DOI: 10.3969/j.issn.1009-0622.2022.04.007

多元复合稀土钨电极和钍钨电极生命周期评价

杨　坤[1,2]，陈文娟[1,2]，杨建参[1]，高　峰[1,2]，龚先政[1,2]，刘　宇[1,2]，孙博学[1,2]
（1.北京工业大学 材料与制造学部，北京 100124；2.工业大数据应用技术国家工程实验室，北京 100124）

摘　要：多元复合稀土钨电极作为替代钍钨电极的无辐射钨电极材料，其应用受到社会的广泛关注，但二者生产过程的环境影响并未开展定量评价。研究采用生命周期评价（LCA）的方法对多元复合稀土钨电极和钍钨电极从“摇篮”到“大门”的资源能源消耗和污染物排放进行研究，功能单位定义为分别生产 1 t 直径 2.4 mm 多元复合稀土钨电极和钍钨电极。结果表明，两种钨电极的环境热点均为上游原料阶段钨粉和氧化钨，分别占总环境影响的 78.56 %和 55.15 %；在工艺链中环境热点为烧结工艺，分别占总环境影响的 9.50 %和 32.30 %。两种钨电极的环境影响比较结果显示，相比于钍钨电极，多元复合稀土钨电极可降低 35.81 %的总环境影响，具有环境优势。对两种钨电极资源消耗、能源消耗和温室气体排放 3 类环境影响类型贡献结构进行分析，结果显示上游原料对这 3 类指标贡献较为突出。

关键词：多元复合稀土钨电极；钍钨电极；温室气体；资源能源；生命周期评价
中图分类号：TG422.3；X820.3　　**文献标识码：A**

0　引　言

焊接技术已被广泛应用在工业生产的各个部门，在推动工业发展和产品的技术进步以及国民经济的发展都发挥着重要作用[1]。其中钨极惰性气体保护焊（Tungsten Inert Gas，TIG），是一种成熟的弧焊工艺，能广泛焊接几乎所有黑色金属和有色金属材料的薄壁零件[2]。

钨电极作为负极材料是 TIG 焊的关键组成部分，其性能对于焊接质量有着重要影响。钨电极材料主要包括纯钨电极、钍钨电极、单元稀土钨电极和多元复合稀土钨电极。其中钍钨电极的适用性及性能较好，但钍钨电极含有放射性元素钍，在生产、使用过程中会产生放射性污染，对自然环境与人体健康都有危害；单元稀土钨电极只能在小电流焊接场合取代钍钨电极；多元复合稀土钨电极能够满足焊接行业对电极性能的要求，实现钍钨电极的替代，避免放射性污染，但却消耗了宝贵的稀土战略资源。目前世界上用于 TIG 焊接的钨电极材料每年达上千吨，生产中消耗了大量资源能源，处理不当就会造成严重的环境污染[3]。

生命周期评价（Life Cycle Assessment，LCA）是一种 ISO 标准化方法[4-5]，广泛用于评估产品整个生命周期中的潜在环境影响。MA Xiaotian 等[6]对中国生产的碳化钨粉末的生命周期进行了量化，研究表明环境负荷最大的来源是仲钨酸铵水合物的生产。BOBBA S 等[7]采用生命周期评价的方法来评估纳米二硫化钨颗粒的生产过程的环境性能，指出氧化钨是导致纳米二硫化钨合成过程中能耗高的主要原因。FURBERG A 等[8]以加拿大和美国生产的硬质合金为研究对象，研究表明采矿、湿法冶金和粉末冶金阶段的环境负荷较为突出。焊接被认为是制造业中最耗能的过程，而钨电极主要用于钨极氩弧焊工艺中，所以针对焊接工艺的环境影响 AFZAL A 等[9]分析对比搅拌摩擦焊、激光束焊、钨极氩弧焊在焊接 ALSI 304 不锈钢时的环境影响，结果表明由于钨极氩弧焊焊接时间介于两者之间，降低了电能和保护气体的消耗，导致其环境影响小

收稿日期：2022–08–04
资助项目：国家自然基金委创新研究群体项目（51621003）
作者简介：杨　坤（1996–），男，安徽阜阳人，硕士研究生，研究方向：为材料生命周期评价与生态设计。
通讯作者：陈文娟（1981–），女，山西临汾人，博士，讲师，主要从事稀土材料的绿色生产及其生命周期评价。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

于搅拌摩擦焊，大于激光焊焊接。FAVI C 等[10]分析比较了气体保护焊、保护金属弧焊、钨极氩弧焊、埋弧焊和药芯焊等 5 种金属弧焊的环境影响，发现钨极氩弧焊工艺环境影响最大，这主要是由于执行该工艺所需的高功率、低焊接速度、高保护气体消耗造成的。

综上可发现，现有研究着眼于类似的钨基材料与相关焊接工艺，缺乏对具体钨电极材料生命周期过程环境影响的分析。该文以典型的多元复合稀土钨电极和钍钨电极为研究对象，采用生命周期评价方法定量评估两种钨电极生产的环境负荷，为钨电极材料的可持续发展提供基础数据与指导意见。

