



International Copper
Association
Copper Alliance



铜业环境概况 -- 电解铜生命周期环境评价 (LCA) 报告

GLOBAL 2023



铜是什么?铜从哪里来?

引言

国际铜业协会 (ICA) 是铜工业的主要倡导组织。ICA联合全球铜工业及其合作伙伴,共同为实现在联合国可持续发展目标做出积极贡献,并助力铜的市场发展。

国际铜业协会拥有31家会员,代表着全球精炼铜产量的绝大部分市场份额,其中包含全球最大的铜生产商和回收商。作为对可持续发展目标承诺的一部分,铜工业致力于提供数据和信息,使铜的使用者能够评估从铜原料提取到废弃回收的整个生命周期内的影响和效益。本环境概况总结了国际铜业协会的电解铜生命周期评价(LCA)的结果。鉴于电解铜是清洁能源转型过程中的重要资源,本概况致力于向铜产业价值链参与者提供信息以及从采矿阶段到铜生产阶段的生命周期数据。根据需求,本概况还可以提供更详细的数据集,帮助铜产业链下游用户在开展生命周期评价研究时了解其产品对环境的影响。

铜天然存在于岩石、土壤、空气和水中,是确保人类和动植物健康和福祉的必需元素。铜在地壳中的平均含量为0.0068%(约60 mg/kg)(Hammarstrom等人,2019年)。

在部分地区,铜含量在自然地质和地球化学过程中被浓缩到了更高的水平。在地球表面和地下发现的铜含量高于0.2%(或2000mg/kg)的区域,就会作为矿体进行开采。

铜矿床在全球各地均有分布。当今领先的铜矿开采国包括智利、秘鲁、中国、刚果民主共和国、美国、俄罗斯、赞比亚、澳大利亚和印度尼西亚(ICSIG 2022)。

铜是为数不多的可以重复回收利用而没有任何性能损失的材料之一。再生铜(二次生产)和原生铜(一次生产)的质量(物理和化学性质)没有差异,可以互换使用。世界上每年约30%的铜需求是通过回收利用来满足的。

回收铜是将有价值的材料重新利用起来的高效方式,具有许多环境效益,包括节约能源,减少温室气体和其它空气污染物排放,延长自然资源的使用寿命,并防止有价值的土地用于垃圾填埋。

当前，铜的全球年使用量近 2800 万吨。

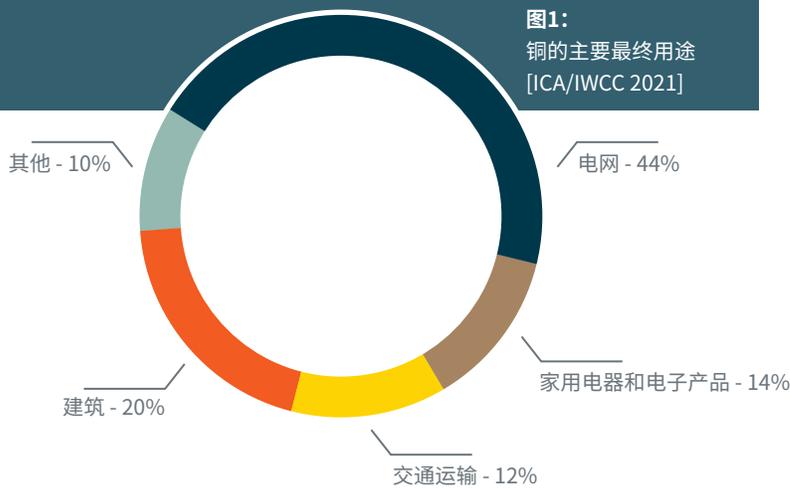
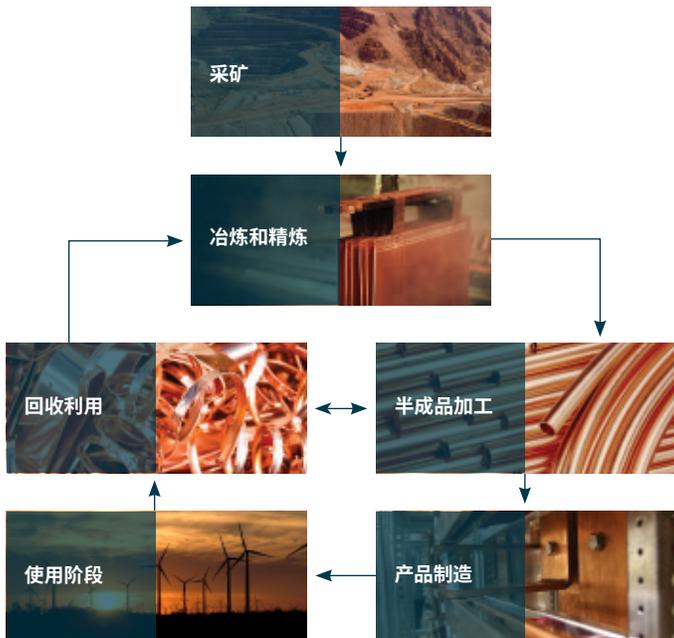


