煤的资源化利用–气化和化学品

在中国，煤的气化和液化与用于制造聚合物、纤维、肥料和燃料的商品化学品的生产结合，形成了一个新兴的煤化工产业。该产业的战略基础是通过利用本土资源来支持中国的能源和化工安全。煤制化学品目前已经发展成为一个全球性产业，并为中国提供一定程度的保护，使其免受原油价格波动影响。未来面临的一个重大挑战在于，煤制化学品的碳强度高于石化产品，且其生产一吨产品的耗煤量超过三吨。鉴于中国要到 2030 年实现碳达峰目标，因此这一挑战将带来严重问题。由于煤制化学品使水泥和钢铁生产以及煤电行业增产本已释放的排放雪上加霜，因此这一目标似乎岌岌可危.。

煤的气化、二氧化碳排放和脱碳

煤气化行业所生产的化学品和聚合物在质量上已经能够与在中国长期占主导地位的石化产业媲美。通过将甲醇制烯烃技术用于聚合物生产，煤气化的产物—原料合成气的 H2/CO 比率较低，因此一氧化碳可以与水反应生成氢和二氧化碳。对于聚合物而言，这意味着仅有不到三分之一的原始煤碳留在产物中，其余的则以二氧化碳的形式释放。在肥料生产中，由于涉及将煤转化为氢和氨，因此最终尿素产物中的煤碳含量要少得多。总体而言，中国的煤气化年排放量超过 1.1 吉吨二氧化碳，几乎是钢铁和水泥行业排放量的一半。

碳捕集：煤气化厂可以在甲醇生产之前捕集高度浓缩的二氧化碳流，因此提供了具有技术优越性且成本更低的碳捕集与封存路线。与发电、水泥和钢制反应器产生的相对稀释的排放流相比，煤气化厂释放的二氧化碳流更易于处理。煤气化厂的区位也有利于进行永久地质封存，避免进行过度基础设施建设。目前，示范装置已投入运行，其中一些装置专用于煤制化学品生产。整个产业的总体目标是每年实现 500 公吨的二氧化碳清除量，相当于现有全球碳捕集与封存产能的十倍。

氢：中国可再生能源产能的迅速发展和太阳能成本的持续下降，推动了基于可再生电力的电解水制氢技术的部署，从而有望将煤的气化与电解氢结合以改变合成气的成分，同时带来诸多优势。氢的加入可以减少二氧化碳和氢转化所需的一氧化碳和水的数量，同时提高产物中的煤碳比例。生产每单位产品所需的煤碳量更低，由此降低了处理成本。最终，原本必需的三台气化反应器可由一台反应器取代。目前，煤是中国最主要的制氢来源，而氢也是行业排放量最高的产物。因此，向电解氢过渡是业内的一个重大事件。使用可再生能源制氢具有间歇性特点，且所有制造装置均依赖于稳定的可再生能源供应，在这方面，就地储氢可能是一个可行的解决方案。电解成本必须与煤制氢工艺成本接近，且这似乎成为一个日益现实的方法。该混合生产方法可以使煤成为一种有价值的化学品生产资源，同时减轻对气候的影响。

塑料废弃物

除了行业碳强度外，塑料废弃物污染也是一大挑战。这一问题十分突出，并且随着回收率的低迷而加剧。这也是作为主要塑料生产来源的煤和石化产品面临的问题。煤制聚合物生产是中国的一项特有工艺，目前占国内聚合物产量的不到 20%。但是，到 2050 年，中国的聚合物产量可能占世界总聚合物产量的一半。回收方面的问题在于，大量不同种类的添加剂导致无法生产新鲜塑料，造成必须进行塑料降解。未

来的新研究有望带来改变，因为低温催化过程可以将塑料还原回单体组合物形式，从而使新的聚合物生产成为可能。塑料再生技术目前处于早期发展阶段，一旦该技术取得进展，则其可能给中国的化工产业带来问题。

塑料具有耐用性，在正常环境下可存在长达数百年。但是，塑料易发生机械降解，形成名为微塑料或纳米塑料的小颗粒。这些颗粒广泛存在于环境、水源和动植物中。塑料对健康的影响仍未明晰，但是，有迹象表明，塑料可能加速心血管病程的发展。近期的研究发现表明，塑料在大脑中可以穿越血脑屏障，这引起了人们的担忧，对该课题进行全面研究的呼声渐高。塑料已成为现代生活中的核心部分，聚合物市场预计到 2050 年将增长 50%，其中一半以上的增长归因于一次性包装。由于废弃物的产生以及投资者、企业和政府面对的令人不安的健康指标影响，塑料的使用可能受到更加严格的审查。

稀土元素和石墨碳

对于一系列使用电动机和电池的技术而言，稀土元素发挥着重要作用。国际能源署（IEA）预测，随着化石燃料的淘汰，未来数十年全世界的稀土元素需求将增加 7 倍。经合组织国家面临的一个问题在于，稀土元素资源均集中在中国。因此，迫切需要开发新的资源和建设独立的精炼产能。稀土元素与煤的结合是国际可持续碳中心关注的焦点。尽管这方面的重点在于从废煤和燃烧残余物中提取稀土元素，但是，近期在美国怀俄明州布鲁克煤矿发现的稀土元素，可能具有开创性意义。尽管与传统矿石相比，稀土元素的浓度较低，但是稀土元素更易于提取。在发现稀土元素之前，布鲁克煤矿的主要目标是在矿井头生产并交付碳产品，而非原材料。使用煤来生产石墨化合物有望降低材料成本，但是，煤中存在的杂质会带来一定的难度。新的方法是将煤与石化产品结合，形成适当的材料特性。例如，沥青与聚丙烯腈（PAN）碳纤维的混合既可以利用聚丙烯腈的高强度，也可以发挥沥青的高导电性优势，为能源和碳储存应用提供了新的可能性。碳的资源化利用仍在不断发展，且具有巨大的市场潜力，尤其在高吨位生产领域。

前景

中国的煤气化产业已达到全球化规模，其战略定位为利用本土原料提供替代化学品来源。但是，该行业的碳强度较高；尽管其目前仍处于行业扩张阶段，但是势头已经有所减弱。如果国际能源署的未来油价预测准确，则煤产物的经济可行性可能面临更多来自石化产品的竞争。气化技术在碳捕集方面具有优势，气化行业有望利用可再生能源发电来转变碳强度，并与石化产品进行竞争。对于未来项目而言，相比于原料供应安全，环境绩效和经济可行性可能是更加关键的考虑因素。

国际可持续碳中心（ICSC）在国际能源署（IEA）的支持下成立，但在职能和法律上均独立于国际能源署。国际可持续碳中心的观点、研究结果和出版物不一定代表国际能源署秘书处或其成员国的观点或政策。

每份执行摘要均基于一项详细研究，该相关研究另请参见：www.sustainable-carbon.org。本报告摘要：**煤的资源化利用—气化和化学品**，作者：伊恩·里德（Ian Reid）博士，ICSC/335，ISBN 978-92-9029-658-4，第 77 页，2025 年 1 月。.