1 研究对象与研究方法

1.1 功能单位与系统边界确定

研究选取的国内钨电极采用典型粉末冶金制备方法，即将原料粉末进行掺杂，然后将得到的掺杂粉末压型、烧结制得金属棒，再经过塑性加工、拉丝、矫直、抛光等工序制得不同规格的钨电极[11]，制备工艺流程如图 1、图 2 所示。针对于调研企业的主流生产工艺，多元复合稀土钨电极以钨粉和稀土氧化物为原料进行掺杂，钍钨电极以氧化钨和硝酸钍为原料进行掺杂。在烧结工艺中，由于钍元素的熔点高，只能采用垂熔烧结，而多元复合稀土钨电极的主流烧结工艺为中频烧结。在塑性加工工艺中，旋锻加工与轧制加工均为钨电极塑性加工的主流工艺，选择轧制加工方式则是由于其效率高，生产成本低。

该研究的系统边界主要为两个生产阶段，钨的采选冶炼，钨电极的粉末冶金，产品的生命周期系统边界如图 3 所示。定义功能单位为分别生产 1 t 直径 2.4 mm 的多元复合稀土钨电极和钍钨电极产品材料，产品遵循 GB/T 31908—2015 多元复合稀土钨电极和钍钨电极生产标准[12]，即主要掺杂物含量不低于 1.7 %，不高于 2.2 %，杂质含量不超过 0.1 %。

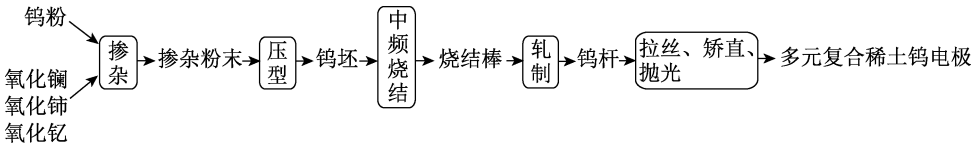


图 1 多元复合稀土钨电极制备工艺流程

Fig.1 Preparation process of multivariate composite rare earth tungsten electrode

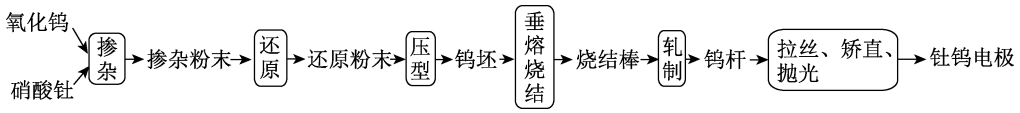
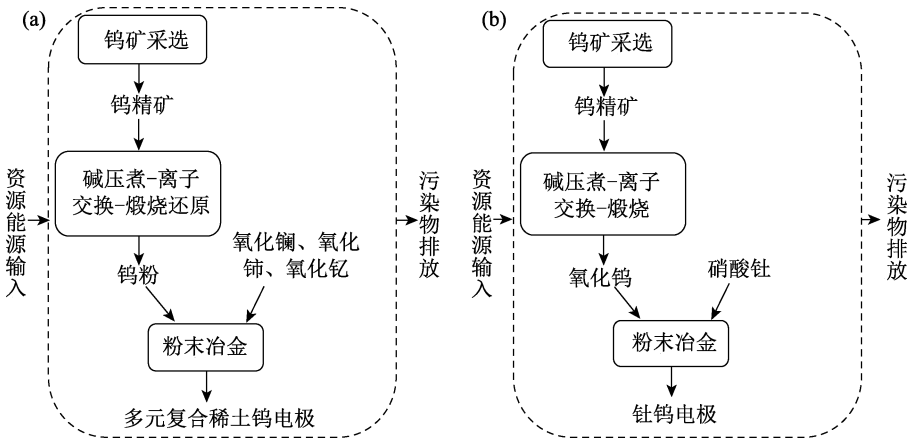


图 2 钍钨电极制备工艺流程

Fig.2 Preparation process of thorium tungsten electrode



(a) 多元复合稀土钨电极；(b) 钍钨电极

图 3 钨电极系统边界图

Fig.3 System boundaries of tungsten electrode system

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1.2　主要数据来源

产品生命周期清单数据包括前景数据与背景数据。产品的生产活动水平数据为前景数据，多元复合稀土钨电极和钍钨电极的生产数据分别来自于企业调研与课题组前期统计，输入总清单分别如表 1、表 2 所示。

表 1　多元复合稀土钨电极生命周期输入总清单

Tab.1　The life cycle input inventory of multivariate omposite rare earth tungsten electrode

项目	钨粉/（kg·t^{-1}）	氧化镧/（kg·t^{-1}）	氧化铈/（kg·t^{-1}）	氧化钇/（kg·t^{-1}）	石墨乳/（kg·t^{-1}）	氢气/（m^3·t^{-1}）	电力/（kWh·t^{-1}）	天然气/（m^3·t^{-1}）
掺杂	1.07×10^3	4.98	4.98	1.49×10^1			5.99×10^1	
压制							2.56×10^2	
中频烧结						4.55×10^2	6.81×10^3	
轧制						5.39×10^2	9.10×10^2	
拉丝、矫直、抛光					3.34×10^1		2.41×10^3	7.80×10^2
数据来源	[13-14]	[15]	[15]	课题组	[16]	[16]	[17]	[17]

表 2　钍钨电极生命周期输入总清单

Tab.2　The life cycle input inventory of thorium tungsten electrode

项目	氧化钨/（kg·t^{-1}）	硝酸钍/（kg·t^{-1}）	水/（kg·t^{-1}）	成型剂/（kg·t^{-1}）	石墨乳/（kg·t^{-1}）	氢气/（m^3·t^{-1}）	电力/（kWh·t^{-1}）	天然气/（m^3·t^{-1}）
掺杂	1.44×10^3	5.60×10^1	8.65×10^2				2.28×10^3	
还原						1.81×10^3	2.53×10^3	
压制				6.05×10^3			1.01×10^2	
中频烧结						2.09×10^3	3.61×10^4	
轧制						5.36×10^2	8.41×10^2	
拉丝、矫直、抛光					1.00×10^1		6.33×10^2	2.00×10^2
数据来源	[13-14]	[18]	[18]	—	[18]	[18]	[19]	[19]

