



关键金属效率 在清洁能源转型中 不可或缺





庄信万丰致力于确保本白皮书中所含信息和资料的准确性，但对于其在任何特定用途下的准确性、完整性或适用性不作任何保证。庄信万丰不承担由于用户对本报告所载信息和资料的依赖所产生的任何责任，且明确表示使用此类信息和资料的风险应由用户自行承担。本白皮书中所含的任何信息不视作、也不应视作对买卖或者处置任何受管制的贵金属制品或任何受管制的产品、有价证券或投资的推荐与建议。亦不应假定专利、版权和外观设计下的任何自由权利。

© 2024 庄信万丰集团

除图9外：© 2024，S&P Global Commodity Insights所有，该部门隶属于S&P Global Inc. 保留所有版权。

本图作为集体作品或汇编，受英国版权、美国版权及其他法律和条约保护，未经版权所有者明确书面许可，不得复制、分发、传输或以其他方式使用。构成本图的所有数据、信息、栏目和其他元素均为版权作品，S&P Global特此保留所有权利。进行任何投资、交易、风险管理或其他决策时，所含信息不应用作依据。作为S&P Global附属机构及其第三方许可方，S&P Global Commodity Insights：（1）对信息本身的适销性、特定目的或适用的特定用途不作任何保证；（2）对信息的充足性、准确性、时效性和/或完整性不作任何保证；（3）对任何损害或责任，包括间接性、特殊性、附带性、惩罚性或结果性损害不承担任何责任。



概述

从化石燃料能源体系到可再生能源的转型需要大量使用某些关键金属，特别是铜、镍、钴和锂。能源利用所需的电池和其他电气化应用是推动这些金属需求上升的主要驱动力，而可再生能源发电对这些金属需求的驱动力则相对较小。在净零目标下，金属需求量预计会极速上升，供应的及时性和可持续性可能受到挑战。

因此，在能源转型中如何减轻对关键金属的单位使用量，且实现巴黎气候协议的目标？

虽然能源利用率推动了电池和直接电气化的普及，但单靠电气化是无法实现的，我们仍需考虑关键金属的单位使用量，须由不同金属（如铂族金属）且金属单位使用量较低的技术加以补充，从而实现有序的能源转型。

不同于其他关键金属，铂族金属拥有完善的供应渠道和成熟的回收网络，并未面临同样压力。因此，通过制氢、氢燃料、燃料电池汽车，生物质燃料和化学品等现有技术便能解决减排困难行业所面临的问题。在总能源消耗量中，这些行业将持续占据重要比例。此外，这些技术还可以解决可再生能源供应的间歇性和运输问题，同时节约基础设施成本。

本白皮书着重讨论了金属效率，以期在能源转型中这一概念能够被充分理解和考虑。

“显然，急剧增加的金属需求可能导致供应的及时性和可持续性可能受到挑战”

引言

为何金属效率至关重要？

提高全球能源利用效率是能源转型的一个重要方面。它降低了脱碳挑战的规模，并使经济增长与化石能源需求增长脱钩，以帮助实现社会转型。

随着我们迈向净零排放，从化石燃料能源体系向可再生能源过渡，可再生能源多数以电能的形式捕集。所以对高效能源利用率的追求推动了电气化技术的研究和普及，如纯电动车（BEVs）。

目前最节省电力损耗的做法是：一旦有电流产生，无需进行任何转换而即刻使用，同时用电设备与发电装置的距离尽可能接近，否则会增加传输损耗。因此，通过将能源消费端电气化，不仅可以直接使用可再生能源电力，还可极大减少能源利用形式转化过程产生的损耗。

但是，能源利用效率往往被视为所有未来能源使用的唯一或首要考虑因素。这种单一的考虑维度存在很大问题，原因如下：

- 首先，能源消费端的电气化将需要高频且大量地使用某些关键金属，而这些金属面临供应短缺的挑战。
- 其次，想要100%实现基于可再生能源直接利用的全球能源经济构想并不可行：可再生能源的电力供应能力并不足以将电力输送到每一个终端用电设备，而且所有应用场景都直接使用电力是不切实际的。所以利用氢能或生物质能源作为现行电气化技术的补充是有必要的，而对于在电气化趋势下已出现供应紧张的关键金属，不得不减少使用量。

综上，未来科技发展战略在追求技术的合理与可持续的同时，须考虑关键金属效率和能源利用效率。

金属效率的概念

对于能源利用效率，尤其是化石燃料的能源利用效率，大家是耳熟能详的：化石燃料资源有限，过度及不合理使用会对环境产生影响；因此，需要高效利用能源。该参数以体系有效利用的能量与实际消耗能量的比值度量，或者说是每产生一个单位的产品所消耗的能源。例如，百公里油耗（与千焦耳相关）。

金属资源效率的概念类似：资源量有限，且矿产资源开采过程会对生态环境产生影响；同样应高效利用金属。以每产生一个单位的产品所消耗的金属量作为度量，如后文中讨论的例子，适用的测量单位是生产一辆车所使用的金属质量。

对于可再生能源，可以认为关键金属效率比能源效率更重要。毕竟，太阳能和风能基本可以视为“取之不尽，用之不竭”且对环境没有污染，但我们需要通过金属将可再生能源转化为可利用的形式，而金属资源面临未来供应的短缺。

