

微波技术在不同领域节能减排的应用

李雨辰

(卡迪夫大学, 卡迪夫 CF24 3AA, 英国)

摘要: 当今世界, 由于能源需求上升所导致的能源供应安全和温室气体排放正严重威胁着能源可持续发展, 推进能源结构改革迫在眉睫。微波作为一种清洁、环保的绿色能源, 近年来发展迅速。与传统加热方式不同, 微波加热是通过极性分子的随机运动而产生热量。这导致微波加热具有选择性加热、升温速度快、易于控制、加热效率高等优势。这使得微波可以在推进能源结构改革中做出贡献。本文调查了在不同行业中使用微波技术节能减排的情况, 发现在炼铁行业中, 微波可以加快铁矿石还原的时间, 减少二氧化碳的排放, 同时在铁矿石预处理过程中可以使铁矿石变得更加容易破碎和磁选。在食品行业中, 微波可以缩短食品烹饪和干燥所需的时间, 并最大程度上保留食品的营养成分。在废物回收领域, 微波在更短的时间内缩小了底放射性废物的体积, 提高了废旧橡胶的脱硫效率。在布杜尔反应中, 微波降低了反应所需的温度, 提高了二氧化碳的转化率。总结了微波技术的优点后, 本文还分析了微波技术目前存在的缺陷, 介绍了微波相关的专利, 最后对微波技术的未来进行了展望。

关键词: 微波技术; 能源可持续发展; 节能减排; 绿色; 能源结构改革

DOI: 10.48014/csdr.20230406001

引用格式: 李雨辰. 微波技术在不同领域节能减排的应用[J]. 中国可持续发展评论, 2023, 2(2): 25-36.

0 引言

确保能源供应安全和遏制由能源使用造成的全球变暖是通往能源可持续发展的两大挑战^[1]。在 2015 年联合国第 70 届会议上通过的《2030 年可持续发展议程》, 提出了 17 个可持续发展大目标和 169 个具体目标, 能源缺乏和全球变暖带来的挑战主要涉及 SDG7“确保人人获得负担得起的、可靠和可持续的现代能源”和 SDG13“采取紧急行动应对气候变化及其影响”。截至 2022 年, 全球仍有 7.7 亿人使用不上电力, 其中大部分无电力人口在非洲, 同时在新冠的影响下, 许多发展中国家家庭的能源购买了进一步下降^[2]。我国虽然很早就提倡减少化石能源使用, 推进能源结构改革, 但因为我国

富煤少油少气的能源分布现状, 我国的能源消费中煤炭仍占了很大比例。2022 年我国能源消费总量 54.1 亿吨标准煤, 比上年增长 2.9%, 其中煤炭消费量增长 4.3%, 煤炭消费量占总能源消费量的 56.2%^[3]。2022 年是全球自 1880 年开始有气象记录以来第六个最热的年份, 比 20 世纪平均温度 13.9℃ 高 0.86℃^[4]。二氧化碳浓度已从 1850 年的 280ppm 增加到 2022 年的 421ppm^[5]。根据世界气象组织的报告, 2022 年的全球平均温度比 1850—1900 年工业化前平均温度高约 1.15 [1.02 ~ 1.28]℃^[6]。全球变暖的后果包括但不限于干旱、洪水和其他类型的极端天气的增加, 海平面上升和生物多样性的丧失^[7]。许多生态系统也面临着世界范围内的危险, 特别是暖水区的热带珊瑚礁系统和北

通讯作者 Corresponding author: 李雨辰, 879253329@qq.com

收稿日期: 2023-04-06; 录用日期: 2023-04-17; 发表日期: 2023-06-28

极地区的生态系统^[8]。虽然温室气体的排放和随之而来的气候变化不是能源部门面临的唯一问题,但却是最普遍和最紧迫的问题。

为了实现 2030 年可持续发展议程中能源的目标,解决能源供应与温室效应问题,各国迫切的需要推行与能源安全和 CO₂ 排放相关的措施和政策,比如加大开发新能源,减少对化石能源的依赖,采用多种碳中和手段,以及降低单位产值能源消耗量等。微波是一种由电力驱动的绿色清洁能源,微波加热技术在某些行业有着显著节能减排的作用,比如炼铁行业、食品加工行业、废物处理行业等。

以炼铁技术为例。炼铁的本质是还原铁矿石以生产生铁。在炼铁过程中,不包括还原铁矿石,一半以上的焦炭都被消耗于加热^[9]。因此,如果用于加热的热源能够被由太阳能和风能等可再生能源产生的电力驱动的能源所取代,如微波,将减少炼铁过程中至少一半的碳排放。同时,碳材料还被认为有着良好的微波吸收能力^[10]。通过使用微波作为热源,碳含量约为 13% 的生铁可以在 1380℃ 下快速生产,比目前的高炉制造方法低 200 ~ 300℃^[11]。这意味着微波可以节约大量炼铁所需的能源。

微波的本质是一种频率在 300MHz 到 300GHz 之间的电磁波,其波长通常在 1~300mm 之间^[12]。在工业上,微波加热频率通常为 900MHz 或 2450MHz^[13]。

微波加热的基本机制涉及极性分子或离子在震荡电场或磁场作用下的搅动。在震荡场的条件下,震荡场内的分子会试图让自己和震荡场对齐。然而,分子的运动会受到阻力的影响,来自粒子间和分子间相互作用力的阻力。这样,分子就不能进行原来的分子运动了,因此分子间会产生随机运动并产生热量^[14]。与传统加热方式不同的是,这种热量是由内向外产生的。与传统加热方式相比,微波具有加热速度快、加热效率高、可以瞬间开启或关闭、对环境友好、价格较低等优势

