

综述与专论

# 钒技术在难减排行业和能源转型中的作用评估

David A Santos<sup>1,2</sup>, Manish K Dixit<sup>3</sup>, Pranav Pradeep Kumar<sup>3,4</sup>,  
Sarbjit Banerjee<sup>1,2</sup>

(1. 德克萨斯农工大学化学系, 德克萨斯州 77843-3255, 美国; 2. 德克萨斯农工大学材料科学和工程系, 德克萨斯州 77843-3255, 美国; 3. 德克萨斯农工大学建筑科学系, 德克萨斯州 77843-3255, 美国; 4. 德克萨斯农工大学土木与环境工程学院, 德克萨斯州 77843-3255, 美国)

**摘要:** 重工业的减碳和可再生能源技术的出现皆与获得矿物资源有着密不可分的联系。因此, 迫切需要对关键元素在减少温室气体排放方面的作用进行基准评估。考察了钒作为微合金元素在建筑碳减排以及作为电网储能液流电池的主要成分在能源转型中的作用。研究结果表明, 钒可使每年减少总计 1.85 亿 t 碳排放。其中, 中国和欧盟的减排幅度分别为各自排放量的 1.15% 和 0.18%。研究结果强调了关键金属在发展低碳基础设施中的作用, 同时指出了进行全面评估并施加政策干预减轻供应链风险的必要性。

**关键词:** 钒; 微合金化; 液流电池; 碳减排

中图分类号: TF841.3, TU51

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)04-0084-11

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.04.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Assessing the role of vanadium technologies in decarbonizing hard-to-abate sectors and enabling the energy transition

David A Santos<sup>1,2</sup>, Manish K Dixit<sup>3</sup>, Pranav Pradeep Kumar<sup>3,4</sup>, Sarbjit Banerjee<sup>1,2</sup>

(1. Department of Chemistry, Texas A&M University, College Station, TX 77843-3255, USA; 2. Department of Materials Science and Engineering, Texas A&M University, College Station, TX 77843-3255, USA; 3. Department of Construction Science, Texas A&M University, College Station, TX 77843-3255, USA; 4. Zachry Department of Civil and Environmental Engineering, Texas A&M University, College Station, TX 77843-3255, USA)

**Abstract:** The decarbonization of heavy industry and the emergence of renewable energy technologies are inextricably linked to access to mineral resources. As such, there is an urgent need to develop benchmarked assessments of the role of critical elements in reducing greenhouse gas emissions. Here, we explore the role of vanadium in decarbonizing construction by serving as a microalloying element and enabling the energy transition as the primary component of flow batteries used for grid-level storage. We estimate that vanadium has enabled an avoided environmental burden totaling 185 million metric tons of CO<sub>2</sub> on an annual basis. A granular analysis estimates savings for China and the European Union at 1.15% and 0.18% of their respective emissions, respectively. Our results highlight the role of critical metals in developing low-carbon infrastructure while underscoring the need for holistic assessments to inform policy interventions that mitigate supply chain risks.

**Key words:** vanadium, microalloying, flow battery, environmental burden totaling of CO<sub>2</sub>

## 0 引言

按照目前的经济增长和消费趋势,预计到2100年全球气温将上升4℃,极端天气事件日益频繁,公共政策反应不稳定,可大规模应用的减排技术领域有限,世界站在气候变化的十字路口(Millar等,2017; Wigley等,1981)。将全球变暖保持在巴黎气候协议的1.5℃目标以下,将需要更深远的减碳措施(Ramakrishnan等,2018)。随着现代经济前所未有的能源转型以及工业生产深度减碳的不断推进,人们对有限自然资源的获取和利用更加谨慎(Child等,2018; Graedel等,2015),可再生能源技术的出现导致了对许多矿产资源的严重关切,在许多情况下,这些技术阻碍了矿产资源更大的市场应用(Hofmann等,2018; Sprecher等,2017)。事实上,重工业减碳和可再生能源技术的出现往往是对稀缺矿物资源的直接争夺,因此,需要对关键矿物进行减碳基准评估,并详细绘制物质和能源流向图,以便为制定战略矿物的平衡和扩大获取的公共政策提供信息支持(Santos等,2021)。本文中,笔者试图从纵向的角度来看待过渡金属钒对难以减碳的重工业领域的碳减排以及新兴储能应用的影响。

减少碳排放以实现全球可持续发展目标,在德国被简称为Energiewende,包括:①从化石燃料向可再生能源过渡;②全面提高能源效率,降低全球能源总消耗;③储能,实现发电与用电的脱钩,从而更好地调节供需。钒具有令人瞩目的氧化还原化学性能多功能性,这就在技术上能够改变能源储存和供应的方式,从而将能源生产(来自可再生能源)和需求脱钩来推进能源转型,并促进更有效地利用可再生资源。此外,钒及其化合物在铁和钛铝合金中的可溶性支持了建筑材料更大程度的节约使用,从而使传统上难以减排的领域实现更高的能源效率。政策干预、技术突破和商业环境等一系列组合因素导致这种金属在商品市场上的价格大幅波动,凸显了对全行业进行全面评估的必要性(Rodby等,2020年; Santos等,2021)。利用详细的全行业物流数据,我们分析了钒在不同行业的使用情况,并对不同行业的巨大环境影响进行了严格的评估。

## 1 钒的典型应用及分析

钒(V)是一种质地轻的灰色延展性过渡金属,天然存在于大约65种不同的矿物中。钒有从-1价

到+5价的七种氧化态,因此具有令人瞩目的化学多功能性以及固态化合物的不同晶体结构(De Jesus等,2018; White和Levy,2021)。从用作钢强化的添加剂(Li和Milbourn,2013)到开发捕捉神经元复杂性的神经模拟电路(Andrews等,2019),钒的多功能性使其在多个行业得到了应用。

在每年生产的约11万t钒中,约68%来自钢铁制造过程的副产品,18%来自原矿生产,其余14%来自二次回收产品,包括从粉尘、石油残留物和废催化剂中回收的钒(Pradeep Kumar等,2021; White和Levy,2021)。值得注意的是,由于国际海事组织(IMO)最近发布的监管变化,限制了船用燃料的最大硫含量,预计含钒催化剂的二次回收量将大幅上升(Topali和Psarftis,2019),对船用燃料馏分广泛加氢脱硫的需求,将要求对炼油工艺进行改造,并更广泛地需要基于钒的排放控制催化剂。大部分钒产品被钢铁工业用作合金化添加剂来强化钢,较小的一部分用于制备汽车或切削工具用的先进高强度合金钢和用于航空航天用的钛铝合金。值得注意的是,绝大多数钒的生命周期开始和结束于钢铁生产,使其可作为循环经济的一部分,不断地重复使用和回收利用(Pradeep Kumar等,2021)。

