



# “城市矿产”资源产生及其供给潜力: 以金属铌为例

曾现来<sup>1</sup>, Moisés GÓMEZ<sup>1</sup>, Mahmoud BAKRY<sup>1</sup>, 耿涌<sup>2,3</sup>, 李金惠<sup>1\*</sup>

- 清华大学环境学院, 北京 100084;
  - 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240;
  - 上海交通大学国际与公共事务学院, 上海 200030
- \* 通讯作者, E-mail: [jinhui@tsinghua.edu.cn](mailto:jinhui@tsinghua.edu.cn)

收稿日期: 2023-12-30; 收修改稿日期: 2024-04-14; 接受日期: 2024-05-27; 网络版发表日期: 2024-07-08  
国家自然科学基金项目(92062111、72394402)资助

**摘要** “碳中和”战略正在重塑全球资源流动和循环利用的格局, 迅速增长的“城市矿产”(也称为二次资源)作为地质矿产的延伸, 在资源供给和平衡方面发挥着越来越重要的作用. 铌是一种关键金属, 但目前缺乏对其可持续性的研究. 循环利用的基本原则是尽可能的在其全生命周期过程中高效利用该金属, 对此, 我们评估了含铌材料在报废过程中的损耗, 揭示了最大限度减少此类损耗的必要性, 阐明了全生命周期中含“城市矿产”和合金的利用过程. 根据对大多数铌应用产生的“城市矿产”预测, 如果不进行回收利用, 到2090年可能会损失16.8万吨. 相反, 如果金属铌的回收利用率增至90%, 预计其损失将减少到1.6万吨. 因此, 需要探索各种措施, 以实现从线性经济到循环经济的无缝过渡, 促进铌资源的可持续利用.

**关键词** 铌, “城市矿产”, 循环经济, 回收利用, 可持续性

## 1 引言

人类活动驱动下, 地质矿物会经历物质流动过程, 在加工生产消费利用过程中, 形成新旧废料, 又称为“城市矿产”(Charpentier Poncelet等, 2022), “城市矿产”资源的产生及其供给潜力涉及消费利用、报废过程等主要环节, 并未得到充分的挖掘. 金属铌(Nb)在多个国家被列为关键金属(Graedel等, 2022), 在各种行业得到应用. 铌表面形成的氧化膜具有超强的耐腐蚀性, 而且在标准温度条件下不发生反应, 这使其成为各种产品的关键构成, 大幅度提高了产品的性能和寿命. 全球约90%的铌产量用于制造铌铁(FeNb), 这种化合

物广泛应用于钢铁行业, 在制造和配制特殊合金方面发挥着关键作用, 而特殊合金是制造高强度低合金(HSLA)钢的基础, 应用于结构、汽车和管道等多个行业(Alves和Coutinho, 2015). 例如, 当钢铁中引入0.1wt.%~0.001wt.%的铌时, 钢的韧性、抗拉强度和热性能都得到了显著提高(Pan等, 2020).

铌在所有元素中具有最高的磁穿透强度, 是核磁共振(NMR)和磁共振成像(MRI)应用的首选材料. 由于铌钛(NbTi)等特殊合金在环境压力和高压条件下都能保持零电阻系数, 因此可用于制造坚固的超导磁体. 目前磁共振成像扫描仪的年产量约为5000台, 根据磁共振成像仪所需的磁场强度分为三种主要类型: 中低

中文引用格式: 曾现来, Gómez M, Bakry M, 耿涌, 李金惠. 2024. “城市矿产”资源产生及其供给潜力: 以金属铌为例. 中国科学: 地球科学, 54(8): 2625–2632, doi: [10.1360/N072023-0319](https://doi.org/10.1360/N072023-0319)

英文引用格式: Zeng X, Gómez M, Bakry M, Geng Y, Li J. 2024. Anthropogenic mineral generation and its potential resource supply: The case of niobium. Science China Earth Sciences, 67(8): 2583–2591, <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1349-2>

磁场(0.5T至1.0T)、高磁场(1.5T)和超高磁场(3.0T), 分别占总产量的28%、55%和17%。磁共振成像扫描仪的重量各不相同, 低场强扫描仪约为16t(1t=1000kg), 1.5T扫描仪为4.5t, 3.0T扫描仪为7.5t。

在过去的四十年中, 金属铌及其衍生物在各行各业中的应用发生了重大变化, 尤其是在结构、汽车和管道应用中的应用。由于铌在建筑、汽车和造船业中的应用日益广泛, 其需求量激增。特别是在钢铁行业, 在1980~2000年间占据了相当大的份额。1980年, 金属铌的应用主要集中在管道制造领域, 58%的铌用于结构, 只有10%的铌同时用于结构和汽车应用。到2000年, 结构和汽车应用的份额相对增加。截止到2020年, 铌的结构应用份额大幅增加, 达到约45%, 汽车行业的应用也出现了大幅增长, 约占23%。相比之下, 铌在特种合金、不锈钢和其他钢材应用中的分布在过去四十年变化不大(Heisterkamp和Carneiro, 2011; European等, 2020)。

