会主席

签名：



吴震皓

沃尔沃汽车大中华区战略副总裁

签名：



目 录

01	概要	04
02	铝	06
03	钢铁	09
04	聚合物	12
05	电池	15
06	铜	18
07	玻璃和电子元器件	20
08	产业与政策建议	21
09	结语	22
10	参考资料	23
11	附录	24

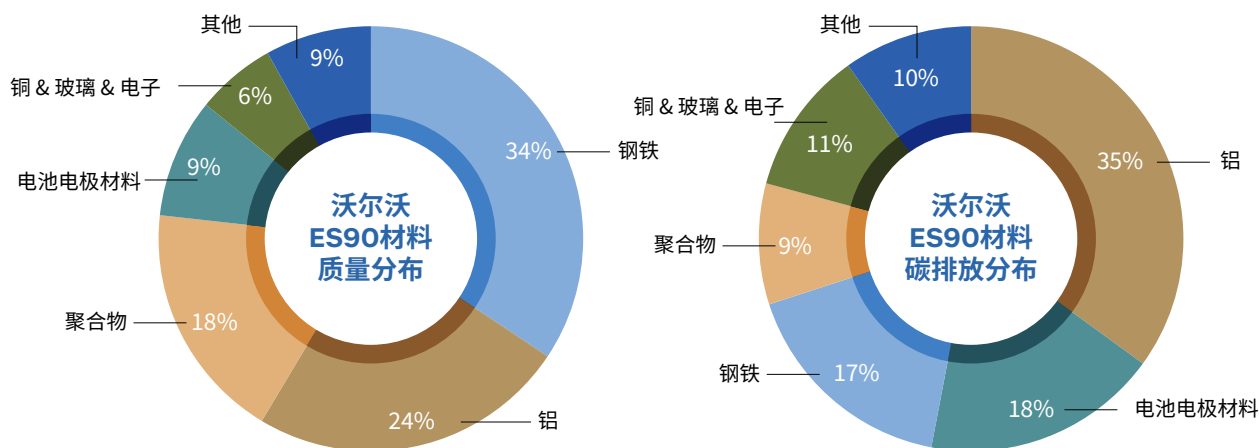
研究方法



本研究以中国市场为情景边界,以沃尔沃ES90汽车为基线,通过整车拆解和材料拆分,构建“材料-能耗-碳排-成本”的全链条分析模型^[1]。研究重点覆盖铝、钢铁、电池、聚合物、铜、玻璃与关键电子元器件等高碳排放重要部件。

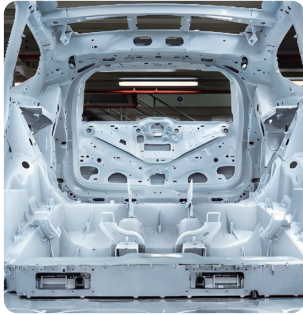
方法上,采用“**成本曲线**”作为核心分析工具:横轴为减排量,纵轴为单车减排成本变化,将不同技术/材料组合在同一坐标系下进行排序,根据成本变化及减排量,识别经济可行的减碳技术。

研究对象

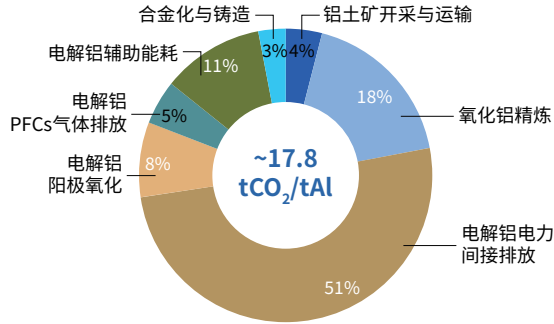


以200,000km的行驶里程为基准,沃尔沃ES90全生命周期碳排放为31吨CO₂/车;若在行驶阶段采用绿电,全生命周期碳排放可降至26吨CO₂/车。整车生产阶段(涵盖原材料生产与车辆制造)碳排放约为23.5吨CO₂/车;材料生产与加工是整车生产阶段碳排放的主要来源,关键贡献材料包括原生铝、动力电池模块和钢铁。

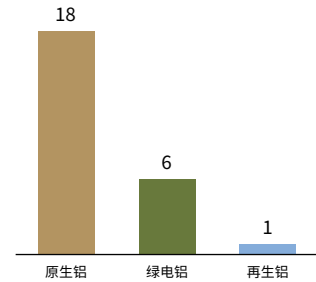
- ▶ **铝:**主要用于制造纵梁、副车架等结构件和发动机缸体、轮毂等非结构件;沃尔沃ES90用铝包含29%的再生铝和43%的绿电铝。
- ▶ **钢铁:**主要用于制造门槛梁、防撞梁等结构件;沃尔沃ES90用钢包含18.4%再生钢铁。
- ▶ **动力电池:**以NCM622三元锂电为例,其碳排放结构复杂;在加工环节使用绿电的前提下,电芯单位碳排放约63.2 kgCO₂/kWh。
- ▶ **聚合物:**主要用于保险杠等外饰件与车门板等内饰件,以PP、PA、PU、PC/ABS为主;沃尔沃ES90的聚合物包含16%的再生材料或生物基材料。
- ▶ **铜:**主要用于电池、电机、电控及高压线束等部件;沃尔沃ES90电机绕组采用80%的再生铜材料。



铝合金车身结构

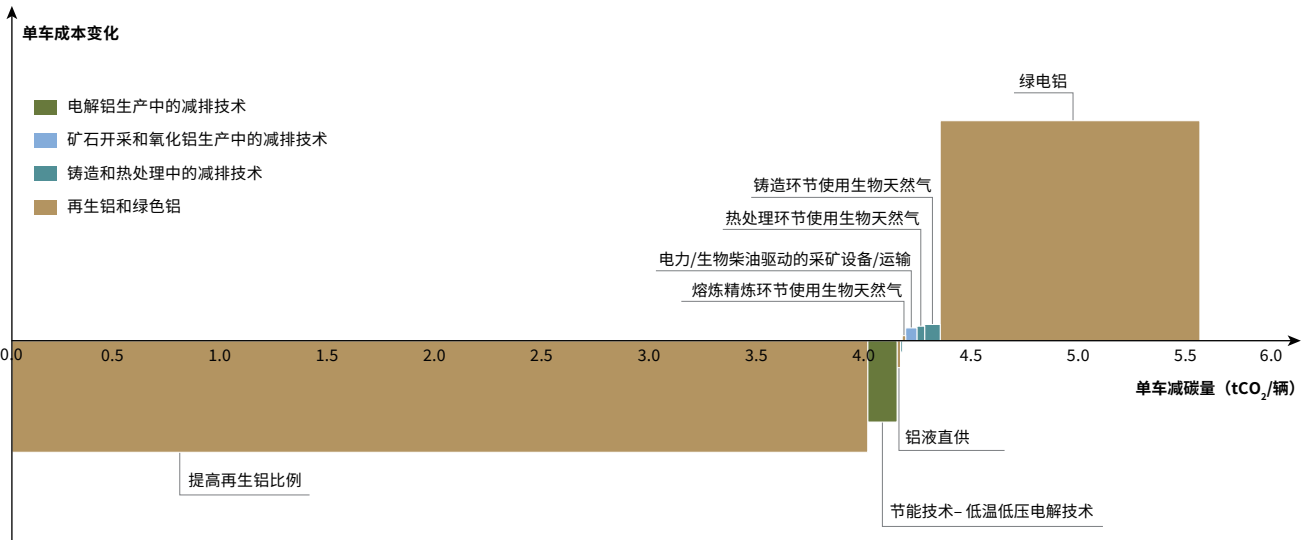


基于火电的铝合金碳排放分布



不同来源铝料碳排放(tCO₂/tAl)

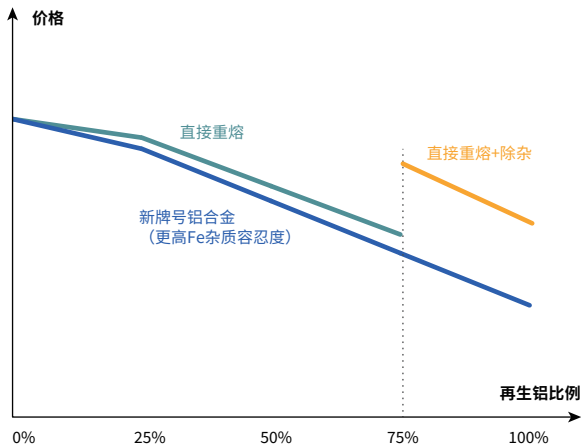
- 沃尔沃ES90为高比例铝合金车型,在轻量化、能耗、续航、被动安全性能及材料可回收性等方面具有综合优势。
- 铝料来源对高比例铝合金汽车碳排放具有显著影响。基于火电的原生铝碳排放高达**18吨CO₂/吨铝**。与原生铝相比,绿电铝(电解等环节使用绿电)碳排放可降至**6吨CO₂/吨铝**,再生铝(废铝重熔除杂再生)可降至**1吨CO₂/吨铝**。



铝合金零部件的主要减排措施:

- **提高再生铝使用比例**至65%以上:当前再生铝价格处于低位,且未来将趋近甚至高于原生铝价格,企业可通过与铝回收厂商签署长期战略合作协议,锁定优质再生资源供应;开发杂质容忍度更高的新型铝合金牌号。
- **使用绿电铝**:加快健全铝生产企业的绿色低碳转型。
- **材料替代**:探索部分零部件钢铁替代铝的可行性。
- **减排技术**:在铝土矿开采、氧化铝/电解铝生产和零部件成形加工环节采用**节能减排技术**。

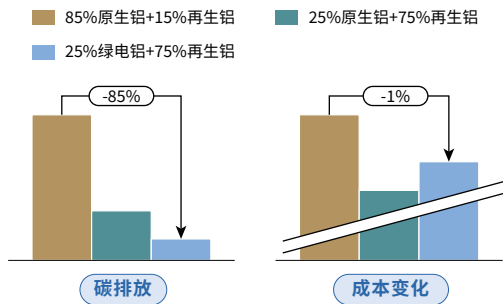
再生铝



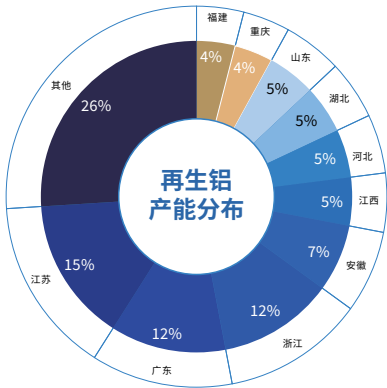
再生铝碳排放主要来自废铝重熔和除杂。Fe杂质会影响再生铝性能且难以去除，高品质废铝是提高再生铝使用比例的关键。

