

铟资源供给与消费格局分析

李芳琴¹⁾, 黄 莉²⁾, 李 杰²⁾, 陈子瞻¹⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

摘 要: 铟资源广泛应用于 ITO 靶材、半导体化合物、焊料及合金等材料的生产制造, 是 21 世纪重要的战略金属。文章基于铟资源全产业链视角, 通过分析 2000 年以来全球铟资源供给与消费格局, 并展望未来供需趋势, 得出的结论主要有: (1) 全球再生铟供给已超过原生铟供给; 原生铟供给高度集中在中国、韩国、日本、加拿大四国; 再生铟供给集中于日本、韩国。(2) 全球铟资源消费量大幅增长, 二十年来, 翻了两番; 日本与韩国是全球铟资源的消费主体; ITO 靶材是主要消费领域。(3) 2007 年以来, 全球铟资源总供给量大于总消费量 600 t, 预判这部分增量进入了国家储备。(4) 未来中国增加铟资源供给的途经可以借鉴日本与韩国的经验, 从社会存量中再利用铟资源, 提高铟全产业链利用效率。

关键词: 铟资源; 供给/消费格局; 产业链; 关键矿产; 战略金属

中图分类号: F426 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.112401

Analysis of Indium Resource Supply and Consumption Pattern

LI Fang-qin¹⁾, HUANG Li²⁾, LI Jie²⁾, CHEN Zi-zhan¹⁾

1) Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083

Abstract: Indium is an important strategic metal in the 21st century and is widely used in the production and manufacture of ITO targets, compound semiconductors, solders, and alloys. By considering the indium industry chain, this study analyzed global supply and consumption of indium since 2000. This study considered the future supply and demand trends, and concluded the following: (1) Global supply of secondary indium has exceeded that of primary indium. Primary indium sources are highly concentrated in China, South Korea, Japan, and Canada, whilst secondary indium sources are concentrated in Japan and South Korea. (2) Global indium consumption has quadrupled in the last two decades. Japan and South Korea are the main consumers of global indium resources, with ITO targets the main consumption area. (3) Since 2007, the global supply of indium has exceeded global consumption by 600 tons. The excess is predicted to enter national reserves. (4) China can learn from the experiences of Japan and South Korea to increase their future supply of indium, reuse indium from the social stock, and improve the utilization efficiency of the indium industry chain.

Keywords: indium resources; supply/consumption pattern; industry chain; critical mineral; strategic metal

铟是一种银白色金属, 因具有较好的光渗透性和导电性而应用于 ITO(氧化铟锡)靶材领域, ITO 靶材广泛应用于手机/电脑/平板等显示屏、电视机液晶显示器、车载/飞机液晶显示屏等的生产制造。铟的高沸点、低电阻及抗腐蚀等特性使其在电子半导

体和无线电领域应用较广, 比如 InGaAs(铟镓砷)、InAs(砷化铟)可以促成集成电路的电子应用。在焊料和合金中掺入铟可以提高合金的强度、延展性等。除此外, 铟还用来制造 CIGS(铜铟镓硒)太阳能薄膜电池、在原子能工业中作为制造中子的指示剂

本文由国家自然科学基金重大研究计划集成项目“中国关键金属矿产清单厘定与风险评估”(编号: 92162321)、国家自然科学基金基础科学中心项目“数字经济时代的资源环境管理理论与应用”(编号: 72088101)、国家自然科学基金重大项目“新时代战略性关键矿产资源安全与管理”(编号: 71991480)、国家社会科学基金重大项目“自然资源高效利用与经济安全 and 高质量发展机制研究”(编号: 21&ZD104)和中国地质调查项目“全球矿产资源战略研究”(编号: DD20221795)联合资助。

收稿日期: 2022-10-08; 改回日期: 2022-11-17; 网络首发日期: 2022-11-30。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 李芳琴, 女, 1982 年生。博士, 副研究员。主要从事资源经济研究。E-mail: lifangqin.1@163.com。

等(图 1)。

进入 21 世纪以来, 随着以 ITO 靶材为代表的新材料产业的快速发展, 铜资源在全球范围内备受关注, 以美国(Graedel et al., 2015; Nassar and Fortier, 2021)、欧盟(Kayam, 2017)、德国(BGS, 2016)、日本(Hatayama and Tahara, 2015)为代表的发达国家均将铜列为关键原材料。未来一段时期, 全球经济增长伴随着技术变革将会增加包括铜资源在内的多种原材料的需求。尤其是在清洁能源技术快速发展的背景下, 迅速崛起的 CIGS 太阳能薄膜电池领域对铜的需求将会快速增加(Stamp et al., 2014), 预计到 2050 年, 全球 CIGS 领域对铜资源的需求将达到总需求量的 1/3(Elshkaki and Graedel, 2015)。可见, 铜资源在战略性新兴产业中的作用日益增强(李芳琴和李建武, 2018; 周艳晶, 2021), 然而, 面对日益增长的铜资源需求, 越来越多的学者对资源供应短缺问题表示担忧(Stamp et al., 2014; Grandell and Höök, 2015)。

全球铜资源供给由原生铜供给与再生铜供给两部分组成(见图 1)。其中: 原生铜主要来源于锌矿加工过程中产生的残渣(硬锌/含锌浸出液)。铜矿作为伴生资源, 在地壳中的含量极低(0.056×10^{-6})(Rudnick and Gao, 2014), 在自然界中主要与锌矿伴生, 伴生比例高达 100%, 这就决定了原生铜的供给严重受约束于锌矿的生产(Nassar et al., 2015; Choi et al., 2016), Choi et al.(2020)的研究结果表明在当前全球发展清洁能源的大背景下, 铜对于 CIGS 和 LED 照明这两种新兴清洁能源技术至关重要, 但作为副产品, 在竞争市场下, 使得供给决策变得更加复杂。再生铜主要包括两部分, 一部分是利用靶材废料加工回收的铜资源(Yang et al., 2013; Lin et al., 2019), 长期以来, 铜资源作为原材