金属铌的来源除地质矿物开采外, 还有一个重要的二次来源——“城市矿产”回收利用, 这不仅有助于环境保护, 而且也是出于可持续发展的原则(Zeng, 2023)。因此, 亟需优先考虑循环经济的方法, 旨在最大限度地提高铌的回收利用潜力。在碳中和背景下, 回收铌的解决方案之一就是在金属行业采用循环经济的理念(Zeng等, 2022a; Sverdrup和Olafsdottir, 2023)。金属在保持其固有特性的同时, 还具有回收利用的巨大潜力, 是循环经济的理想选择。

因此, 铌需求的激增促进了对回收等补充来源的探索, 以增加这种稀有难熔金属的供应。随着铌及其合金利用的加强, 迫切需要对铌和铌合金“城市矿产”产生及供给潜力进行科学评估, 因为与传统采矿相比, 铌和铌合金的回收利用具有巨大的经济和环境优势。通过利用现有数据、官方报告和同行评审出版物, 可以估算出各种铌应用领域的“城市矿产”和铌合金废料数量, 并通过合理假设填补信息空白。这种方法对于完善目前废料回收率的测算, 进而评估损失和浪费的数量至关重要。这一步骤是推进循环经济的关键组成部分, 需要进行充分的调查。

## 2 数据和方法

### 2.1 方法

该研究的目标是预测未来70年内各种最终用途行

业和应用产生的铌“城市矿产”, 为实现循环经济奠定物质基础, 这需要获取尽可能准确的数据。最初的步骤包括评估含铌应用的全球产量, 概述铌在其成分中的含量, 并进一步细分铌在每个行业的应用。随后, 根据官方报告和同行评议出版物估算出整个行业的铌消费比例, 从而测算含铌产品可回收的“城市矿产”和合金废料的“城市矿产”资源数量。然而, 由于数据不充分, 要精确量化工业废料的实际数量面临着巨大的挑战。并且铌在过去的普及程度有限, 许多行业并不使用铌, 这影响了从工业废料中分析出的“城市矿产”或合金废料数量的可靠性。为了解决这个问题, 本研究采用了自上而下的方法来预测每个行业未来产生的“城市矿产”, 假定所有铌产品在其生命周期结束后最终都会变成废料。由于某些行业的废料数据稀缺, 因此采用这种自上而下的方法。

图1给出了1990~2022年的铌产量, 根据这些数据, 采用逻辑回归法预测了2023~2090年铌的未来产量。为适应铌产量的变化, 最低和最高饱和度水平也被纳入该数据中, 这一范围代表了铌产量95%的置信区间, 确保了估算的可靠性。

### 2.2 回收利用率

与钢材回收相比, 铌的回收情况截然不同。钢铁产品的回收利用率简单明了, 即某一特定年份回收的废料量占可用废料能力的比例, 而估算回收铌占总消费量的百分比则更为复杂。目前, 确定各种铌钢应用的精确回收率是一项具有挑战性的工作。与明确的钢材回收率不同, 目前钢材的总体回收率约为85%。这一回收率因行业而异, 汽车用钢、结构钢、钢制容器和钢制家电的回收率分别为85%、97.5%、70%和82%(Cullen等, 2012; Zhu等, 2019)。高效的铌回收技术是关键, 目前的情况表明, 回收过程中的废料损失趋势令人担忧, 全球大约只有10%的废料被回收(IRP, 2024)。值得注意的是, 超耐热合金造成了65%的废料流失(利用率不到铌总产量的10%), 而消耗了铌总产量近86%的钢铁仅占5%(Graedel等, 2022)。因此, 有效地解决和管理这一问题对于充分实现铌回收利用的效益至关重要。