背景数据就是输入原料、能源及输出的污染物排放数据，研究中将钨粉和氧化钨设定为主要上游原料，将其生命周期清单数据分为钨矿采选清单和冶炼清单，前者数据来源于有色金属年鉴[13]，研究范围涵盖 2016—2020 年，后者主要参考鹿珂伟[14]关于钨冶金的技术参数数据。其余上游原料及能源的清单均在表中列出，其中根据生命周期评价中的截断原则，研究中忽略占原料总量 5 %以下的资源消耗项目的环境影响，输入清单如表 3、表 4 所示。

1.3　环境影响评价方法

研究采用 ReCiPe 2016（H）中间点和终点方法作为多元复合稀土钨电极和钍钨电极生命周期评价工具。钨电极的中间点环境影响类型分别为：全球变暖潜力（GWP）、电离辐射（IRP）、光化学臭氧形成对人体健康的影响（HOFP）、颗粒物形成（PMFP）、光化学臭氧形成对生态系统的影响（EOFP）、陆地酸化（AP）、淡水富营养化（FEP）、海洋富营养化（MEP）、陆地生态毒性（TETP）、淡水生态毒性（FETP）、海洋生态毒性（METP）、人体致癌毒性（HTPc）、人体非致癌毒性（HTPnc）、矿产资源稀缺性（SOP）、化石能源稀缺性（FFP）、水资源耗竭（WCP）。终点环境损害类型为：人体健康损害（HH）、生态系统损害（ED）和资源可用性损害（RA）。

2　分析部分

2.1　多元复合稀土钨电极的环境影响

图 4 为多元复合稀土钨电极的特征化结果，从图 4 可以看出，上游原料钨粉的主要环境影响类型是 GWP、HOFP、PMFP、EOFP 等，贡献率分别为 80.50 %、80.62 %、78.17 %、80.64 %。掺杂工艺的主要环境影响类型是 IRP、FEP、FETP，贡献率分别为 98.76 %、95.63 %、70.21 %。

图 5 为多元复合稀土钨电极主要生产工艺对总环境影响的贡献。由图 5 可知，上游原料钨粉的总环境影响最高为 78.56 %，其次为中频烧结工艺为 9.50 %，掺杂工艺为 4.28 %，拉丝、抛光工艺为

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 钨粉生命周期输入总清单

Tab.3 The life cycle input inventory of tungsten powder

项目	钨矿石/（kg·t^{-1}）	水玻璃/（kg·t^{-1}）	浮选药剂/（kg·t^{-1}）	新鲜水/（m^3·t^{-1}）	氢氧化钠/（kg·t^{-1}）	NH_4OH，NH_4Cl/（kg·t^{-1}）	硫化氨/（kg·t^{-1}）	氢气/（m^3·t^{-1}）	钢球/（kg·t^{-1}）
原矿开采	7.69×10^5								
选矿		1.04×10^1	1.25	4.07					2.09×10^1
碱压煮-离子交换				7.18×10^1	8.19×10^3	8.03×10^2	1.96		
煅烧还原								3.63×10^2	
数据来源	[13]	[16]	—	[16]	[19]	[16]	[16]	[16]	[17]
项目	石灰/（kg·t^{-1}）	树脂/（kg·t^{-1}）	电力/（kWh·t^{-1}）	煤炭/（kg·t^{-1}）	焦炭/（kg·t^{-1}）	天然气/（m^3·t^{-1}）	柴油/（kg·t^{-1}）	汽油/（kg·t^{-1}）	蒸汽/（kg·t^{-1}）
原矿开采			1.21×10^4	3.28×10^2	1.70×10^{-1}	8.85×10^1	1.27×10^1	2.36×10^1	
选矿	1.57×10^1		2.96×10^1	8.03×10^{-1}	4.15×10^{-4}	2.17×10^{-1}	3.11×10^{-2}	5.79×10^{-2}	
碱压煮-离子交换		1.65	2.74×10^3	5.03×10^2	1.10×10^1	4.38×10^1	1.22×10^1	3.69	7.43×10^3
煅烧还原			1.05×10^4	3.40×10^2	7.45	2.96×10^1	8.21	2.49	
数据来源	[19]	—	[17]	[17]	[17]	[17]	[17]	[17]	[17]