料在生产制造过程中利用效率低的问题一直存在, ITO 靶材的溅射率为 30%, 意味着在这一过程中有 70% 的铜被损耗(杜轶伦等, 2014)。而 Licht et al. (2015)的研究结果表明纯铜加工成 ITO 薄膜的损耗率为 83%, 加工成合金和半导体的损耗率为 23%, 这些损耗的部分均是再生铜的重要来源。再生铜的另一部分指从终端报废产品(也即社会存量)中回收再利用铜资源(Li et al., 2022), Ciacci et al.(2018)运用物质流研究方法对欧洲地区铜社会存量的研究结果表明, 截至 2016 年, 累计存量约 500 t。Thiébaud et al.(2018)对瑞士境内的铜资源物质流研究表明铜在使用阶段的的社会存量最大。

本文从全产业链视角研究全球铜资源供给与消费问题, 对全球供给与消费格局现状及未来供需趋势进行研判, 以期理清全球铜资源供给与消费形势, 并得出相关结论, 为铜资源可持续供应提供支撑。

1 铜资源供给格局

1.1 全球铜资源分布概况

铜资源分布稀疏, 全球储量尚未有确切统计(储量指探明资源量和控制资源量中可经济采出的部分)。美国地质调查局(U.S. Geological Survey, 2008)对全球铜矿储量统计停留在 2008 年的 1.1 万 t, 储量基础为 1.6 万 t(He et al., 2014), 之后一直未作更新。目前的研究主要是依据含铜矿床中铜的品位估算铜资源量(资源量指探明资源量和潜在可采资源量), 比如, 徐净和李晓峰(2018)的研究结果表明: 全球铜资源总量主要集中在闪锌矿中。根据现有文献(Murakami and Ishihara, 2013; Werner et al., 2017)的统计数据, 全球铜资源量约 7.6 万 t, 其中 96% 以上的资源集中在: 中国、玻利维亚、俄罗斯、加拿大、