- 在不降低性能的前提下，采用一定比例再生铝可降低零部件的原材料成本。
- 高比例使用再生铝可能会提升成本，主要原因是更加严格的除杂工艺以及良品率的下降等。
- 开发高Fe杂质容忍度的新牌号，提高再生铝的使用比例。

再生铝合金轮毂案例

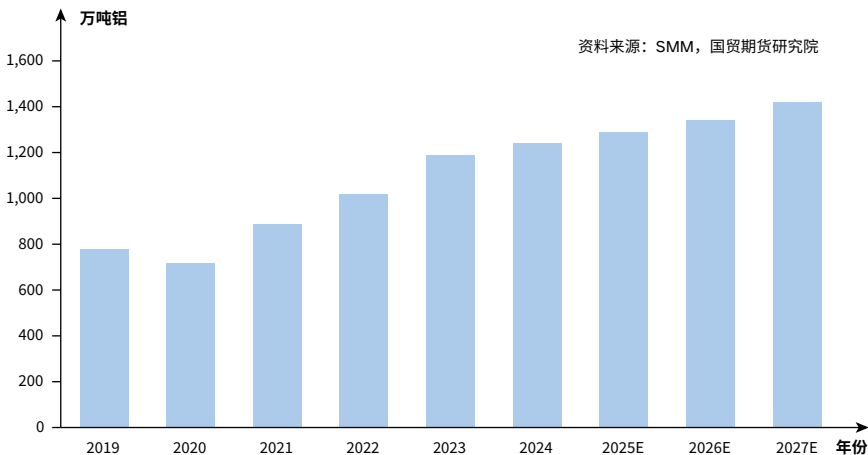


轮毂常用牌号为A356.2，其Fe杂质含量限制在0.2%。使用**75%**的废轮毂与**25%**绿电铝合金可以在不增加成本的前提下实现**85%**的减排。部分车企如沃尔沃等已采用该技术。



废铝价格是影响再生铝使用成本的主要因素。废铝未形成成熟的市场，价格波动较大。目前废铝价格处于低位，**提高再生铝使用比例可**

- 我国再生铝企业主要集中于华东、华南等地区 [2]。
- 随着新能源汽车逐步进入报废回收周期，相关产业与市场将进一步向该区域集聚。

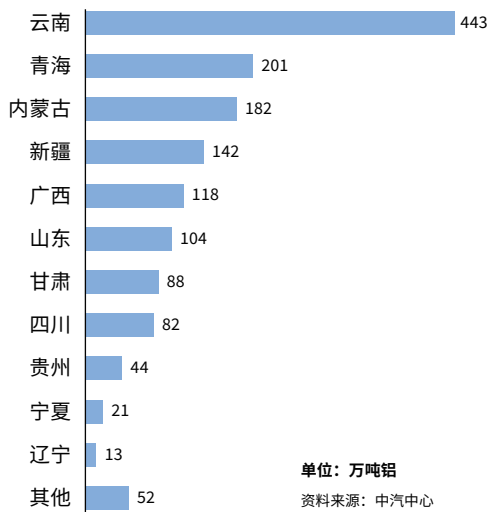


资料来源：SMM，国贸期货研究院

未来电解铝总产能接近上限，再生铝需求将持续提升，再生铝价格会不断接近于原生铝价格，**建议相关企业与产能稳定的华东、华南地区回收再生企业建立长期战略协议，锁定优质再生料的供应与价格。**

再生铝市场需求量

绿电铝



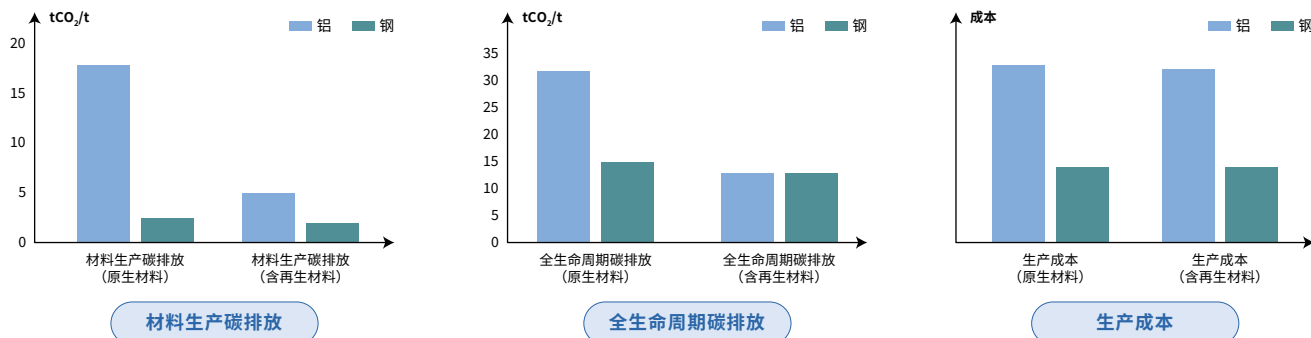
当前，绿电铝生产成本显著高于原生铝，且高度依赖可再生能源电力价格。从中期（2025-2030年）看，随着可再生能源技术持续进步与规模化应用，可再生能源电力的平准化度电成本（LCOE）将持续下降^[3]，带动绿电铝价格下降。

- 受益于丰富的水电、风电及光伏资源，绿电铝产能主要集中在云南、青海、甘肃及内蒙古等西部省份。
- 未来绿电铝产能规划将呈现区域集聚特征，向西部、南部绿电资源丰富区集中。
- 在政策引导与市场机制协同驱动下，绿电铝预计自2028年起将在新增电解铝产能中占据主导地位。

绿电铝案例

沃尔沃汽车与云铝股份达成合作，推动绿电铝在汽车零部件中的规模化应用。通过整合一、二级供应商的铝材需求并依托云铝的绿色供应网络，双方实现绿电铝在汽车零部件生产过程的高效导入，显著降低铝合金零部件碳足迹。

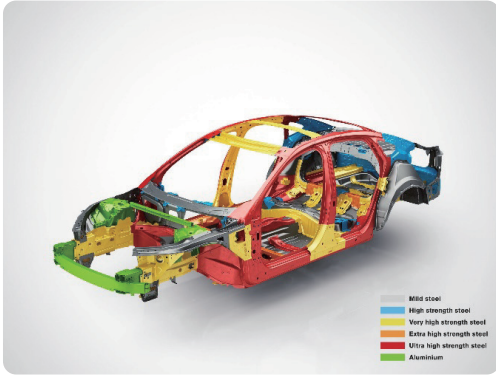
材料替代



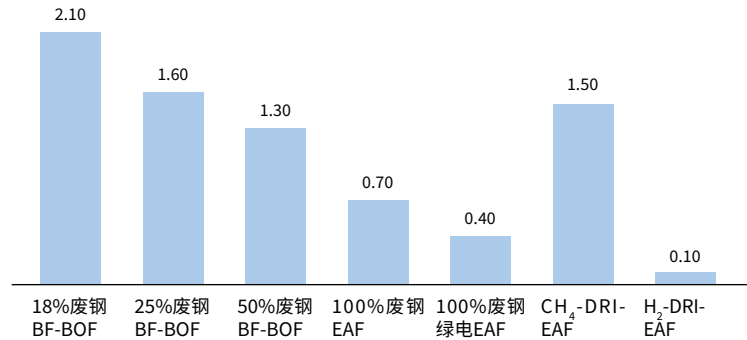
以非结构件方向盘骨架为例，假设含再生材料的部件分别包含20%再生钢铁和75%再生铝。基于材料生产和全生命周期碳排放评估，**钢铁的碳足迹低于铝**。在满足功能需求的前提下，乘用车的部分非结构件采用钢铁替代铝可实现降本降碳。

节能减排技术

不同生产环节	节能减排技术
铝土矿开采	可再生能源+电动装备一体化 ^[4]
氧化铝生产	热活化碱循环脱硅技术 ^[5] 、绿电锅炉替代
电解铝生产	高效槽型 ^[6] 、惰性阳极 ^[7] 、阳极效应智能抑制 + PFC在线管理 ^[8] 、可润湿阴极/低ACD ^[9]
成形工艺	一体化铸造 ^[10] 、热处理余热回收

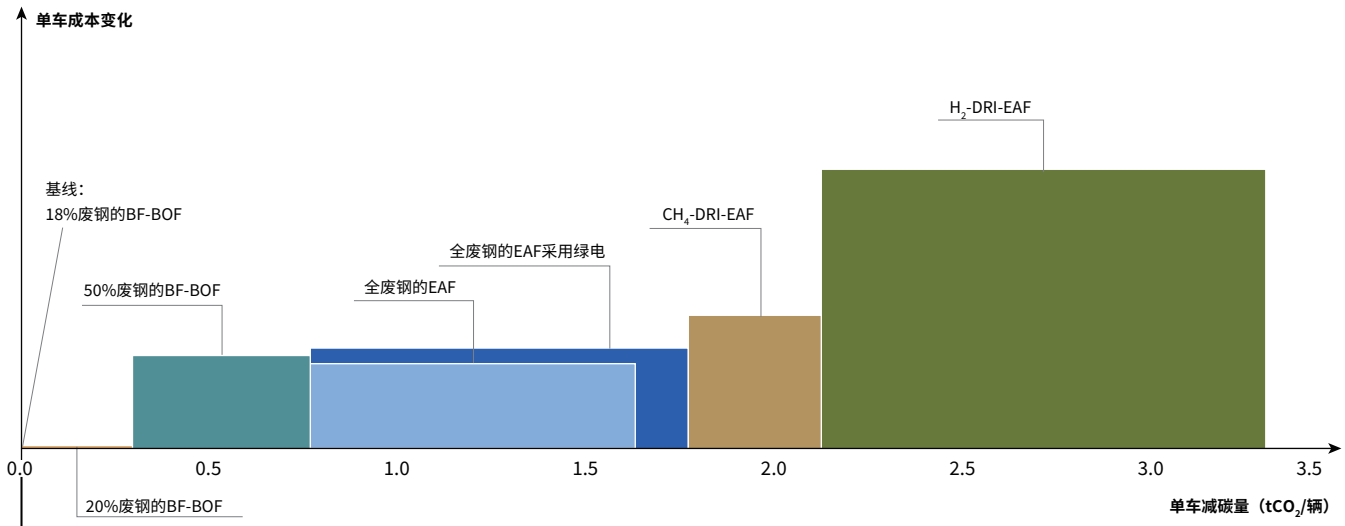


乘用车钢部件



钢铁生产技术路线碳排放 (tCO₂/tFe)