“能源利用效率往往被视为未来能源使用的唯一或首要考虑因素”。

何为关键金属？

“关键原材料”日益受到监管机构的关注。通常，这一术语指代具有经济或技术重要性，但面临供应短缺或供应中断风险的全部材料。某些情况下，“战略材料”一词也用于能源转型、国防安全或其他关键技术所需的材料。

在本白皮书中，我们使用“关键金属”这一术语专门指代能源转型过程中不可或缺的、但安全供应存在高风险的金属，重点关注铜、锂、钴、镍和铂族金属（PGM）。

“毋庸置疑，对可再生能源而言，关键金属效率甚至比能源利用率更为重要。”

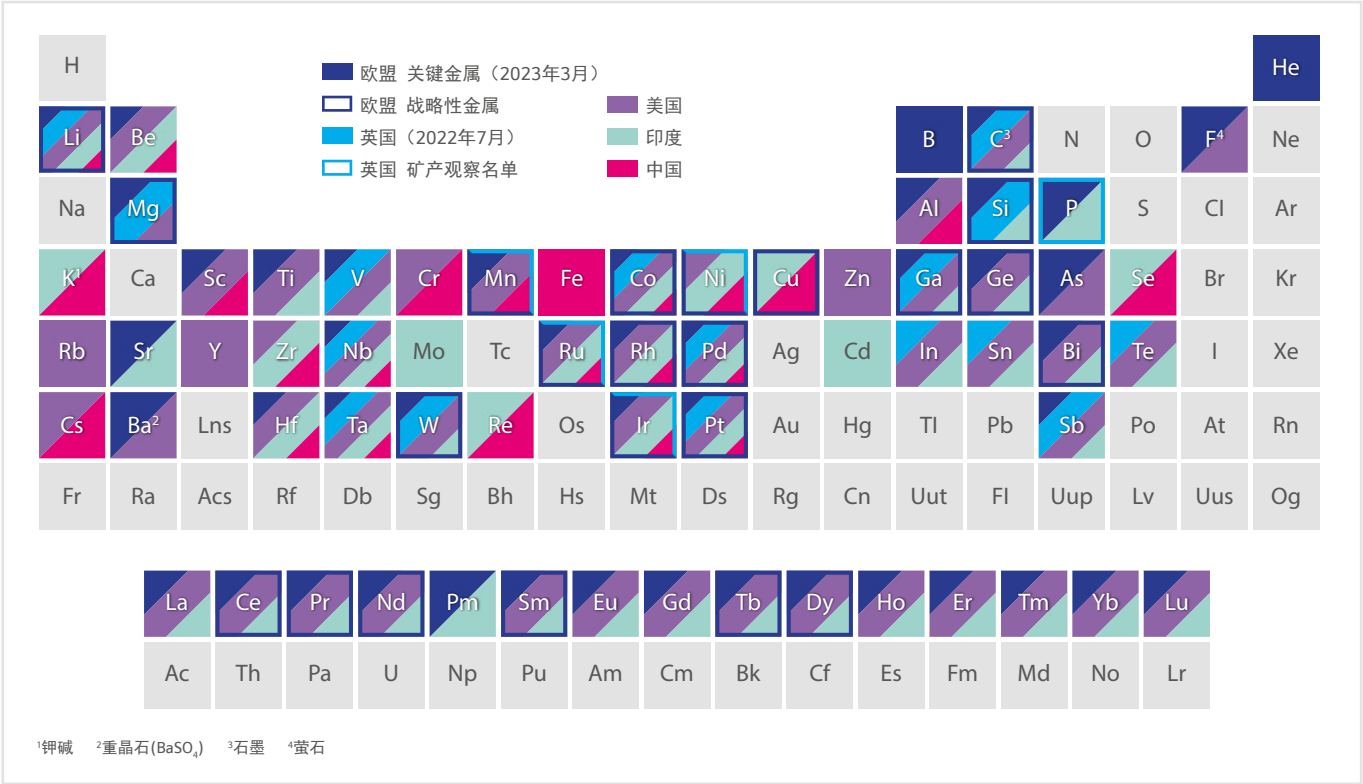


图1 各国及地区当前列为“关键”的元素

净零展望

能源供应的变化

国际能源署（IEA）的净零排放（NZE）方案要求：快速将一次能源供应来源由化石燃料供给转向其他能源供给。预计现代生物能源（以替代传统生物质）和核能均将显著扩张。最引人注目的变化是，预计到2050年，全球太阳能、风能、水能等可再生能源的发电量将比2022年增加八倍（图2）。

众多知名机构的净零预测也呈现出，2050年相近的可再生能源需求量。鉴于此，在最近举行的第28次联合国气候变化大会气候峰会上，超过100个国家同意到2030年将可再生能源发电产能提升两倍。

随着能源供应方式的转变，消费者获取能源的方式也将发生重大变化。本质上，我们可将其描述为“通过电线输送的能源”大幅增加，而“通过管道输送的能源”却相对减少，因为更多可再生能源通过发电并网后以电流形式进行传输，而非以某种气态或液态化学品的形式运输，后者在化石燃料经济中，一直是主要供应方式（图3）。

“为实现净零排放，2050年可再生源发电量需增加八倍。”