近年来随着钒氧化还原液流电池(VRFB)的发展(Weber等,2011),越来越多的钒被用于制造VRFB电解质,虽然储能行业在2019年占钒市场的比例<5%,但VRFB的迅速增长和新型V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>基插层电池阴极的开发(Andrews等,2018; De Jesus等,2018; Parija等,2016),预计将创造显著增长的市场份额,可能会破坏长期建立的钒物料流(Rodby等,2020)。在本研究中,笔者重点介绍了钒在三个主要领域的使用案例,即建筑(钢筋和结构钢)、汽车和能源储存,同时强调和量化了钒技术带来的碳减排作用。

建筑环境是一个难以减排的行业,却因其巨大的碳排放量而众所周知,占全球总能源消耗的近一半(Dixit等,2015)。在过去十年中,碳中和建筑的兴起表明,通过提高能源效率和增加对可再生能源的依赖,人们为减少建筑物的运行碳足迹做出了巨大努力(Zuo等,2012)。与建筑运行阶段通过使用节能电器或可持续实践来减少碳排放不同,隐含碳足迹在生产阶段之后就不可改变地锁定了(Akbarnezhad和Xiao,2017),仅钢铁(Hoffmann等,2020)和水泥(Monteiro等,2017)等建筑材料的制

造过程就占全球人为二氧化碳排放量的约 16%。对化石燃料根深蒂固的依赖,加上能源密集型生产过程和不理想的过程强化,继续对环境造成重大损失。通过更经济地使用传统建筑材料和设计更可持续的替代品来减少新建筑产生的碳排放,对建筑环境减碳至关重要 (Bajpayee 等, 2020)。

值得注意的是,钢铁——建筑业的支柱,已经是全球回收最多的材料,在美国,大约 93% 的现有钢结构是回收钢材,这表明回收钢材所避免的环境负担接近饱和 (AISI, 2020)。

另一种替代方法是使用高强度低合金钢 (HSLA), 由于能够减少满足建筑设计性能要求所需的建筑材料数量,它提供了相当大的材料使用经济性,因此获得了显著的吸引力 (Baker, 2016; Pradeep Kumar 等, 2021; White 和 Levy, 2021)。通过显著减少结构所需的钢材或混凝土总量,即提高材料效率,减少了碳排放, HSLA 的使用进一步使得基于最少的钢材和其他建筑材料消耗的新颖建筑设计成为可能。

运输行业进一步利用了钒合金钢提供的更大的材料经济性。运输行业约占美国温室气体 (GHG) 排放总量的 29% (EPA, 2019)。为了实现更低的尾气排放,汽车制造商已经引入了新的低密度结构材料 (例如,铝和镁合金,碳纤维复合材料),或者采用先进的高强度钢,以保持 (或提高) 功能性能,同时提高材料使用的经济性 (Geyer, 2008; Taub 等, 2019)。然而,许多轻量化材料的高碳排放型生产 (铝比钢高 20 倍) 抵消了在使用阶段通过减轻重量实现的所有减排 (Geyer, 2008; Hickey, 2018; World Auto Steel, 2021)。由于这个原因,采用生命周期评估以准确估算温室气体排放是必要的。在本研究中,以钒基先进高强度钢 (AHSS) 的作用为例,定性地讨论了汽车行业轻量化的新方法。

2019 年,美国约 63% 的电力来自化石燃料,与此形成鲜明对比的是,只有 18% 的电力生产来自风能和太阳能等可再生能源 (EIA, 2019)。尽管可再生能源的贡献看似不大,但国际能源署 (IEA) 预测,到 2025 年,全球太阳能和风能的发电量将翻一番,接近 2 400 GW,超过煤炭和天然气的发电量 (IEA, 2020 a)。太阳能和风能发电装置的增加需要开发辅助性储能技术,以平衡风能和太阳能发电的间歇性。在候选的储能技术中,氧化还原液流电池因其独特的能力而引起了人们的关注,因为它可以独立地扩展功率和能量密度指标,以满足特定应用的要求

(Weber 等, 2011)。在最简单的形式中,氧化还原液流电池通过可逆的电化学反应将电能转化为化学势能。而且,与锂离子电池不同,钒液流电池系统明显不容易受到火灾或爆燃风险的影响 (Paiss, 2017)。在这里,能源和电力组件的分离、水性电解质的使用以及相对较小的能量密度产生了较低的热梯度,最大限度地减少了可燃物,并从根本上消除了内部/外部短路的风险 (Whitehead 等, 2017)。长循环寿命、快速响应时间、在长时间运行中可以忽略不计的容量损失以及出色的安全特性,使 VRFB 成为固定式储能领域的主要竞争者 (Soloveichik, 2015)。VRFB 平台的一个显著优势是钒矿床的地域多样性 (Imtiaz 等, 2015) 和再生方法的成熟,缓解了两大主要瓶颈,而这两大瓶颈严重阻碍了锂离子电池的应用。虽然钒的生产仍然集中在中国 (约占钒总产量的 63%),但对钒电解质的预期需求导致中国以外的国家已宣布几个计划项目,其计划产量超过目前世界产量的 20%。一些新投资项目、钒回收项目和产能扩张项目具有很高的实现可能性,包括铁合金资源集团 (Ferro-Alloy Resources Group, 哈萨克斯坦)、澳大利亚钒有限公司 (Australian Vanadium Limited, 西澳大利亚)、Neometals Limited (芬兰)、Skåne Vanadium Project (瑞典)、Bushveld Minerals (南非) 和 AMG Vanadium (美国和沙特阿拉伯)。预计钒供应地域多样性的增加有可能缓解锂离子电池价值链中许多长期的供应风险。这些项目中有几个高级合金项目已充分被证实批准。正如向可再生能源转型的主要驱动力是减少碳排放一样,储能基础设施的环境影响和可持续性也必须考虑在内。

## 2 钒应用的减排结果与讨论

### 2.1 含钒建筑用钢

高强度低合金钢 (HSLA) 的成分与传统低碳钢相似,但包含一种或多种合金元素,如钒、铌或钛,通过晶粒细化和沉淀强化机制显著提高屈服强度 (Baker, 2016)。已有报道表明每添加 0.01% 的微合金化元素可提高 15 MPa 的强度,并且已证明 0.12% 的微合金化,屈服强度可达 1 000 MPa (Li 和 Milbourn, 2013; Pradeep Kumar 等, 2021; 谢等, 2014)。由于钒在奥氏体相中具有优异的溶解度,从而能够在较低的工作温度下生产更高强度的钢,因此钒已成为许多高强钢生产商首选的微合金化元素 (Pradeep Kumar 等, 2021)。钒微合金钢的主要强化机制包括晶粒细化和形成细小且分散良好的碳化物