表 4 氧化钨生命周期输入总清单

Tab.4 The life cycle input inventory of tungsten oxide

项目	钨矿石/（kg·t^{-1}）	水玻璃/（kg·t^{-1}）	浮选药剂/（kg·t^{-1}）	新鲜水/（m^3·t^{-1}）	氢氧化钠/（kg·t^{-1}）	NH_4OH，NH_4Cl/（kg·t^{-1}）	硫化氨/（kg·t^{-1}）	氢气/（m^3·t^{-1}）	钢球/（kg·t^{-1}）
原矿开采	7.25×10^5								
选矿		9.85	1.18	3.84					1.97×10^1
碱压煮-离子交换				6.78×10^1	7.73×10^3	7.58×10^2	1.85		
煅烧还原									
数据来源	[13]	[16]	—	[16]	[19]	[16]	[16]	[16]	[17]
项目	石灰/（kg·t^{-1}）	树脂/（kg·t^{-1}）	电力/（kWh·t^{-1}）	煤炭/（kg·t^{-1}）	焦炭/（kg·t^{-1}）	天然气/（m^3·t^{-1}）	柴油/（kg·t^{-1}）	汽油/（kg·t^{-1}）	蒸汽/（kg·t^{-1}）
原矿开采			1.14×10^4	3.09×10^2	1.60×10^{-1}	8.35×10^1	1.20×10^1	2.23×10^1	
选矿	1.48×10^1		2.79×10^1	7.58×10^{-1}	3.92×10^{-4}	2.05×10^{-1}	2.93×10^{-2}	5.46×10^{-2}	
碱压煮-离子交换		1.52	2.58×10^3	4.75×10^2	1.04×10^1	4.14×10^1	1.15×10^1	3.49	7.01×10^3
煅烧还原			4.06×10^3						
数据来源	[19]	—	[17]	[17]	[17]	[17]	[17]	[17]	[17]

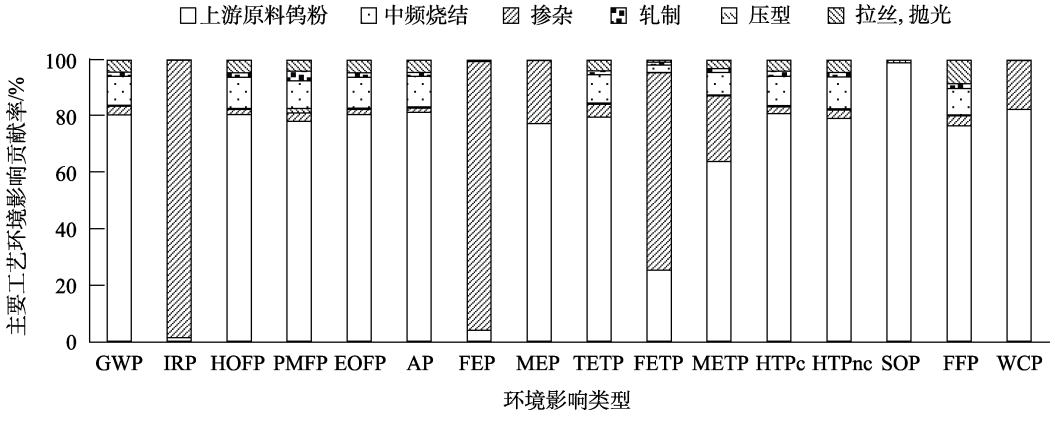


图 4 多元复合稀土钨电极的特征化结果

Fig.4 The characterization results of multivariate composite rare-earth tungsten electrodes

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

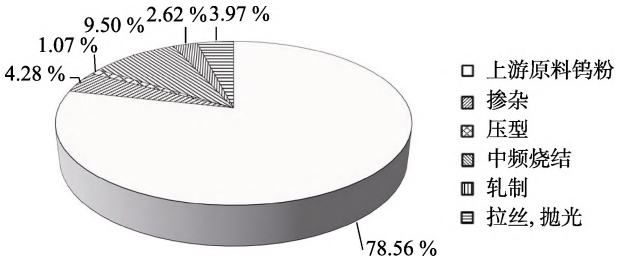


图 5　多元复合稀土钨电极主要生产工艺对总环境影响的贡献

Fig.5　The contribution to the total environmental impact of main processes of multivariate composite rare earth tungsten electrode

3.97 %，轧制工艺为 2.62 %、压型工艺的总环境影响最低为 1.07 %。

2.2　钍钨电极的环境影响

钍钨电极的特征化结果如图 6 所示，由图 6 可以看出，上游原料氧化钨的主要环境影响类型是 GWP、HOFP、PMFP、EOFP 等，贡献率分别为 55.28 %、54.44 %、53.63 %、54.46 %。掺杂工艺的主要环境影响类型是 IRP、FEP、FETP、METP 贡献率分别为 99.36 %、96.27 %、85.28 %、37.58 %。

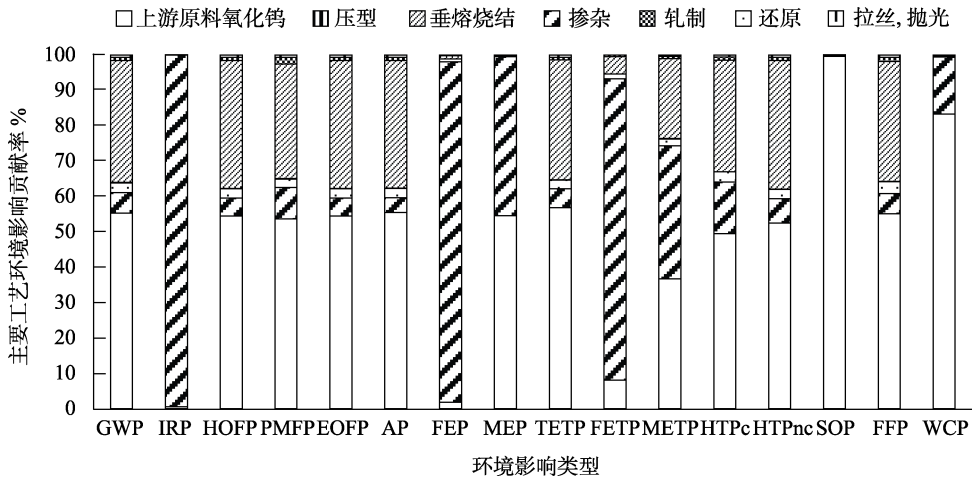


图 6　钍钨电极的特征化结果

Fig.6　The characterization results of thorium-tungsten electrodes

图 7 为钍钨电极主要生产工艺对总环境影响的贡献，由图 7 可知，上游原料氧化钨的总环境影响最高为 55.15 %，其次垂熔烧结工艺为 32.30 %，掺杂工艺为 7.82 %，还原工艺为 2.43 %，轧制工艺为 1.48 %、拉丝、抛光工艺为 0.62 %，压型工艺的总环境影响最低为 0.20 %。