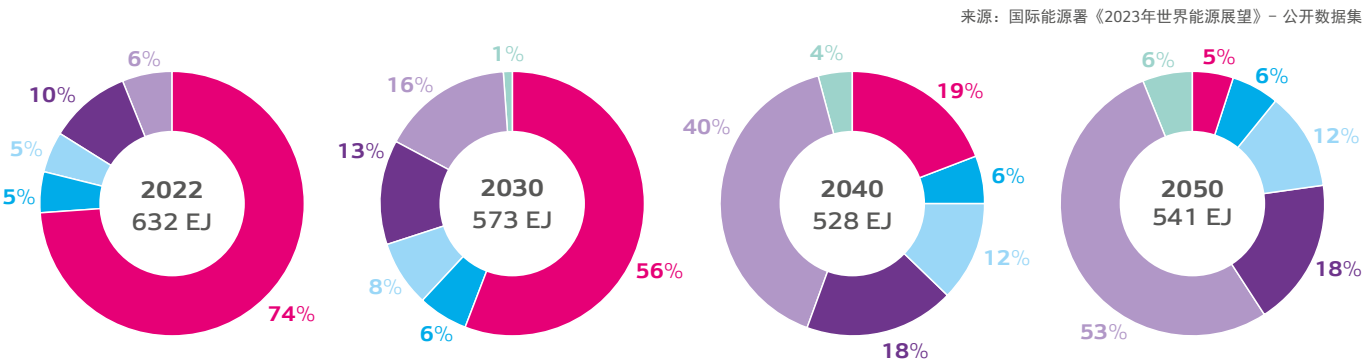


图2 国际能源署净零排放情景下全球一次能源供应变化

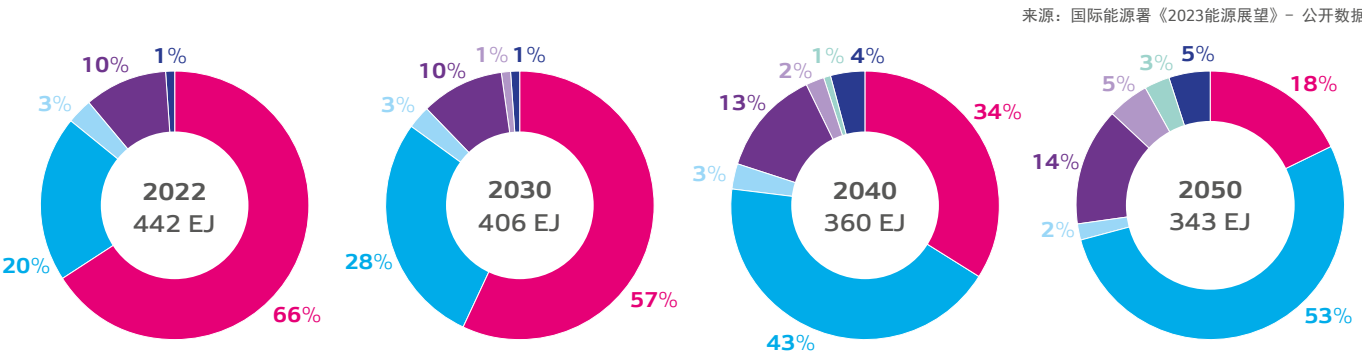


图3 国际能源署净零排放情景下全球能源载体的变化（能源的最终消费形式）

能源消费方式的改变

能源消费方式在技术层面也将发生变革。由于能源利用效率的重要性，未来能源经济将更多直接使用电力，取代化石燃料的使用。例如，乘用车技术将从依赖内燃机过渡到电动汽车，很多家庭中的燃气供暖将被热泵取代。

正如下方示例，电气化可以在几种消费场景得到很好的应用，特别是在轻型车、建筑节能，以及一些轻工业中，但这还远未达到全球能源消费总量（图4）。

剩余应用场景统称为“难以减排”的领域，包括绝大多数工业用能和所有能源密集型的交通运输。由于不太可能对这些领域进行电气化改造从而降低碳排放，它们将转而使用洁净氢能或可持续燃料，无论是基于氢气还是先进生物质燃料（见图5）。换句话说，它们需要的是某种气态或液态化学品，而非电荷。

“对于大部分工业和所有能源密集型运输，通过电气化实现减碳极为困难”