和氮化物沉淀,这在防止腐蚀、氢脆和抗震等方面又提供了一种好处(Baker, 2016; Cho 等, 2018; Hussain 等, 2020; Perrard 和 Scott, 2007)。虽然铌等替代品能提供类似的强度优势,但它们通常需要更多的能源密集型热机械处理,而且没有一种能与钒基 HSLA 钢的整体性能相匹配(Kalantar 等, 2019)。20 年来,中国一直是钒的主要消费国,近年来,中国每年的钒消费量超过了世界其他地区的总和。虽然中国是通过钒合金实现大规模减碳的典范,但欧盟打造的是一个完全不同的建筑行业,提供了一个独特但同样重要的视角,其中,用淬火和自回火方法部分抵消了对建筑钢筋中微量合金的偏好。出于这个原因,对含钒建筑钢材的分析(见下文)同时考虑了欧盟和中国的钒消耗数据,除了提供对地区节约的深入了解之外,还估算了全球碳减排的下限和上限。虽然研究中的钢材评估侧重于钒微合金化“从摇篮到大门”的碳减排,但是需要强调的是,其好处在使用阶段也可能会得到额外体现。这里指的是,钒的掺入对耐腐蚀性(钢筋混凝土结构恶化的主要原因)(Guzmán 和 Gálvez, 2017)、氢脆(与超高强度应用愈加相关)和地震活动(对地震多发地区至关重要)的有益作用,有助于延长建筑结构的寿命,从而减少“从大门到摇篮”的材料和能源消耗。

## 2.2 结构钢

已经建立了一个框架模型来解释钢中微合金化的减碳效益,包括两个层面:构件和建筑层面的分析。在构件层面,计算得出钢梁和钢柱分别减排了约 10% 和 40% 的隐含能源和碳,而总体建筑层面,梁和柱的隐含能源和碳减排约占 5%。由于基于 BS4 Part1 1993 (BS4 Part1, 1993) 标准的型材类型选择有限,所以建筑层面的减排较低。从概念上讲,材料节约应该随着抗拉强度和钒添加量的增加而增加,但在实践中,实际应用(即在建筑层面)实现节约之前,必须满足型钢规格的最低门槛。尽管存在这些实际限制,如后续章节所讨论的那样,由于型钢的钒微合金化,最终在建筑层面上减排了大量的隐含碳。

根据中国钢铁工业协会(CISA)的数据,2018 年生产了约 1 450 万 t H 型和 I 型钢。其中约 69% 为低碳钢(Q235 级),其余为高强度钢(> Q345 级),2018 年中国生产了约 448 万 t 高强度钒微合金钢型材,这些型钢的钒含量为 0.035%,这相当于在型钢中加入了 1 568 t 钒。利用这些数据,计算了隐含能源和隐含碳减排量。与低碳钢(235 MPa)相比,钒微合金化可减少 29 万 t 的钢材消耗。钢的节省

不仅抵消了钒掺入成本,还可以用来量化隐含能源和隐含碳的减排量。计算结果表明,采用钒微合金化 350 MPa 钢可节约隐含能源  $7.33 \times 10^9$  MJ,节约隐含碳 56 万 t,碳减排量相当于中国 2018 年化石燃料的碳排放量的 0.006% (GCP, 2019)。

在欧盟(EU-28),2018 年生产了约 960 万 t 大型材,每吨钢使用 0.05 kg 钒,即共 482 t 钒。假设 350 MPa 型钢中含钒量为 0.035%,耗钒量为 482 t,则钒微合金钢的总产量为 1 376 714 t。使用钒微合金型钢代替低碳型钢可减少约 89 000 t 的钢材消耗量。用钒微合金化 350 MPa 钢代替 235 MPa 低碳钢,节约隐含能源  $1.66 \times 10^9$  MJ,节约隐含碳 12 万 t。考虑到欧盟 28 国 2018 年的碳排放量为 34 亿 t(GCP, 2019),使用钒微合金型钢所减排的碳相当于欧盟 28 国碳足迹减少了 0.004%。

2018 年,全球型钢总产量为 5 250 万 t,中国和欧盟 28 国合计产量为 2 410 万 t,由此推测,世界其他地区生产了 2 840 万 t 型钢。考虑到像欧盟 28 国这样的钢中钒强度,即生产每吨钢使用 0.05 kg 钒,则钢中含有 1 421 t 钒。采用与欧盟 28 国类似的方法,即当型钢中钒含量为 0.035% 时,1 421 t 钒可以得到总共 4 058 591 t 的钒微合金型钢。累加中国、欧盟 28 国和世界其他地区的相关指标得到:通过用钒微合金型钢代替低碳型钢,总共减少了约 65 万 t 的钢材消耗,相当于  $15.6 \times 10^9$  MJ 的隐含能源节约和 118 万 t 的隐含碳减排。基于 2018 年全球化石燃料的碳排放量为 368 亿 t(GCP, 2019),碳减排量相当于减少了 0.003% 的全球碳足迹。

从建筑层面的分析中得到的隐含能源和隐含碳减排表明,钒微合金化在减少型钢生产的环境影响和碳足迹方面发挥了重要作用。影响评估表明,欧盟 28 国和中国地区的碳排放量相对于各自 2018 年的地区化石碳足迹减少了 0.004% ~ 0.006%。全球分析显示,钒微合金钢型材在 2018 年共减排了 118 万 t 二氧化碳,这相当于 2 000 万棵树 10 年所吸收的碳(EPA, 2021)。