图2：
铜的生命周期



铜的用途有哪些？

当前，铜的全球年使用量近2800万吨。其中近 70% 的铜产品用于电气、导体和通信领域，如图1所示。

铜是除银之外导电率最高的金属。这一特性使铜成为电网材料的选择(占44%)——安全高效地向家庭和企业提供电力。

电气设备——为家用电器和消费性电子产品提供电路、接线和电接点，占铜用量的14%。

12%的铜用于交通运输领域。火车、汽车或卡车中的高纯度铜线束系统将电池提供的电流传送给整个车辆上的设备，如灯具、中控锁、车载计算机和卫星导航系统等。

另外 20% 的铜产品用于建筑行业——水管设施、屋顶和幕墙等。铜结构轻便、耐用和免维护，并且自然美观、持久耐用和完全可回收。

10%的铜用于硬币、雕塑、珠宝、乐器、炊具和其它消费品。

铜的生命周期

铜具有六个主要生命周期阶段：采矿、冶炼和精炼、半成品加工、产品制造、使用和回收阶段。回收过程同时发生在生产铜的冶炼厂和生产半成品的加工厂。

国际铜业协会的电解铜生命周期评价(LCI)提供了从采矿到冶炼和精炼的关键环境信息，因此是整个产品生命周期研究的重要基础。与其它所有材料一样，铜对环境可能的影响最好根据使用铜的产品或应用领域来确定。例如，当用作铜线时，铜的导电性可以提高能耗产品的能源效率，使这些产品在使用阶段更具可持续性。

铜是如何生产的？

从最初来源于矿井中到用于电线或管道等成品，铜的生产过程会经历若干阶段。

原生铜的生产始于含铜矿石的开采。铜矿开采有两种基本方式：露天采矿和地下采矿。由于铜以较低的含量分布在较大的区域范围内，地表或露天采矿是世界上主要的铜矿开采方法。

采矿结束后，铜通过两种工艺路线之一进行生产：火法冶炼或湿法冶炼工艺。在火法冶炼工艺路线中，开采出来的矿石被粉碎并研磨，然后使用浮选方法进行精矿生产。所获得的铜精矿平均含有30%的铜，但矿石品位在20%到40%之间（国际铜业研究组织，2021年）。

在接下来的冶炼过程中，铜矿被转化成“冰铜”，含铜率在50%至70%之间。冰铜要么进行闪速吹炼，要么在转炉中进行处理，生产出含铜量为98.5-99.5%的粗铜。

下一步，粗铜经过传统工艺路线进行火法精炼，或重熔、铸成阳极进行电解精炼。电解精炼的产物是精炼电解铜，含铜率在99.99%以上。而湿法冶炼工艺路线通过浸出、溶剂萃取（也称为溶液萃取）和电解沉积法（通常称为SX-EW工艺），主要从低品位氧化矿和一些硫化矿中提取出铜。最终产品与通过火法冶炼路线生产的含铜率在99.99%以上的精炼电解铜相同。图2和图3显示了精炼电解铜生产的基本步骤。