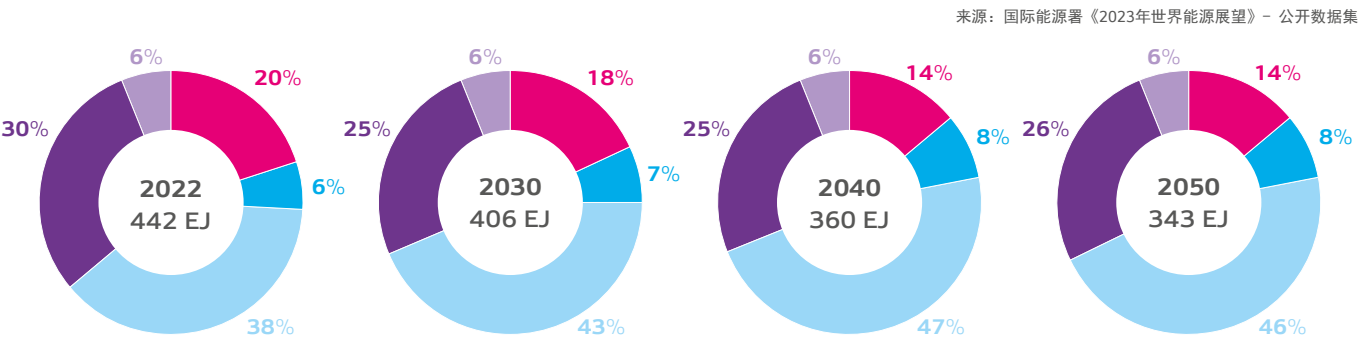


图4 国际能源署净零排放情景下全球能源消费情况的变化（按行业划分）

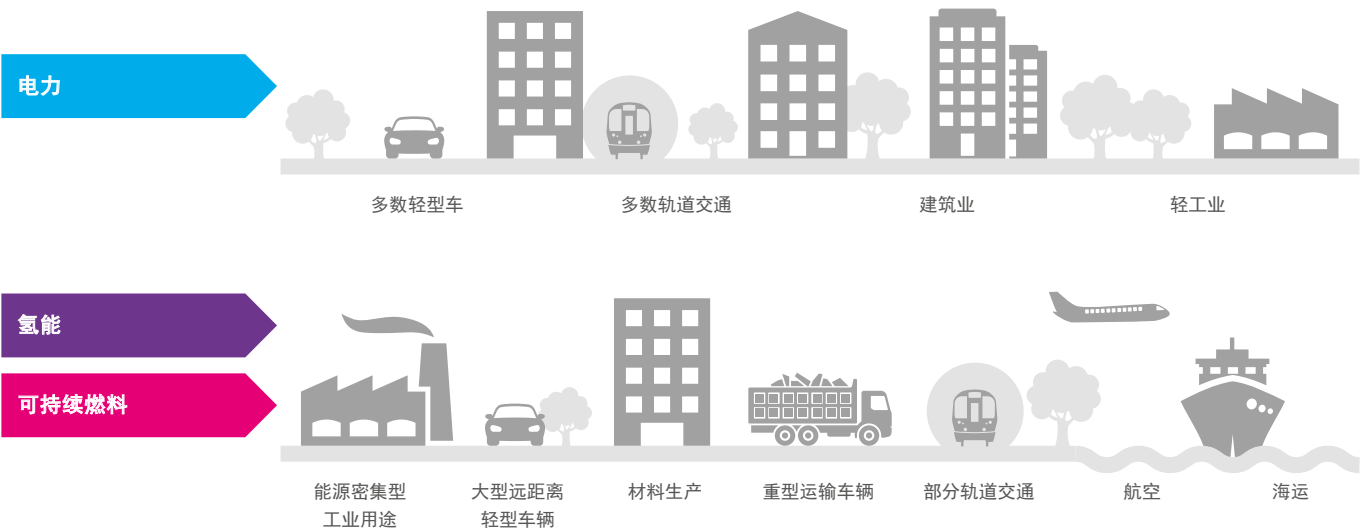


图5 不同形式的清洁能源所应用的多种能源消费场景

关键金属供需失衡

需求空前增长

能源供应方式和消费方式的转变在技术上极度依赖关键金属¹。国际能源署预测了净零排放情景下关键金属矿产需求的增长，最大增速将在2040²年之前出现。到2040年，铜的需求量将比2022年增加60%，钴和镍的需求将增加一倍以上，锂的需求将增加十倍（图6a）。

这几乎全是由清洁能源技术对这些金属的需求带动（图6b）。仔细观察图6C数据便可发现，可再生能源发电并非推动金属需求大幅增长的主要因素，而是纯电汽车产量的增长以及新增电力基础设施的建设。

供应短缺

通过提高关键金属的供应能力以适配快速增长的需求将极具挑战性。值得注意的是，预计锂³、镍⁴、钴⁵和铜将在2030年前出现市场供应短缺，到2035年，供应缺口将扩大到届时金属需求的20%。

尽管这些关键金属的回收利用也将大幅增加，但仍不足以弥补供需缺口。预计到2033年，锂、钴和镍的回收供应仅能满足5%-15%电池生产对金属的需求，所以未来十年这些金属的供应几乎全部依赖矿产资源的开采。

若要解决这一差距，必须进行规模空前的投资以扩大矿产供应。但是考虑到采矿业的周期性以及市场需求的紧迫性，这不太可能实现。一个新矿脉的勘查、开发到生产冶炼，往往需要十年时间，甚至更久。

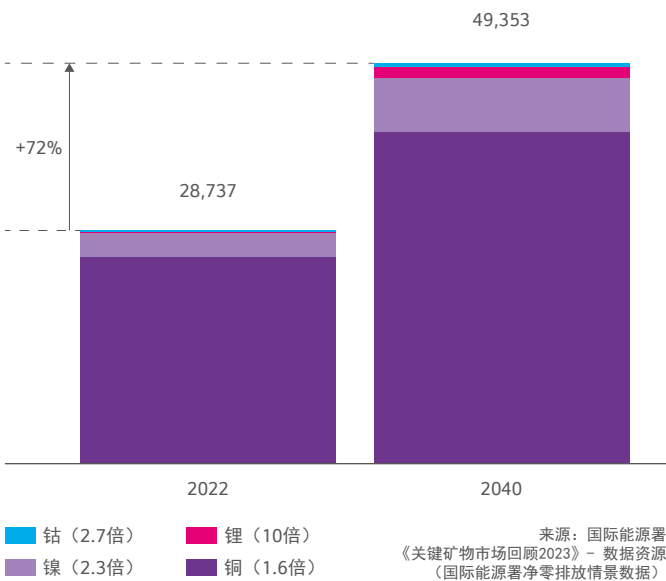


图6a 2040年关键金属的总需求预测量（千吨）

同时，尝试弥补供需缺口的行为也可能带来严重的环境污染和社会问题。例如，对开采海底矿床的讨论引出在能源转型的过程中，是否将交通出行的技术变革凌驾在了生物多样性和环境的可持续性发展之上。