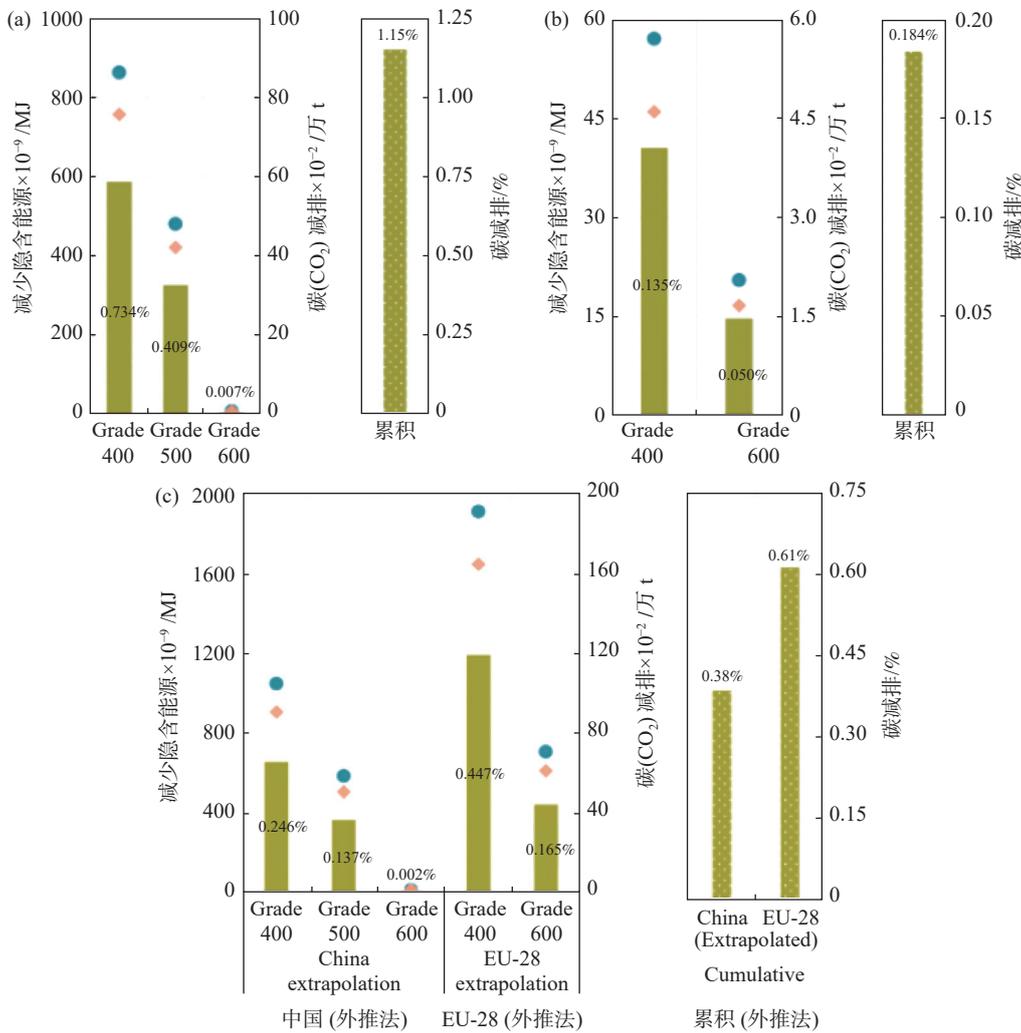
## 2.3 钢筋

钢筋占建筑行业所用钢材总量的 44%。在最近发表的一篇文章中,该文使用 2017 年的数据对钢筋进行了详细的生命周期评估,并证明了钒微合金化在降低隐含能源和隐含碳方面的重要作用(Pra-deep Kumar 等, 2021)。鉴于当前旨在解决耐震性的法规导致的钒消耗大幅增加的问题,在本文中,我们使用最新的 2019 年数据计算了隐含能源和隐含碳

的节约量,这一数据特别具有指导意义。对中国和欧盟 28 国进行了地区特定分析,并利用中国和欧盟 28 国的数据外推全球情景,以给出上限和下限。中国 2019 年的钢和钒数据来自中国钢研科技集团 (CISRI)。根据 CISRI 的数据,2019 年中国共生产了 2.27 亿 t 高强螺纹钢,其中 1.08 亿 t 400 MPa 螺纹钢消耗钒 3 236 0 t, 3 700 万 t 500 MPa 螺纹钢消耗钒 22 284 t, 46.9 万 t 600 MPa 螺纹钢消耗钒 496 t。2019 年观察到 IV 级 (500 MPa) 和 V 级 (600 MPa) 等高级别钢的产量有所增加,这与四川地震后实施的更严格的钢筋规范有关 (Santos 等, 2021 年)。欧盟 28 国的钢材数据来自世界钢铁协会 (World

Steel Association), 钒数据来自 Vanitec。螺纹钢等级分类和相应的钒消耗量是通过螺纹钢总量和钒市场数据以及机器学习模型的结果得到的。根据 Vanitec 获得的数据, 欧盟 28 国生产了约 13 000 t 钒, 其中约 30% 被认为用于生产钢筋。2019 年, 欧盟 28 国生产了约 1 060 万 t 螺纹钢, 其中约 900 万 t 400 MPa 螺纹钢消耗了 1 183 t 钒, 约 150 万 t 600 MPa 螺纹钢消耗了 2 703 t 钒。

使用最新的 (2019 年) 钢和钒市场数据, 按照方法部分中描述的程序进行生命周期分析 (LCA)。图 1 给出了使用 2019 年市场数据得到的区域和全球结果的比较。



图中,减排量是使用 2019 年的数据计算的: (a) 中国; (b) 欧盟 (EU-28); (c) 全球 (以中国和欧盟 28 国使用情景作为边界条件外推得到的数据)。节约的隐含能源 (青色) 和隐含碳 (橙色) 是采用螺纹钢市场的钒数据计算的,并通过已知地区的螺纹钢成分推算每个等级的钢产量和钒用量。对于全球情景分析,具体的隐含能源和隐含碳减排量是使用螺纹钢市场数据中的钒、中国和欧盟 28 国的数据以及每个等级占总钢比例加权钒量来计算的。以低碳钢 (250 MPa) 为参考,计算各等级钢的隐含能源和隐含碳的节约量。碳的减排百分比 (黄绿色) 是相对于各自的年度化石碳排放总量计算的

图 1 减少隐含能源与碳减排的地区差异

Fig. 1 Regional variation in embodied energy and carbon savings

在中国,基于结构模型结果,用400 MPa级、500 MPa级和600 MPa级代替低碳钢(250 MPa)分别可节省3 900、2 200万t和40万t钢材。图1(a)列出了每种等级螺纹钢的隐含能源和隐含碳减排量。根据2019年103亿t的化石碳排放总量,钢筋中的钒微合金化有助于中国减少1.15%的碳足迹。在欧盟28国,根据现有数据和上述假设,用400 MPa和600 MPa的钢代替250 MPa的钢,分别节省约330万t和120万t螺纹钢,如图1(b)所示,这直接表明了隐含能源和隐含碳的显著节约。相对于2019年欧盟28国34亿t的化石燃料碳排放总量,累计减少了0.18%碳足迹。

在全球范围内,2019年生产了约2.85亿t螺纹钢。我们考虑两种使用场景。第一种情况用中国的数据进行外推,采用与中国类似的螺纹钢分类方法,分别使用400、500 MPa和600 MPa螺纹钢代替250 MPa的低碳钢,节省钢材约4 900、2 700万t和50万t。图1(c)列出了每个螺纹钢等级的隐含能源和隐含碳减排量。2019年,全球化石碳排放总量为368亿t,通过用钒微合金螺纹钢取代低碳钢,碳排放量减少了0.38%。第二种情况,使用EU-28的数据进行外推,结果显示,用400 MPa和600 MPa的螺纹钢代替低碳钢分别节省8 850万t和3 300万t钢材,如图1(c)所示,这种情景可以减排大量的隐含能源和隐含碳。按2019年全球化石燃料碳排放总量计算,这相当于总计减少0.61%的全球碳足迹。使用中国和欧盟28国场景的外推法,估计全球碳排放总量将降低0.38%~0.61%,这表明钒作为微合金材料在提高建筑行业可持续性方面具有相当大的意义。

基于这一分析,钒微合金钢筋具有显著的能源和碳效益。我们估计,由于建筑中使用钒微合金化钢筋,2019年全球减少了CO<sub>2</sub>排放量1.417亿t至2.252亿t(分别基于中国和欧盟28国的数据外推)。在这里,下限和上限之间的平均减少量(0.835亿t CO<sub>2</sub>)相当于30亿棵树十年所吸收的CO<sub>2</sub>量(EPA, 2021)。按照中国和欧盟28国情景进行地区分析,得到预期减排量上限和下限,但是,鉴于欧盟28国数据的可用性有限,分析的上限可能会存在更大的不确定性。