根据上述结果，两种钨电极的环境热点均为上游原料阶段，原因是钨电极的主要原料就是钨基体，而钨基体的上游生产涉及矿产资源、辅助原料和能源的投入，同时也产生环境排放。而在钨电极的制备工艺过程中环境热点为掺杂工艺和烧结工艺，掺杂工艺需要消耗少量的氧化镧、氧化铈、氧化钇或者硝酸钍原材料，烧结工艺则耗电量很高，分别占钨电极各个工艺用电量总和的 65.22 %和 84.94 %。目前我国的发电方式仍然是大量使用燃煤发电，这是导致该工艺总环境影响较大的主要原因。而且无论是在上游原料还是制备工艺方面，电力的消耗对环境影响也是间接的主要责任者。

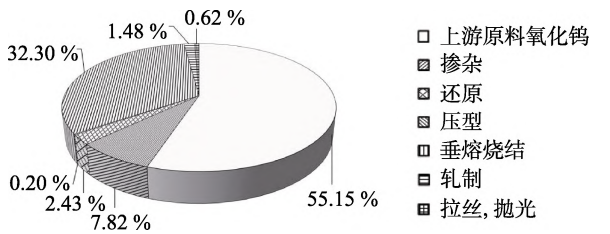


图 7　钍钨电极主要工艺对总环境影响的贡献

Fig.7　The contribution to the total environmental impact of the main processes of thorium-tungsten electrodes

2.3　两种钨电极环境影响对比分析

将钍钨电极的环境影响作为基准，以百分比的形式对两种钨电极的环境影响进行对比分析。

图 8 为两种钨电极的特征化结果对比分析图，由图 8 可知，多元复合稀土钨电极的每个环境影响类型的特征化结果均低于钍钨电极，说明多元复合稀土钨电极具有一定的环境优势，其中多元复合稀土钨电极较钍钨电极具有较大环境优势的是 IRP、MEP、FETP、METP、HTPc，分别只有钍钨电极的

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

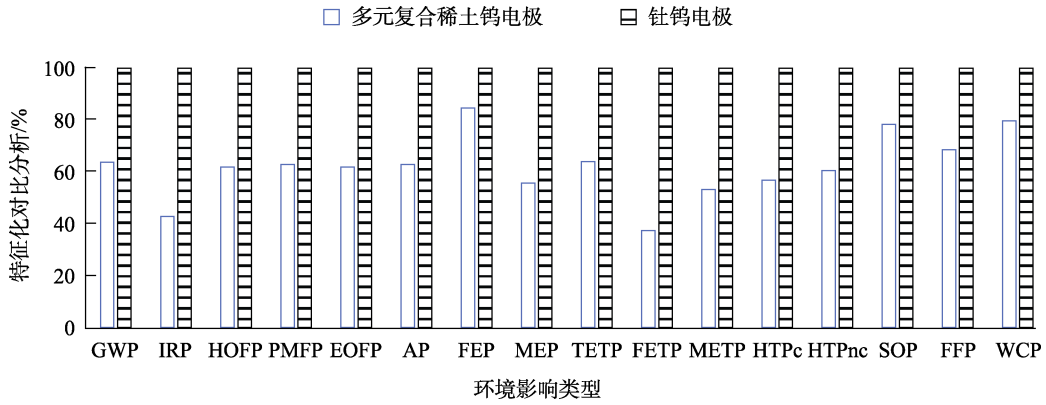


图 8　两种钨电极的特征化结果对比分析

Fig.8　The characterization results of two types of tungsten electrodes

42.72 %、55.65 %、37.35 %、53.15 %、56.71 %。

图 9 为两种钨电极的环境损害评价结果，由图 9 可知，多元复合稀土钨电极具有环境优势，该电极的 3 类环境损害均低于钛钨电极，环境优势由大到小为：HH＞ED＞RA，分别为钛钨电极环境影响的 63.16 %、63.67 %、79.52 %。转化为总环境影响，钛钨电极为 4.66×10^3 Pt；多元复合稀土钨电极为 2.99×10^3 Pt，故多元复合稀土钨电极相比于钛钨电极，可减少 35.81 %的总环境影响。