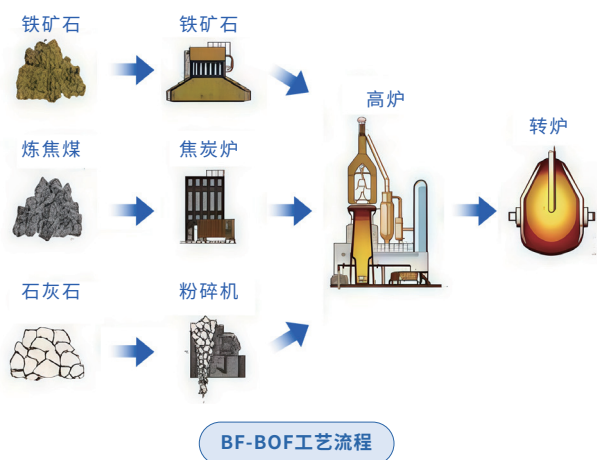
- 沃尔沃ES90主要采用高强度和超高强度钢,因其优异的**比强度、碰撞性能与成本效益**,广泛用于车身骨架、防撞梁、门槛梁等关键安全结构件中。
- **原材料生产技术路线是决定钢铁零部件碳排放的关键**。中国炼钢以长流程BF-BOF为主,碳排放强度较高,达2.1吨CO₂/吨粗钢;短流程EAF炼钢可实现100%废钢冶炼,避免焦化与高炉炼铁环节的碳排放,碳排放可降至0.7吨CO₂/吨粗钢;DRI-EAF通过天然气或绿氢还原铁矿石,避免高炉对冶金焦炭的依赖,已成为全球低碳钢铁产能建设的重点方向。



钢零部件的主要减排措施:

- **提高BF-BOF的废钢使用比例至20%以上**:通过废钢预热等**工艺优化**,提高废钢使用比例;建立废钢**分级与保级回收体系**,保障高品质废钢稳定供应。
- **扩大EAF产能**:在废钢富集区扩大EAF产能,配套**绿电采购与分时电价机制**;着力解决**车规级短流程钢**的质量一致性问题,提升其对长流程钢的替代能力。
- **规划布局H₂-DRI-EAF**:优先在绿电-绿氢资源富集地区推进H₂-DRI-EAF的中试及产业化。
- **减排技术**:在焦化、炼铁、炼钢和成形工艺环节采用**节能减排技术**。

提高BF-BOF废钢比例



在BF-BOF工艺中,废钢通常用于冷却铁水以调节转炉温度,实际生产中废钢使用比例为10-20%。

- 在现有技术条件下, BF-BOF废钢消纳比例可以达到50%。
- 在工业运行中, 通常根据市场价格调节废钢比。多数情况废钢价格高于铁水价格。尽管钢铁产品逐渐进入报废周期, 但其市场需求仍然巨大 (EAF的推广、不同领域的需求等), 优质废钢价格保持高位。

扩大EAF产能



EAF短流程钢目前主要用于汽车长材、管材及厚热轧结构件; 在高性能要求的车规级板材应用仍受限于废钢中杂质元素 (如Cu、Sn) 及成分波动引发的表面质量、夹杂物控制和成形稳定性问题。

- 推动短流程钢向汽车板及高强钢的应用拓展, 需提升废钢品质与冶炼控制水平, 并联合下游企业推进替代牌号开发与认证。
- 我国2025年短流程钢产量占比已达到15%, 年产能超过2亿吨; 2030年预计将短流程钢产能占比提升至20-22%^[11]。
- EAF的产能布局重点集中在华南和华东地区。

闭环保级利用

废钢保级循环案例

沃尔沃汽车将“保级利用”作为材料降碳与供应链韧性同步优化的抓手, 已与北京首钢、浙江弋云在汽车钢铁领域形成可复制的闭环实践。

其核心做法是将冲压/车身件工厂产生的高纯净度汽车钢边角料通过协议回流至钢厂, 在受控成分与杂质水平下再冶炼为满足汽车用板等级要求的钢材, 并回供整车量产体系, 实现“生产废料—再生汽车钢—再进入汽车产品”的闭环循环, 配套信息追溯以减少降级风险。



DRI-EAF (CH₄与H₂)

CH₄-DRI-EAF与H₂-DRI-EAF的对比

	CH ₄ -DRI-EAF	H ₂ -DRI-EAF
技术成熟度	高(已商业化应用)	低(绿氢路线目前主要处于示范阶段)
碳排放水平	1.2-1.5吨CO ₂ /吨钢	接近零(需使用绿氢)
能源依赖性	取决于天然气供应的稳定性	取决于可再生能源电价及电解槽技术发展
成本竞争力	短期优势(成本较传统工艺低30-50%)	长期潜力(绿电、绿氢成本下降)

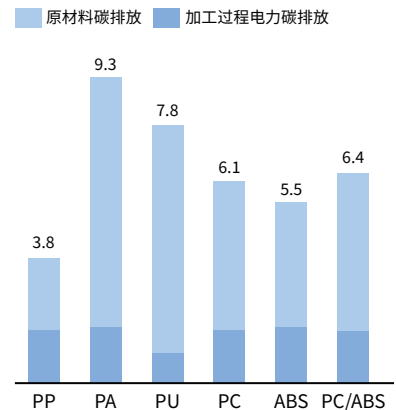
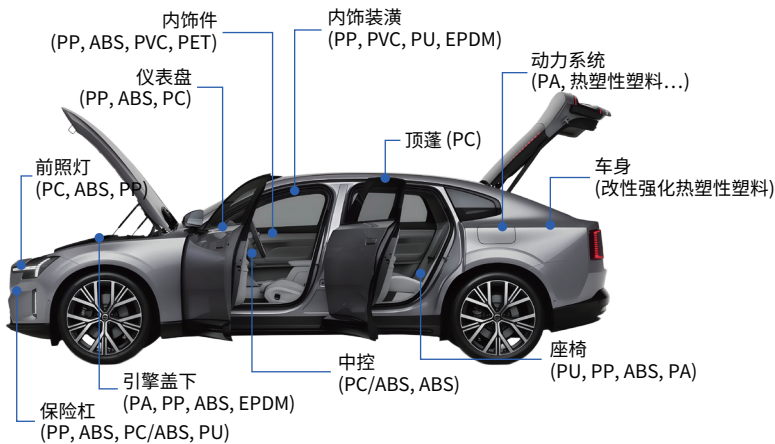
- DRI-EAF的成本构成复杂,影响因素主要包括原材料、能源、设备投资、运营和维护费用、碳成本以及地区资源禀赋差异。
- CH₄-DRI-EAF产能主要集中于印度、伊朗等地区;依托可再生电力与绿氢技术优势,中国更具备H₂-DRI-EAF的发展潜力。
- 在绿氢价格降至约10.5元/千克时,以绿氢为基础的H₂-DRI-EAF具备经济可行性,预计2030年前后在部分区域可与BF-BOF成本持平^[12]。

中国H₂-DRI-EAF项目

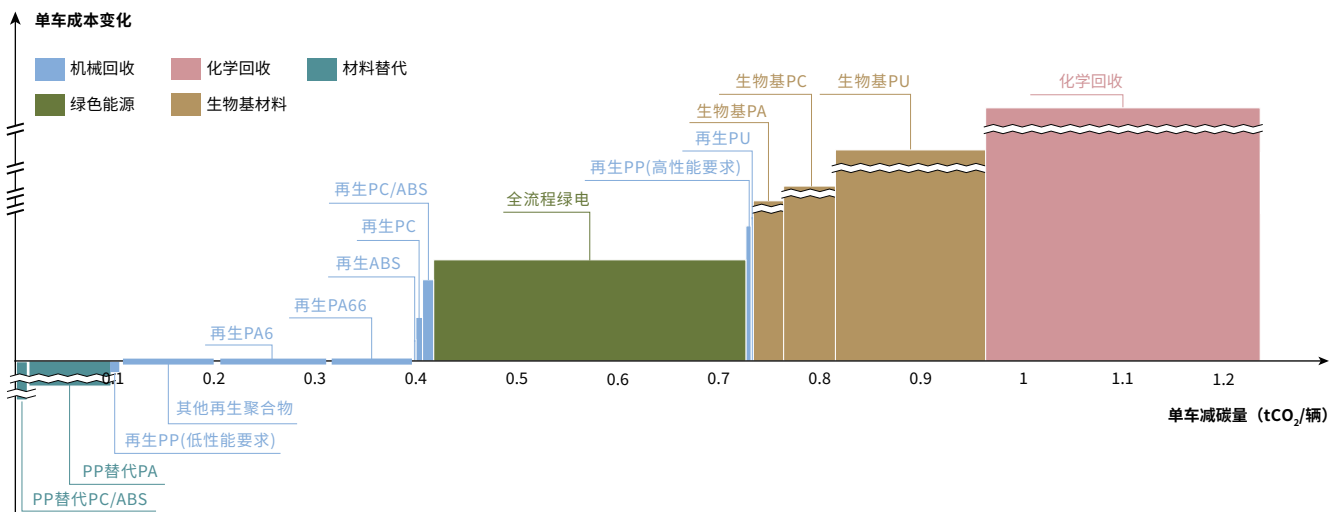
相关企业	所在省市	类型	项目	运营
宝武	广东	氢直接还原	100万吨/年氢基竖炉直接还原示范工程	2025近零碳产线贯通
河钢	河北	氢直接还原	120万吨规模的氢冶金示范工程	2024汽车板连铸线投产
鞍钢	辽宁	氢直接还原	万吨级流化床氢气炼铁示范工程	2025中试线运行
宝武	新疆	高炉喷吹氢气	2500立方米高炉富氧喷吹氢气高炉	2023全线贯通
晋南钢铁	山西	高炉喷吹氢气	1860立方米高炉喷吹氢气	2021常态化生产
山西建龙	山西	氢基竖炉还原	30万吨氢基竖炉直接还原	2021点火投产
德龙	内蒙古	氢基熔融还原	30万吨氢基熔融还原;新增60万吨/年技改	2025获批备案
元图	河北	高炉喷吹氢气	40m ³ 富氢试验高炉	2025试运行
中冶京诚	山东	氢直接还原	5万吨/年中国自主开发氢基冶金自控系统	2024工程示范
河钢	河北	高炉喷吹氢气	2座2300立方米高炉喷吹氢气	2023实施运营