#### 2.4 含钒汽车用钢

因为先进高强度钢(AHSS)具有优越的结构性能和在汽车生命周期的各个阶段降低碳排放的独特

能力(Keeler等,2017;Lesch等,2017),这些合金在汽车中的用量迅速增加。就像建筑中使用的HSLA钢一样,使用比普通钢材更少的AHSS钢材就可以满足组件的性能要求,因此,采用AHSS钢节省了大量材料,从而减轻了车辆重量并提高了燃油经济性。与HLSA钢不同,AHSS的使用性能是通过合金化和精确的热机械加工而获得的,通过协同作用可以得到既有强度又有延展性的多相组织结构,这是传统HSLA钢无法得到的(Keeler等,2017;Taub等,2019)。AHSS的一些例子包括双相钢(DP)、多相复合钢(CP)、铁素体-贝氏体钢(FB)、马氏体钢(MS)、相变诱发塑性钢(TRIP)、热成形钢(HF)和孪晶诱发塑性钢(TWIP)。由于强化效率高,少量钒(通常含量低于0.5%)等微合金化元素就能显著提高钢的强度,因此,AHSS钢生产的碳足迹与传统钢(最广泛回收的材料)相当,比铝、镁和碳纤维复合材料的碳足迹少很多倍(Broadbent, 2016;Geyer, 2008)。美国钢铁协会钢铁再循环分会(SRI)的一份详尽报告显示,对5 000个研究案例进行100%的基准比较以及对超过90%的案例进行基准比较,大量使用AHSS组件的白色车身比大量使用铝件的设计更轻且碳减排效果更好(Sebastian和Thimons, 2017)。塔塔钢铁公司(Tata Steel, 2016年)的类似研究结果表明,与大量使用铝件的设计相比,大量使用AHSS组件的设计可减少30.5%的全生命周期的碳足迹,与玻璃纤维增强替代方案相比,可节省34.8%。2016年,世界钢铁协会(World Steel)估计,与传统钢材相比,AHSS钢制造的车辆的温室气体排放量减少了300万t至450万t(WSA, 2020 a)。现在,几乎所有的新车设计都使用了AHSS钢,接近车身结构的60%。最近的研究表明,由于汽车电气化,材料使用的变化特征表明,V用量增加了四倍,从内燃机轿车的0.003%增加到插电式混合动力(PHEV)SUV的0.012%(Bhuwalka等, 2021)。随着零尾气排放的电动车(EV)和混合动力车(HEV)的日益普及,车辆的生产和回收生命阶段的碳排放的重要性将变得越来越重要,因此AHSS钢相对于其他轻量化选择的优势只会变得更大(Hickey, 2019;Lesch等, 2017;Tata steel, 2018)。

由于AHSS钢的化学和加工组合有很大的可变性,量化单一合金元素,即钒所带来的碳减排太过复杂,超出了本研究的范围。此外,细致的模型也需要考察完整的生命周期清单,包括专用合金的成分

和数百个车辆设计参数 (Geyer, 2018; Pero 等, 2018)。然而, 钒微合金化在许多高性能轻质钢中起着关键作用, 纳米沉淀强化铁素体在双相钢中的作用已被广泛研究 (Chakraborti 和 Mitra, 2007; Garcia 等, 2012; Luo 等, 2010; Son 等, 2005)。人们理想地寻求抗拉强度和延展性这两种材料性能的同时最大化, 但两者的变化趋势通常是相反的 (即抗拉强度的增加通常是以牺牲延展性为代价的)。钒的加入却能同时提高导致抗拉强度和延展性, 相比之下, 添加合金元素, 比如添加钛, 虽然提供类似的沉淀强化效果, 但超过一个阈值 (约 0.1%) 则导致钢的脆性增加 (Scott 等, 2013)。在相变诱导塑性 (TRIP) 钢中也出现了类似的效果, 在掺入钒和氮后, 其极限抗拉强度 (UTS) 增加了 200 MPa, 而延伸韧性没有损失 (Oja 等, 2019; Perrard 和 Scott, 2007; Scott 等, 2004)。事实上, 提高某一材料性能而不显著牺牲材料的另一种性能是冶金学家面临的挑战之一, 例如, 随着 AHSS 钢强度的提高, 它们对氢脆的敏感性也在增加, 氢脆是一种腐蚀形式, 其中氢的扩散和渗透使钢变脆, 导致产生早期裂纹 (Cho 等, 2018; Lesch 等, 2017)。研究表明, 钒的添加可以捕获碳化钒夹杂物周围可迁移的氢, 从而掩蔽氢, 降低材料发生氢脆的倾向。

## 2.5 钒氧化还原液流电池

本研究利用基于 VRFB 综合生命周期评估的基准情景 (Weber 等, 2018), 计算两种情况下的当前运行容量 (COC) 和预测运行容量 (POC) 的碳减排: ①可再生能源弃电: 没有储能技术的情况; ②比较评估: 相对于由磷酸铁锂阴极和钛酸锂阳极组成的锂离子电池 (LiB) (Weber 等, 2018)。

### 2.5.1 基准情景

基准情景以 Weber 等人考察的 VRFB 电池为代表, 其额定功率为 1 MW, 存储容量为 8.3 MWh (即在 8.3 h 内放电 1 MW) (Weber 等, 2018)。VRFB 和 LiB 的平均使用率都为 1.12 次/d, 使用寿命为 20 年, 共计 8 176 次充放电循环, 终身提供 67 861 MWh 的电力 (Weber 等, 2018)。基准情景的碳减排量是在假设风能、太阳能或风能/太阳能各占一半的情况下计算出来的。图 2 为在每种电力来源条件下的 20 年寿命周期内的减排量。

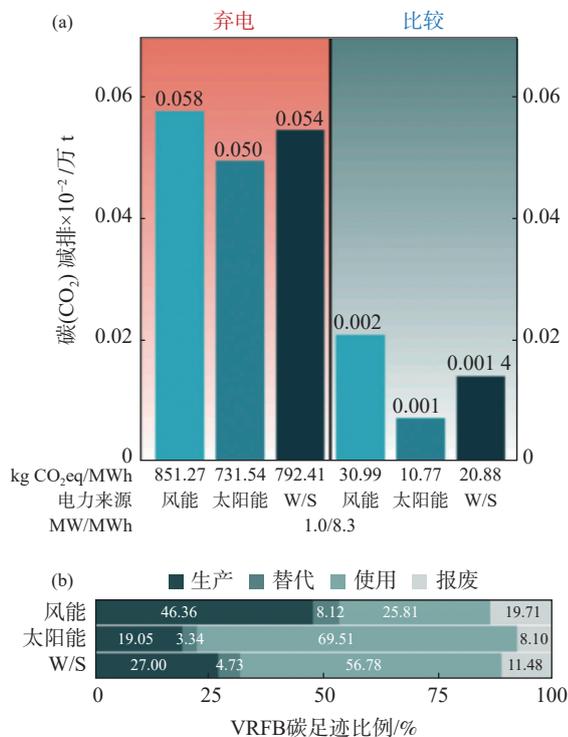
分析表明, 当与风力资源相结合时, 因为减少可再生能源弃电, 1 MW、8.3 MWh 的装置将在其使用寿命 (20 年) 内减少高达 5.8 万 t 的 CO<sub>2</sub>, 相当于减