印度尼西亚的镍矿资源就是一个现成的例子。印度尼西亚是全球最大的镍生产国，以红土型镍矿为主，其冶炼厂运行的大部分廉价能源来自燃煤发电厂，冶炼过程产生的碳排放量是硫化镍矿⁷的二到六倍。此外，印度尼西亚镍矿资源的开采加剧了雨林的砍伐、燃煤电厂排放大量温室气体等行为显而易见损害了当地居民权益、造成环境的破坏，这不是我们想看到的绿色低碳转型⁸。

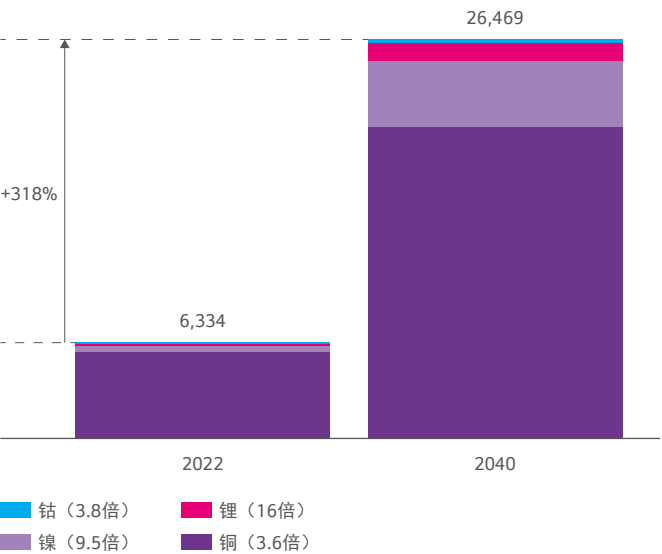


图6b 清洁技术发展带动的关键金属需求量增长预测（按金属划分，千吨）

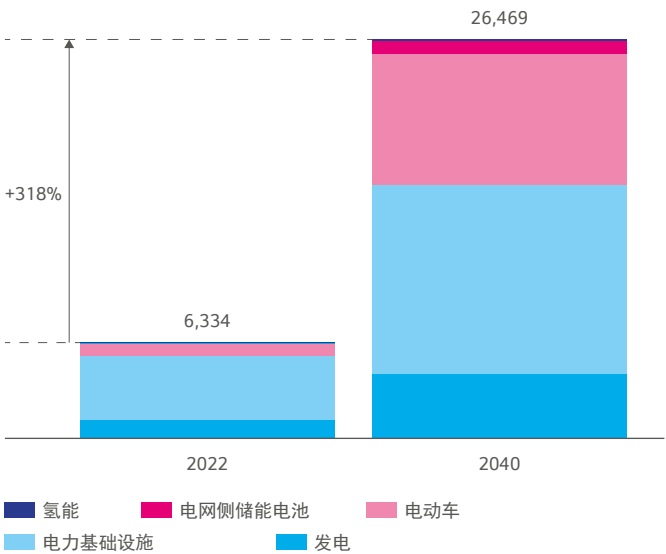


图6c 清洁技术发展带动的关键金属需求量增长预测（按应用划分）

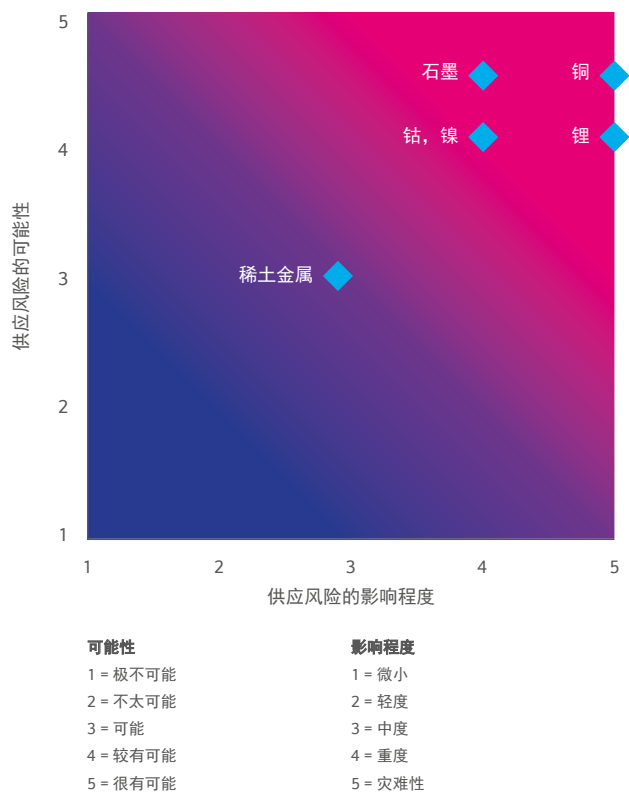


图7 对2023-2035年纯电动车关键材料供应风险的评估

供需缺口影响

庄信万丰采用一系列外部预测，对2035年前纯电动车市场受限于关键金属供应不足的可能性及影响进行评估。铜、镍、钴、锂（以及石墨等其他材料）的供应对纯电动车的限制性概率均被判定为可能或非常可能，而这些限制对纯电动车达到预期产量（图7）具有严重影响。