### 2.3 铌金属废料

新旧废料来源于各种含有铌成分的产品, 包括报

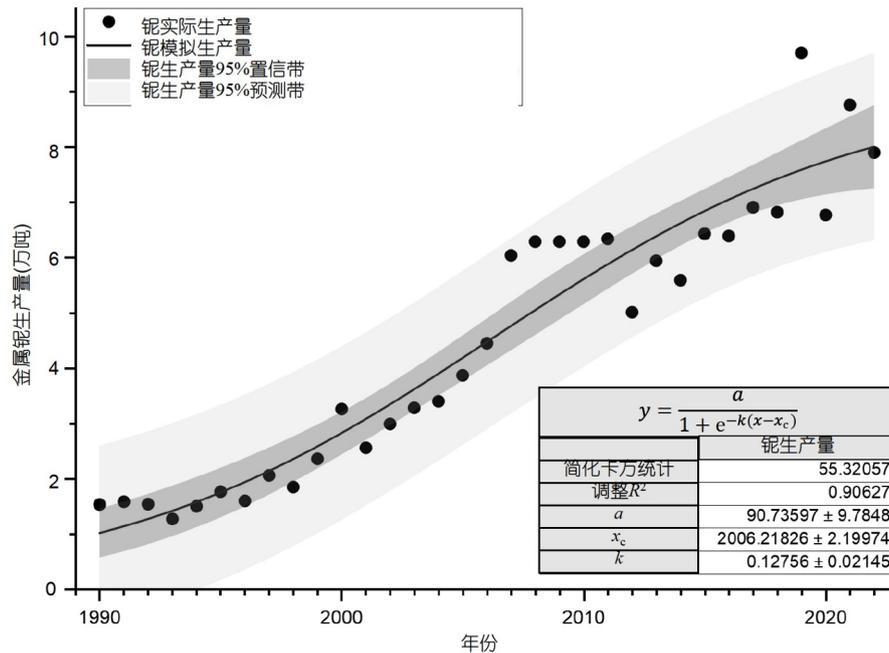


图1 全球铌产量的Logistic回归

数据来源于网络版附表S1(<http://earthcn.scichina.com>)

废汽车、桥梁、天然气管道和铌超合金。在估算“城市矿产”时,需要对每种产品的使用寿命进行评估,并假定目前的和潜在的回收率在回收过程中不会造成铌的损失。然而,必须注意的是,在炼钢过程中,约有5%的铌会流失到炉渣中,另有5%的铌会在炼钢过程中流失(Bakry等, 2023)。虽然炼钢过程中的这些损失超出了本研究的范围,但必须认识到铌的理论回收率可高达95%。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 估计废料产生量

图2展示了2023~2090年全球铌产量的预测,预计未来几十年铌的需求量将逐步增加,在2035年左右产量约为9.1万吨至9.2万吨,达到平衡。在图中观察到的铌产量变化源于逻辑模型和可用数据固有的不确定性。在图1中,模型的相关系数接近0.9,表现出较高的匹配度,但仍存在一定的不确定性。再加上1990~2022年期间铌产量的历史波动,为该模型提供了95%的置信度来估算数值,如图2所示,历史数据中某些时期的产量出现下降;例如,2012年的产量降至5.01万吨,低

于前一年的6.34万吨和后一年的5.94万吨。置信区间的扩大可以说明铌产量的波动增加了模型的不确定性。

假设在不进行回收利用的情况下,未来70年,每年含铌报废应用中的铌估算量如图3所示。值得注意的是,尽管目前的回收率约为5%~10%(Graedel等, 2022),但图例中并未将其考虑在内。图中展示了铌回收利用的总体潜力,并强调了在缺乏有效回收利用实践的情况下会损失的大量铌(90%~95%)。铌的寿命估计约为22年(Charpentier Poncelet等, 2022)。值得注意的是,在不同的用途和应用中,铌的寿命会有很大差异(附图S3),从超导体应用的10年到建筑中长达75年不等(Ciacci等, 2016)。这说明了工业界现在迫切需要迅速收集和处理“城市矿产”,从而促进“城市矿产”重新进入生产流程,融入高要求的应用和工业中。

2030年和2040年,“城市矿产”主要来自汽车和超导体行业,估计产生的“城市矿产”量分别为0.66亿吨和1.32亿吨。到2050年,管道产生的废料也被纳入其中,使废料总量达到2.07亿吨。后续的预测将保持这一趋势,2060年的废料量将激增至汽车和超导体废料的四倍。到2070年,将增至汽车、超导体和不锈钢材料废弃物总和的五倍。再往后看,到2080年,废物数量增