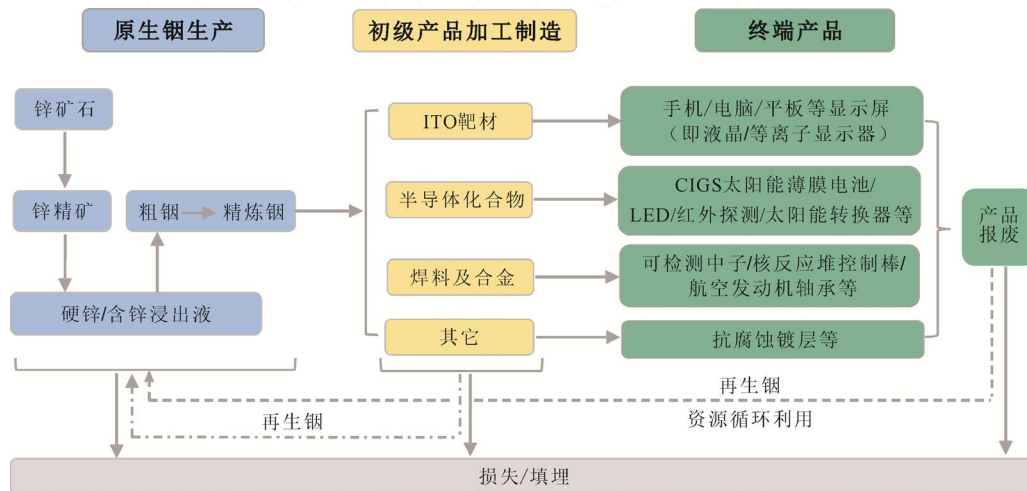


图 1 铜全产业链流程图

Fig. 1 Flowchart of the indium industry chain

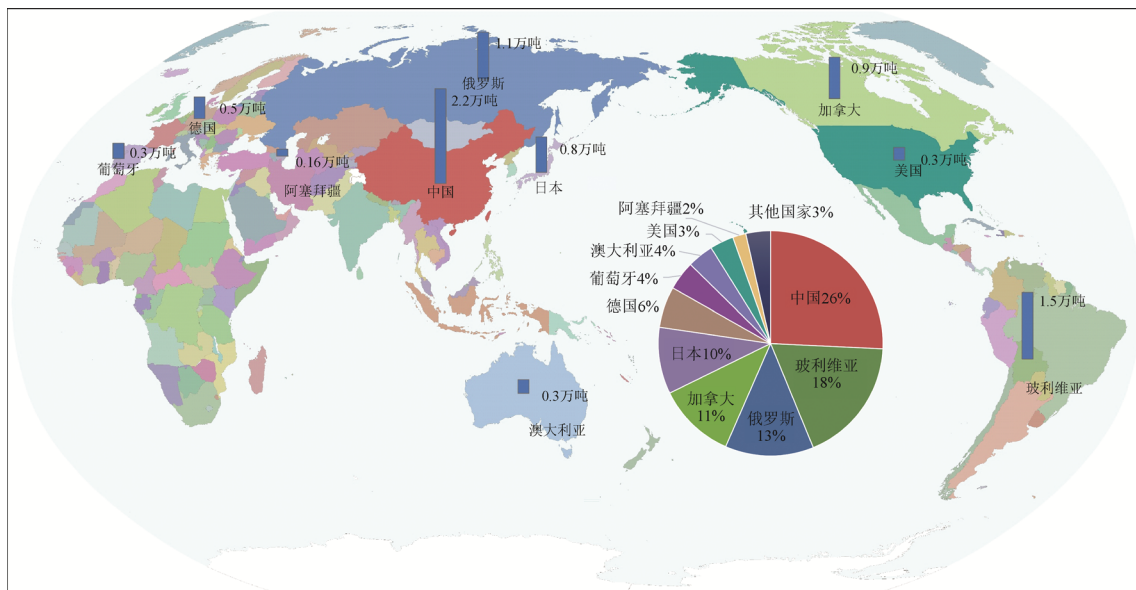


图2 全球钢资源量分布
Fig. 2 Global distribution of indium resources

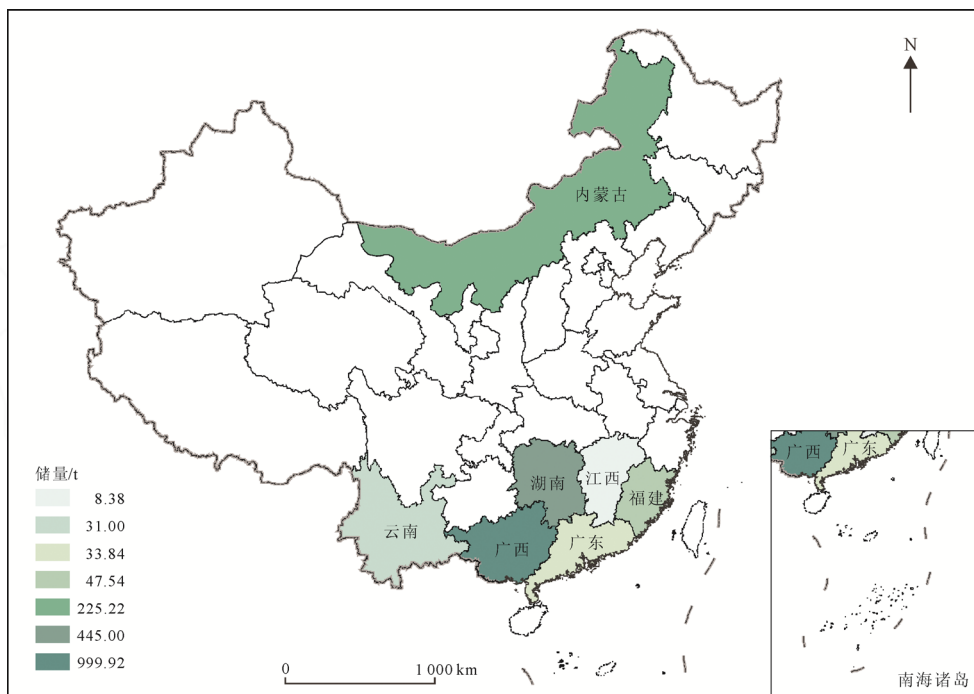


图3 中国钢储量
Fig. 3 China's indium reserves

日本、德国、葡萄牙、澳大利亚、美国、阿塞拜疆(如图2所示)。钢资源的伴生性、储量的不完全确定性,给全球钢资源的可持续供应带来风险,一定程度上制约钢资源配置利用,影响钢相关产业可持续发展。因此,很有必要研究全球范围内钢资源的供给格局。

中国钢储量最为丰富,居世界首位。中国已探明的钢资源分布相对集中,根据自然资源部公布的《2020年全国矿产资源储量统计表》,全国钢储量为1 792.77 t(图3),广西、湖南、内蒙、福建、广东、云南、江西7地占据了全国资源量的83%,其

中,广西储量最多,为999.92 t,占全国比例达55.8%;其次是湖南,储量为445 t,占比为24.8%;内蒙排名第三,为225.22 t,占比将近12.6%。

1.2 全球钢资源供给

1.2.1 原生钢供给

根据美国地质调查局(USGS)统计的原生钢产量,2000—2020年,全球原生钢产量逐年增加,由2000年的335 t增至2020年的960 t(图4)。20年来,全球原生钢产地高度集中:2000年,主要集中于中国(30%)、法国(21%)、日本(16%)、加拿大(14%)、比利时(13%),五国原生钢产量占比高达94%。2010