再生铜的生产利用了各种含有再生铜的材料，例如在半成品或成品制造过程中废弃的金属中含有的铜废料（“新废料”）或陈旧的报废产品（“旧废料”），以及电子废料和其它复合材料。含有再生铜的材料在炉中熔炼成冰铜或黑铜，并在转炉中经过进一步处理形成粗铜。粗铜通过火法精炼形成阳极铜，进行电解精炼。电解精炼步骤的产出是铜含量为99.99%的电解铜。

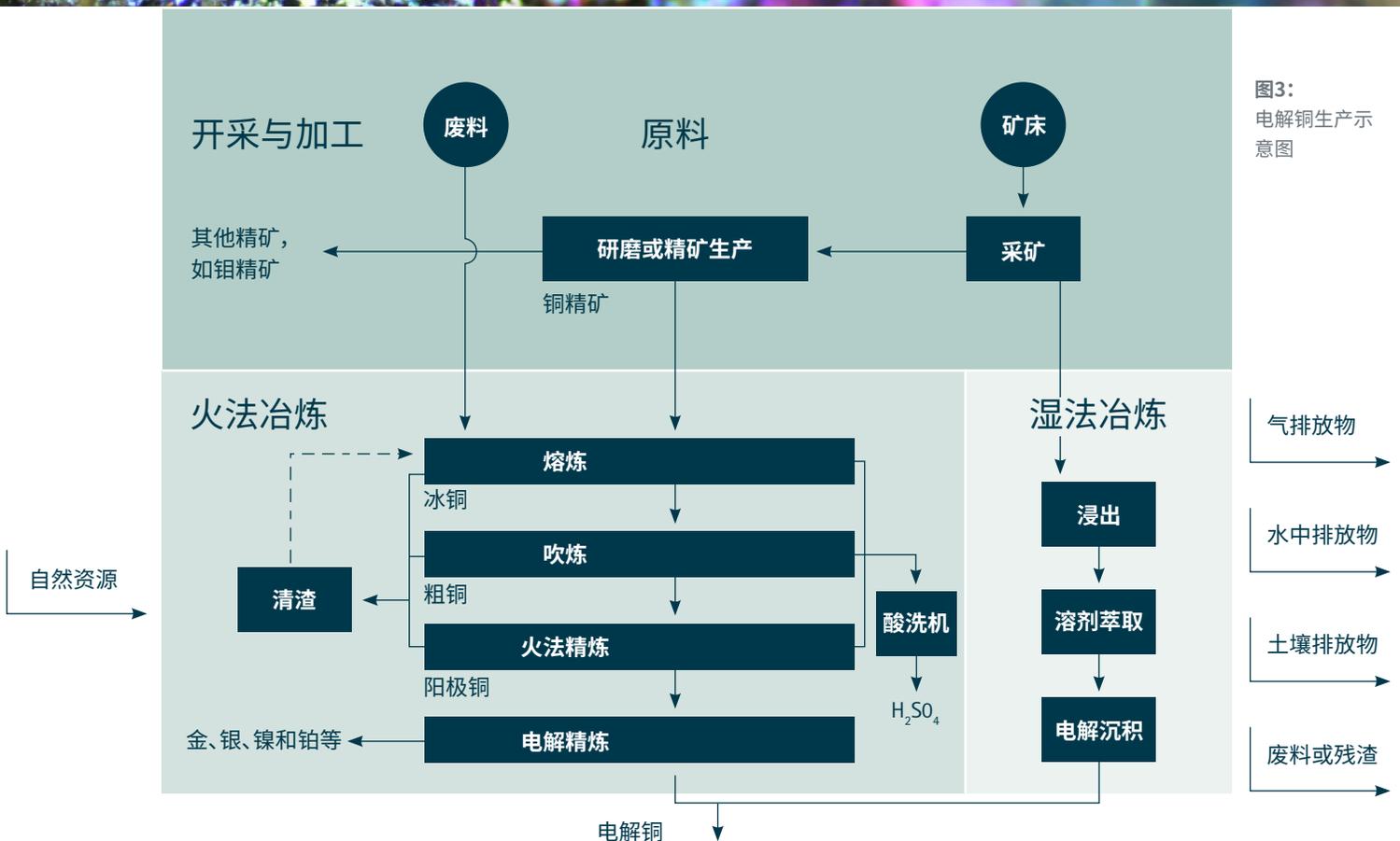


图3：
电解铜生产示意图

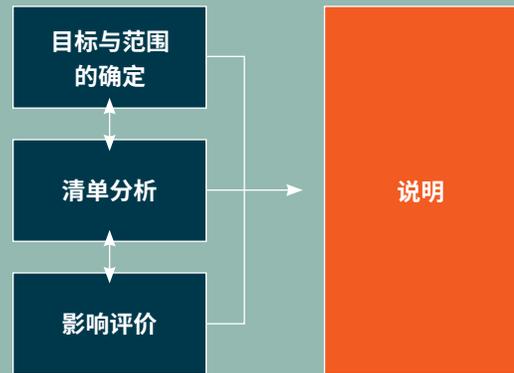
生命周期评价

生命周期评价是一种决策工具,用于确定环境负荷和评价商品或服务在其生命周期过程中的潜在环境影响。生命周期评价已经在国际标准化组织(ISO)的领导下进行了标准化,并形成了许多考虑产品系统生命周期影响的管理方法和标准的概念基础。

典型的生命周期评价研究有四个阶段,如图4所示。

1. **目标和范围**——确定研究的功能单位、系统边界、受众和用途等;
2. **生命周期清单分析**——对产品系统进行建模,并将所有相关的输入和输出数据收集到系统中;
3. **生命周期影响评价**——评价与所研究系统相关的潜在环境影响;
4. **解释说明**——对评价结果进行解释说明,帮助决策者了解与整体环境概况最相关的因素(热点问题,主控因子及生产环节),并确定产品系统的潜在优化方案。

图4: 生命周期评价框架*