由此可见,微波技术在节能减排领域具有重大潜能,使用微波可以减少对化石能源加热的依赖,对化石能源可持续发展目标以及推动能源转型有着重要战略意义,本文将重点关注近年来微波技术在节能减排领域的研究进展,对微波在不同产业的

应用进行阐述,以期为推进微波技术在我国的应用提供参考经验。

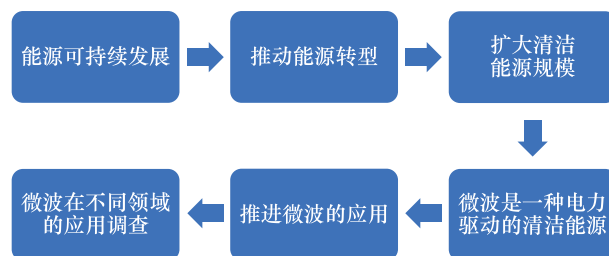


图 1 论文研究框架

Fig. 1 Framework diagram for the Review

1 微波技术在炼铁行业节能减排的应用

自几千年前人类进入铁器时代开始,人类就已经可以通过还原铁矿石来生产铁了。随着科技进步,一个个更加先进的高炉也被生产了出来,这意味着铁的生产率也在逐步提高。但是无论传统炼铁方式的效率再怎么提高,也始终面临着需要热反应能源的问题,目前热反应能源主要来自碳的燃烧。且快速反应的主要障碍之一便是从周围环境到混合物核心的热传递。如果反应可以在颗粒内部产生,那么整个反应的速度就可以在原来的基础上提高更多。这时微波技术逐渐走入人们的视野。微波在炼铁工艺中以下三个过程可以起到节能减排的作用:微波加热铁矿石还原、微波催化铁矿石裂解、微波加热铁矿石磁化。

1.1 微波加热铁矿石还原

铁矿石主要是铁氧化物,通过焙烧氧化铁被还原成铁,主要反应为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} = 2\text{Fe} + 3\text{CO}_2$ 。传统炼铁工艺包括磁选、烧结、炼焦、高炉炼铁等几个过程。其中在高炉炼铁中铁矿石的还原又分为直接还原和间接还原,如今的高炉炼铁工艺 70% 以上都是间接反应,属气固反应。但无论哪种反应都需要热源提供足够的温度,反应才能顺利进行。目前越来越多的研究人员开始重视了微波在铁矿石还原方面的应用。与传统热还原反应相比,微波加热还原铁矿石具有升温快,反应时间快,消耗材料少等特点^[15,16]。Zhong 等^[17]使用 15kW 的微波发生器,以 2.45GHz 的微波频率对粉末状和颗粒状的

铁矿石加热。在 20% 过量化学计量碳的情况下,该实验在 10 分钟内,实现了对铁矿石 90% 以上的还原。温度大约在 1000℃。这比传统加热反应温度低了二三百摄氏度左右。Ishizaki 等^[18]也做了类似的实验,他们使用 2.45GHz 的微波加热 5 克磁铁矿,结果 10 分钟就迅速还原出了生铁。He 等^[19]使用微波对赤铁矿进行了碳热还原和脱磷,最终脱磷率和生铁产量分别超过 87.8% 和 91.8%。Hara 等^[20]使用 2.45GHz 频率的微波,以 17.5kW 的功率加热磁铁矿和石墨混合粉,最终除了快速得到大量生铁以外,还发现生铁杂质的浓度比高炉生铁中杂质的浓度低得多,这可能是因为加热速度快导致铁矿石还原过程中发生气化。Hotta 等^[21]发现 2.45GHz 频率的微波是最适合铁矿石加热还原的,同时微波加热可以减少氧化铁溶解到渣相中,有助于分离铁和渣相。这说明铁矿石和碳粉对微波有着良好的吸收能力,所以微波加热可以提高铁矿石还原的速度以及减少反应所需要的能量。同时微波加热还原出来的生铁杂质的浓度比传统加热要低得多。

1.2 微波催化铁矿石裂解

由于铁矿石还原速率会受到铁矿石颗粒大小的影响,所以在炼铁工艺中,通常需要先将铁矿石裂解成颗粒大小。微波技术对铁矿石裂解存在促进作用。Walkiewicz 等^[22]和 Kumar 等^[23]发现微波处理铁矿石可以提高其可磨性,从而减少破碎铁矿石时消耗的能量。Javad 等^[24]对比了未经微波处理的铁矿石和经过微波处理的铁矿石,在相同研磨条件下,对铁矿石进行微波处理可以提高破碎率和研磨速度,并使细粉的比例降到最低。Omran 等^[25]对比了微波和常规加热预处理对铁矿石的影响,结果表明微波处理过后的铁矿石更容易研磨,矿石上产生了大量晶间裂缝,且微波处理能量消耗要少得多。这说明先对铁矿石进行微波预处理,可以使铁矿石变得更容易研磨和破碎,从而减少破碎铁矿石所消耗的能量。

1.3 微波辅助铁矿石磁化

磁选的主要目的是通过磁性将铁矿石与脉石分离,我国铁矿石储量中 97% 都为贫矿,其中很大

一部分铁矿石都难以通过重选、磁选等技术有效处理。磁化焙烧是指对一些磁性较低,不方便磁选的铁矿石进行磁化焙烧,从而提高其磁化系数使其更容易被选用。传统焙烧方式的温度通常在 700℃ 到 1000℃,而微波焙烧的温度通常在 500℃ 到 850℃ 之间。同时微波加热的时间更短^[26]。Barani 等^[27]使用 2.45GHz、1100W 微波对三个矿石样品分别进行了 30、60、120 秒的处理,结果发现微波辐射确实可以提高铁矿石的磁性,但过量辐射会产生负面影响,使磁性下降。但 Omran 等^[28]却得出了相反的结论,他们使用 2.45GHz、900W 微波对三个矿石样品进行了 20、60、90 秒的处理,发现处理时间越长,铁矿石磁性提高的越高。这可能是因为后者功率较低,样品成分不同,且处理时间不够长导致的。Rath 等^[29]比较了传统加热方法和微波加热对矿石选矿的影响,发现微波加热可以将铁矿石中的铁含量提高到 63%~65%。目前而言,铁矿石磁化还是主要停留在实验室规模,要推行到工业上应用,还有很长的路要走^[30]。