节能减排技术

不同生产环节	节能减排技术
焦化	焦炉干熄焦 ^[13]
炼铁	生物炭替代煤粉喷吹、富氢喷吹+碳循环高炉 ^[14] 、炉顶余压发电
炼钢	转炉煤气回收、炉顶余压发电
成形工艺	冷冲压-伺服冲压 ^[15] 、热冲压-感应加热替代传统炉 ^[16]



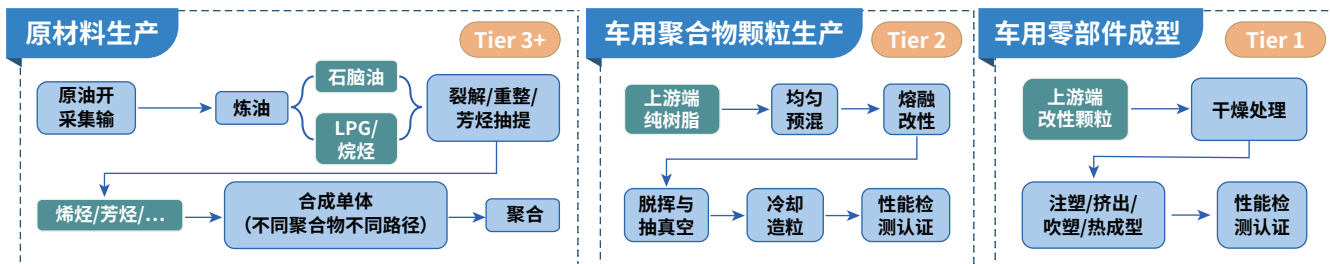
- 车用聚合物包括改性 PP、PA、PU、PC/ABS 等，广泛用于内外饰、动力系统、电子元器件等零部件生产制造。聚合物在轻量化与结构集成方面具备优势，同时具有可设计性强、性能窗口可通过配方与工艺按需定制的特点^[17]。
- 聚合物的碳排放主要来自原料生产环节（70%），改性混配和成型工艺的电力消耗排放分别占20%和10%。不同聚合物在原料合成路线与能耗水平上的差异，导致其单位碳排放表现显著分化^[18]。



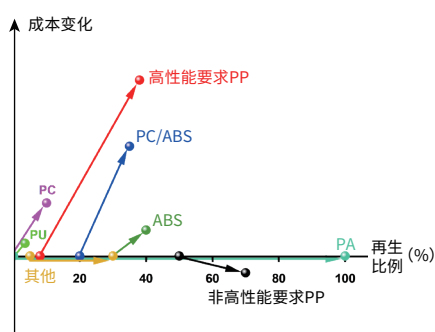
聚合物零部件的主要减排措施：

- **提高再生料使用比例：**保障高品质再生料稳定供给，建设“车端到车端”的回收与闭环供应链，以提升再生料的可用性与一致性；合作开发高再生比例的零部件。
- **材料替代：**在满足安全、耐久与法规要求的前提下，优化配方与结构设计，拓宽改性PP在内外饰及功能件中的适用边界。
- **提升绿电使用比例：**将绿电采购与使用比例纳入评价与项目考核指标，通过长期购电协议、绿证/绿电交易及工厂用能改造等方式，降低改性与成型等电力驱动环节的间接排放。

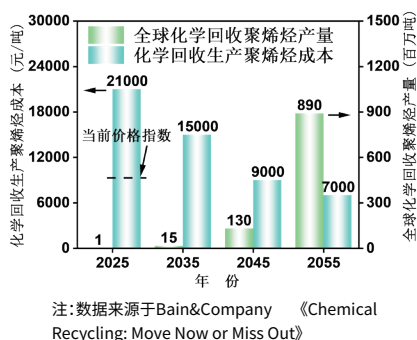
车用聚合物产业链



聚合物回收循环



机械回收再生比例与成本关系



注：数据来源于Bain&Company 《Chemical Recycling: Move Now or Miss Out》

化学回收未来产量与成本关系

ESPR-2027	15%再生塑料
ESPR-2030	总共25%再生塑料 含6.25%车端再生塑料
ELV-6 years	15%再生塑料
ELV-8 years	20%再生塑料
ELV-10 years	25%再生塑料

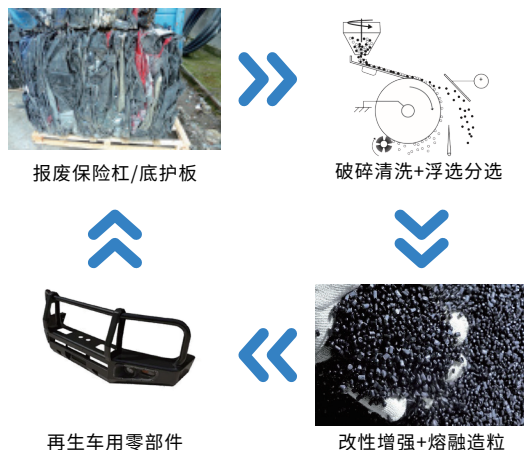
车用聚合物循环相关政策法规

- 车用聚合物零部件对再生料纯度、稳定性与批次一致性要求较高^[19]，废料的收集、分选、清洗、再生改性导致高品质再生料价格较原料溢价约5%–20%。部分外饰件使用机械再生PP及提高PA6/66机械再生料使用比例，可以在不增本的情况下减排。
- 化学回收仍处于商业化早期阶段，技术体系、产业链供给和行业标准仍有待完善^[20]。化学回收再生料价格远高于原料，短期适合在高附加值或强合规驱动的细分场景下开展示范应用与规模爬坡。
- 随着政策要求逐渐出台，机械回收仍将是提高车用零部件再生比例的主要路径。

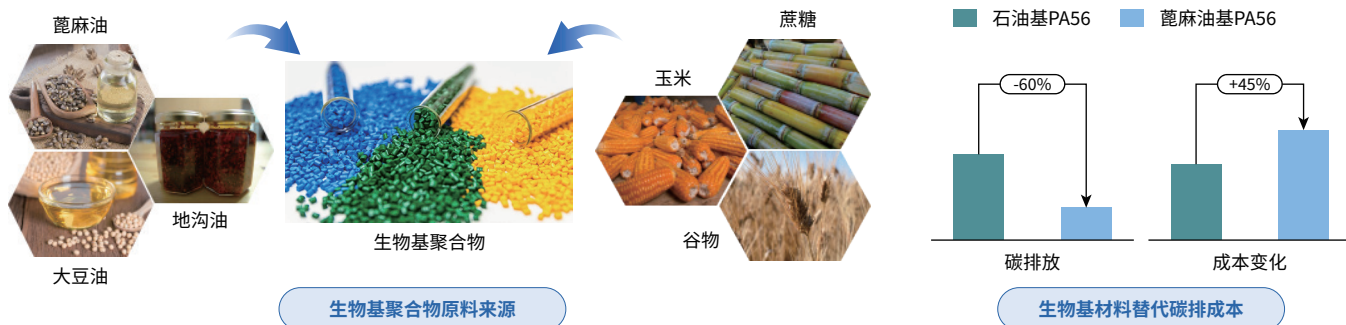
Renault Group 报废车 (ELV) 机械回收再生保险杠、底护板案例^[21]

构建闭环回收体系时需确保：1) 建立完整的原料溯源机制；2) 通过定向改性技术提升再生材料性能。

- 分选除杂工艺是提升再生比例的关键，通过高效去除苯乙烯类、泡沫与薄膜等杂质，可以降低交叉污染对再生零部件性能和稳定性的影响。
- 内饰件更受外观、气味与VOC约束，外饰端关注涂装与耐候等要求，需要对再生料来源进行严格排查与管理。



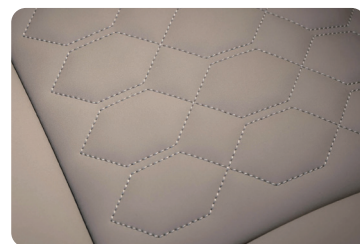
生物基材料替代



- 以生物基原料替代化石基原料,显著降低上游原料合成与能源使用的碳排放。
- 生物基聚合物使用农林生物质可再生资源作为原料,降低对石油、天然气等化石资源的结构性依赖,有助于提升资源循环利用水平与长期原料供给稳定性^[22]。
- 当前生物基材料产业规模有限,供应链稳定性、质量一致性与认证体系有待完善,导致成本偏高,其发展需要明确的性能/品牌价值场景与政策激励支持。

内饰Nordico®植然皮案例

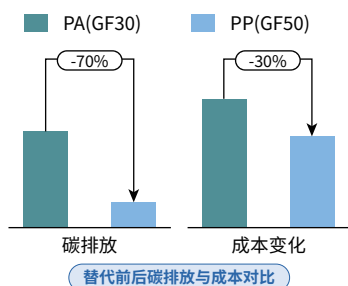
以生物基松油为关键原料生产PVC,并与PET瓶共混,实现多源生物基组分与废塑料的协同利用。产品单位碳排放仅为 $2.4\text{kgCO}_2/\text{m}^2$,相较传统皮革碳足迹降低74%。



Nordico®植然皮

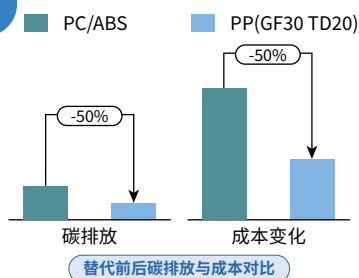
低碳聚合物替代

冷却模组 PA→PP案例



电动车发动机周围工作环境温度更低、介质更可控,使得以低碳低成本材料替代传统燃油车工程塑料成为可能^[23]。在满足性能要求的前提下,以改性PP替代PA,生产制造动力系统冷却模组,实现成本与碳足迹同步优化。