*ISO. (2006). ISO 14044.《环境管理-生命周期评价-要求与导则》, 国际标准化组织, 日内瓦

目标与范围的确定

2019年,国际铜业协会(ICA)启动了第三次生命周期评价研究,对从铜矿开采到铜加工厂的铜精矿和电解铜生产相关的资源使用、能源消耗和环境排放物进行量化分析(Quantis 2022)。

该研究的系统范围包括从矿山中开采铜矿石到生产电解铜(原生铜和再生铜)的整个生命周期清单。该研究是根据ISO14040关于生命周期评价的系列标准进行的,并纳入了《产品环境足迹(PEF)指南》的一些要素,如生命周期影响评价方法和数据质量评估,以便与未来的产品环境足迹等评估保持一致。研究完成后,数据经过了独立专家的坚定性评审。该研究的具体目标是:

- 为国际铜业协会的会员企业生产电解铜提供最新的生命周期清单数据;
- 促进在主流生命周期清单数据库中采用电解铜生命周期清单数据;
- 为今后开展含铜中间产品和最终成品的生命周期评价研究提供基础数据;

此前,在2017年(基于2013年)(ICA, 2017)和2011年(基于2005年)(PE International, 2012)也进行过研究。但是,此次研究并非为了与先前研究结果进行比较来显示铜精矿和电解铜概况的时间序列,这种比较也不合适,因为各研究的参与研究的区域和企业并不相同。本报告旨在通过对可获得的最新活动数据进行计算,提供铜精矿和电解铜生产对环境影响的最新情况。