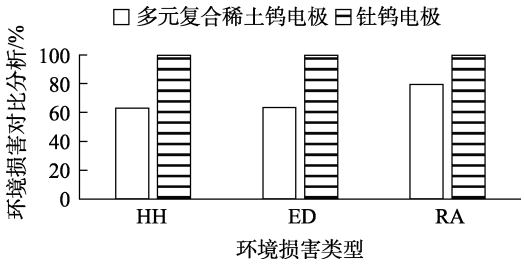


图 9　两种钨电极的环境损害评价结果

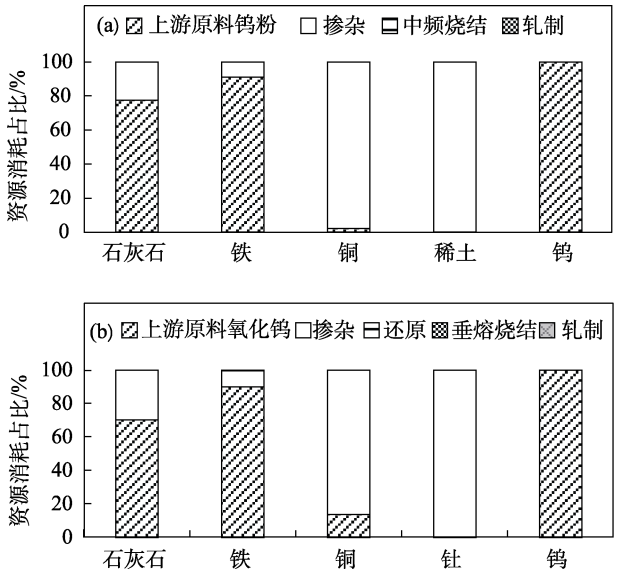
Fig.9　The environmental damages of two types of tungsten electrodes

多元复合稀土钨电极总环境影响较低的主要原因在于两种钨电极不同的上游原料造成的。根据计算，功能单位下上游原料的总环境影响为钨粉（2.35×10^3 Pt）＜氧化钨（2.57×10^3 Pt），造成该结果的主要原因在于相同功能单位的多元复合稀土钨电极所需钨粉的质量小于钛钨电极所需的氧化钨。对于工艺链中的掺杂工艺和烧结工艺，掺杂工艺的总环境影响为多元复合稀土钨电极 127.95 Pt 小于钛钨电极 364.25 Pt。其原因是掺杂工艺的不同，多元复合稀土钨电极是干掺，钛钨电极是湿掺，导致电能消耗具有较大差异；而且掺杂所需原料不同，也是导致两种掺杂工艺的总环境影响具有较大差异的主要原因。烧结工艺的总环境影响为中频烧结 284.04 Pt＜垂熔烧结 1504.61 Pt。造成该结果的原因是烧结工艺的不同，电能消耗具有较大差异，相同功能单位下中频烧结的耗电量仅占垂熔烧结的 18.89 %。

2.3.1　资源消耗

通过 SOP 的计算可知，多元复合稀土钨电极和钛钨电极两种钨电极功能单位的资源消耗量分别为 1.8×10^4 kg Cu eq 和 2.3×10^4 kg Cu eq。

图 10 为两种钨电极资源消耗贡献分析图。如图 10 所示，大部分资源消耗是在上游原料和掺杂阶段，主要原因是这两个阶段涉及矿物的开采与冶炼。多元复合稀土钨电极中上游原料钨粉阶段存在



(a) 多元复合稀土钨电极资源投入；(b) 钛钨电极资源投入

图 10　两种钨电极资源消耗贡献分析

Fig.10　The contribution analysis of resource consumption of two types of tungsten electrodes

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

钨、石灰石、铁、铜 4 类资源消耗，其中钨的贡献比例最高为 100 %，其次是铁为 91.19 %，石灰石为 77.58 %，最低的是铜为 2.13 %；掺杂阶段存在稀土、石灰石、铜、铁 4 类资源消耗，其中稀土的贡献比例最高为 100 %，其次是铜为 97.87 %，石灰石为 22.42 %，最低是铁为 8.73 %。钍钨电极中上游原料氧化钨阶段存在钨、石灰石、铁、铜 4 类资源消耗，其中钨的贡献比例最高为 100 %，其次是铁为 90.03 %，石灰石为 70.42 %，最低的是铜为 13.79 %；掺杂阶段存在钍、石灰石、铜、铁 4 类资源消耗，其中钍的贡献比例最高为 100 %，其次是铜为 86.17 %，石灰石为 29.58 %，最低是铁为 9.69 %。

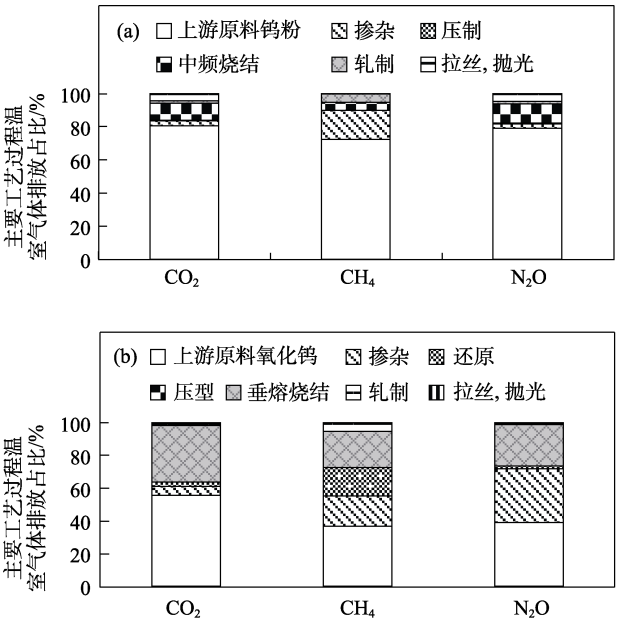
2.3.2　能源消耗

经计算，多元复合稀土钨电极功能单位的总耗能 668.74 GJ，其中上游原料钨粉的能耗占比最高，为 76.62 %，中频烧结工艺其次为 9.40 %。钍钨电极功能单位总耗能 976.09 GJ，其中上游原料：氧化钨能耗占比最高为 55.05 %，垂熔烧结其次为 33.97 %。结果表明，两种钨电极的能源贡献结构相似，均是上游原料钨基体是两种钨电极全生命周期能耗的重要来源，主要原因是钨电极中约 98 %的成分是钨基体。烧结工艺中电能的使用量也较为明显，其中中频烧结电耗占生命周期总能耗的 9.40 %，垂熔烧结占生命周期总能耗的 33.97 %。