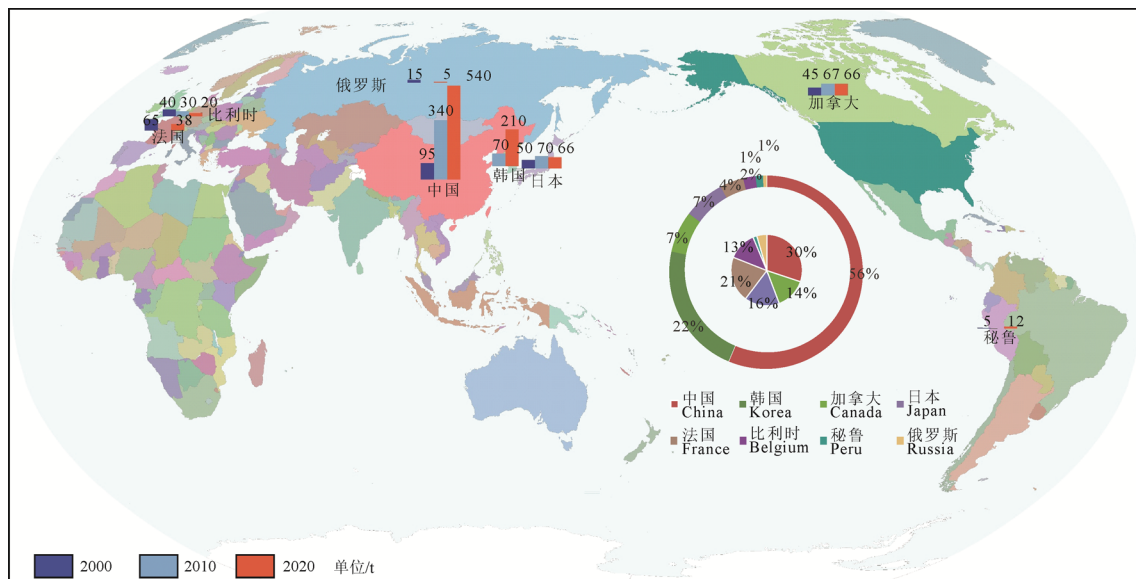


图4 2000、2010、2020年全球原生锑产量、分布及占比

Fig. 4 Global primary indium production, distribution, and proportion in 2000, 2010, and 2020

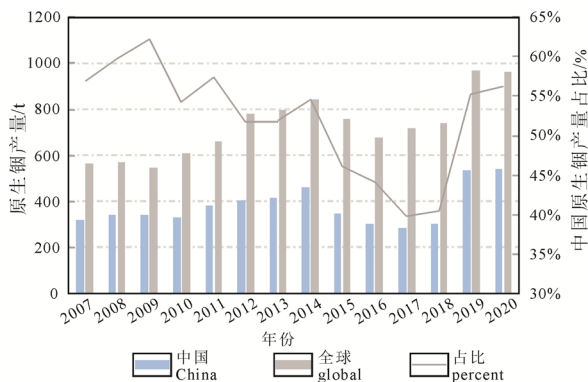


图5 中国/全球原生锑产量及占比

Fig. 5 Primary indium production

年,中国原生锑供给占全球总供给的比例约为54%,其次为韩国、日本、加拿大。2020年,原生锑产量主要集中于中国(56%)、韩国(22%)、加拿大(7%)、日本(7%)、法国(4%),五国产量占比高达96%。可见,全球原生锑供给主要集中在:中国、韩国、日本、加拿大等国。

中国原生锑产量在全球原生锑产量中居首要地位,如图5所示。根据USGS统计数据,2007—2014年,中国原生锑产量占全球的比例持续高于50%,在2009年占比达到最高值62%。随后,2014—2018年,由于“泛亚事件”的冲击,中国原生锑产量占全球比例大幅下滑,较为突出的是2017年与2018年,占比约40%。而之后,随着“泛亚事件”冲击的逐步缓冲,以及靶材领域对锑资源的强劲需求,中国原生锑产量开始提升,占全球的比例回升到50%之上。可见,中国是全球最重要的原生锑供给国,在2007年至今的大部分时间内,供给量超过了全球一半以上。

1.2.2 再生锑供给

再生锑的合理利用是提高资源配置效率、增加有效供给的重要途径。由于ITO靶材在溅射镀膜过程中损失较大,损失率高达70%,回收再利用报废ITO靶材中的锑资源具有回收周期短、经济可行的优势。同时,终端报废产品中的锑含量远高于矿物中的含量(Li et al., 2022),也是再生锑的重要回收来源。目前,日本是全球再生锑产量最大的国家,发达的ITO靶材制造业使得日本从ITO靶材废料及终端报废产品中回收锑资源的历史较早,回收技术成熟,再生锑可以满足其国内70%以上的需求(刘劲松和高丽丽, 2021)。

2007—2020年以来,日本再生锑供给量基本保持稳定;韩国再生锑的产量位居全球第二,近年来产量增幅较大;此外,中国再生锑产量增加趋势明显,但显然,与日本、韩国还有较大差距(图6a)。因此,全球再生锑供给格局表现为:日本、韩国为主要供给国,中国供给量保持逐步增加,以2020年为例,日本供给量占比为46%,韩国为38%,中国占比为16%(图6b)。

2 锑资源消费格局

2.1 全球锑资源消费历史

随着电子信息产业的迅猛发展,ITO靶材的应用得到了空前提升,2000年至2020年期间,全球锑消费量从450 t增加至1780 t,二十年来,消费量几乎翻了两番。尤其是2003—2007年期间,年消费增长率大幅提升,在2006年达到消费增长率的峰值36%,2008年至今以来全球锑消费量保持稳步小幅增长(图7)。

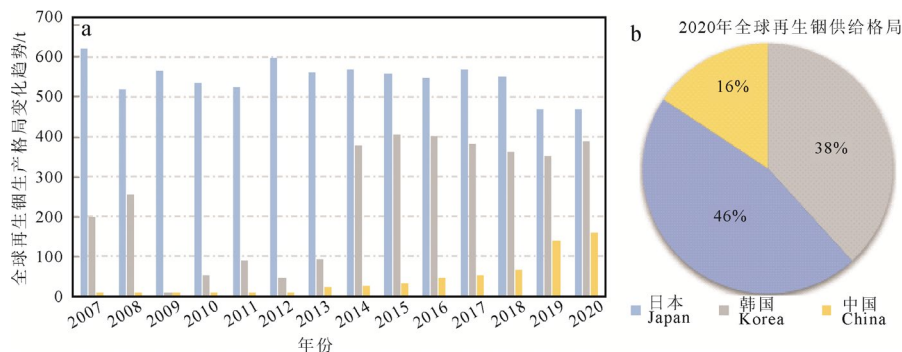


图6 2007—2020 年全球再生钢供给格局变化趋势(JOGMEC, 2019; 安泰科, 2022)

Fig. 6 Global supply of recycled indium for 2007–2020, for Korea, Japan, and China (JOGMEC, 2019; Antaike, 2022)