少了约 29 000 t 煤的燃烧排放 (EPA, 2021)。值得指出的是, 由于当前一定比例的可再生能源发电过剩和当前安装的储能设施有限, 我们假设 VRFB 的总容量是根据用户配置 (即最佳情况场景) 使用的。此外, 储能系统实现减排的细节涉及多种因素, 如储能系统的充分性程度影响可再生能源技术投资的增加、地区排放上限、可再生能源技术补贴、可调度能源的替代方案、储能系统与当地气候及可再生能源基础设施的匹配 (Bistline 和 Young, 2020; Cavicchi 和 Ross, 2020)。然而, 在没有可用电网储能解决方案的地方, 可再生能源存储技术在减少二氧化碳排放和可再生电力弃电方面的潜力已经得到证明 (Arbabzadeh 等, 2019; Denholm, 2012)。例如, Arbabzadeh 等人表明, 储能与现有可再生能源电力的结合可以将二氧化碳减排从 72% 增加到 90%, 同时将加利福尼亚州的可再生能源弃电从近三分之一减少到 9% (Arbabzadeh 等, 2019)。随着可再生能源存储成本的降低, 更有效地开发可再生能源, 减少弃电的动机显著增加。虽然未使用的可再生能源的碳成本并不高, 但当需求大于供应时, 对非可再生能源 (如调峰电厂) 依赖的增加将不可避免地增加二氧化碳的排放量, 从而显著抵消可再生能源联网期间积累的收益。

虽然实施电网级储能的好处是显而易见的, 但从碳排放的角度对一种技术与另一种技术的动机的探讨是不充分的。Weber 等人证明, 当 VRFB 而不是 LiB 与风能或太阳能等可再生能源结合, 可以减少碳负担 (Weber 等, 2018)。他们的研究表明, 当电池与风源结合时, VRFB 生产每兆瓦时的电力比 LiB 少产生约 31 kg CO<sub>2</sub>eq; 当与太阳能结合时, 按如图 2(a) 所示的标准化节约量计算可节约约 11 kg CO<sub>2</sub>eq/MWh (这些节约考虑了 LiB 和 VRFB 使用回收材料的收益)。虽然与弃电分析相比较小, 但 1 MW/8.3 MWh VRFB 装置产生的总碳减排 (假设与风结合) 约为 2 100 t CO<sub>2</sub>, 相当于减少 457 辆 (内燃机, ICE) 乘用车一年的碳排放。VRFB 比 LiB 减排的主要原因是钒电解质卓越的可回收性, 例如, 一家领先的高纯度钒产品生产商最近证实了前所未有的 97% 的钒电解质回收率 (U.S. Vanadium, 2021 年)。

由于 VRFB 的循环效率 (75%) (round-trip efficiency) 低于 LiB (90%), 从与风能结合到与太阳能结合, 碳减排量呈减少趋势。在这里, 较低的效率

导致额外的能源消耗,因此环境负担与电力来源的碳强度成正比。为了更好地说明这个概念,图 2(b)列出了每个阶段在 VRFB 总碳排放中的比例。从风能到太阳能,使用阶段的比例从 25.81% 增加到 69.51%。从本质上讲,太阳能 (106 kg CO<sub>2</sub>eq/MWh) 比风能 (16 kg CO<sub>2</sub>eq/MWh) 为补偿储能效率低下所需额外能源的碳成本更高。因此,随着结合电源碳强度的增加,VRFB 每输出 1 MWh 电能所减排的 kg CO<sub>2</sub>eq 量也随之减少(见图 2(a))。值得注意的是,虽然锂电池技术具有当前优势,但随着 VRFB 预期循环效率的提高(参见预测运行容量),加上正在进行的电网减碳,将肯定会降低运营成本,因此选择 VRFB 的动力会更大。



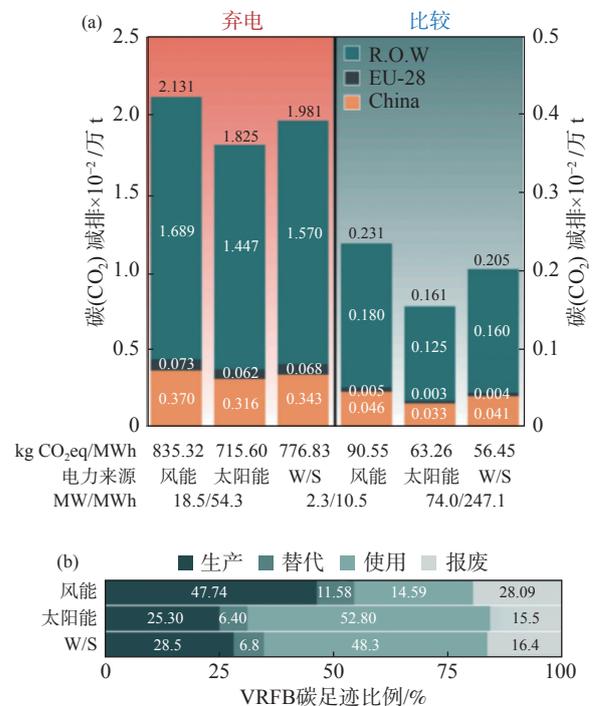
(a) 列出了 VRFB 在 20 年寿命期间针对可再生能源弃电(橙色)和比较评估(绿色)情景的减排量。柱状图下面插入的表格与上面的列相对应,并给出了(从上到下)以 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh (kgCO<sub>2</sub> 当量/MWh) 为单位的标准化减排量、电源(风能、太阳能或风能/太阳能混合(W/S),以蓝色阴影区分)以及系统的额定功率和存储容量;(b) 每个生命周期阶段占 VRFB 碳足迹的比例

图 2 基准情景下 VRFB 碳排放量

### 2.5.2 目前运行容量

根据基准情景中 VRFB 和 LiB 的碳足迹,利用从 Vanitec 获得的全球每个 VRFB 装置的广泛数据,估算了二氧化碳的节约量(参见数据 S1 的电子表格,其中包含每个已宣布、已签约和正在运行的

VRFB 项目的详细清单,以及 Vanitec 公共数据源中列出的地理位置)。虽然已尽一切努力确保这些数字的准确性,但在没有公开资料的情况下,预计会出现偏差。此外,值得注意的是,这些数字很可能低估了全球 VRFB 安装总数,因此估算的减排量是保守的。与基准情景一样,我们假设 VRFB 和 LiB 的平均循环效率分别为 75% 和 90%,并且每个储能系统在其 20 年的使用寿命内平均使用 1.12 次/d。与钢筋和钢材的分析非常相似,图 3(a)列出了在风能、太阳能或风能/太阳能混合(W/S)能源条件下,全球、中国、欧盟 28 国和世界其它地区的 VRFB 区域减排量。