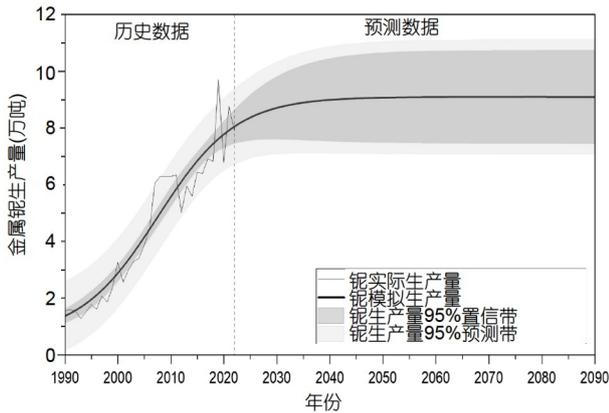


图2 1990年至2090年间全球历史及预测铌产量  
铌产量的历史数据见附表S1

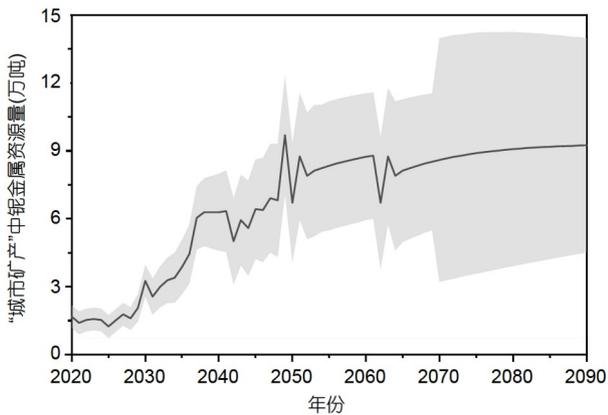


图3 全球2020~2090年“城市矿产”中铌金属的估计产量  
几乎所有使用铌的行业都会产生废料。计算方法是根据每个行业的使用年限合并所有废料，每个应用领域的回收率为0%

长到汽车和超导体废物的约六倍，管道废物的两倍。到2090年，建筑和结构废料可能会被纳入，最终会产生总计约5.04亿吨未经处理的废弃物。2090年的“城市矿产”重量平均将达到9万吨，范围为4.5万吨至13.5万吨(图3)。

### 3.2 铌的循环利用和回收可能性

从超级合金和钢铁废料中提取纯金属或铌铁，是铌“城市矿产”循环利用过程中所面临的主要挑战。这些废料中铌的浓度很低，尤其是钢铁工业中使用的铌铁，对铌的循环利用造成了较大阻碍，使提取过程既具有挑战性又耗费能源。据报道，在铌浓度约为5.5wt.%的超级合金中，回收率可达50%~70%(Tkaczyk等，

2018; Graedel等, 2022)。然而，超级合金仅占铌总产量的约3%~5%(Graedel等, 2022)。目前，铌报废量在于其在钢铁回收过程中的损耗，从而导致其流失，这种损耗被称为非功能性回收。从本质上讲，非功能性回收包括收集材料，并将其整合到更广泛的集合中，最终进入低端产品中，其独特性能既得不到利用，也没有价值(Graedel等, 2011)。更糟糕的是，在大多数情况下，铌被视为污染物。然而，铌具有高达92%的潜在可回收性，主要以铌铁的形式用于高强度低合金钢(Ciacci等, 2015)，唯一例外是以其他化合物形式使用的铌。因此，铌的回收利用潜力巨大，需要进一步探索。

回收效率是金属回收中最为重要的一环(Sovacool等, 2020; Hagelüken和Goldmann, 2022)。如果在收集和分离过程中，钢和铌的回收效率都不高，那么随着时间的推移，回收的整体效益就会降低。汽车行业使用的钢材中含有两种不同类型的铌：一种是排气部件中所含的铌，约占0.03%~0.3%，另一种是车身中所含的铌，约占比0.02%~0.05%(Heisterkamp和Carneiro, 2011)。这说明，有关铌成分的准确信息对于整个铌回收过程至关重要。在明确数据的指导下改进分离过程，对于提高回收效率，进而提高整个行业的铌回收率都举足轻重。

与原始采矿和生产相比，供应链中的铌回收利用有望在40年内大幅降低能耗，并将温室气体排放量分别减少约26%和18%(Rahimpour Golroudbary等, 2019)。回收利用铌的主要优势在于可在约70年(建筑钢材的预期寿命)内为市场提供大量铌。这对于包括管线钢、汽车、超导体和不锈钢在内的各行各业尤为重要，尽管这些行业的单个铌用量相对较小，但其产品中的累积含量却比较可观。建筑废料中的铌含量比较丰富，而汽车报废周期约十年，这为提高关注度提供了机会。尽管汽车废料中的“城市矿产”含量低于建筑废料，但汽车废料可被视为铌的早期二次来源和完善回收流程的重点。此外，铌废料的长期堆存可能导致有毒物质泄漏到环境中。因此，对所有铌应用进行全面回收是减少铌流失的关键举措，并在一定程度上减少填埋量。因此，回收“城市矿产”和合金废料，不仅有助于减少废物量，还能减轻铌的未来供应风险，使其成为重要的二次资源。