由于铁矿石以及碳材料都是良好的微波吸收材料,因此在炼铁工艺许多过程中都可以采用微波进行加热或者辅助处理,使用微波处理或者加热后,能明显使过程需要的能源和排放的二氧化碳减少,这使得微波在炼铁行业的应用极具前景和潜力。

2 微波技术在食品行业中节能减排的应用

微波加热技术因为能大大减少烹饪时间和食品加工时的能源消耗,已经广泛运用于食品行业^[31]。微波炉在很多食品加工领域有着出色的发挥,比如食品的干燥、烹饪、加热、杀菌和保存^[32]。

在食品烹饪中,微波加热可以减少烹饪时间,使加热更加均匀,同时操作安全,易于操作和维护^[33]。Póltorak 等^[34]使用两种不同的微波对流加热和两种不同类型的传统恒温烘烤去烹饪牛肉,发现微波加热缩短了烘烤时间,减少了烹饪损失,提高了肉的嫩度。Xu 等^[35]使用微波加热和传统加热烘焙鹰嘴豆,发现相比传统加热,微波加热可以使被加热样品的营养质量达到最大。James 等^[36]分别使用家用烤箱和工业微波炉烹饪培根,发现工业

微波炉烹饪的培根更加均匀,同时减少了培根的质量损失和烹饪时间。Cocci 等^[37]发现使用微波烹饪意大利面,不仅比传统烹饪总热效应更低,而且微波烹饪出来的意大利面更加柔软,颜色保持的更好,凝胶度更高。Gonzalez 等^[38]比较了使用微波和传统挤压蒸煮扁豆淀粉的效果,结果表明,经过微波处理的扁豆淀粉还原糖的含量增加了。这说明在某些食物的烹饪中,使用微波加热既可以加快烹饪时间又可以实现更好的烹饪效果。

微波在食品烘焙中,比如面包,与传统烘焙相比,微波可以最大程度上减少面包的含水量,延缓面包变质的速度^[39],但微波并不能给面包提供更好的品质^[40]。除此之外,还有许多人调查了微波对食品进行干燥后食品营养成分的变化。Wojdyło 等^[41]研究发现微波可以有效地干燥酸樱桃干,先使用 480W 功率的微波进行干燥,直到算樱桃干样品水分达到 1kg/kgpm,然后将微波功率降到 120W 进行干燥,这样可以使样品内酚类的含量达到最高,同时增加样品抗氧化能力以及光泽。Aghilinategh 等^[42]发现使用微波高温干燥苹果会破坏食品营养物质,特别是热敏成分。Horuz 等^[43]研究了微波干燥石榴干果的情况,发现其复水能力、颜色和干燥时间都受到微波功率影响。Magdalena 等^[44]对比了热风对流干燥和微波真空干燥对蓝莓总多酚、花青素和抗氧化能力的影响,发现将两种干燥方式结合可以使蓝莓的花青素含量和抗氧化能力达到最高。Szadzinska 等^[45]同样运用对流和微波、超声波结合的方式对青椒进行干燥,发现能源消耗减少了近 80%,干燥时间缩短为 80 分钟,再水化率更高,颜色和维生素 C 的保留率提高到 70%。基于这些研究,可以发现微波对食品无论是直接干燥还是结合不同能源干燥,都能最大保留食品营养成分的情况下有效干燥食品。但也有不少学者认为在干燥过程中,微波会导致水分分布不均匀,从而给过程带了复杂性,使得最终难以获得理想的干燥产品^[46,47]。除此之外,微波的高穿透性可能导致产品过度加热,从而导致产品烧焦。这些问题都是由于微波自身的特性导致的,为克服这些挑战,应当对加热工艺、工具、包装材料等进行一定的优化。

在食物的烹饪或处理过程中,由于微波由内而外加热的特性,其可以有效地减少食物原本达到要

求所需的反应时间,从而减少能源消耗。但也因为微波加热是由内而外,导致微波在食品烹饪领域具有一定的局限性,比如有些食物在微波加热下难以达到其预期的口感的美观程度。同时在干燥过程中食品营养成分也在一定程度上收到微波功率的影响。

3 微波在废物回收领域的应用

3.1 微波处理低放射性废物

废物是人类生活不可避免的产物,在处理某些废物时比如低水平放射物、橡胶,微波比传统加热方式更具有优势。低水平放射性废物是许多工业、医疗和核电站不可避免的产物。这种废物对环境和人们的健康有着严重的威胁,若是不慎泄露可能会导致土壤和水的污染等^[48]。处理这类型废物的方法主要是减少体积并封存起来^[49]。微波技术被认为是减少废物体积的最佳方法之一^[50]。Tu 等^[51]使用微波烧结 72 小时高浓度放射性废物样品,发现和传统方法相比,微波可以在更低的温度和更小的样品颗粒中获得更优异的形成率。Nam 等^[52]利用微波等离子体技术对核电站废物进行净化处理,发现该技术可以在低消耗的情况下,对样品达到 96.9% 的去钴率。除此之外,在利用微波处理低水平放射性废物之前,首先要根据废物的介电性质差异进行分类,这样可以提高废物的处理率^[48]。Bhadouria 等^[53]随后使用 COMSOL 软件模拟了之前实验的过程,并与之前实验的结果进行了比较,得到了相同的结论。这说明,在处理低水平放射性废物时,与传统方式相比,微波所需要的时间更短,能耗更低,效率更高。如果在处理前能根据不同的介电性能对材料进行分类,可以进一步提高处理效率。