数据收集范围涵盖了2019年度铜生产工艺的所有技术路线的代表性数据,即火法冶炼路线、湿法冶炼路线和再生电解铜生产。背景数据为2017-2020年的代表数据。

铜精矿采用两种功能单位。一为生产一吨平均铜含量为26%的精矿,二为精矿中的实际铜含量,即生产精矿中所含的一吨铜。本文件中包含的生命周期影响评价审查了电解铜的生产对环境的影响指标,包括一次能源的需求、全球变暖、酸化、富营养化、光化学烟雾形成和臭氧损耗等。

表 1: 1吨电解铜和铜精矿的生命周期清单分析结果

生命周期清单

生命周期清单是生命周期评价过程中的关键一步。生命周期清单对产品系统的所有环境输入和输出数据进行分类。数据可以从关键活动的测量和估计中直接收集,或者基于从现有生命周期清单数据库中获取的信息。

对于电解铜的全球生命周期清单而言,本研究的具体原始数据由国际铜业协会的会员企业提供,并使用GaBi 2021.1数据库进行建模。该数据集包含来自五大洲的产量,占2019年基准年度世界电解铜产量的23%。

表1列出了完整生命周期清单的摘录,显示了电解铜和铜精矿的分析结果。

类型	流程	铜精矿 (含铜品位26%)	电解铜	单位	
能源资源	原油	3,873	14,505	MJ	
	无烟煤	3,910	14,998	MJ	
	褐煤	408	2,072	MJ	
	天然气	4,048	15,633	MJ	
	泥煤	4	20	MJ	
	铀	400	3,169	MJ	
	水力发电	1,722	5,069	MJ	
	太阳能	1,872	6,175	MJ	
	风力发电	555	2,192	MJ	
	物质资源	石灰岩	85	288	Kg
砂		-	193	Kg	
用水		1,048,840	9,335,512	Kg	
堆积物	表土	11,196	20,560	Kg	
	尾矿	52,611	93,522	Kg	
大气排放物	CO2	863	3,558	Kg	
	CH4	1.53	5.69	Kg	
	N2O	0.13	0.42	Kg	
	NOx	3.69	15.68	Kg	
	SO2	2.86	31.22	Kg	
	NM VOC	0.56	1.99	Kg	
	CO	1.87	6.35	Kg	
	灰尘 (>PM10)	0.08	0.37	Kg	
	灰尘 (PM10)	0.01	0.07	Kg	
	灰尘 (PM2,5 - PM10)	0.22	0.82	Kg	
	灰尘 (PM2.5)	0.27	1.47	Kg	
	砷	0.00009	0.05546	Kg	
	铜	0.00021	0.00470	Kg	
	铅	0.00022	0.00333	Kg	
	锌	0.00087	0.00240	Kg	
	大气排放物	铵盐或氨 (NH4+ /NH3)	0.03	0.11	Kg
		硝酸盐 (NO3-)	0.35	1.10	Kg
		磷酸盐 (PO43-)	0.01	0.03	Kg
		生物需氧量	0.09	0.26	Kg
化学需氧量		2.27	7.24	Kg	
砷		0.00051	0.00157	Kg	
铜		0.00053	0.00126	Kg	
铅		0.00054	0.00120	Kg	
锌		0.00044	0.00086	Kg	





表 2: 副产品处理方法摘要

工艺水平	副产品	处理方法
采矿	- 硫化矿 - 氧化矿	金属含量分配
精矿生产	- 铜精矿 - 钼精矿	金属含量分配
冶炼工艺	- 铅锡合金(二次熔炼) - 蒸汽	系统扩展 - 铅锡混合物 - 蒸汽
硫酸厂	- 硫酸	系统扩展
电解精炼	- 电解铜 - 贵金属(通过阳极泥) - 硫酸镍 - 硫酸铜	经济分配 - 平均10年