图4显示了铌金属“城市矿产”回收率从0%到90%的潜在影响，考虑到铌的可回收潜力刚刚超过90%(Ciacci等, 2015)，这些回收率之间的鲜明对比在全球

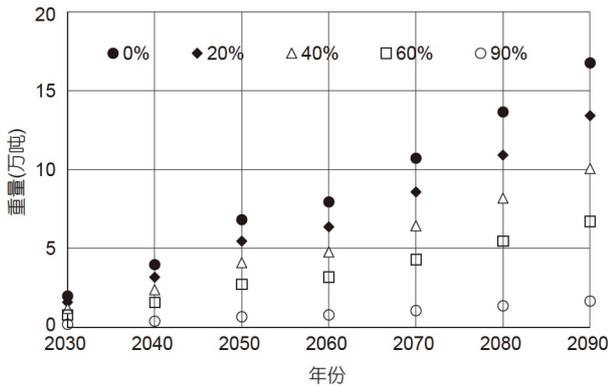


图4 全球2030~2090年“城市矿产”镍金属产量的预测演化

金属镍的损失量方面显而易见。例如,到2090年,如果镍金属不回收,则可能损失约16.8万吨镍;如果回收率为90%,则损失量只有1.6万吨。由于该领域的研究有限,镍回收率仍不确定,进一步的研究势在必行,以便全面评估其回收潜力。

### 3.3 迈向循环经济的镍金属“城市矿产”

能否在“碳中和”框架内创造可持续发展取决于钢铁产品的广泛使用。钢铁是一种环境友好型材料,可以多次循环利用,其特性不会受到任何影响,因此是实现可持续发展的关键因素(Broadbent, 2016)。满足钢铁生产的大量需求的同时,也需要大量的金属镍。在应对这一挑战时,采用循环经济战略势在必行。金属镍的广泛利用促使其需求不断攀升,这迫使生产企业不得不启动城市采矿(Urban mining)获取再生资源来满足这一需求(Tutton等, 2022)。根据欧盟委员会的数据,镍的临界值已从2011年的2.8上升到2020年的3.9,并在2023年进一步上升到4.4(Milan等, 2023),这凸显了镍不断升级的临界重要性。因此,对镍的供应风险进行全面评估比较重要,要考虑的因素包括产量、其在一个国家生产通道中的集中度、正在进行的回收利用率以及替代材料的潜在利用率。

目前,镍的主要二次来源是废钢,这就强调了各行各业在镍循环利用和回收方面采取有力措施的必要性。特别是汽车行业,由于其镍消耗量大且产品寿命相对较短(10~12年),因此成为提取“城市矿产”的关键领域(Liang等, 2024)。目前,汽车行业的“城市矿产”回收量为1.69万吨,如果完全回收,这一数字有可能增加到1.99万吨(图5)。此外,建筑和结构行业也产生了大量的

镍,可能产生的“城市矿产”和合金废料会在60~70年的钢铁回收过程中流失,如果不加以有效管理,预计会产生约2.8万吨“城市矿产”。类似的情况也适用于管道行业,按照目前的回收率,管道行业的“城市矿产”总量为0.6万吨,如果回收率达到100%,则可达到0.86万吨(图5)。因此,“城市矿产”和合金废料作为未来镍应用的资源具有相当大的潜力,这些回收数量仅涉及上述行业内的钢铁回收。在这种情况下,镍被归类为钢铁回收过程中的非功能性回收。这强调了一个概念,即从废料中释放回收镍是非常有前景的,特别是考虑到这些行业内广泛的钢材回收实践。

为了实现从线性经济向循环经济的过渡,有必要对镍的回收利用模式进行重新分析(附图S8),这对镍的非功能性回收转化为功能性和可持续的回收非常重要。此外,循环经济的实施不仅对环境可持续性具有重要意义,而且对经济和市场动态也起着决定作用。采用这一理念,可以降低资源短缺的风险,促进价格稳定,防止镍价飙升。

提高镍循环经济重要性的最佳途径,是最大限度地减少废物的产生。在采用循环经济方法时,重点不仅仅是消除废物,而是强调相同材料的重复再利用(Mujkić等, 2019)。然而,这不仅关系到镍资源平衡,还关系到减少温室气体的排放。城市采矿被认为是获取镍的最有效方法,对于所有应用和最终使用行业而言,其使用寿命相对较长。虽然目前市场并不面临资源短缺的问题(Freij von Rennenberg, 2021),但仍有必要将这种可行的方法视为应对镍行业挑战时期的战略储备。过度依赖这一战略有可能导致未来几年出现近乎危机的局面。尽管循环利用是循环经济框架中的核心要素,但由于某些循环利用技术可能对环境造成不利影响,并对成本效益有重要影响,因此有必要对其进行更多研究。

### 3.4 不确定性和限制

镍生产的未来轨迹遵循对数增长模式,这恰当地反映了镍生产的时间变化。然而,必须承认的是,2090年之前的预测是在不间断运营和供需平衡的假设下进行的。预测诸如COVID-19大流行病、冲突或其他可能影响镍生产及其供应链的干扰等,这些不可预见的事件是相当大的挑战。鉴于这些不可预测事件的发生,确保生产能够充分满足未来需求就成了首要考虑因