虽然个别风险可以得到规避或缓解，但是我们认为，众多限制中至少有一个风险实现的概率极高，从而可能无法实现纯电动车的市场预期。

所以过度依赖单一技术，以及由此导致的关键金属供应短缺将造成向净零排放社会转型的延迟或脱轨。因而，补充技术必须参与能源转型过程中，从整体上降低对关键金属的需求强度。

“过度依赖单一技术的后果是能源转型的延迟或脱轨”

提高关键金属效率的可持续性技术

在本章节中，我们将讨论两个案例，以便展示如何通过分析金属效率来进行技术选择。

金属效率高的道路车辆

图8展示了几种典型的关键金属在传统汽油车、燃料电池汽车和纯电动车三种不同动力系统的中型乘用车中的含量估值（单位：千克/辆）。

零排放车辆中燃料电池汽车的关键金属强度最低（即金属效率最高），尽管其车身搭载了小型混合动力电池组和一个燃料电池堆。

这得益于铂族金属（PGM）强大的催化性能：极少量的铂金就能催化燃料电池反应堆中的电化学反应。通常，市场上领先的燃料电池汽车中的铂金含量仅有20克——比锂电池中贱金属的含量低几个数量级。相比之下，纯电动车电池模组中关键金属效率相对较低。

中型和重型商用车中也存在关键金属效率的差异。S&P Global 对不同动力系统、不同车型车辆中的铜含量进行了评估，结果如图9所示，可以看出铜在燃料电池车的金属效率远高于纯电动车——特别是重型车。

卡车的单车铜用量达数百公斤，所以当需要用到大量零排放卡车时，铜供应的可行性将受到严重质疑；而且“通过电线输送”的能源供应模式，也意味着新电缆的搭建也需要大量铜。

通过上述对比，我们可以知道纯电动车具有更高的能源利用效率，而燃料电池汽车具有更高的关键金属效率。如果将二者结合，充分发挥不同情景下各自的优势，将创造出一个零排放车队，实现能源效率和关键金属效率的平衡。