铜的生产和回收能够从初级和次生原料中回收许多有价值的金属和非金属副产品,如贵金属(例如金和银)、硫酸镍、锌、铅、锡、硫酸和硅酸铁等。

副产品的处理是电解铜生命周期清单分析的一个关键方法学问题。副产品的处理基本上有三种程序:细分、分配和通过替代法来实现系统扩展。分配和通过替代法来实现系统扩展都应用到了电解铜生命周期清单中,以适当考虑广大范围的副产品,如表2所示。表1中列出的生命周期清单和研究结果都是在应用分配和系统扩展方法之后计算出来的。

坚定性评审

德国柏林工业大学的Matthias Finkbeiner教授作为独立专家评审员对本研究的方法、数据质量和建模方面进行了审查。评审声明和报告可根据要求提供。



生命周期影响评价助力铜工业在运营过程中找准改进的机会。

生命周期影响评价(LCIA)

继生命周期清单分析之后,该研究完成了生命周期影响评价,帮助ICA及其会员确定潜在环境影响最为显著的工艺。生命周期影响评价助力铜工业在运营过程中找准改进的机会。

潜在环境影响评价根据表3中显示的八个主要影响类别和能源需求进行。该评价方法,即EF 3.0,主要基于产品环境足迹(PEF)影响评价方法框架。该框架包含16个不同的潜在影响类别,被视为影响评估方法的一次高级更新。本报告中详述的八个主要影响类别与气候变化、能源效率和自然环境有关,也都是公众和机构高度关注的课题。所有16项指标的结果可应要求提供。但需要注意的是,“非生物耗竭潜势”和“毒性”影响的稳健性和准确性尚不足以用于金属评价。

注:先前的研究使用了荷兰莱顿大学的环境研究中心(CML)用于生命周期影响评价的表征方法。使用CML方法的各影响类别结果可应要求提供。

表3: 生命周期影响评价中的影响类别

影响类别	说明
气候变化	测量温室气体排放量,如二氧化碳和甲烷,使用IPCC 2001年全球变暖潜能指数(GWP100)进行计算。
富营养化潜势	测量导致生态系统中氮和磷的过量富集,从而导致氧含量降低的排放物。
酸化潜势	测量已知的导致酸雨的大气排放物的排放量。
光化学臭氧生成潜势(POCP)	测量在紫外线的照射下,氮氧化物和挥发性有机化合物(VOCs)反应产生的导致地面烟雾的前体物质排放量。
臭氧消耗	测量导致平流层臭氧层消耗,从而导致更高水平的UVB紫外线到达地球表面的大气排放物含量。
蓝水消耗量	蓝水是指地表水和地下水,不包括雨水。当水因蒸发而流失或被掺入产品中,因此在被抽取后没有返回到原始水源时,就会发生蓝水的消耗。
蓝水的使用量	指从水源抽取的地表水和地下水的使用量。
化石资源利用	测量从地球上开采的用于一次能源生产的不可再生化石资源(如石油、天然气等)的总量。

研究结果

表4列出了铜精矿和电解铜全球生命周期影响评价的绝对结果。通常情况下，LCA从业者所指的铜精矿在干重基础上具有一定的铜含量（约24%至36%的铜）。但当铜精矿被出售和运输时，它们通常含有8~10%的水。电解铜的相对结果按照工艺步骤和类别列出，见图5。

生命周期影响评价的结果有助于铜工业将注意力集中在解决那些改善环境绩效的优先问题上。

该研究发现：

- 冶炼过程中释放的、未被硫酸厂利用的**直接二氧化硫(SO₂)排放量**是导致**酸化潜势**的重要原因。酸化潜势的第二大驱动因素是电力，尤其是在依赖燃煤发电厂的电网中，具体取决于地方法规和安装的脱硫技术。
- 光化学臭氧生成潜势也主要由SO₂的直接排放以及氮氧化物(NO_x)和其他挥发性化合物等驱动。这些结果证实了铜工业减少SO₂现场排放量的持续重要性。
- 就气候变化这一环境影响类别而言，购电产生的排放量是最重要的促成因素。因此，铜业的环境概况在很大程度上取决于铜生产地区的电网结构。除电力以外，采矿过程中的柴油燃烧也是一个重要因素。
- 对于**海洋和陆地富营养化潜势**而言，其结果是由NO_x的排放引起的，主要与采矿过程中和某些矿区将精矿通过中间运输到冶炼厂过程中的柴油燃烧相关。对于**淡水富营养化**而言，其影响是由磷和磷酸盐排放到水中造成的。这些主要与废水处理和柴油燃烧有关。