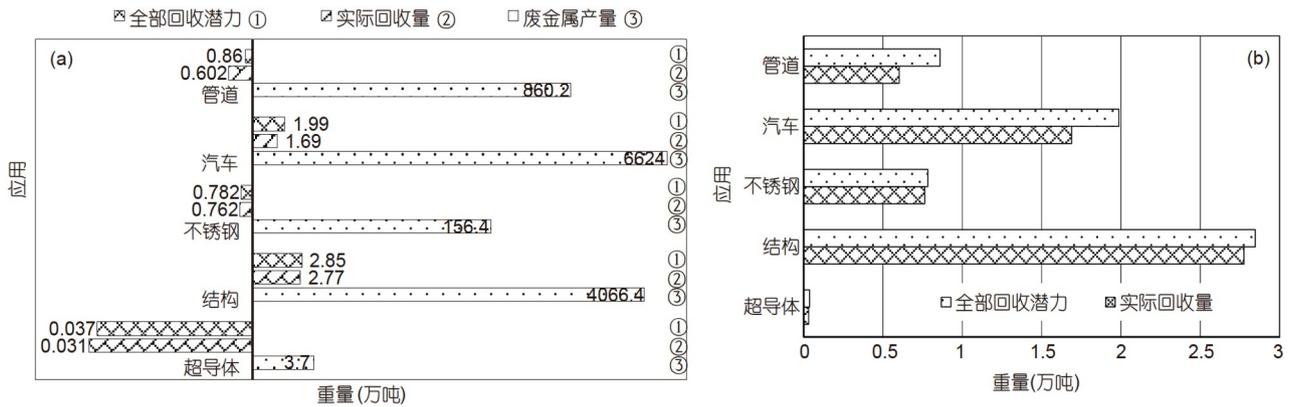


图5 全球2022年各种用途的铌金属“城市矿产”评估

(a) 产生量和回收量; (b) 完全回收潜力和实际回收量. 每个结果都是通过估算每个应用和行业中的铌含量、铌在每个应用和行业中所占的比例以及每个行业中含有铌成分的生产比例得出的, 所有这些都与现有的回收率相比较. 该评估进一步探讨了全面回收的潜力, 以获得完整的“城市矿产”量

素. 关于铌产量, 提供了全球铌产量逻辑回归的两个参数( $a$ 和 $k$ )的范围(图1), 以说明逻辑回归的误差. 然后, 这些范围可以说明所收集和预测的1990~2090年全球铌产量的不确定性(图2). 最后, 根据各种应用的使用寿命, 2020~2090年全球“城市矿产”估计重量的范围用阴影区域表示(图3), 由于没有铌应用寿命分布的详细数据, 因此无法对废料产生量进行更精确的预测.

#### 4 结论和启示

物质流分析揭示了废料循环利用所需要关注和解决的关键环节, 以及我们对产品环境影响认识上的差距. 虽然对不同材料的评估看似相似, 但每种材料都有其特性, 因此有必要进行单独评估(Alves和Coutinho, 2019). 从研究这些问题中获得的发现, 有助于全面理解循环经济对所有产品的重要作用. 就“碳中和”而言, 这意味着要解决铌循环经济计划中的关键问题. 首先, 建立详细铌物质流分析框架, 对于深度厘清每个流程的特征必不可少; 其次, 获得含铌报废产品数量的详实数据, 对于科学的理论评估非常关键; 最后, 需要在经济可行性和环境影响之间取得平衡, 因为某些回收技术绿色友好, 因此有必要推广既经济又环保的新型绿色回收利用技术.

铌在不同阶段的损耗, 特别是在废物管理和回收过程中的损耗, 促使我们对其回收潜力和效率进行全面分析. 这种方法不仅可以保护重要的资源和材料,

还可以减少垃圾填埋场的压力, 促进更可持续的废物管理实践. 在循环经济框架内进行循环利用和废料回收, 有助于形成闭环, 同时遏制废物的产生, 节约生产过程中消耗的能源. 这反过来又会减少温室气体排放, 从而促进“碳中和”目标实现(Wang等, 2022). 从经济角度来看, 循环利用和回收各类废料的优势明显, 并有助于通过多种方式降低成本: 循环利用减少了对大量初级生产的需求, 从而节约了成本; 回收材料往往比原材料更经济, 尤其是在材料保持其特性的情况下(Zeng等, 2022b); 由于回收材料不是钢或铌的唯一来源, 因此更广泛地使用回收材料有助于降低原材料的整体价格. 鉴于各种应用领域对铌的巨大需求及其不可替代性, 成本效益变得更加关键. 事实证明, 回收利用对维持铌的可持续供应不可或缺, 可确保在不过度依赖原材料的情况下补充供给.