(a) 所有目前运行的 VRFB 在 20 年内针对可再生能源弃电(橙色)和比较评估(绿色)情景的减排量。中国(黄色)、欧盟 28 国(黑色)和 R.O.W.(世界其余地区,深绿色)减排量被堆叠起来,以显示全球减排总量。柱状图下面插入的表格与上面的列相对应,并给出了以 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh (kgCO<sub>2</sub> 当量/MWh) 为单位的标准化减排量、电源(风能、太阳能或风能/太阳能混合(W/S))以及系统的额定功率和存储容量(根据其相应的柱色进行颜色匹配);(b) 每个生命周期阶段占 VRFB 总碳排放的比例

图 3 目前运行容量 VRFB 碳减排量

Fig. 3 Savings by the current operational VRFB capacity

正如在基准情景中所讨论的那样,电力来源的碳强度对弃电和比较评估中的减排量有重大影响。为了结果和讨论的清晰性,随后仅讨论与风能结合的情景下 COC(当前运行容量)的绝对减排量和单位减排量。我们的分析估计,目前全球运行的 VRFB 装置,预计在其预期的 20 年使用寿命内可减

排高达 213.1 万 t 的二氧化碳排放,更形象地说,213.1 万 t 的二氧化碳减排相当于一年时间内多运行 413 台风力涡轮机。此外,每年 10.7 万 t 二氧化碳的全球碳减排量相当于约 13 万英亩美国森林的同期碳吸收量 (EPA, 2019)。根据每个地区的装机容量,估计中国、欧盟 28 国和 R.O.W.在 20 年的生命周期内分别减少 37、7.3、168.9 万 t 的二氧化碳排放 (见图 3(a))。图 3(a)中的表格列出了 VRFB 在其生命周期内产生的以 kg/MWh 为单位的标准化全球二氧化碳减排量。与 BC 情景相比,通过减少可再生能源弃电得到的标准化减排量要小一些,即:BC(基准情景)和 COC 情景(当前运行容量)下分别为 851.27、835.32 kg CO<sub>2</sub>eq/MWh。从 BC 情景到 COC 情景,标准化节约变少,可以用平均能量功率比 (E/P) 的差异来解释——基准情景为 8.3,当前运行容量为 3.3,在这里,较低的放电速率(较大的 E/P 值)使存储容量最大化,而存储容量直接关系到可再生能源弃电(及其碳成本)的比例。

比较评估表明,根据目前安装的 VRFB 运行容

量,选择 VRFB 而不是 LiB,将在 20 年的使用寿命内减排 23.1 万 t 二氧化碳。必须再次说明,虽然比较评估情景的节约量比弃电情景小一个数量级,但比较评估是在两种绿色储能解决方案之间进行碳减排比较,除了减少可再生能源弃电所带来的碳排放节约,VRFB 还比 LiB 多减排相当于燃烧 12 万 t 煤所产生的碳排放。与弃电情形不同,COC 情景较低的 E/P 值(更快的放电时间)使标准化节约量从 BC 情景的约 31 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh 增加到约 91 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh。考虑到相对于 LiB,VRFB 减排量主要来自于生产、更换和报废(EoL)阶段(本分析中主要按功率表示),较小的 E/P 值有利于增加 VRFB 生命周期,同时减少了较低的循环效率产生的影响(使用阶段产生的碳影响,按 MWh 表示,如图 3(b)所示)。值得注意的是,将 E/P 值变化的结果与现有文献进行比较,得出的结果是不一致的,部分原因是 E/P 值的计算方式不同(Baumann 等,2017;Hiremath 等,2015;Rydh,1999;Weber 等,2018)(详见本研究的局限性)。表 1 为弃电和比较评估情形的年化 CO<sub>2</sub> 节约量。

表 1 按照当前运行的 VRFB 容量,弃电和比较评估情形下 VRFB 每年的 CO<sub>2</sub> 减排量

Table 1 Annualized savings by VRFBs from the curtailment and comparative assessment for current operational VRFB capacity

	年减排量/万t							
	弃电				比较			
	中国	欧盟-28	世界其他地区	全球	中国	欧盟-28	世界其他地区	全球
风能	1.85	0.36	8.44	10.65	0.23	0.03	0.90	1.15
太阳能	1.58	0.31	7.23	9.13	0.16	0.02	0.63	0.81
风能/太阳能	1.72	0.34	7.85	9.90	0.21	0.02	0.80	1.03

注:按中国、欧盟28国、世界其它地区和全球地区分类,给出了风能、太阳能和风能/太阳能混合发电结合的减排量。为了展现生命周期每个阶段的比例,表中报告的一年减排量是20年生命周期中平均每年的减排量,而不是使用1年后的减排量。

### 2.5.3 预测运行容量

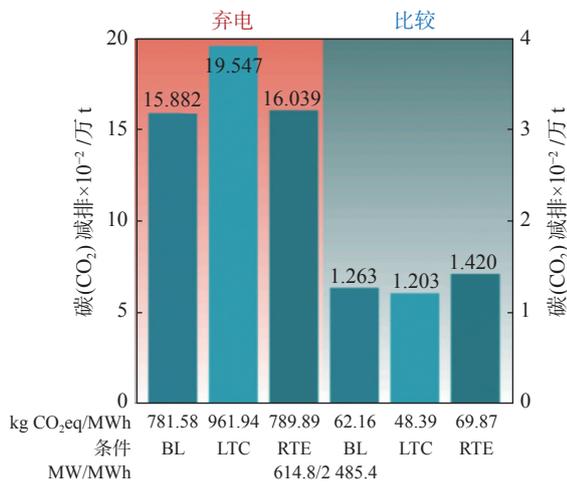
虽然 VRFB 是一项新兴技术,但发展势头迅猛,近年来已经宣布了几个 GWh 计划项目。即使 VRFB 只占未来可再生能源转型的一小部分,VRFB 装置的预期碳减排也将继续快速增长。

根据数据 S1 中详细的清单,我们考虑了目前正在运行、正在维修、宣布正在建设并计划到 2030 年运行的每个 VRFB 情况。我们估计,到 2030 年将有近 200 个 VRFB 装置投入运行,总功率为 615 MW,总存储容量为 2 485 MWh。再一次说明,这个数字可能是保守估计,但仍然比 COC(目前运行容量)大近 800%。已退役的设施已从我们的分

析中剔除,而公开宣布的 VRFB 设施仍被保留。我们没有报告不同可再生电力来源条件下的预期节约量,而是估算所有预测运行装置的总二氧化碳减排量——首先,假设按照 BC 情景的循环效率和循环次数/天,其次是生命周期从 8 176 增加到 10 001,最后是 VRFB 的循环效率从 75% 提高到 83% (da Silva Lima 等,2021)。所有的计算都假设为一个由 50% 风力发电和 50% 太阳能发电 (60 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh) 组成的共存电源。

根据基准情景 (8 176 个生命周期,75% 的循环效率) 预计 20 年的减排量:可再生能源弃电量减少相当于减排 1 588 万 t 二氧化碳,减少近 800 万 t 的