- 对于**海洋和陆地富营养化潜势**而言，其结果是由NO_x的排放引起的，主要与采矿过程中和某些矿区将精矿通过中间运输到冶炼厂过程中的柴油燃烧相关。对于**淡水富营养化**而言，其影响是由磷和磷酸盐排放到水中造成的。这些主要与废水处理和柴油燃烧有关。
- **电力**因素应承担大约三分之一的责任，特别是拥有较高燃煤发电份额的电网。
- 对于**臭氧消耗潜势**而言，该影响几乎完全是由于R114（二氯四氟乙烷）的排放引起的，并且很大程度上取决于采矿作业中使用的炸药。电网内核电站的存在也是一个促成因素。

由于购电和精矿运输产生的排放物具有较大的环境影响，本研究结果强调了铜工业在铜生产商所在地区倡导环保型电力和燃料资源方面应发挥的作用。

表4：根据EF 3.0方法对铜精矿和电解铜进行LCIA的结果

影响类别	每公吨铜精矿的结果 (26% Cu)	精矿中每公吨铜含量的 结果	每公吨电解铜的结果 (99.99% Cu)	单位
气候变化	980	3788	3,965	kg CO ₂ 当量
富营养化潜势- 淡水	0.01	0.03	0.03	kg P 当量
富营养化潜势- 海洋	1.6	6.1	6.8	kg N 当量
富营养化潜势- 陆地	17.1	66	73.4	摩尔 N 当量
酸化潜势	6.8	26	53.8	摩尔 H ⁺ 当量
光化学臭氧生成潜势 (POCP)	4.5	18	20.7	kg NMVOC当量
臭氧消耗潜势(ODP)	2.1E-09	8E-09	6.5E-09	kg CFC-11当量
蓝水消耗量	23.6	91.1	57.3	公吨
蓝水的使用量	1035	4003	9,190	公吨
化石资源利用	11702	45252	46700	MJ

图5:按照影响类别列出的电解铜LCIA的相对结果



此研究结果为铜工业减少环境影响提供了一项基准,这一点变得越来越重要,由于铜在清洁能源转型中的重要作用,预计2050年铜需求量将增加一倍以上(ICA, 2023)。任何能够降低电力消耗或燃料燃烧排放物的效率提升方法都将最有可能减少对环境的影响。

铜生产和回收可从初级和次生原料中回收有价值的金属和副产品,如贵金属、镍、锌、铅和硫酸等。



参考文献

Hammarstrom, J.M., Zientek, M.L., Parks, H.L., Dicken, C.L., 及美国地质调查局全球铜矿产资源评估小组,《全球未发现铜资源的评估(2019年)》。检索自<https://doi.org/10.3133/sir20185160>

ICA (2023).《铜——实现净零排放的途径》。摘自《铜——实现净零排放的途径——国际铜业协会》

ICA (2017).《铜业环境概况》。摘自<https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2021/08/ICA-EnvironmentalProfileHESD-201803-FINAL-LOWRES-1.pdf>

ICSG (2022).《2021年世界铜业概况》。摘自<https://icsg.org/copper-factbook/>

PE International (2012).《原生电解铜的生命周期评价(全球研究)》,代表国际铜业协会(ICA)

Quantis (2022).《铜精矿和电解铜的生命周期评价》,代表国际铜业协会(ICA)

了解更多信息, 请联系:

Louise Assem
louise.assem@copperalliance.org

Ladji Tikana
ladji.tikana@copperalliance.de

文案作者:

Veronica Tuazon
veronica.tuazon@copperalliance.org

copperalliance.org