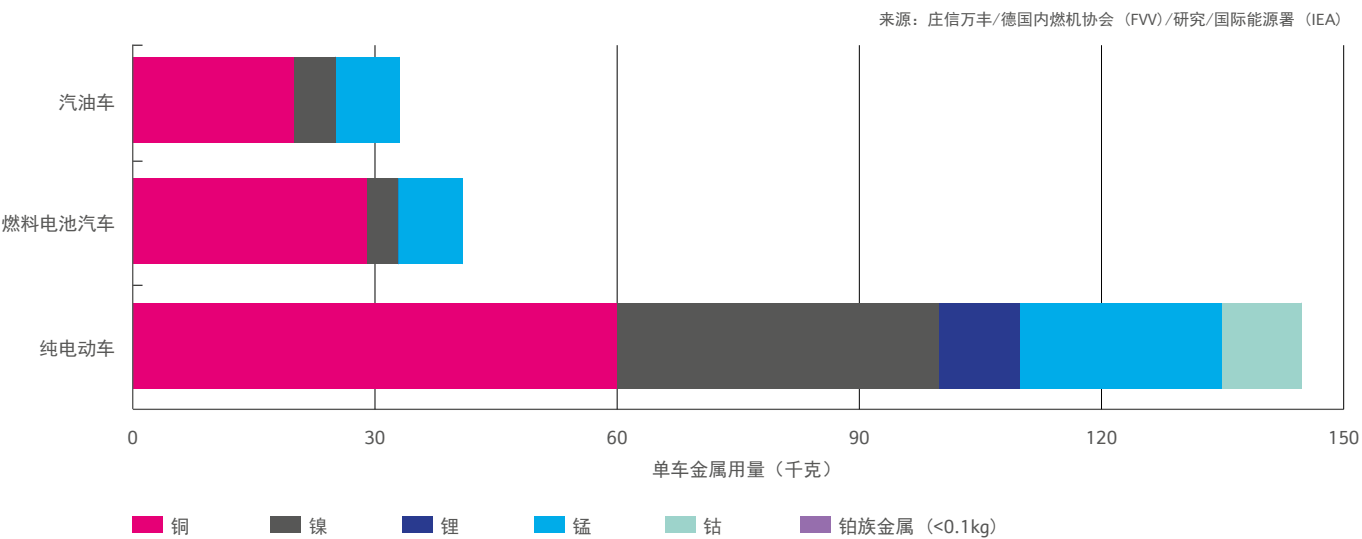


图8 中型乘用车单车关键金属典型用量

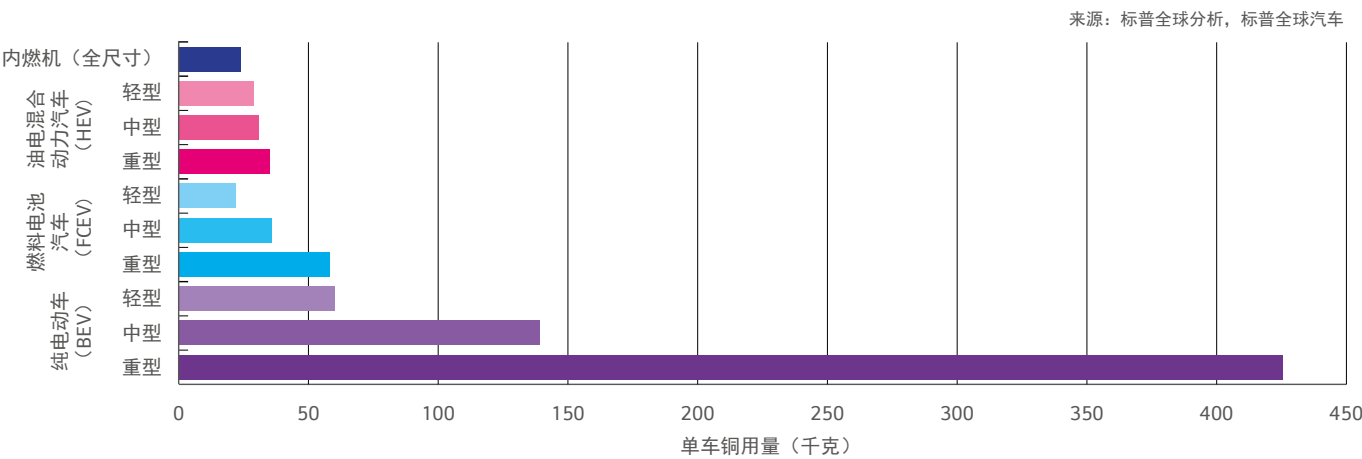


图9 当前主要车型的单车铜使用量对比
版权说明：© 2024 S&P Global Commodity Insights所有。该部门隶属于标普全球S&P Global Inc.，保留所有版权。

金属效率能源分配

能源传输方式的转变也需考虑到关键金属效率。目前，全球能源消费中只有大约五分之一是通过电线以电能的形式传输（见图3），国际能源署预计这一比例在未来将扩大到40-50%以上，就铜材使用的角度而言是不可持续的。

因此，我们需要其他的能源载体，而且不存在铜这样的原材料供应压力（见图10）。如果我们将低碳可再生的氢及氢基衍生物（例如氨和甲醇），以及生物燃料作为新的能源载体，继续通过管道传输，将有助于提高能源体系的关键金属效率。最关键地是可以将铜的需求量控制在更可能被满足的范围。

此外，传输管道还可以对部分化石燃料基础设施进行二次利用，通过将目前在用状态的大宗材料（例如钢）回收利用，最大限度地降低零排放基础设施转型对环境的总体影响。

“多种技术并行有助于实现能源利用效率和关键金属效率的平衡”



图10 能源传输基础设施中金属密度（千克/兆瓦/千米）ⁱⁱ

能源体系的协同效应

多种技术并行，对关键金属效率与能源利用效率进行平衡和优化，于能源体系大有裨益。

提高可再生能源发电效率

相较于过度依赖直接电气化的方案，使用氢能和可持续燃料将提高未来能源消耗和基础设施的关键金属效率。然而，这些能源载体的生产过程包含能量的转换，任何形式的能量转换都不可避免地会损失一部分能量。例如，利用可再生电力生产绿氢通常有20%损耗，因此能源利用率最多80%¹⁰。

人们通常推测，为代偿这一损失，需要多输入20%能量，继而需要多使用20%关键金属，从而抵消了其他应用中提升关键金属效率带来的收益。但是事实未必如此。

首先要考虑的是可再生能源发电本身的效率。太阳能电池板和风力涡轮机的负载率各不相同，这取决于它们所承受的风力和日照强度。例如，位于阳光充足的阿尔及利亚的太阳能电池板比位于德国的相同电池板产生电能更多，能源利用效率也更高¹¹。类似论点也适用于深海离岸风力发电，它通常比陆上风电负载率更高¹²。

发电效率的提高可以抵消能源转换效率的明显损失。氢能理事会的一项说明性案例研究显示，在德国使用当地太阳能电池板为一辆纯电动车充电，与在同一地点使用从中东等阳光充足地区生产的进口可再生氢为一辆燃料电池汽车供能，两者的最终能源利用效率相似¹³。

与此相关的还有一点：由于可再生能源发电天然具有间歇性、随机性和波动性，无法根据需要开启或关闭，所以能源需求与可再生能源发电之间存在时间错配情况。足够体量的能源存储系统能够起到平滑可再生能源发电侧时间空间错配的情况¹⁴，并且提高可再生能源消纳能力，否则这些电力可能会因无法立即使用而被浪费。

在其他考虑因素中，关键金属供应的有限性意味着这种储能只有部分可以通过电网侧储能电池来实现。然而，可再生氢及其衍生物是一种有效的、金属效率高的储能方式，可以长时间储存大量能源，远距离输送能源，例如跨洲际输送能源。

可再生能源发电必须靠近消费终端并直接并入电网，而使用氢和氢衍生物（例如氨）则可缓解新能源消纳的容量规模与放电时间的限制。而且可以选址在能源利用效率最高、土地使用限制较少的地方实现可再生能源发电。随着可再生能源在能源结构中渗透率的快速提高，这些考虑因素变得越来越迫切（图2）。

因此，使用氢及其衍生物有助于更有效地建设可再生能源基础设施，从而弥补转换过程中产生的能源“损失”。

“氢能可以提高可再生能源发电的利用效率，抵消能源转换过程中的损失”

优化基础设施成本

有观点认为，拥有两种不同的基础设施，即通过电线输送能源和通过管道输送能源，比只建设一种基础设施更加昂贵。但我们有充分理由证明事实恰恰相反。

麦肯锡为氢能理事会进行了一项说明性研究¹⁵（图11），展示了如何将两种配送基础设施结合起来以优化成本。仍以道路交通为例，就零排放车辆而言，使用燃料电池汽车代替纯电动车来执行更为耗能的任务（尺寸更大、续航更长的车辆），就不再需要使用大型电池模组，那么与纯电动车充电相匹配的高压基础设施以及昂贵的电缆也自然更换为“管道式”氢能基础设施上。