3.1 微波处理废旧橡胶

微波加热也越来越多的应用于聚合物化学,主要是在废橡胶领域。废旧轮胎热解产生的液体在脱硫后可当作燃料使用,气体可用作液化石油气,而固体由于碳含量较高,可用作燃料、焦炭或生产新轮胎的填料^[54]。Formela 等^[55]通过实验证明,使用微波处理橡胶可以实现无溶剂、短时间和高效的

脱硫和热解。Undri 等^[54]发现微波功率和轮胎质量会影响微波热解效率,在实验中使用 0.2kg 在 3kW 微波功率照射下,效率最高。Aoudia 等^[56]研究了微波辐射对废橡胶脱胶率的影响,他们使用微波作用于轮胎,并使用傅里叶红外分析测量法检查最终脱胶的结果,发现废轮胎表面脱胶很明显。Luo 等^[57]使用微波和传统脱硫方法进行对比,发现微波脱硫可以避免主要的橡胶链降解,从而避免机械性能的损失。同时微波辐照时间也会影响脱硫效果。Zanchet 等^[58]使用材料分别接受 1、2、3 分钟的微波辐照,发现 2 分钟的脱硫效果最好。这与 de Sousa 等^[59]的研究结果类似。这表明微波在废旧橡胶的热解和脱硫领域有着很好的表现,同时热解受微波功率和材料质量影响,而脱硫则受辐照时间影响。

4 微波在布杜尔反应(boudouard reaction)中的应用

布杜尔反应(boudouard reaction)是碳和二氧化碳反应生成一氧化碳的反应。它是处理二氧化碳的一种直接和简单的方法,但它也发生在其他化学过程中,如铁的生产。它的化学反应式为: $C + CO_2 = 2CO$ 。然而布杜尔反应是一个高度吸热反

应。如果使用传统加热方式,通常当反应温度大于 700℃时,才会产生 CO_2 。由于许多人发现微波在激活化学反应方面发挥非常出色,如微波辅助生物质燃料气化^[60]。以及微波辅助煤向重碳氢化合物的转化^[61]。因此也有越来越多的人开始关注微波对布杜尔反应的催化作用。Hunt 等^[62]通过实验发现,当使用微波代替传统的加热方式加热布杜尔反应时,反应的焓值从 1100K 的 183.3kJ/mol 下降到相同温度的 33.4kJ/mol。这导致 CO 成为主要产物的温度从 643℃下降到 213℃。Dai 等^[63]用半焦炭作为反应物,用微波代替常规加热来驱动布杜尔反应发现,在 900℃时二氧化碳的转化率可以达到 99%,这比相同温度下的常规加热高出约 3 倍。研究还发现,碳酸钡可以作为催化剂,进一步降低反应所需的温度。这说明微波可以减少布杜尔反应所需要的温度,使反应能够更容易发生。

使用微波意味着我们可以克服原先布杜尔反应所需热量过高的缺点,正式将布杜尔反应作为一种碳中和的手段。通过加热将二氧化碳转化为一氧化碳,一氧化碳不仅是合成油和蜡的原料,也是合成众多精细化学品的原料^[64]。同时一氧化碳也可以通过水煤气变化反应提供氢能^[65]。

表 1 不同领域代表性文献

Table1 Diagram of the research framework of the paper

领域	题目	期刊	作者	时间	主要成果
炼铁	Reduction of iron ore with coal by microwave heating	MINERALS & METALLURGICAL PROCESSING	ZHONG S, GEOTZMAN H E	1996	发现微波加热可以在大约 1000℃下,10 分钟左右实现对铁矿石 90%以上的还原
炼铁	Thermally assisted liberation of high phosphorus oolitic iron ore: A comparison between microwave and conventional furnaces	POWER TECHNOLOGY	OMRAN M, FABRITIUS T, MATTILA R	2015	微波处理后晶粒体和赤铁矿之间形成了晶间裂缝,同时铁矿石的可磨性增加
炼铁	Magnetic properties of an iron ore sample after microwave heating	SEPARATION AND PURIFICATION TECHNOLOGY	BARANI K, KOLEINI S J, REZAEI B	2011	对样品使用了相同功率的微波,辐照了不同的时间。证实了微波辐射对铁矿石磁性有明显影响
食品	Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments	TRENDS IN FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY	Ekezie, Flora-Glad Chizoba	2017	详细介绍了微波在食品领域的一些应用,如微波辅助超声、微波辅助欧姆加热、微波辅助电子辐射等

续表

领域	题目	期刊	作者	时间	主要成果
废物	Rapid immobilization of simulated radioactive soil waste by microwave sintering	JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS	HANG S, SHU X, CHEN S	2017	通过分析微波处理过后的废料的微观结构、形貌、元素分布、密度和化学耐久度,发现微波烧结在放射性污染土壤的处置中存在较大应用潜力
布杜尔反应	A microwave-assisted boudouard reaction: A highly effective reduction of the greenhouse gas CO ₂ to useful CO feedstock with semi-coke	MOLECULES	DAI H,ZHAO H, CHEN S	2021	以半焦炭(SC)为微波吸收剂和反应物,在微波固定床反应器中进行 Boudouard 反应,并与常规热场加热反应进行了系统比较。发现微波加热 CO ₂ 转化率达到了传统加热的三倍,而活化能仅为常规加热下的三分之一