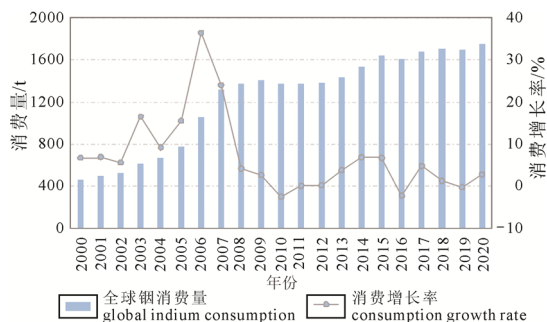


图7 全球钢消费历史变化趋势

Fig. 7 Historical trends in global indium consumption

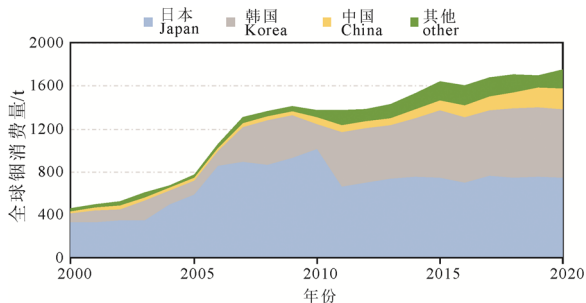


图8 全球钢消费格局

Fig. 8 Major indium-consuming countries

2.2 全球钢资源消费

全球钢资源消费表现出以日本、韩国为主的格局, 中国的消费量在逐步增长, 但与日、韩相比仍有较大差距(图8)。以2020年为例, 日本消费量约

750 t, 居全球首位, 占全球消费比例为 43%; 其次是韩国, 占比为 36%; 消费量排第三的为中国, 占比为 11%。

分析全球典型国家钢资源的消费结构发现: 消费量占全球最大的日本, 从2000年到2020年以来, 80%以上钢资源均应用于ITO靶材领域。二十年来, 中国整体消费量虽然占全球比例较小, 但有小幅增长趋势, 并且整体增量由ITO靶材领域的消费带动, 2000年, 中国ITO靶材消费量占比为18%, 2010年这一占比增至62%, 2020年则增至73%(图9)。可见, 全球钢资源消费结构基本保持稳定, ITO靶材行业为主要消费领域。

3 讨论与主要认识

3.1 全球钢资源供给与消费现状

总体上, 全球钢资源供给与消费格局表现为三个特征:

(1)全球再生钢供给已超过原生钢供给

全球钢资源供给由原生、再生两部分供给相结合。再生钢供给呈现逐步增加的态势, 近年来, 已基本超过原生钢供给量。2007—2020年的14年期间, 除去2010—2013年及2019年以外(其中2010年与2019年原生钢与再生钢供给量差距不大, 几乎相当), 其余年份全球再生钢供给量均超过原生

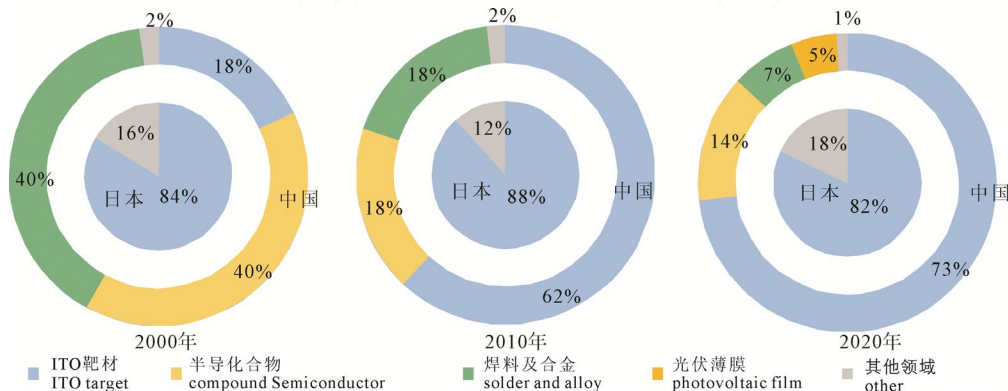


图9 典型国家钢消费结构变化

Fig. 9 Main sources of indium consumption in major indium-consuming countries

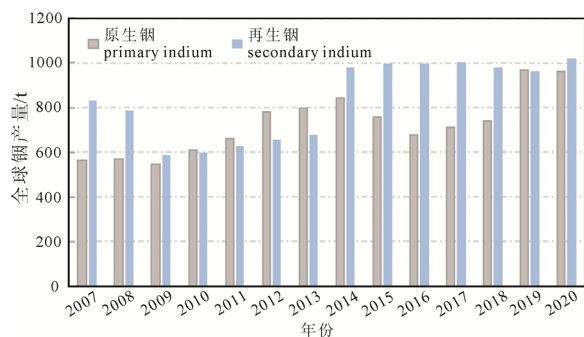


图 10 2007—2020 年全球原生钢/再生钢供给变化趋势 (JOGMEC, 2019; USGS, 2022; 安泰科, 2022)

Fig. 10 Global supply of primary and secondary indium for 2007–2020 (JOGMEC, 2019; USGS, 2020; Antaike, 2022)

钢供给量。尤其是最近几年，再生钢的供给量大幅提升，以 2016 年为例，再生钢产量为 997 t，占全球钢资源总产量的比例达到 59%(图 10)。总体上，全球钢资源供给形成了以中国、日本、韩国三国为供给中心的格局，其中，中国是原生钢的主要供给国，日本是再生钢的主要供给国，而韩国的原生钢与再生钢供给均占有重要地位。