氢能基础设施还规避掉了纯电动车充电基础设施建设中最具挑战和最为昂贵的部分，例如在偏远地区或高密度城市中心，建设快充基础设施极具挑战性。氢能基础设施同样可以满足这些需求，而且成本低于额外的电力基础设施，从而降低了基础设施的总成本。

“使用燃料电池汽车代替纯电动车来执行更为耗能的任務，有助于降低基础设施总成本”

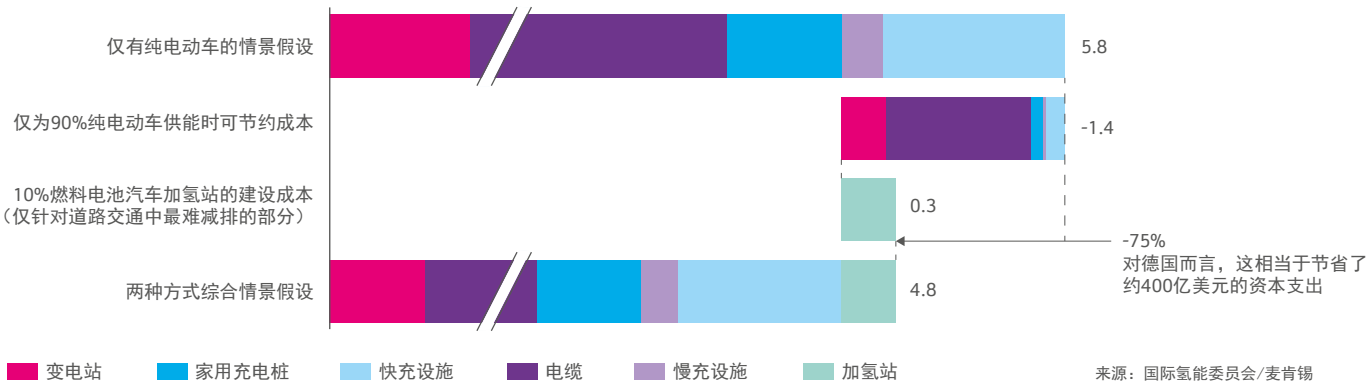


图11 纯电动车充电设施与燃料电池车加氢站的增量投资对比svii（为1,000辆乘用车提供服务的资本支出，以百万美元计，2050年）（注：布缆规模大于所示规模）

结论

本文概述了在能源转型中考虑关键金属效率的紧迫性。这并不是对能源利用效率重要性的否定，而是提醒我们转变思维，从单一维度分析转为考量更为广泛的系统。

在可预见的未来，全球能源系统中可再生能源发电量将大幅增加，特定能源消费领域的电气化程度也将不断提升。但是，使用更多可再生能源的未来仍然不是可再生的未来，因为清洁能源技术需要大量的关键金属。我们仍然依赖于开采有限资源的采矿业，必须谨慎使用这些资源。

即使对于最为雄心勃勃的净零排放预期，也不建议将电气化作为唯一的解决方案。需要有补充技术来提高可再生能源的普及率，去解决电气化无法覆盖的领域里所存在的碳排放问题，更重要的是，提高能源转型的关键金属效率。

这些技术已经存在：低碳可再生的氢能、氢基合成燃料以及先进的生物燃料。为了实现“高效”电气化，以不可持续的方式获取关键金属，同时对于能源利用效率低下存在误解而反对使用补充技术的行为是不明智的。

同时考虑能源和关键金属效率，将上述解决方案与直接电气化结合使用，可确保未来能源系统作为一个整体得以优化。最重要的是，它可以帮助我们实现能源转型。

“补充技术与电气化并驾齐驱，提高能源转型中关键金属效率”



参考文献

- 1 Energy Technology Perspectives 2023 – Analysis - IEA
- 2 Critical Minerals Data Explorer – Data Tools - IEA
- 3 Benchmark Minerals Lithium Forecast, Q4 2023
- 4 Benchmark Minerals Nickel Forecast, Q4 2023
- 5 Benchmark Minerals Cobalt Forecast, Q4 2023
- 6 S&P Global, The Future of Copper, July 2022
- 7 GHG emissions intensity for class 1 nickel by resource type and processing route – International Energy Agency
- 8 AEER, Halmahera dilemma in the midst of the nickel industry, July 2023

Climate Rights International, Nickel Unearthed, January 2024

S&P Global, Indonesia's nickel processing boom raises questions over tailings disposal, April 2023
- 9 Myths and misconceptions: does platinum make fuel cell vehicles expensive? | LinkedIn
- 10 Additional conversion steps, such as converting hydrogen back to electricity in a fuel cell, would reduce this further.
- 11 Solar Photovoltaic Power Potential by Country (worldbank.org)
- 12 Experts Anticipate Larger Turbines and Plants, with Increasing Focus on Grid-Value Enhancement Options | Electricity Markets and Policy Group (lbl.gov)
- 13 Transport-Study-Full-Report-Hydrogen-Council-1.pdf (hydrogencouncil.com)
- 14 The Future of Energy Storage | MIT Energy Initiative
- 15 Transport-Study-Full-Report-Hydrogen-Council-1.pdf (hydrogencouncil.com)

欲了解更多信息，敬请访问下列网站：

<https://matthey.com/pgm-markets>