为了吸引人们对循环经济的更多关注, 有研究表明, 铌的回收利用是替代铌矿开采的一个重要来源(Sovacool等, 2020). 因此, 应对铌回收利用的环境和经济前景进行全面评估, 包括但不限于能源消耗和生命周期评估. 此外, 如果这些研究显示现有的铌回收工艺在温室气体排放或能源消耗方面不具有环境可持续性, 那么探索符合环境和经济标准的替代回收方法势在必行.

铌与钛等其他元素相比, 在不锈钢市场中的地位更为突出, 这是因为铌在表面和精加工方面具有卓越的品质. 即使铌在不锈钢中所占的比例相对较小, 通

常为0.05%~0.5%，铌的添加也能增强不锈钢的耐腐蚀性，并为该行业带来其他各种有益特性(McCaffrey等, 2023)。尽管铌的重要性不言而喻，但铌在不锈钢中的比例却不足以满足这一庞大产业的需求，仅占整个不锈钢产量的约3%(附图S4)。不锈钢的年产量在50亿吨至52亿吨之间波动，产生的全球废料量约为32.2亿吨。根据上述分析，估计2022年将积累约4830t“城市矿产”。值得注意的是，不锈钢中铌的寿命可延长至50年以上(附图S3)，并具有充分的潜在可回收性(Ciacci等, 2015)。

最近，汽车设计的重点已转向轻量化，这就需要同时减少汽车的质量和使用更细的弹簧(McCaffrey等, 2023; Rahimpour Golroudbary等, 2019)。这种双管齐下的方法不仅有助于提高燃油效率，还有助于减少大气中的环境排放(Klinkenberg等, 2006)。因此，汽车行业试图寻求微合金钢，并在大量研究和实验的基础上证明，铌是一种具有稳定化、沉淀强化和晶粒细化的微合金，而这些都被认为是汽车车身钢的特点(Heisterkamp和Carneiro, 2011)。根据国际汽车制造商组织的数据，全球汽车年产量约为9200万辆。每辆汽车通常需要使用约900kg钢材。值得注意的是，通过使用铌微合金钢，重量可减少约150kg。这不仅可将燃油效率提高近5%，还有助于降低能耗、减少材料用量和提高成本效益(Bakry等, 2023)。

金属铌2001年在输油管钢成分中的应用再度兴起，这主要是由于铌具有强化作用。铌的添加量不到钢材总重量的0.1%，但足以提高管道的运行能力(Heisterkamp和Carneiro, 2011)。2020年，输油管钢的年市场容量约为8.9亿吨，预计未来将以6.7%的速度增长，其典型使用寿命约为30年，彰显了铌需求的日益增长，尤其是考虑到只有10%的管线钢含有铌。

目前，铌的供应风险已成为一个重大问题，目前全球近92%的铌生产集中在巴西(Milan Grohol等, 2023)。当务之急是探索和发展循环经济，以有效地使铌停留在市场之中，从而大幅减少对原材料的依赖。这种战略方法旨在减轻供应链的脆弱性，提高铌利用的可持续性。随着技术的进步，对铌的需求持续增长(Hagelük-en和Goldmann, 2022)。这凸显了在城市矿采之外探索铌替代来源的重要性。“城市矿产”和合金废料具有二次供应潜力，如果得到有效管理，它们将成为一种可观的资源。此外，鉴于铌在结构钢、汽车钢和不锈钢等不

同行业中的存在，将出现大量的回收材料机会。如果这些行业采用正确的回收工艺，在不损害铌的内在价值的情况下最大限度地回收铌，那么这种潜力就能得到充分发挥。

铌的循环利用为市场和各种产品带来了崭新机会。首先，它减少了对铌原材料的依赖，降低了市场成本，同时促进了对“城市矿产”的回收利用。此外，从线性经济过渡到循环经济符合环保标准，可降低能源消耗、减少温室气体排放，并以更可持续的方式利用这些再生资源。