煤炭燃烧, 以及预计 540 万 t 废物的回收减排量, 此外 VRFB 还比 LiB 减少多达 126 万 t 的二氧化碳。图 4 显示, 生命周期值的增加将二氧化碳排放减排量从 1 588 万 t 提高到 1955 万 t; 这些增加的减排量来源相对简单——寿命周期的增加导致可再生能源弃电的减少, 从而增加了预期的碳减排。由于 VRFB 的循环效率较低, 使用阶段组件质量增加, 这一点 LiBs 更有优势 (在本计算中), 但 VRFB 仍然是碳强度较低的选择。值得注意的是, 与 LiB 不同, VRFB 预期的充放电循环次数可以显著增加, 而且无需更换/维护。这里没有考虑到这个好处, 值得在未来的工作中更详细地探讨。如图 4 所示, VRFB 的循环返效率从 75% 提高到 83%, 弃电和比较评估情形下的标准化节约都增加了。



VRFB 预测运行容量在预期寿命内的弃电 (橙色) 情形和比较评估情形 (绿色) 下的碳减排量。柱状图下面的插入表格与上面的列相对应, 并依次表示 (从上到下) 以 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh (kg CO<sub>2</sub> 当量/MWh) 为单位的标准化减排量、条件 (基准 (BL)、生命周期 (LTC) 的增加、循环效率 (RTE) 提高) (以蓝色阴影区分), 以及预测的运行功率和存储容量。

图 4 预测运行容量的 VRFB 碳排放减排量

Fig. 4 Savings by the projected VRFB operational capacity

弃电分析估算的巨大减排量表明, 在目前的能源转型状态下, 即使计入生产、运营、维护和回收储能设施的碳成本也能大量降低碳排放。即使在出现的初期, 由于 VRFB 和 LiB 的不成比例的可回收性与可再生能源相结合, 使用 VRFB 比使用 LiBs 将产生更少的碳足迹。降低与钒生产相关的碳影响的持续努力将必然会降低使用原生钒的第一代装置的碳成本; 同样, 不断取得的 VRFB 循环效率技术进步和持续的电力生产减碳努力将推动其运营碳成本的下降。

### 3 结论

按照《巴黎气候协定》的规定, 将全球变暖控制在 1.5 °C 以内的目标将需要持续的努力, 包括难减排行业的减碳, 以及向可再生能源的过渡。工业过程的广泛变化、制造业经济的深度减碳以及能源转型将引发对自然资源的激烈竞争, 而自然资源的可持续利用对经济繁荣和减缓气候变化的全球计划至关重要。广泛的清洁能源技术的实现取决于当前或正引起重点关注的关键材料。随着能源转型步伐的加快, 这些对能源转型至关重要的关键原材料的需求将会增长, 为解决这些矿物的可持续获取和利用问题, 供应链弹性、回收和政策决策的重要性也将增加。在本研究中, 我们利用了不同行业的钒消耗数据和电网级大型存储设施的公共数据汇编, 详细评估了钒对建筑行业减碳和实现能源转型的潜在影响。根据估算的型钢碳减排量 (118 万 t CO<sub>2</sub>)、钢筋的减排量下限和上限的平均值 (18 350 万 t CO<sub>2</sub>) 和 VRFB 目前运行容量 (COC) 分析数据 (9.89 万 t CO<sub>2</sub>), 我们估计, 建筑和储能部门使用钒每年可避免约 1.85 亿 t CO<sub>2</sub> 排放。更深刻地看这些减排量, 1.85 亿 t 二氧化碳相当于燃烧约 9 300 万 t 煤炭或消耗约 4.3 亿桶石油。要注意的是, 这些减排来自难减排行业 and 新兴的绿色能源技术, 这表明钒在提高重工业能源效率, 同时通过提供储能技术平衡可再生能源的间歇性, 实现能源转型方面的作用 (IEA, 2020 b)。虽然在本研究中定性地讨论了汽车工业的二氧化碳减排, 并且可能成为钒产品实现减排的重要补充, 但尚未给予量化分析。钒的多功能性及其在多个行业产生减碳效益的能力, 突出了将生命周期评估应用于政策决策的重要性。该研究进一步强调了必要的减碳和能源转型在供应链中断和价格波动中的脆弱性, 表明需要广泛重视回收和大幅扩大原矿钒产量。随着电网级储能的预期增长, 考虑到没有存储选择或可替代短期存储技术, VRFB 在这方面的明显技术优势将推动越来越多的钒需求, 进一步推动钒生产的需求超出钢铁行业的闭环流程。

### 4 本研究的局限性

钢铁生命周期分析 (LCA) 方法的主要局限性之一是 ICE 数据库是 2008 年开发的, 并在 2011 年进行了修订, 因此可能容易受到时间变化的影响。此

外,该数据库是使用全球和欧洲平均能源值编制的,采用的碳值主要来源于英国,因此具有有限的地理代表性(Hammond和Jones,2008)。钒的数据是相对较新的(2019年),因此较少受时间变化的影响。鉴于获得的欧盟28国螺纹钢消费相关数据有限,与利用中国和全球螺纹钢综合数据计算的下限相比,该分析的上限存在更大的不确定性。

VRFB分析存在的一个限制是,在比较不同的E/P配置时,当前运行容量和预测运行容量情景没能完全考虑能量密度的影响——具有更高能量密度的储能系统(如LiB)通常需要更少的电池来提供类似的存储容量。此外,与大多数其他储能技术(包括LiB)不同,VRFB可以根据应用场景的能量和功率需求灵活设计,换句话说,生产时决定VRFB容量(MWh)的质量组件,即电解液可以不受决定其额定功率(MW)的组件(堆组件)的限制而灵活地放大。Weber等人表明,按质量计算,VRFB的功率组件比钒电解液对环境的影响更大,表明E/P值越大,VRFB每兆瓦时存储容量的碳足迹越少(Weber等,2018)。如上所述,使用阶段对碳排放至关重要,其排放量以电池在整个生命周期内的功能单位,即kg

CO<sub>2</sub>当量/MWh表示。虽然较高的E/P值可以减少每兆瓦时存储容量的碳影响,但在相同的使用情况下(即每天的循环次数),具有较高E/P值的VRFB将在其生命周期内提供更大的MWh,从而增加使用阶段的相对GWP(全球变暖潜能值)的贡献。有一种方法与本研究中使用的方法类似,利用膜面积(由功率决定)和电解质体积(由容量决定)之间的指数关系,解释存储容量和功率输出与VRFB碳影响之间的关系,从而建立典型VRFB生产成本的比例因子(Baumann等,2017)。未来的工作将侧重于更新生命周期清单,直接评估具有不同E/P值的特定VRFB装置的生命周期影响。综上所述,COC和POC情形的比较评估CO<sub>2</sub>节约量相对于不同E/P值是可变的。

## 致谢

本研究部分由Vanitec资助。最初的结果来自于X-Grants项目(德克萨斯农工大学校长卓越基金),David A Santos感谢美国国家科学基金研究生研究奖学金的支持(项目号:1746932)。感谢CISRI和Vanitec提供本研究中使用的的大量数据。

参考文献(详见OSID码内)

研究方法(详见OSID码内)

顶点翻译公司译

编辑 杨冬梅