座椅结构件 PC/ABS→PP案例

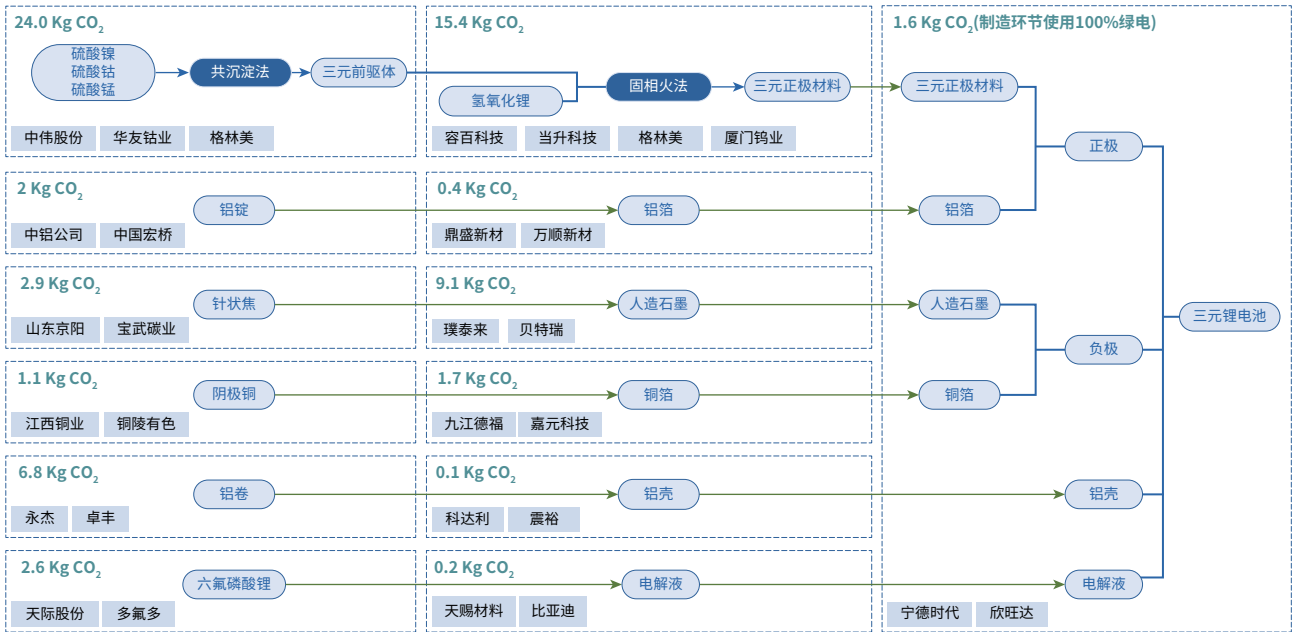


通过对低碳、低成本材料(PP)进行定向改性,可显著提升材料的强度、刚度及尺寸稳定性^[24],进一步拓宽其替代工程塑料(PC/ABS)的应用场景。该类材料有望在更多结构件中实现规模化应用,如车门把手、座椅背板、钥匙卡口等。

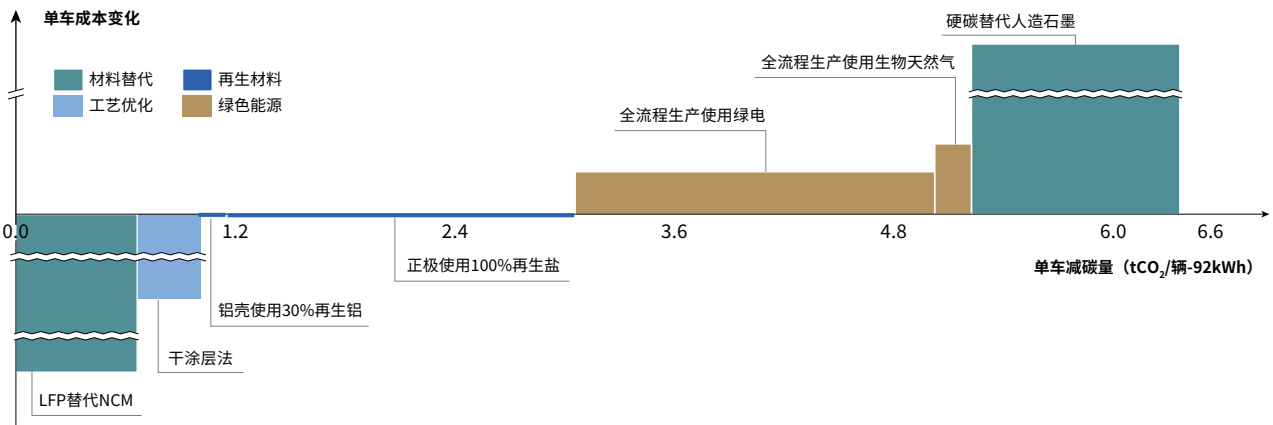
动力电池

动力电池在新能源汽车全生命周期碳排放占比高达**18%**。三元锂电池主要由三元正极、石墨负极、铝壳、电解液等部分组成,凭借高能量密度优势占据中高端车型市场。在NCM622中,电芯的碳排放量约为**63.4 kgCO₂/kWh**,其中三元正极材料碳排放高达**39 kgCO₂/kWh**。

动力电池产业链碳足迹分布 (以1kWh NCM622为例)



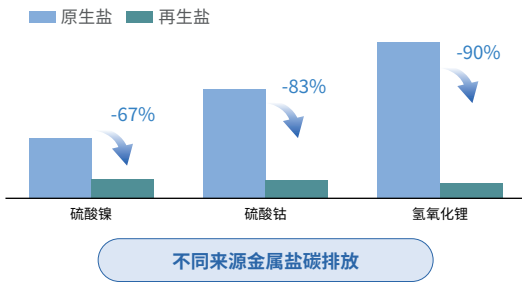
- **动力电池正极:**碳排放主要来源于原材料开采精炼、正极烧结等高能耗环节。
- **人造石墨负极:**动力电池中第二大排放源,主要源于生产步骤中石墨化工艺的能源使用。
- **其他结构件:**铝壳与铜铝箔的碳足迹,主要源于原材料冶炼阶段的能源使用。



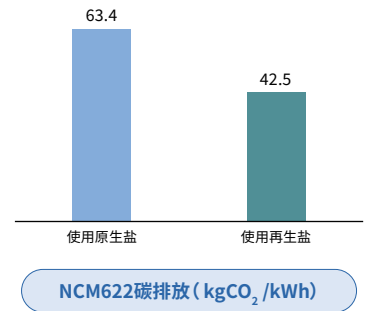
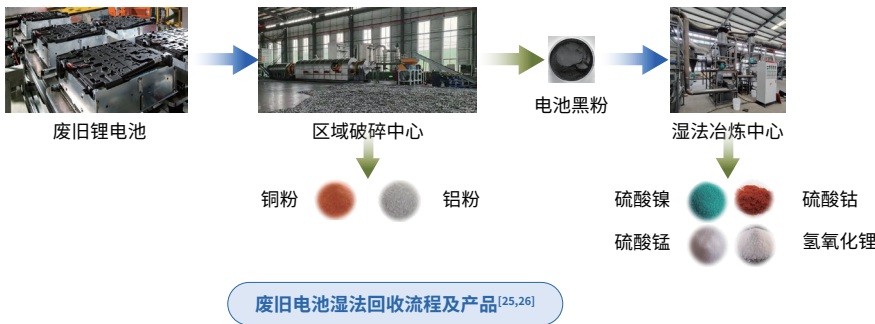
动力电池的主要减排措施:

- **提高再生盐使用比例:**与电池回收生产厂商合作搭建闭环回收模式,保证再生盐稳定供给。
- **磷酸铁锂电池替代三元锂电池:**在中低续航车型上替代三元锂电池,实现降本与减排的双重收益。
- **全流程生产使用100%绿电:**加快构建锂动力电池产业链的能源转型,实现绿色生产。
- **创新技术:**干涂层法、硬碳负极、碳酸锂锂源切换为盐湖。

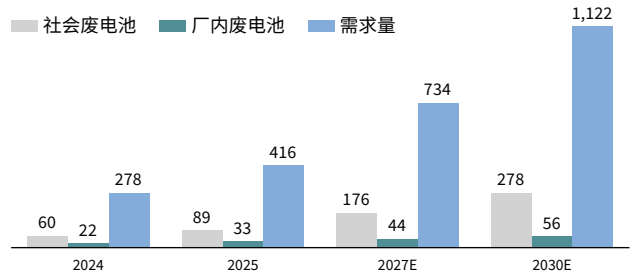
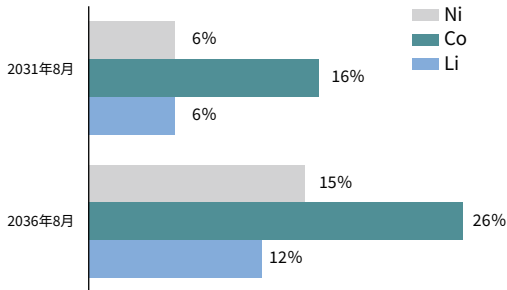
再生盐



NCM622正极材料制备主要使用硫酸镍、硫酸钴和氢氧化锂等金属盐。相比原生盐，再生盐的单位碳排放较低：**硫酸镍碳排放约减少67%、硫酸钴减少83%、氢氧化锂减少90%。**



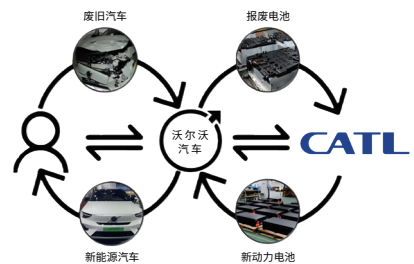
- 废旧电池湿法处理可实现镍、钴和锂的高比例回收，回收比分别达到98%、98%和90%。
- NCM622电池使用**100%使用湿法再生盐**，可减少**20.9 kgCO₂/kWh**碳排放。