(2)全球钢消费格局基本稳定，日本、韩国为主要消费国，ITO 靶材为主要消费领域

日本是全球钢消费量最大的国家。从 20 世纪末以来，日本在电子信息科技领域独占鳌头，科技的发展带动钢产业发展起步较早，包括回收钢资源在内的产业链健全，资源利用效率较高。同时，日本是全球钢相关产品(各类应用 ITO 靶材的显示屏、应用太阳能靶材的 CIGS 系统、应用复合半导体的通讯设备及 LED 光学设备等)高端制造的领头羊。比如，日本日矿、三井掌握着全球大尺寸高端 ITO 靶材生产制造的核心技术，半导体领域比较具有代表性的企业是日本住友，垄断了全球高端半导体的半壁江山。

除此外，韩国也是全球重要的钢消费国，消费量仅次于日本。自 1999 年以来，韩国以十年为单位制定科技发展战略，在电子信息领域，半导体生产制造领域起步较早，技术较为成熟。因此，钢产业链完备，并且掌握了钢产业相关高端 ITO 靶材生产、半导体制造技术，比较具有代表性的企业为韩国三星、LG。

尽管中国钢资源储量、原生钢供给量在全球排首位，但消费量却不高。Lin et al.(2019)基于物质流分析的研究结果表明，中国钢初级产品产量占世界产量的 50%以上，但国内消费不足 20%。同时，廖亚琴等(2014)的研究结果表明，中国钢深加工技术水平较低，飞机显示器所用 ITO 靶材 98%以上依赖于进口。可见，发展钢产业链下游，提升产品质量是未来中国钢资源发展方向。

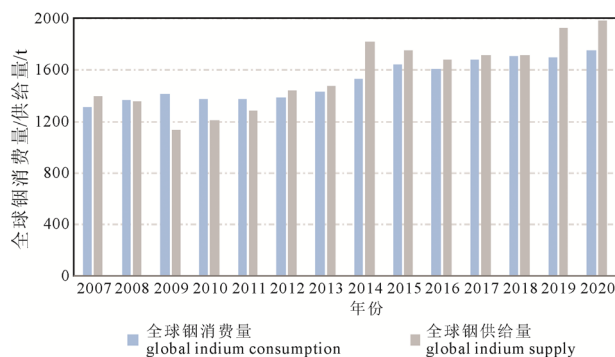


图 11 2007—2020 年全球钢供给量与消费量对比

Fig. 11 Global indium supply and consumption for 2007–2020

(3)全球钢资源供给量整体上大于消费量

在 2007—2020 年期间，除去 2008—2011 年外，整体上，全球钢资源供给量略大于消费量(图 11)。14 年期间，全球钢资源累计总供给量约 21 890 t，累计总消费量约 21 280 t，累计供给与累计消费之间的差值约为 600 t，预判这部分差量处于国家储备状态。

3.2 全球未来钢资源供给与需求展望

(1)全球钢资源需求趋势

未来，随着技术的进一步发展，对钢资源的需求可能会产生不同的影响。如果有新的钢资源应用领域的出现，可能会导致需求的增加；相反，如果有钢资源相关应用领域完全被消除，则可能会导致需求的减少。同时，随着技术的改进，钢资源利用效率随之提高，或随之出现替代材料，也可能导致需求减少。在没有出现上述重大技术突破的前提下，预判未来钢资源需求保持增长态势。Elshkaki and Graedel(2015)的研究也表明：在现有技术条件下，传统应用领域和光伏太阳能技术中对伴生金属钢的未来需求均会增加。

在传统领域，随着显示屏相关产品种类的不断推出，及各类产品更新迭代速度的加快，预计未来全球范围内 ITO 靶材方面对钢资源的需求将保持增加。随着 5G 时代的进一步推进，半导体方面，以磷化钢为代表的材料对钢资源的需求预计增速明显。

在发展清洁能源的大背景下，CIGS 薄膜太阳能电池具有污染小、弱光性能好、光电转换效率高等优势，被全球各国广泛认为是十分具有发展潜力的领域，目前尚处在产业化初级阶段。未来随着技术的进一步发展，CIGS 电池的性能有望提高并大规模进入商业化应用，预计到 2050 年，单是光伏太阳能发电领域对钢资源的需求将达到总需求的 34%(Elshkaki and Graedel, 2015)。

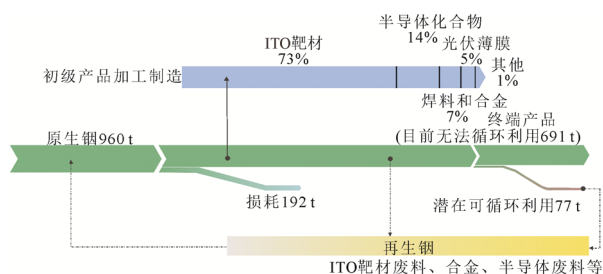


图 12 2020 年全球原生钢资源流量图(Li et al., 2022)
Fig. 12 Flowchart of global primary indium resources in 2020(Li et al., 2022)

(2)全球钢资源供给趋势

由于原生钢资源的伴生性,导致其供给严重依赖于锌矿的供需。目前全球精炼锌产量排名第一的中国(以 2021 年为例,产量 633 万 t, 占全球比例 45.5%),国内锌需求峰值期已经到来,这就意味着中国原生钢资源供给短时期内增速有限。而精炼锌产量排名前五的其余四国,由于供给分散且占全球的比例较小,以 2021 年为例,表现为:韩国占全球比例为 6.9%,印度占比为 5.6%,加拿大占比为 4.6%,日本占比为 3.8%,锌矿供给增幅有限,因此,原生钢供给增速有限。并且,Stamp et al.(2014)对全球 2010—2050 年能源发展情景与金属需求关联的研究结果表明:单独依靠精炼锌的生产供给原生钢资源将无法满足全球 CIGS 对钢资源的需求。也即,未来,仅从精炼锌的生产过程中提取原生钢资源,将不能满足日益增长的钢需求。