2.3.3　温室气体排放

通过计算 GWP 特征化结果，两种钨电极功能单位的温室气体排放量分别为 5.58×10^4 kg CO_2 eq 和 8.75×10^4 kg CO_2 eq。

图 11 为两种钨电极温室气体排放贡献结构分析图。由图 11 可得，其中多元复合稀土钨电极功能单位的温室气体中 CO_2 占最大比重为 98.41 %，其次是 CH_4 为 1.12 %、N_2O 为 0.47 %；钍钨电极功能单位的温室气体中 CO_2 占最大比重为 98.56 %，其次是 CH_4 为 0.71 %、N_2O 为 0.73 %。由于钨电极的主要成分是上游原料，故钨电极 CO_2、CH_4、N_2O 排放首要贡献者是上游原料，其中钨粉的贡献率：CO_2 为 80.60 %、CH_4 为 72.24 %、N_2O 为 78.05 %；氧化钨的贡献率：CO_2 为 55.54 %、CH_4 为 36.69 %、N_2O 为 32.93 %。在制备工艺方面，电能的消耗是造成工艺产生温室气体的主要原因，其中多元复合稀土钨电极掺杂工艺对 CH_4 排放的贡献率较高为 17.66 %，中频烧结对 CO_2 和 N_2O 排放的贡献率较高分别为 10.30 %和 11.62 %；钍钨电极掺杂工艺对 N_2O 排放的贡献率较高为 32.87 %，垂熔烧结对 CO_2 和 CH_4 排放的贡献率较高分别为 34.68 %和 22.22 %。



(a) 多元复合稀土钨电极温室气体排放; (b) 钍钨电极温室气体排放

图 11　温室气体排放贡献结构分析

Fig.11　The contribution analysis of greenhouse gas emission

3　结　论

（1）对两种钨电极生命周期各阶段环境影响贡献进行分析，多元复合稀土钨电极：上游原料钨粉＞中频烧结＞掺杂＞拉丝、抛光＞轧制＞压型；钍钨电极：上游原料氧化钨＞垂熔烧结＞掺杂＞还原＞轧制＞拉丝、抛光＞压型。

（2）两种钨电极环境热点均为上游原料，分别占生命周期总环境影响的 78.56 %和 55.15 %，主要是因为上游原料占钨电极约 98 %（质量分数）。在工艺方面的环境热点为烧结工艺，分别占生命周期总环境影响的 9.50 %和 32.30 %，这主要是因为我国仍以燃煤发电为主要发电方式导致的。

（3）多元复合稀土钨电极资源、能源消耗，温室气体排放等指标优于钍钨电极，且两种钨电极各指标贡献结构相似，即上游原料、掺杂和烧结为这 3 类指标的主要贡献者，其余阶段的贡献均小于 4 %。

（4）多元复合稀土钨电极的总环境影响小于钍钨电极，将多元复合稀土钨电极用于焊接领域，比使用钍钨电极可减少 35.81 %的总环境影响，具有一定的环境优势，促进了我国钨电极材料的发展。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献：

[1] 李 华. 基于视觉的焊缝路径识别与轨迹规划[D]. 山东：山东科技大学，2017.
LI Hua. Weilding path recognition and trajectory planning based on vision[D]. Shandong：Shandong University of Sciency and Technology，2017.

[2] KUMAR K，KUMAR C S，MASANTA M，et al. A review on TIG welding technology variants and its effect on weld geometry[J]. Materials Today：Proceedings，2021，50（5）：999−1004.

[3] 崔云涛，李炳山，王芦燕. 我国钨电极行业现状及未来发展趋势[J]. 新材料产业，2013，231（2）：12−15.
CUI Yuntao，LI Bingshan，WANG Luyan. Current situation and future development trend of tungsten electrode industry in our country[J]. New Materials Industry，2013，231（2）：12−15.

[4] 全国环境管理标准化技术委员会. 生命周期评价原则与框架：GB/T 24040—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2008.

[5] 全国环境管理标准化技术委员会. 生命周期评价要求与指导：GB/T 24040—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2008.

[6] MA Xiaotian，QI Congcong，YE Liping，et al. Life cycle assessment of tungsten carbide powder production：a case study in China[J]. Journal of Cleaner Production，2017，149：936−944.

[7] BOBBA S，BLENGINI G A，DEORSOLA F A，et al. LCA of tungsten disulphide (WS_2) nanoparticles synthesis：state of art and fromcradle to gate LCA[J]. Journal of Cleaner Production，2016，139：1478−1484.

[8] FURBERG A，ARVIDSSON R，MOLANDER S，et al. Environmental life cycle assessment of cemented carbide（WC-Co）production[J]. Journal of Cleaner Production，2019，209：1126−1138.

[9] AFZAL A，SHAUKAT M，YILBAS B，et al. Life cycle assessment（LCA）of welded of aisi 304 stainless steel using laser beam welding（LBW），friction stir welding（FSW）and gas tungsten arc welding（GTAW）[J]. Lasers in Engineering，2021，48（1/3）：33−42.

[10] FAVI C，CAMPI F，GERMANI M. Comparative life cycle assessment of metal arc welding technologies by using engineering design documentation[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment，2019，24（12）：2140−2172.