## 参考文献

- Alves A R, Coutinho A d R. 2015. The evolution of the niobium production in Brazil. *Mat Res*, 18: 106–112
- Alves A R, Coutinho A d R. 2019. Life cycle assessment of niobium: A mining and production case study in Brazil. *Miner Eng*, 132: 275–283
- Bakry M, Li J, Zeng X. 2023. Evaluation of global niobium flow modeling and its market forecasting. *Front Energy*, 17: 286–293
- Broadbent C. 2016. Steel's recyclability: Demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy. *Int J Life Cycle Assess*, 21: 1658–1665
- Charpentier Poncelet A, Helbig C, Loubet P, Beylot A, Muller S, Villeneuve J, Laratte B, Thorenz A, Tuma A, Sonnemann G. 2022. Losses and lifetimes of metals in the economy. *Nat Sustain*, 5: 717–726
- Ciacci L, Reck B K, Nassar N T, Graedel T E. 2015. Lost by design. *Environ Sci Technol*, 49: 9443–9451
- Ciacci L, Harper E M, Nassar N T, Reck B K, Graedel T E. 2016. Metal dissipation and inefficient recycling intensify climate forcing. *Environ Sci Technol*, 50: 11394–11402
- Cullen J M, Allwood J M, Bambach M D. 2012. Mapping the global flow of steel: From steelmaking to end-use goods. *Environ Sci Technol*, 46: 13048–13055
- European C, Directorate-General for Internal Market I E, Smes, Bobba S, Carrara S, Huisman J, Mathieux F, Pavel C. 2020. Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU—A foresight study (doi/10.2873/58081): Publications Office
- Freiin von Rennenberg T S. 2021. Towards a circular economy of critical raw materials: The case of niobium. Dissertation for Master's Degree. Twente: University of Twente
- Graedel T E, Allwood J, Birat J P, Buchert M, Hagelük-en C, Reck B K, Sibley S F, Sonnemann G. 2011. What do we know about metal recycling rates? *J Industrial Ecol*, 15: 355–366

- Graedel T E, Reck B K, Miatto A. 2022. Alloy information helps prioritize material criticality lists. *Nat Commun*, 13: 150
- Hagelüken C, Goldmann D. 2022. Recycling and circular economy—Towards a closed loop for metals in emerging clean technologies. *Miner Econ*, 35: 539–562
- Heisterkamp F, Carneiro T. 2011. Niobium: Future possibilities—Technology and the market place. *Niobium, Science and Technology*
- IRP. 2024. *Global Resources Outlook 2024: A report by the International Resource Panel*. Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme
- Klinkenberg C, Trute S, Bleck W. 2006. Niobium in engineering steels for automotive applications. *Steel Res Int*, 77: 698–703
- Liang Z, Geng Y, Zhong C, Xiao S, Wei W. 2024. Tracking the evolution of niobium cycle in China from 2000 to 2021: A dynamic material flow analysis. *J Clean Prod*, 434: 140455
- McCaffrey D M, Nassar N T, Jowitt S M, Padilla A J, Bird L R. 2023. Embedded critical material flow: The case of niobium, the United States, and China. *Resour Conserv Recycl*, 188: 106698
- Milan Grohol, Constanze Veeh. DG GROW, European Commission. 2023. *European Commission, Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023-Final Report*
- Mujkić Z, Krekhovetckii N, Kraslawski A. 2019. Material pinch location and critical materials recycling. *Int J Manage Sustainability*, 8: 10–19
- Pan S, Zeng F, Su N, Xian Z. 2020. The effect of niobium addition on the microstructure and properties of cast iron used in cylinder head. *J Mater Res Tech*, 9: 1509–1518
- Rahimpour Golroudbary S, Krekhovetckii N, El Wali M, Kraslawski A. 2019. Environmental sustainability of niobium recycling: The case of the automotive industry. *Recycling*, 4: 5
- Sovacool B K, Ali S H, Bazilian M, Radley B, Nemery B, Okatz J, Mulvaney D. 2020. Sustainable minerals and metals for a low-carbon future. *Science*, 367: 30–33
- Sverdrup H U, Olafsdottir A H. 2023. Modelling the dynamics of the industrial vanadium cycle using the WORLD7 Integrated Assessment Model. *Resources Environ Sustainability*, 13: 100121
- Tkaczyk A H, Bartl A, Amato A, Lapkovskis V, Petranikova M. 2018. Sustainability evaluation of essential critical raw materials: Cobalt, niobium, tungsten and rare earth elements. *J Phys D-Appl Phys*, 51: 203001
- Tutton C G, Young S B, Habib K. 2022. Pre-processing of e-waste in Canada: Case of a facility responding to changing material composition. *Resources Environ Sustainability*, 9: 100069
- Wang P, Wang H, Chen W Q, Pauliuk S. 2022. Carbon neutrality needs a circular metal-energy nexus. *Fundamental Res*, 2: 392–395
- Zeng X. 2023. Win-Win: Anthropogenic circularity for metal criticality and carbon neutrality. *Front Environ Sci Eng*, 17: 23
- Zeng X, Ogunseitan O A, Nakamura S, Suh S, Kral U, Li J, Geng Y. 2022a. Reshaping global policies for circular economy. *Circular Economy*, 1: 100003
- Zeng X, Xiao T, Xu G, Albalghiti E, Shan G, Li J. 2022b. Comparing the costs and benefits of virgin and urban mining. *J Manage Sci Eng*, 7: 98–106
- Zhu Y, Syndergaard K, Cooper D R. 2019. Mapping the annual flow of steel in the United States. *Environ Sci Technol*, 53: 11260–11268

(责任编辑: 刘晓东)