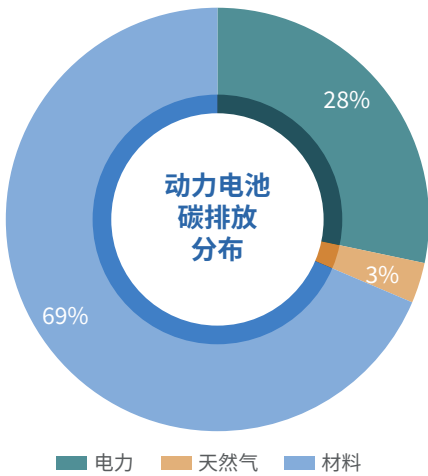
- 欧盟《电池法案》规定，2031年起电池正极中必须使用再生材料，再生盐将成为动力电池出口海外市场的必要条件。我国将在2027年和2030年迎来三元锂电池退役潮，但随着未来锂电池需求不断增长，**废旧电池再生材料仅能满足社会锂电池生产需求的30%**。
- 构建稳定的再生盐供应体系，是企业应对未来供需缺口、维系供应链安全的关键战略举措。

电池闭环回收案例^[26]

沃尔沃汽车将回收退役废旧电池，交由下游供应商进行处理，提取镍、钴、锂等金属材料。宁德时代利用再生材料生产新电池，并定向用于沃尔沃汽车生产。



全流程绿色电力

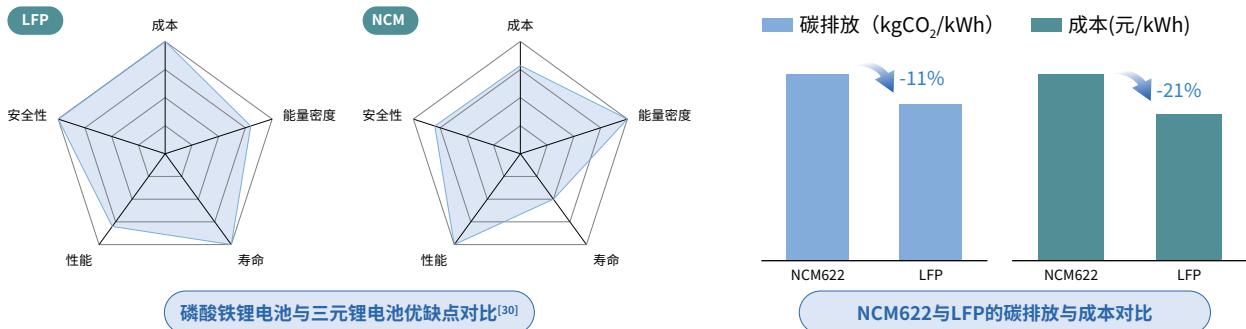


动力电池正、负极材料龙头企业绿电&碳中和计划

企业	目前绿电比例	未来绿电计划	碳中和计划
中伟股份	100%	—	2040
华友钴业	40%	100% (2035)	2050
格林美	25.7%	100% (2030)	2035
容百科技	40%	100% (2030)	2030
厦门钨业	61.2%	100% (2050)	2050
宁德时代	100%	—	2035
欣旺达	25.4%	100% (2050)	2050
璞泰来	75.4%	100% (2030)	2050

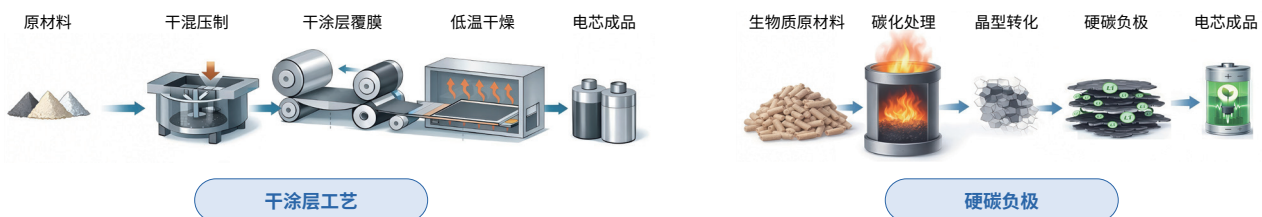
- 我国动力电池正、负极材料重点生产企业相继提出：在2030年前后生产环节使用100%绿电的目标。
- 生产环节的能源结构转型可减少动力电池近28%的全生命周期碳排放。

磷酸铁锂电池替代三元锂电池



- 磷酸铁锂电池具有**长循环寿命**，可满足新能源汽车频繁充放电需求。
- 磷酸铁锂电池具有**良好的热稳定性**，不易发生热失控，**安全性更高**。
- 磷酸铁锂电池替代三元锂电池，可**降低21%成本**，**减少11%碳排放**。

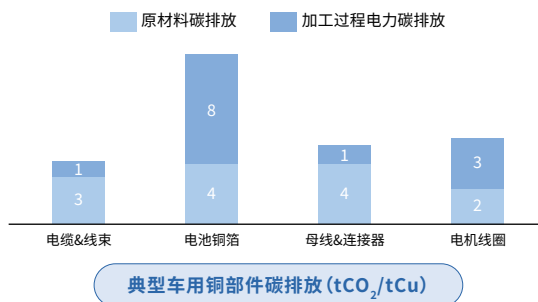
干涂层法/硬碳负极



- 在电芯制造环节使用干涂层法有望**降低约18%成本**，**减少约40%碳排放**，产业化窗口期在2027-2028年。
- **硬碳负极**具有出色的**比容量和循环寿命**，可减少约19%动力电池碳排放。

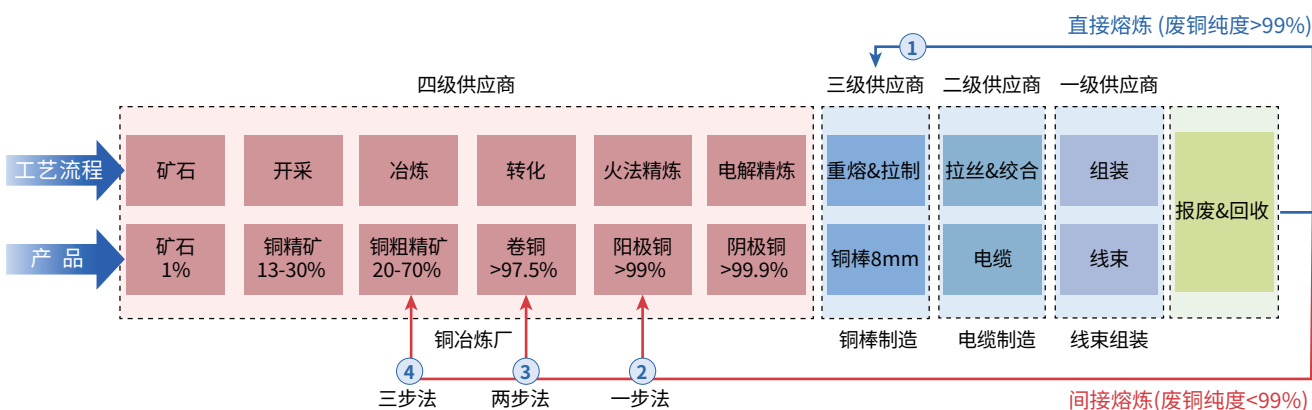
典型车用铜部件基本情况

部件	图片	材料牌号	纯度	体积电阻率	延伸率
电缆&线束		ETP1	99.9935	0.01707	40%
电池铜箔		T1	99.9935	0.01707	40%
母线&连接器		T2	99.95	0.01724	37%
电机线圈		C1100 TU1	99.90	0.01724	35%

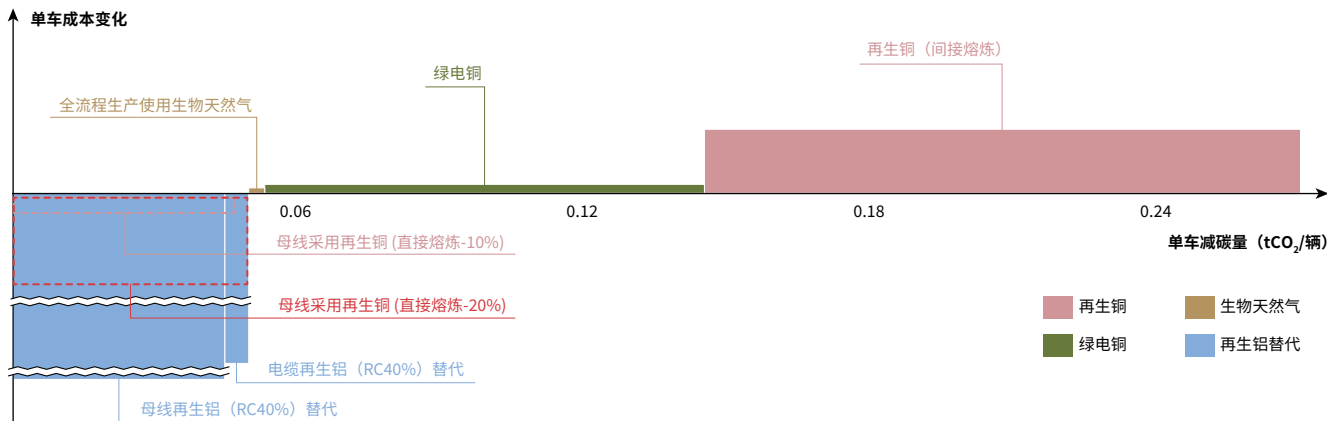


- 铜主要用于线束、母线、电机线圈等部件。
- 原生铜碳排放集中于熔炼与电解环节，碳排放约4吨CO₂/吨铜。使用再生铜可在满足性能要求的前提下显著降低单位碳排放(0.6-2吨CO₂/吨铜)，再生铜产量占中国铜总产量的50%。