[11] 杨建参. 多元复合稀土钨电极制备技术[D]. 北京：北京工业大学，2009.
YANG Jiancan. Preparation technology of composite rare earth tungsten electrode[D]. Beijing：Beijing University of Technology，2009.

[12] 国家技术监督局. 电弧焊与等离子焊接、切割用钨电极：GB/T31908—2015[S]. 北京：中国标准出版社，2015.

[13] 中国有色金属工业年鉴编辑委员会. 中国有色金属工业年鉴（2016−2020）[M]. 北京：《中国有色金属工业年鉴》社，2016−2020.

[14] 鹿珂伟. 基于生命周期评价的金属钨生产的环境负荷研究[D]. 北京：北京工业大学，2019.
LU Kewei. Study on environmental load of tungsten production based on life cycle evaluation[D]. Beijing：Beijing University of Technology，2016.

[15] 陈文娟. 典型稀土材料的生命周期评价及稀土元素物质流分析[D]. 北京：北京工业大学，2019.
CHEN Wenjuan. Life cycle evaluation of typical rare earth materials and material flow analysis of rare earth elements[D]. Beijing：Beijing University of Technology，2019.

[16] Ecoinvent. Database Initiatives[DB/OL].2018[2022-5-1]http://www.ecoinvent. org/database/database.

[17] Beijing University of Technology. Material Environmental Load Database−Sinocenter.2020[2022−5−1][DB/OL]. http://cnmlca.bjut.edu.cn.

[18] 湖南共伴生铀资源（独居石）综合利用项目（氯化稀土制备部分）环境影响报告书[EB/OL].中核二七二铀业有限责任公司 .2018[2022−5−1].http://sthjt.hunan.gov.cn/sthjt/xxgk/xzgs/jsxm/hpgs/jsslgk/201811/10141145/files/1e4254a4251c40469b55716078e7faef.pdf.

[19] ZHANG Q Q，GONG X Z，MENG X C. Environment impact analysis of natural graphite anode material production[J]. Materials Science Forum，2018，4740：1011−1017.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Life Cycle Assessment of Multivariate Composite Rare Earth Tungsten Electrode and Thorium Tungsten Electrode

YANG Kun[1,2], CHEN Wenjuan[1,2], YANG Jiancan[1], GAO Feng[1,2], GONG Xianzheng[1,2], LIU Yu[1,2], SUN Boxue[1,2]

（1.Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124; 2.National Engineering Laboratory for Industrial Big-data Application Technology, Beijing 100124）

Abstract: Multi-element composite rare earth tungsten electrode, as a non-radiation tungsten electrode material to replace thorium tungsten electrode, has been widely concerned by the society, but the environmental impact of their production processes has not been quantitatively evaluated. The life cycle assessment (LCA) method was used to study the resource and energy consumption and pollutant emission of multicomponent composite rare earth tungsten electrode and thorium tungsten electrode from cradle to gate. The functional unit was defined as the production of 1 t diameter 2.4 mm multicomponent composite rare earth tungsten electrode and thorium tungsten electrode respectively. The results show that the environmental hot spots of the two kinds of tungsten electrodes are tungsten powder and tungsten oxide in the upstream raw material stage, accounting for 78.56 % and 55.15 % of the total environmental impact respectively. The environmental hotspot in the process chain is sintering process, which accounts for 9.50 % and 32.30 % of the total environmental impact respectively. The comparison of the environmental impact of two tungsten electrodes shows that compared with thorium tungsten electrode, the multi-element composite rare earth tungsten electrode can reduce the total environmental impact by 35.81 %, which has environmental advantages. The contribution structure of two kinds of environmental impact types, namely tungsten electrode resource consumption, energy consumption and greenhouse gas emission, was analyzed. The results showed that the upstream raw materials made outstanding contributions to these three indicators.

Key words: multivariate composite rare earth tungsten electrode; thorium tungsten electrode; greenhouse gases; resource and energy; life cycle assessment

（上接第 25 页）

Experimental Research by Heavy Medium Beneficiation for a Quartz Large-vein-type Tungsten-tin Ore in Southern Jiangxi

WANG Qiangqiang, LI Zhenfei, LI Ping, SHEN Xinchun, ZHANG Ting

（Ganzhou Nonferrous Metallurgy Research Institute Co., Ltd., Ganzhou 341000, Jiangxi, China）

Abstract: The heavy medium beneficiation test for a qualified quartz large-vein tungsten and tin mine assaying 0.15 % WO_3 and 0.16 % Sn in southern Jiangxi was carried out using a non-pressure three-product heavy medium separator. The influence of ore-medium ratio and medium concentration on the heavy medium beneficiation test indexes was mainly investigated. The test results show that under the conditions of heavy medium cyclone pressure is 0.15 MPa, flow rate is 88~94 m^3/h, ore-medium ratio is 1:16, medium concentration is 1.45 g/cm^3, tailings throwing rate is 63.67 %, the recoveries of WO_3 and Sn in tailings is only 6.07 % and 11.78 % respectively, the test indicators is well.Can achieve a large number of pre-tailing while ensuring the recovery rate of WO_3 and Sn of tailings by use of non-pressure three product heavy medium cyclone, At the same time can reduce the burden of grinding system, greatly save the capacity of tailings reservoir, and provide technical support for the development and utilization of this type of quartz large vein tungsten-tin ore.

Key words: quartz large-vein-type; tungsten-tin ore; heavy medium beneficiation; tailings throwing

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net