5 微波加热存在的缺陷

由于每种材料介电系数不同,这导致他们吸收微波的能力也不同。这也是微波加热最显著的特征之一:选择性加热。吸收微波能力强的材料升温快,而吸收微波能力弱的材料甚至不能被微波所加热。这一特点使得微波在很多行业都有着特殊的用途。然而,反过来看,不均匀加热也是微波加热的一个缺点。由于微波不能均匀的加热,这可能导致被加热物出现热点和冷点,甚至出现反向温度梯度(中心温度比周围高)。有不少学者对不均匀加热做出了研究^[66-68]。这可能是导致微波不能在某些领域大规模推广的原因之一。比如在食品领域使用微波烘焙馅饼,可能中心已经熟透了,表皮却还没有酥脆。

除此之外,微波加热的另一个问题是影响微波传热的因素非常多,比如被加热物的厚度、形状、介电系数,同时介电系数还会随水分和温度的变化而变化,这些都会导致微波加热或干燥过程变得极为复杂^[69]。因此,微波虽然可以在许多领域都起到节能减排的效果,但想要达到最理想的加热效果,还需要对被加热物提前分析和调查,同时建立一个适合该物品的工艺流程。这其中需要投入的成本和时间是难以估量的。

6 总结与展望

本文从微波的原理到微波在各行各业应用的

情况做了详细的回顾和阐述,就如何利用微波进行节能减排做出了说明。微波加热比传统加热方式更加环保、可持续,因为驱动微波的电能不能从太阳能、风能等可再生能源中产出。同时在许多行业,由微波加热所产生的二氧化碳比传统加热要少得多。在炼铁过程中,微波加热可以加快反应速度,降低焦炭消耗,减少二氧化碳排放。在铁矿石的预处理中,它可以提高铁矿石的可磨性,从而减少研磨铁矿石所消耗的能量。同时微波可以提高铁矿石的磁性系数,使其更容易被磁选。在食品领域,微波可以加速食物的烹饪和干燥,减少烹饪损失。应该注意的是,虽然微波功率越大,食物的干燥速度越快,但功率过高会导致食物营养成分的破坏。在废物领域,微波可以快速有效地减少低水平放射性废物的体积。微波处理橡胶可以实现无溶剂、短时间、高效的脱硫和热解。热解受微波功率和材料质量的影响,而脱硫则受暴露时间的影响。在石油领域,微波可以帮助原油高效脱钒和油砂分离。在布杜尔反应中,用微波代替传统的加热方式,反应进行的温度下降了约 400℃,这意味着使用的能量要少得多。同时,微波加热可以提高反应中二氧化碳的转化率。

微波加热也有一定的缺点。微波只与极性分子发生反应,由于不同材料的介电性质不同,反应的程度也不同,这导致微波加热会出现不均匀加热,甚至有些物品无法被微波加热。所以微波可以使用的领域是有限的。此外,在进行微波加热之

前,还需要对其他材料的介电性质、厚度、形状等因素进行研究,以达到更好的加热效果。要想使微波在工业上大规模推广,还需要大力发展可持续能源,使电的来源更清洁,同时降低安装微波所需相应设备和工艺的成本。

尽管微波在工业上还没有大规模的应用,但近年来,在炼铁行业已经有了不少微波炼铁炉和新的微波炼铁工艺的发明。Chen 等^[70]发明了一种微波竖炉,用于制取低碳海绵铁,它采用铁矿石粉作为原材料,普通烟煤粉或无烟煤粉作为还原剂。最后制铁效率可达 90%~98%,含碳量小于 0.5%。Jiann 等^[71]发明了一种炉膛,可以在该炉膛内使用微波加热还原氧化铁,该微波炉膛的创新点在于其的二次加热区,可以将还原后的铁加工成铁块或液态金属。Xu^[72]发明了一种新的微波炼铁工艺,将微波作为窑炉中的加热源和非燃烧方式,使粉状物料连续行进,直接加热由氧化铁原粉、助溶剂粉和还原剂粉组成的混合物,直到其熔化并与炉中的铁和渣融合。除此之外,Xu^[73]还开发了一种新的微波竖炉,与前者不同,这个新的竖炉解决了微波对炼铁混合原料的渗透率低和竖炉内径小的问题。

从炼铁行业中不难发现,现阶段微波工艺的发展趋势,仍是先以小规模实验室为主,补足缺陷并完善相应的技术。等到微波工艺技术逐渐稳定和成熟,存在大量的利润空间,企业才有可能大规模运用这种工艺。

如何安全、环保、高效的使用能源对可持续发展至关重要。如今能源系统是人类发展的基石,其运用于全世界的社会、经济、环境系统中。然而目前的能源供应和使用系统是高度不可持续的,这主要体现在高度依赖传统化石能源。传统化石能源如石油资源又大量集中在政局不稳定的中东和中亚地区。确保能源的可持续发展依然存在众多挑战,它要求以更普遍、更可靠、更安全、更环保、更负担得起的方式去提供能源服务。这需要对当今能源技术、方法、设施,甚至人们的行为做出根本性改革。微波技术是一种可以推动能源转型的重要技术,但其能否在工业上大范围应用,还需要政府、企业对这种技术进行扶持。

利益冲突:作者声明无利益冲突。

参考文献(References)