电缆&线束生产流程



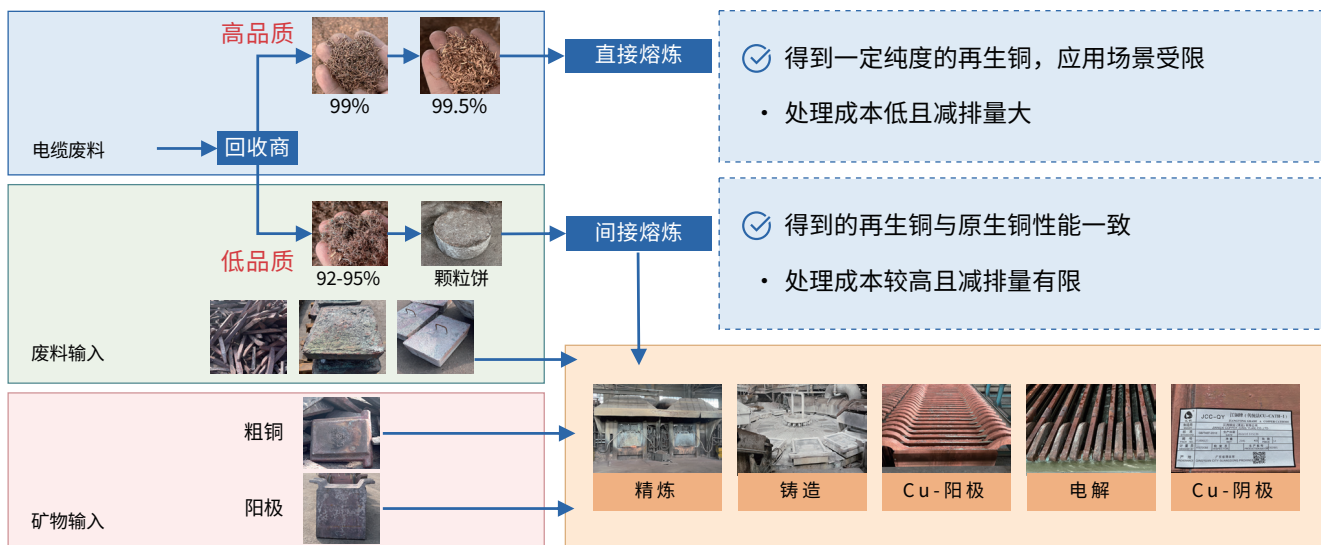
- 以电缆和线束铜部件为例，原材料生产是贡献碳排放的主要环节。
- 矿石开采、能源密集型冶炼及后续多次加工均产生显著碳排放。
- 铜材料的减碳措施需要覆盖全产业链：在源头优化生产工艺，在末端强化循环利用。



铜零部件的主要减排措施：

- 提高再生铜使用比例：**建立标准化资源循环认证体系，完善废料精细化分选技术，构建高效回收网络。
- 使用绿电铜：**加快健全铜生产企业的绿色低碳转型。
- 再生铝替代：**通过新型连接工艺和材料结构设计，克服铝母线排性能局限。

再生铜



- 高品质废铜占社会废铜总量的2/3，通常采用直接熔炼处理再生，其生产的再生铜纯度有限。
- 低品质废铜占社会废铜总量的1/3，通常采用间接熔炼处理再生，其生产的再生铜性能与原生铜一致。
- 《关键原材料法案》（CRMA）规定：到2030年，欧盟战略原材料回收量应达到年消费总量的15%；《铜产业高质量发展实施方案（2025—2027年）》明确了中国再生铜产业“集约化、高值化”的发展方向。

再生铜应用案例

技术层面，间接熔炼再生铜纯度可达到99.90%以上，符合电机线圈的性能要求。沃尔沃汽车电机线圈再生铜使用比例达到80%，取得了显著的碳减排成效。

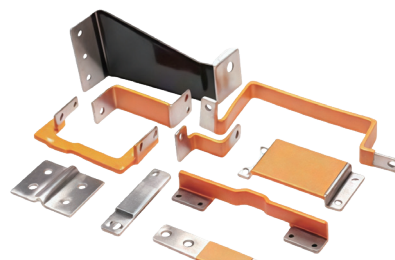


电机线圈

材料替代

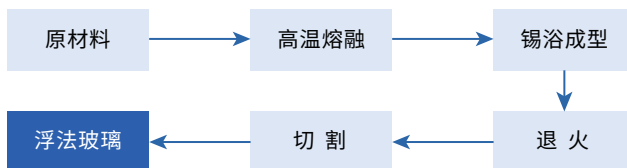
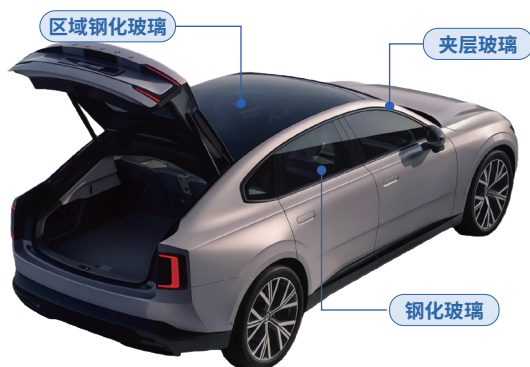
铝制母线排应用案例

汽车高压电气系统采用铝制母线排替代传统铜材，可实现新能源汽车轻量化和降本增效。针对铝材料存在的导电率低、截面需求大和机械/热可靠性较差等问题，特斯拉、比亚迪及大众等汽车公司提出了新型焊接技术和表面处理工艺，并应用于铝制母线排的生产实践。



铝制母线排

车用玻璃及生产工艺



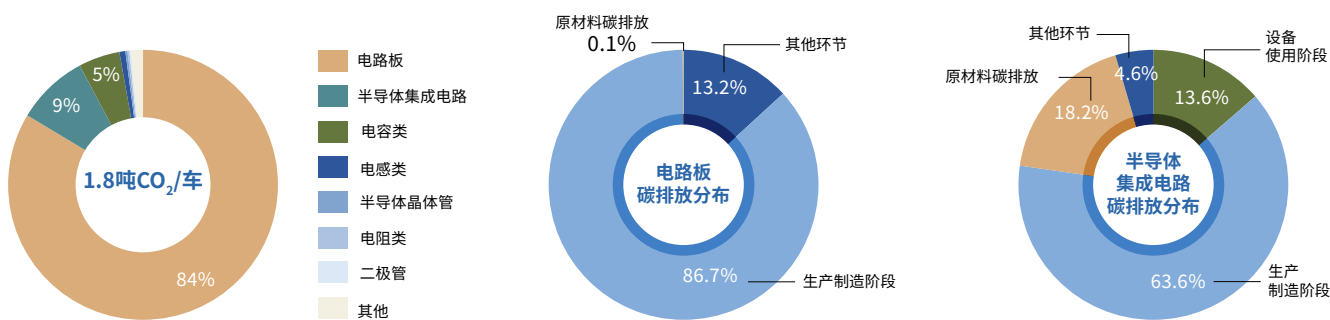
玻璃类型	碳排放量
钢化玻璃	0.01 - 0.02 吨 CO ₂ /m ²
夹层玻璃	0.015 - 0.03 吨 CO ₂ /m ²
区域钢化玻璃	0.01 - 0.02 吨 CO ₂ /m ²

玻璃的主要减排措施：

- **材料替代:**采用光学级聚碳酸酯材料替代部分玻璃,实现大于50%的减重与节能。
- **再生玻璃:**采用光学、密度等分选技术,高效分离不同类型碎玻璃,同时降低杂质含量,提高再生玻璃使用比例。
- **工艺优化:**应用高性能功能玻璃(如低辐射镀膜玻璃)降低整车使用阶段能耗。

电子元器件

各类电子元器件的碳排放^[31]



各类电子元器件的碳减排技术^[32,33]

电子元器件类型	减碳手段
电路板	绿电生产；减少高碳排放工艺气体使用；工艺优化及能源结构调整；可再生材料利用。
半导体/集成电路	绿电生产；能效优化设计；提高芯片良率；推广先进封装技术。
显示器	绿电生产；亮度自适应与局部调光降低能耗。
传感器	绿电生产；外壳与支架采用再生铝。
线束与连接	绿电生产；域控化减少长度；降低连接端子镀金厚度。
架构设计	中央计算/域控化：用3-5个域控替代70-100个电子控制单元，同时缩短线束长度与分布式电源模块数量
功率电子	绿电生产：SiC/GaN模块替代Si-IGBT模块；高导热陶瓷替代厚金属。

产业与政策建议

面向汽车行业的建议

1. 材料再生与策略优化

汽车企业提升铝、电池等再生材料使用比例,与供应商签署协议并制定典型零件再生比例规划;构建金属与聚合物协同优化策略,平衡轻量化与成本考量,推动改性材料的应用。

2. 碳足迹管理与绿电

推动打通价值链碳足迹透明度,要求供应商核算、共享数据并建立碳排放数据库;推动上游供应链在高电耗环节使用100%绿电,合作降低边际成本。

3. 强化内外部协同

零部件生产企业加强内外部协作,内部统一碳成本与材料策略认知,对外与整车厂及行业组织共享减排路径,扩大在供应链减碳领域的引领作用。

面向地方政府与主管部门的建议

1. 产业协同与园区建设

打造涵盖多种再生材料回收及电池回收的一体化园区,推动再生材料产能与本地企业协同,纳入地方产业规划与用地保障。

2. 降本减阻与标准建设

通过财政补贴、税收优惠、创新激励等组合政策降低高耗能领域减碳成本,确保“绿电+能效提升”综合用电成本不高于基准;制定关键材料碳足迹核算指南,推动供应商采用标准化碳核算。

3. 政策引导与多元支持

加强绿色采购引导,设置硬性要求或加分项;支持关键低碳工艺首台/套示范线;推进零碳园区试点,形成可复制模式;建立健全金融与监管激励机制,推动全产业链减排。

结 语

| 关于本研究

本次研究历时1年,我们系统走访调研了近40家业内企业,结合国内外最新学术产业报告,识别出约50个减碳方法,推动形成22个核心减排措施。

在上海交通大学中英国际低碳学院院长耿涌教授和书记郭亮老师的指导下,薛渊老师课题组和沃尔沃汽车亚太可持续团队承担了该项目的实际工作。本研究也得到了上海交通大学学生创新中心宋续明书记,学院张宇泉、余海珊、季亦利、储倩老师的支持,一并表示感谢。

同时,鉴于目前对汽车材料碳减排核算的方法论还没有统一的标准,我们的核算主要基于沃尔沃汽车采用的 ISO 14044:2006标准。减排成本方面,我们同时从行业价格指数以及成本模型多方加以验证,但限于人力物力、日新月异的行业发展,恐有偏颇之处,还请海涵指正。

| 产学研成果展示平台

为了更好地服务行业,同时积极吸纳行业最新发展趋势,我们打造了一个新能源汽车碳中和讨论平台。您可以扫描下方二维码获得此报告的原始文件,并提出您的宝贵建议!