终端产品中聚积了大量钢资源(见图12),理论上,产品一旦寿命结束,便可通过一定技术手段对其中钢资源进行循环利用获得再生钢。全球学者做了大量研究,主要是围绕从报废液晶显示器中回收再利用钢资源展开(Zhang et al., 2017; Lahtela et al., 2019; Wang et al., 2020; Chinnam et al., 2020),也有少量研究是围绕报废发光二极管展开(Hasegawa et al., 2013; Boundy et al., 2017)。目前,整体上,这些研究大多停留在实验室阶段,但日本真正投入实际应用较早,比如早在2006年夏普公司就已经开始从报废液晶显示屏中回收并成功利用钢资源。未来,从终端报废产品中再利用钢资源是增加资源供给很有潜力的途经。

3.3 政策建议

尽管中国钢资源储量位居世界首位,原生钢供给位居全球第一,一再被认为是中国的“优势资源”。然而,通过本文的分析研究,中国的再生钢供给远远落后于日本、韩国;中国在钢产业链下游的高精尖产品制造上不具有优势。为此,基于中国钢资源全产业链视角,提出相关建议:

相比于日、韩而言,中国钢产业起步较晚,在高端 ITO 靶材制造、高端半导体生产方面缺乏核心

技术,容易被“卡脖子”。未来,需在产业升级、提高产品质量、增加产品附加值方面久久为攻,攻克核心加工制造技术,使“优势资源”在全产业链上真正变优。

提高钢资源全产业链利用效率是符合时代发展要求的必然举措。提高资源利用效率,意味着损耗减少,真正流入到终端实际供给的部分增加。提高钢全产业链利用效率需从两方面着手:一方面是钢产业链的上、中游环节,包括粗钢、精炼钢提取率的提升,以及初级产品加工制造阶段 ITO 靶材等利用效率的提高、从该阶段各种废料中提取再生钢效率的提高等;另一方面是从终端报废产品中再利用钢资源效率的提升,从产业链视角可以看出,除去损耗流失的部分,大部分钢资源均流向了终端,以社会存量的形式蓄积在各类终端产品。未来,随着消费量的进一步增加,社会存量也随之增加。因此,提高从终端报废产品中再利用钢资源的效率是增加资源供给的重要途径。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 92162321, 72088101, and 71991480), National Social Science Foundation (No. 21&ZD104), and China Geological Survey (No. DD20221795).

参考文献:

- 安泰科. 2022. 2021 年有色金属市场发展报告[R]. 北京: 安泰科咨询研究部.
- 杜铁伦, 张福良, 胡永达, 雷晓力, 易继宁, 陶银龙, 崔迪. 2014. 钢矿资源开发形势分析及管理对策建议[J]. 中国矿业, 23(2): 11-15.
- 李芳琴, 李建武. 2018. 金属矿产资源经济重要性评估研究[J]. 中国矿业, 27(12): 6-13.
- 廖亚琴, 李愿杰, 黄添懋. 2014. 透明导电薄膜现状与发展趋势[J]. 东方电气评论, 28(1): 13-18.
- 刘劲松, 高丽丽. 2021. 日本钢资源供需格局及其矿业政策分析[J]. 矿业研究与开发, 41(5): 188-194.
- 徐净, 李晓峰. 2018. 钢矿床时空分布、成矿背景及其成矿过程[J]. 岩石学报, 34(12): 3611-3626.
- 周艳晶. 2021. 中国钢资源动态物质流研究[D]. 武汉: 中国地质大学.

References:

- Antaika. 2022. Non ferrous metal market development report in 2021[R]. Beijing: Antaika Consulting and Research Department.
- BGS. 2016. Risk list 2015: An update to the supply risk index for elements or element groups that are of economic value[R]. UK: BGS Minerals UK Centre for Sustainable Mineral Development.
- BOUNDY T, BOYTON M, TAYLOR P. 2017. Attrition scrubbing for recovery of indium from waste liquid crystal display glass via selective comminution[J]. Journal of Cleaner Production, 154: 436-444.