- [1] ABAS N, KALAIR A, KHAN N. Review of fossil fuels and future energy technologies[J]. *Futures*, 2015, 69: 31-49.
<https://doi.org/10.1016/j.futures.2015.03.003>
- [2] IEA. SDG7: Data and Projections[EB/OL]. (2022-04)[2023-04-06].
<https://www.iea.org/reports/sdg7-data-and-projections>
- [3] 国家统计局. 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2023-02-28)[2023-04-06].
http://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228_1919011.html
- [4] NOAA. State of the Climate: Global Climate Report for 2022[EB/OL]. (2023-01-12)[2023-04-06].
<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>
- [5] NOAA. Carbon dioxide now more than 50% higher than pre-industrial levels 2022[EB/OL]. (2022-05-03)[2023-04-06].
<https://www.noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels>
- [6] WMO. Provisional State of the Global Climate in 2022[EB/OL]. (2022-09-01)[2023-04-06].
<https://public.wmo.int/en/our-mandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>
- [7] MYSIAK J, SURMINSKI S, THIEKEN A, et al. Brief communication: Sendai framework for disaster risk reduction-success or warning sign for Paris? [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16(10): 2189-2193.
<https://doi.org/10.5194/nhess-16-2189-2016>
- [8] FIELD C B, BARROS V R. Climate change 2014-Impacts, adaptation and vulnerability: Regional aspects [M]. Cambridge University Press, 2014.
- [9] SABELSTRÖM N, HAYASHI M, YOKOYAMA Y, et al. XRD In Situ Observation of Carbothermic Reduction of Magnetite Powder in Microwave Electric and Magnetic Fields[J]. *Steel Research International*, 2013, 84(10): 975-981.
<https://doi.org/10.1002/srin.201200307>
- [10] DU Y. Advances in carbon-based microwave absorbing materials[Z]. MDPI, 2022: 1359.
<https://doi.org/10.3390/ma15041359>
- [11] FUKUSHIMA J, TAKIZAWA H. In situ spectroscopic analysis of the carbothermal reduction process of iron oxides during microwave irradiation[J]. *Metals*, 2018, 8

- (1):49.
<https://doi.org/10.3390/met8010049>
- [12] MASKAN M. Microwave/air and microwave finish drying of banana[J]. *Journal of Food Engineering*, 2000, 44(2):71-78.
[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(99\)00167-3](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(99)00167-3)
- [13] MEREDITH R J. Engineers' handbook of industrial microwave heating[M]. Iet, 1998.
- [14] METAXAS A A, MEREDITH R J. Industrial microwave heating[M]. IET, 1983.
- [15] ISHIZAKI K, NAGATA K, HAYASHI T. Production of pig iron from magnetite ore-coal composite pellets by microwave heating[J]. *ISIJ International*, 2006, 46(10):1403-9.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.46.1403>
- [16] CHUN T, LONG H, DI Z, et al. Influence of microwave heating on the microstructures of iron ore pellets with coal during reduction[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2017, 44(7):486-91.
<https://doi.org/10.1080/03019233.2016.1215960>
- [17] ZHONG S, GEOTZMAN H E, BLEIFUSS R L. Reduction of iron ore with coal by microwave heating[J]. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 1996, 13(4):174-8.
- [18] ISHIZAKI K, NAGATA K. Selectivity of microwave energy consumption in the reduction of Fe₃O₄ with carbon black in mixed powder[J]. *ISIJ International*, 2007, 47(6):811-6.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.47.811>
- [19] HE Z J, JIN Y L, ZHANG H. Experiment Study on the High-Phosphorus Hematite Carbothermal Reduction in Microwave Field; proceedings of the Advanced Materials Research, F, 2011[C]. *Trans Tech Publ*.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.291-294.1317>
- [20] HARA K, HAYASHI M, SATO M, et al. Pig iron making by focused microwave beams with 20 kW at 2.45 GHz[J]. *ISIJ International*, 2012, 52(12):2149-57.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.52.2149>
- [21] HOTTA M, HAYASHI M, NISHIKATA A, et al. Complex permittivity and permeability of SiO₂ and Fe₃O₄ powders in microwave frequency range between 0.2 and 13.5 GHz[J]. *ISIJ International*, 2009, 49(9):1443-8.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.1443>
- [22] WALKIEWICZ J W, MCGILL S, MOYER L. Improved grindability of iron ores using microwave energy[J]. *MRS Online Proceedings Library*, 1988, 124(1):297-302.
- [23] KUMAR P, SAHOO B, DE S, et al. Iron ore grindability improvement by microwave pre-treatment[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2010, 16(5):805-12.
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2010.05.008>
- [24] JAVAD KOLEINI S, BARANI K, REZAEI B. The effect of microwave treatment on dry grinding kinetics of iron ore[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2012, 33(3):159-69.
<https://doi.org/10.1080/08827508.2011.562947>
- [25] OMRAN M, FABRITIUS T, MATTILA R. Thermally assisted liberation of high phosphorus oolitic iron ore: a comparison between microwave and conventional furnaces[J]. *Powder Technology*, 2015, 269:7-14.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.08.073>
- [26] XU B J, CHEN K, HUANG C J. Microwave Heating in Iron Ore Magnetization Roasting the Current Status; proceedings of the Applied Mechanics and Materials, F, 2013[C]. *Trans Tech Publ*.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.303-306.2611>
- [27] BARANI K, KOLEINI S J, REZAEI B. Magnetic properties of an iron ore sample after microwave heating[J]. *Separation and Purification Technology*, 2011, 76(3):331-6.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2010.11.001>
- [28] OMRAN M, FABRITIUS T, ELMAHDY A M, et al. Effect of microwave pre-treatment on the magnetic properties of iron ore and its implications on magnetic separation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 136:223-32.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.09.011>
- [29] RATH S S, DHAWAN N, RAO D, et al. Beneficiation studies of a difficult to treat iron ore using conventional and microwave roasting[J]. *Powder Technology*, 2016, 301:1016-24.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.07.044>
- [30] YU J, HAN Y, LI Y, et al. Recent advances in magnetization roasting of refractory iron ores: A technological review in the past decade[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2020, 41(5):349-59.
<https://doi.org/10.1080/08827508.2019.1634565>
- [31] GUO Q, SUN D W, CHENG J H, et al. Microwave processing techniques and their recent applications in