扫描二维码

参考资料

- [1] Volvo Cars. Carbon footprint assessment of the Volvo ES90 [R/OL]. (2025). <https://www.volvocars.com>.
- [2] 中国产业研究院. 2025年电解铝行业市场发展现状趋势分析 [EB/OL]. (2025). <https://www.chinairn.com/scfx/20251105/160132378.shtml>.
- [3] IEA, Renewables 2025 [EB/OL]. (2025). <https://www.iea.org/reports/renewables-2025/renewable-electricity>.
- [4] 中国铝业集团有限公司.【战新产业“百大工程”】中铝集团新能源项目领跑铝行业低碳革命[EB/OL]. (2025). <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588119/c33274541/content.html>.
- [5] IB2, Technip Energies endorses IB2 technology: Paving the way for a sustainable alumina industry [EB/OL]. (2025). <https://www.al-circle.com/press-release/technip-energies-endorses-ib2-technology-paving-the-way-for-a-sustainable-alumina-industry-113167>
- [6] 中新网青海. 中铝青海分公司600KA电解槽启动运行[EB/OL]. (2024). <https://www.qh.chinanews.com.cn/zq/news/2024/1227/131797.html>.
- [7] 东方网. 俄铝向中国出口创新型ALLOW INERTA (惰性阳极产铝锭) 助力绿色环保铝箔生产[EB/OL]. (2025). <https://ex.chinadaily.com.cn/exchange/partners/82/rss/channel/cn/columns/sz8srm/stories/WS692feeb4a310942cc4994bec.html>.
- [8] 中国工业报. 铝电解智能制造与数字孪生融合应用[EB/OL]. (2025). <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1840865859546849766&wfr=spider&for=pc>.
- [9] 吕晓军, 陈昌, 韩泽勋, 等. 一种铝电解槽用可润湿性阴极材料、制备方法及应用: 中国, CN123456789A[P/OL]. (2024).
- [10] 华经产业研究院. 2025-2031年中国铝压铸行业市场全景分析及投资战略规划报告[EB/OL]. (2024). <https://www.huaon.com/channel/trend/1031264.html>.
- [11] 工业和信息化部, 国家发展改革委, 生态环境部. 工业领域碳达峰实施方案[R/OL]. (2022). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/01/content_5703830.htm.
- [12] Hydrogen Council, McKinsey & Company. Hydrogen Insights 2021[R/OL]. (2021). <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights/>.
- [13] 中华网. 8个月建成投产! 干熄焦项目开启绿色低碳发展新篇章[EB/OL]. (2025). <https://mtz.china.com/touzi/2025/1230/210752.html>.
- [14] 王超, 许海法, 康健, 等. 富氢碳循环氧高炉的CO2循环喷吹炼铁方法及系统: 中国, CN119639977A[P/OL]. (2025).
- [15] 文骄阳, 高建波, 王启武, 等. 采用伺服压力机实现冲压节能的定量研究[J] 山东科技, 2020, 33(2): 46-53.
- [16] 凯文·罗伯特·绍文, 加勒特·桑基·赫夫, 康斯坦丁·基里亚克, 等. 通过感应加热选择性地软化热冲压部件的方法和系统: 中国, CN106466695B[P/OL]. (2020).
- [17] 陈葳. CHINAPLAS 2025——看橡塑行业创新变革之旅 [J]. 中国石油和化工, 2025, 05: 28-31.
- [18] 柯铭青. 回收塑料材料在汽车工业中应用的调查研究 [J]. 中学科技, 2024, 22: 37-39.
- [19] 何翔任. 石油石化行业积极构建全产业链协同的低碳生态 [N]. 中国石化报, 2025-11-11 (005). <https://doi.org/10.28130/n.cnki.ncshb.2025.001537>.
- [20] 张金庆, 吕行, 徐英志, 等. 废塑料化学回收现状及研究进展 [J]. 化工进展, 2026: 1-19.
- [21] GALLONE T, ZENI-GUIDO A. Closed-loop polypropylene, an opportunity for the automotive sector [J]. Field Actions Science Reports The journal of field actions, 2019, 19: 48-53.
- [22] 田亚兵, 冯雪贞, 王亚利, 等. 生物基聚合物泡沫的研究进展 [J]. 高分子材料科学与工程, 2025, 41(09): 160-168.
- [23] 张红星, 李丽, 邓守军, 等. 高性能轻量化环保型车用聚丙烯的开发 [J]. 石油化工, 2025, 54(10): 1459-1465.
- [24] 马殿普, 李俊, 袁英杰, 等. 汽车零部件用阻燃高分子材料的应用研究进展 [J]. 云南化工, 2021, 48(09): 1-7.
- [25] 央视新闻. 20万吨退役电池大量流入黑市 新能源汽车如何避免“新污染” [R/OL]. (2021). <https://news.cctv.com/2021/04/13/ARTIqfcysTctgvVyL6gluyh210413.shtml>
- [26] 贤集网. 锂电池梯次利用储能系统成本进入1元/Wh新时代[R/OL]. (2022). https://www.xianjichina.com/special/detail_418763.html?isreal=1
- [27] 人民网. 电池回收市场良性发展可期[R/OL]. (2025). https://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/content/202503/31/content_30066287.html.
- [28] 邦普循环. 2024年可持续发展报告[R/OL]. (2024). <https://www.brunp.com.cn/sustainable-development/sustainability>.
- [29] 华安证券. 锂电回收新势力, 技术领先渠道布局产能加速[R/OL]. (2022). https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202208171577289583_1.pdf. [30] 信达证券. 磷酸铁锂龙头企业, 综合优势显著[EB/OL]. (2025). https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202310131601405327_1.PDF
- [31] EES2, SLAC Stanford University. [EB/OL]. (2025). <https://ees2.slac.stanford.edu/>
- [32] Wide Band Gap Technology: Energy and environmental related Life Cycle Assessment [EB/OL]. (2023). <https://www.iea-4e.org/>
- [33] Felix Funk, et al. Scenario-Based Life Cycle Assessment of an Automotive Wire Harness[J] Sustainable Manufacturing as a Driver for Growth, 2025: .232-240.

附录

名词	解释
PFC	全氟化碳 (Perfluorocarbons, PFC) PFC属于温室气体，产生于铝电解冶炼过程中的阳极效应。
ACD	极距 (Anode-Cathode Distance, ACD) ACD属于铝电解工艺的核心几何参数，直接影响槽电压和直流电耗。
BF-BOF	高炉-转炉工艺 (Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace, BF-BOF) BF-BOF是当前全球主导的钢铁生产路线，该工艺依赖煤炭，碳排放较高。
EAF	电弧炉工艺 (Electric Arc Furnace, EAF) EAF是以废钢为主要原料的短流程炼钢技术，占全球粗钢产量的22%-26%。
DRI-EAF	直接还原铁-电弧炉工艺 (Direct Reduced Iron-Electric Arc Furnace, DRI-EAF) DRI-EAF是将铁矿石气基直接还原为海绵铁，随后在电弧炉中熔炼成钢。
PP	聚丙烯 (Polypropylene, PP) PP属于热塑性聚烯烃材料，广泛用于汽车内饰件、保险杠及轻量化结构部件。
PA	聚酰胺 (Polyamide, PA) PA属于工程塑料，具有优良的耐磨性和耐热性，广泛用于动力系统部件与齿轮材料。
PC	聚碳酸酯 (Polycarbonate, PC) PC属于高透明工程塑料，具有高冲击强度，广泛用于车灯罩与透明防护部件。
PU	聚氨酯 (Polyurethane, PU) PU属于高分子弹性材料，广泛用于座椅泡沫、密封件及减震隔音材料。
ABS	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 (Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS) ABS属于工程塑料，兼具韧性与刚性，广泛用于汽车仪表板与外壳结构件。
PC/ABS	工程塑料合金 (PC/ABS Blend) PC/ABS属于共混工程塑料，兼具耐热性与加工性，广泛用于汽车内外饰高强度部件。
PVC	聚氯乙烯 (Polyvinyl Chloride, PVC) PVC属于通用塑料，具有良好的阻燃性和耐化学性，广泛用于电缆护套与内饰覆盖材料。
PET	聚对苯二甲酸乙二醇酯 (Polyethylene Terephthalate, PET) PET属于聚酯类热塑性材料，广泛用于纤维、薄膜及汽车塑料件的增强基体。
EPDM	三元乙丙橡胶 (Ethylene Propylene Diene Monomer, EPDM) EPDM属于合成橡胶，具有优良的耐候性，广泛用于汽车密封条与耐老化橡胶部件。
GF	玻璃纤维 (Glass Fiber, GF) GF属于常用增强材料，可显著提高塑料的强度与刚度，广泛用于玻纤增强复合材料。
LPG	液化石油气 (Liquefied Petroleum Gas, LPG) LPG可用于生产聚合物前驱体。
VOC	挥发性有机物 (Volatile Organic Compounds, VOC) VOC属于汽车内饰材料释放的挥发性气体成分，是评价车辆气味与舱内空气质量的重要指标。
ELV	报废汽车 (End-of-Life Vehicle, ELV) ELV指达到使用寿命的车辆，其回收与资源化处理是汽车循环经济的重要环节。
ESPR	欧盟报废车辆法规框架 (End-of-Life Vehicle Regulation, ESPR) ESPR属于欧盟汽车制造相关政策法规，强调生态设计与可持续材料使用要求。
NCM	三元锂电池 (Nickel Cobalt Manganese Battery, NCM) NCM是以镍钴锰酸锂为正极材料的锂离子电池，能量密度高、寿命长，广泛应用于电动汽车和储能领域。
LFP	磷酸铁锂电池 (Lithium Iron Phosphate Battery, LFP) LFP是一种以磷酸铁锂为正极材料的锂离子电池，安全性高、寿命长及成本低，广泛应用于电动汽车、储能系统等领域。
Si-IGBT	硅基绝缘栅双极型晶体管 (Si-Insulated Gate Bipolar Transistor, Si-IGBT) Si-IGBT是第二代功率半导体的核心器件，输入阻抗高和导通压降低，广泛应用于中高电压、中大功率的电力电子领域。