- CHINNAM R K, UJACZKI É, O'DONOGHUE L. 2020. Leaching indium from discarded LCD glass: A rapid and environmentally friendly process[J]. *Journal of Cleaner Production*, 277: 122868.
- CHOI C H, CAO Jin-jian, ZHAO Fu. 2016. System dynamics modeling of indium material flows under wide deployment of clean energy technologies[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 114: 59-71.
- CHOI C H, KIM S P, LEE S, ZHAO Fu. 2020. Game theoretic production decisions of by-product materials critical for clean energy technologies-indium as a case study[J]. *Energy*, 203: 117768.
- CIACCI L, WERNER T T, VASSURA I, PASSARINI F. 2019. Backlighting the European indium recycling potentials[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 23(2): 426-437.
- DU Yi-lun, ZHANG Fu-liang, HU Yong-da, LEI Xiao-li, YI Ji-ning, TAO Yin-long, CUI Di. 2014. Analysis on the development of indium and recommended management strategies[J]. *China Mining Magazine*, 23(2): 11-15(in Chinese with English abstract).
- ELSHKAKI A, GRAEDEL T E. 2015. Solar cell metals and their hosts: A tale of oversupply and undersupply[J]. *Applied Energy*, 158(C): 167-177.
- GRAEDEL T E, HARPER E M, NASSAR N T, NUSS P, RECK B K. 2015. Criticality of metals and metalloids[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(14): 4257-4262.
- GRANDELL L, HÖÖK M. 2015. Assessing rare metal availability challenges for solar energy technologies[J]. *Sustainability*, 7(9): 11818-11837.
- HASEGAWA H, RAHMAN I M M, EGAWA Y, SAWAI H, BEGUM Z A, MAKI T, MIZUTANI S. 2013. Chelant-induced reclamation of indium from the spent liquid crystal display panels with the aid of microwave irradiation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 254-255: 10-17.
- HATAYAMA H, TAHARA K. 2015. Criticality assessment of metals for Japan's resource strategy[J]. *Materials Transactions*, 56(2): 229-235.
- HE Yun-xia, MA En, XU Zhen-ming. 2014. Recycling indium from waste liquid crystal display panel by vacuum carbon-reduction[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 268: 185-190.
- JOGMEC. 鉱物資源マテリアルフローインジウム(In)[EB/OL]. [2019-03-26]. <https://mric.jogmec.go.jp/>.
- KAYAM Y. 2017. Assessment of the methodology for establishing the EU list of critical raw materials: Background report[M]. JRC Technical Reports.
- LAHTELA V, VIROLAINEN S, UWAOMA A, KALLIOINEN M, KÄRKI T, SAINIO T. 2019. Novel mechanical pre-treatment methods for effective indium recovery from end-of-life liquid-crystal display panels[J]. *Journal of Cleaner Production*, 230: 580-591.
- LI Fang-qin, WANG Peng, CHEN Wei, CHEN Wei-qiang, WEN Bo-jie, DAI Tao. 2022. Exploring recycling potential of rare, scarce, and scattered metals: Present status and future directions[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 30: 988-1000.
- LI Fang-qin, LI Jian-wu. 2018. Study on economic importance assessment of metal mineral resources[J]. *China Mining Magazine*, 27(12): 6-13(in Chinese with English abstract).
- LIAO Ya-qin, LI Yuan-jie, HUANG Tian-mao. 2014. Status and development tendency of transparent conductive films[J]. *Dongfang Electric Review*, 28(1): 13-18(in Chinese with English abstract).
- LICHT C, PEIRÓ L T, VILLALBA G. 2015. Global substance flow analysis of gallium, germanium, and indium: Quantification of extraction, uses, and dissipative losses within their anthropogenic cycles[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 19 (5): 890-903.
- LIN Shao-hua, MAO Jian-su, CHEN Wei-qiang, SHI Lei. 2019. Indium in mainland China: Insights into use, trade, and efficiency from the substance flow analysis[J]. *Resources, Conservation & Recycling*, 149: 312-321.
- LIU Jin-song, GAO Li-li. 2021. Analysis on supply and demand situation of indium resources and mining policy in Japan[J]. *Mining Research and Development*, 41(5): 188-194(in Chinese with English abstract).
- MURAKAMI H, ISHIHARA S. 2013. Trace elements of indium-bearing sphalerite from tin-polymetallic deposits in Bolivia, China and Japan: A femto-second LA-ICPMS study[J]. *Ore Geology Reviews*, 53: 223-243.
- NASSAR N T, FORTIER S M. 2021. Methodology and technical input for the 2021 review and revision of the US Critical Minerals List[R]. Reston: US Geological Survey.
- NASSAR N T, GRAEDEL T E, HARPER E M. 2015. By-product metals are technologically essential but have problematic supply[J]. *Science Advances*, 1(3): e1400180.
- RUDNICK R L, GAO S. 2014. Composition of the continental crust[C]//TURELIAN H D, HOLLAND K K. *Treatise on geochemistry*(2nd Edition). Oxford: Elsevier: 1-51.
- STAMP A, WÄGER P A, HELLWEG S. 2014. Linking energy scenarios with metal demand modeling-The case of indium in CIGS solar cells[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 93: 156-167.
- THIÉBAUD E, HILTY L M, SCHLUEP M, BÖNI H W, FAULSTICH M. 2018. Where do our resources go? indium, neodymium, and gold flows connected to the use of electronic equipment in Switzerland[J]. *Sustainability*, 10(8): 1-17.
- USGS. 2022. Minerals commodity summaries: Indium[EB/OL]. [2022-1-31]. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-indium.pdf>.
- WANG Shuai, HE Ya-qun, FENG Yi, ZHANG Feng-bin, ZHANG Tao. 2020. Indium tin oxide recycling from waste colour filter glass via thermal decomposition[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 392: 122503.
- WERNER T T, MUDD G M, JOWITT S M. 2017. The world's by-product and critical metal resources part III: A global assessment of indium[J]. *Ore Geology Reviews*, 86: 939-956.
- XU Jing, LI Xiao-feng. 2018. Spatial and temporal distributions, metallogenic backgrounds and processes of indium deposits[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(12): 3611-3626(in Chinese with English abstract).
- YANG Jia-xu, RETEGAN T, EKBERG C. 2013. Indium recovery from discarded LCD panel glass by solvent extraction[J]. *Hydrometallurgy*, 137: 68-77.
- ZHANG Lin-gen, WU Bi, CHEN Ya, XU Zhen-ming. 2017. Energy and valuable resource recovery from waste liquid crystal display panels by an environment-friendly technological process: Pyrolysis of liquid crystals and preparation of indium product[J]. *Journal of Cleaner Production*, 162: 141-152.
- ZHOU Yan-jing. 2021. Dynamic material flow analysis of indium in China[D]. Wuhan: China University of Geosciences(in Chinese with English abstract).