- the food industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 67:236-47.
<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.07.007>
- [32] CHANDRASEKARAN S, RAMANATHAN S, BASAK T. Microwave food processing—A review[J]. Food Research International, 2013, 52(1):243-61.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.033>
- [33] SALAZAR-GONZÁLEZ C, MARTÍN-GONZÁLEZ S, FERNANDA M, et al. Recent studies related to microwave processing of fluid foods[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(1):31-46.
- [34] PÓŁTORAK A, WYRWISZ J, MOCZKOWSKA M, et al. Microwave vs. convection heating of bovine Gluteus Medius muscle: impact on selected physical properties of final product and cooking yield[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50(4):958-65.
<https://doi.org/10.1111/ijfs.12729>
- [35] XU Y, CARTIER A, OBIÉLODAN M, et al. Nutritional and anti-nutritional composition, and in vitro protein digestibility of Kabuli chickpea (*Cicer arietinum* L.) as affected by differential processing methods[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2016, 10(3):625-33.
- [36] JAMES C, BARLOW K E, JAMES S J, et al. The influence of processing and product factors on the quality of microwave pre-cooked bacon[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 77(4):835-43.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.08.010>
- [37] COCCI E, SACCHETTI G, VALLICELLI M, et al. Spaghetti cooking by microwave oven: Cooking kinetics and product quality[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 85(4):537-46.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.08.013>
- [38] GONZALEZ Z, PEREZ E. Evaluation of lentil starches modified by microwave irradiation and extrusion cooking[J]. Food Research International, 2002, 35(5):415-20.
[https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(01\)00135-1](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(01)00135-1)
- [39] OZKOC S O, SUMNU G, SAHIN S, et al. Investigation of physicochemical properties of breads baked in microwave and infrared-microwave combination ovens during storage[J]. European Food Research and Technology, 2009, 228(6):883-93.
- [40] CHANDRASEKARAN S, RAMANATHAN S, BASAK T. Microwave food processing—A review[J]. Food Research International, 2013, 52(1):243-61.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2013.02.033>
- [41] WOJDYŁO A, FIGIEL A, LECH K, et al. Effect of convective and vacuum-microwave drying on the bioactive compounds, color, and antioxidant capacity of sour cherries[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(3):829-41.
- [42] AGHILINATEGH N, RAFIEE S, HOSSEINPOUR S, et al. Optimization of intermittent microwave-convective drying using response surface methodology[J]. Food Science & Nutrition, 2015, 3(4):331-41.
<https://doi.org/10.1002/fsn3.224>
- [43] HORUZ E, MASKAN M. Hot air and microwave drying of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(1):285-93.
- [44] ZIELINSKA M, MICHALSKA A. Microwave-assisted drying of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruits: Drying kinetics, polyphenols, anthocyanins, antioxidant capacity, colour and texture[J]. Food Chemistry, 2016, 212:671-80.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.06.003>
- [45] SZADZIŃSKA J, LECHTAŃSKA J, KOWALSKI S J, et al. The effect of high power airborne ultrasound and microwaves on convective drying effectiveness and quality of green pepper[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 34:531-9.
<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2016.06.030>
- [46] DUAN X, ZHANG M, MUJUMDAR A, et al. Trends in microwave-assisted freeze drying of foods[J]. Drying Technology, 2010, 28(4):444-53.
<https://doi.org/10.1080/07373931003609666>
- [47] WANG Y, ZHANG M, MUJUMDAR A S, et al. Microwave-assisted pulse-spouted bed freeze-drying of stem lettuce slices—Effect on product quality[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6:3530-43.
- [48] BHADOURIA V S, AKHTAR M J, MUNSHI P. Low-level radioactive waste management using microwave technology[J]. Progress in Nuclear Energy, 2021, 131:103569.
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103569>
- [49] ZHANG S, SHU X, CHEN S, et al. Rapid immobilization of simulated radioactive soil waste by microwave sintering[J]. Journal of hazardous materials, 2017, 337:

- 20-6.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.003>
- [50] KOMATSU F, TAKUSAGAWA A, WADA R, et al. Application of microwave treatment technology for radioactive wastes[J]. *Waste Management*, 1990, 10(3): 211-5.
[https://doi.org/10.1016/0956-053X\(90\)90043-K](https://doi.org/10.1016/0956-053X(90)90043-K)
- [51] TU H, DUAN T, DING Y, et al. Preparation of zircon-matrix material for dealing with high-level radioactive waste with microwave[J]. *Materials Letters*, 2014, 131:171-3.
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.05.195>
- [52] NAM S, UM W. Decontamination of radioactive metal wastes using underwater microwave plasma[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, 10(1):107090.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107090>
- [53] BHADOURIA V S, RAY D, AKHTAR M J, et al. An approach towards enhancing the role of microwave heating in low-level radioactive waste management[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2022, 147:104180.
<https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104180>
- [54] UNDRI A, MEINI S, ROSI L, et al. Microwave pyrolysis of polymeric materials: Waste tires treatment and characterization of the value-added products[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2013, 103:149-58.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.11.011>
- [55] FORMELA K, HEJNA A, ZEDLER L, et al. Microwave treatment in waste rubber recycling-recent advances and limitations[J]. *Express Polymer Letters*, 2019, 13(6):565-88.
<http://dx.doi.org/10.3144/expresspolymlett.2019.48>
- [56] AOUDIA K, AZEM S, HOCINE N A, et al. Recycling of waste tire rubber: Microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin[J]. *Waste Management*, 2017, 60:471-81.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.051>
- [57] LUO M, LIAO X, LIAO S, et al. Mechanical and dynamic mechanical properties of natural rubber blended with waste rubber powder modified by both microwave and sol-gel method[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 129(4):2313-20.
<https://doi.org/10.1002/app.38954>
- [58] ZANCHET A, CARLI L, GIOVANELA M, et al. Use of styrene butadiene rubber industrial waste devulcanized by microwave in rubber composites for automotive application[J]. *Materials & Design*, 2012, 39: 437-43.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.03.014>
- [59] DE SOUSA F D, SCURACCHIO C H, HU G-H, et al. Devulcanization of waste tire rubber by microwaves[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2017, 138: 169-81.
<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2017.03.008>
- [60] ZHANG Y, KE C, FU W, et al. Simulation of microwave-assisted gasification of biomass: A review[J]. *Renewable Energy*, 2020, 154:488-96.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.003>
- [61] SINGH S, NECULAES V, LISSIANSKI V, et al. Microwave assisted coal conversion[J]. *Fuel*, 2015, 140: 495-501.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.09.108>
- [62] HUNT J, FERRARI A, LITA A, et al. Microwave-specific enhancement of the carbon-carbon dioxide (Boudouard) reaction[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2013, 117(51):26871-80.
<https://doi.org/10.1021/jp4076965>
- [63] DAI H, ZHAO H, CHEN S, et al. A microwave-assisted boudouard reaction: a highly effective reduction of the greenhouse gas CO₂ to useful CO feedstock with semi-coke[J]. *Molecules*, 2021, 26(6):1507.
<https://doi.org/10.3390/molecules26061507>
- [64] BELLER M. Catalytic carbonylation reactions[M]. Springer, 2006.
- [65] RATNASAMY C, WAGNER J P. Water gas shift catalysis[J]. *Catalysis Reviews*, 2009, 51(3):325-440.
<https://doi.org/10.1080/01614940903048661>
- [66] FAKHOURI M, RAMASWAMY H. Temperature uniformity of microwave heated foods as influenced by product type and composition[J]. *Food Research International*, 1993, 26(2):89-95.
[https://doi.org/10.1016/0963-9969\(93\)90062-N](https://doi.org/10.1016/0963-9969(93)90062-N)
- [67] GOKSOY E, JAMES C, JAMES S. Non-uniformity of surface temperatures after microwave heating of poultry meat[J]. *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 1999, 34(3):149-60.
<https://doi.org/10.1080/08327823.1999.11688400>
- [68] RYYNÄNEN S, OHLSSON T. Microwave heating uniformity of ready meals as affected by placement, composition, and geometry[J]. *Journal of Food Science*,

- 1996,61(3):620-4.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1996.tb13171.x>
- [69] FUNEBO T, OHLSSON T. Microwave-assisted air dehydration of apple and mushroom[J]. Journal of Food Engineering, 1998, 38(3):353-67.
[https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(98\)00131-9](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(98)00131-9)
- [70] CHEN Z, LI Y, WANG L, et al. Evaluation of the possible non-thermal effect of microwave radiation on the inactivation of wheat germ lipase[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(4):e12506.
<https://doi.org/10.1111/jfpe.12506>
- [71] Jiann-Yang Hwang, Xiaodi Huang. Method for reducing iron oxide and producing syngas. US8540794B2[P]. 2013-09-24.
- [72] XU LINBO. Microwave iron making technology and microwave iron making shaft furnace thereof. CN110453026A[P]. 2019-11-15.
- [73] XU LINBO. New microwave ironmaking process and equipment thereof. CN110387446A[P]. 2019-10-29.

Application of Microwave Technology in Different Fields for Energy Saving and Emission Reduction

LI Yuchen

(Cardiff University, Cardiff, UK, CF24 3AA)

Abstract: In today's world, security of energy supply and greenhouse gas emissions due to rising energy demand are seriously threatening sustainable energy development, and it is urgent to promote energy structure reform. Microwave, as a clean and environmentally friendly green energy source, has developed rapidly in recent years. Unlike traditional heating methods, microwave heating generates heat through the random motion of polar molecules. This results in microwave heating having the advantages of selective heating, fast temperature rise, easy control and high heating efficiency. This allows microwaves to make a contribution in advancing the reform of the energy mix. This paper investigates the use of microwave technology in different industries to save energy and reduce emissions. It finds that in the ironmaking industry, microwaves can speed up the reduction time of iron ore, reduce carbon dioxide emissions, while making iron ore more easier to crush and magnetically sort during iron ore pretreatment process. In the food industry, microwaves can reduce the time required to cook and dry, and maximise the retention of nutrients in food. In the field of waste recycling, microwaves reduce the volume of bottom radioactive waste in a shorter time and improve the efficiency of desulphurisation of waste rubber. In the Budur reaction, microwaves reduce the temperature required for the reaction and increase the conversion of carbon dioxide. After summarising the advantages of microwave technology, this paper also analyses the current shortcomings of microwave technology, introduces microwave-related patents and concludes with an outlook on the future of microwave technology.

Keywords: Microwave technology; sustainable energy development; energy saving and emission reduction; green; energy structure change

DOI: 10.48014/csdr.20230406001

Citation: LI Yuchen. Application of microwave technology in different fields for energy saving and emission reduction[J]. Chinese Sustainable Development Review, 2023, 2(2): 25-36.

Copyright © 2023 by author(s) and Science Footprint Press Co., Limited. This article is open accessed under the CC-BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

