

# 化工、冶金与材料领域颠覆性技术影响初探

“化工、冶金与材料领域”课题组

**摘要：**化工、冶金与材料工业通过获取自然资源进行再加工，生产人们生活所必需的材料、化学品和二次能源，为人类社会发展和国民经济建设提供了重要的物质基础。本文梳理了化工、冶金与材料领域历史上曾产生过的、公认的具有颠覆性意义的技术，分析了这类技术对人们日常生活、人类社会文明进步的影响和对传统技术的颠覆。并根据愿景驱动、问题导向和世界技术发展趋势，对化工、冶金与材料领域未来高效、安全、节能环保的可持续性科学发展模式，以及有望产生的颠覆性技术对国计民生的影响进行了展望，提出了浆态床渣油加氢转化技术、冶金制造流程功能拓展技术、石墨烯等具有颠覆性意义的技术。最后针对颠覆性技术的培育、发展和所需营造的环境提出了相关政策与建议。

**关键词：**化工；冶金；材料；颠覆性技术；国计民生

**中图分类号：**T-0   **文献标识码：**A

## Preliminary Study on Impact of Disruptive Technologies in Chemical, Metallurgical, and Material Fields

The Research Group of *Chemical, Metallurgical, and Material Fields*

**Abstract:** The chemical, metallurgical and material industries re-process natural resources to produce materials, chemicals, and secondary energies necessary for human life, thereby providing an important material basis for social development and economic construction. This paper reviews the recognized disruptive technologies in the history of chemical, metallurgical, and material industries, and analyzes the impact of such technologies on people's daily lives, the progress of human society, and the disruption of traditional technologies. According to vision driving, problem orientation, and the world technology development trend, we forecast the future sustainable science development models, which are efficient, safe, energy-saving, and environment-friendly, in the chemical, metallurgical, and material industries, and predict the impacts of possible disruptive technologies on national economy and people's livelihood. The slurry bed hydro-conversion technology, the metallurgical manufacturing process function expansion technology, grapheme, and other disruptive technologies are proposed. Finally, relevant policies and suggestions are put forward for the cultivation, development, and environment of disruptive technologies.

**Keywords:** chemical industry; metallurgy; material; disruptive technology; national economy and people's livelihood

收稿日期：2018-10-25；修回日期：2018-11-06

联系人：孙蓟泉，E-mail: sunjq@ustb.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“工程科技颠覆性技术战略研究”（2017-ZD-10）

本刊网址：www.enginsci.cn

## 一、前言

能源、粮食和材料是人类赖以生存和发展的物质基础,化工、冶金和材料领域的技术进步有力保障了人类文明的演进。石器时代、铜器时代、铁器时代,均以材料的特性与应用特征作为时代划分的标志。现代种类繁多的材料已成为人类社会发展的重要物质基础。各种化肥、农药、化纤织物增加了食品、衣服供应,满足了不断增长的人口需求,各种油品为现代交通工具提供了充足的动力。化工、冶金工业是生产制造和国民经济的中流砥柱,是国家生存和发展的保障 [1]。

化工、冶金与材料工业通过获取自然资源进行化学和物理加工,生产满足人类幸福生活必要的多样化的材料、化学品和二次能源。但是,由于认知的不足、技术的局限和短期利益的推动,也存在资源的过度开发和浪费,带来了环境的污染和二氧化碳过度排放。随着科学与技术的进步和认知的不断深化,人们开始重视社会的可持续发展,要求加工自然资源的化工、冶金与材料工业大力推进科技进步,实现绿色低碳可持续发展。过去的几十年,我国在化工、冶金与材料领域取得了巨大成就,为我国国民经济的快速发展做出了重要贡献。但是我们与发达国家还存在差距,要迎头赶上,就必须另辟蹊径。研究颠覆性技术时不我待,敏锐地识别、捕获和培育那些对经济社会发展、对国防和军工建设具有战略影响的颠覆性技术,有利于抢占新科技变革的战略主动权,奠定国家在世界竞争格局中的优势地位。根据这个要求,笔者梳理了化工、冶金与材料领域曾产生的颠覆性技术和带来的影响,研究了颠覆性技术产生与发展的背景和条件。根据愿景驱动、问题导向及世界的技术动向,提出了化工、冶金与材料工程领域未来颠覆性技术的发展方向,确定了未来可能引发的颠覆性技术。

## 二、化工、冶金与材料领域曾产生的颠覆性技术和所带来的影响

历史上化工、冶金与材料工程领域所产生的颠覆性技术,不仅颠覆了本领域传统生产工艺技术,而且对其他领域以及人类生活均产生了深远的影响。

### (一) 化工领域

化工领域颠覆性技术集中涌现于 19 世纪中叶至 20 世纪中叶,这一时期经历了人类历史上的第二次工业革命和两次世界大战。在此期间,人口迅速增长,经济高速发展,科学技术进步提速,人类生活方式发生巨大转变等,成为颠覆性技术从萌芽到现实的重要推动器。作为第二次工业革命科学技术进步的重要领域,石油化工工业为社会发展提供物质和能源基础,与人们的衣食住行息息相关,对社会发展和人类生活至今还有着重要的影响。颠覆性技术的诞生一方面极大满足了社会发展对石油化工技术和产品的需求,对改善人们的生活方式和提高生活质量起到了积极作用;另一方面化工领域颠覆性技术依靠全新的发展轨道展现出巨大的突破性和影响力,引导出了众多的相关产业,为人类社会创造出空前的生产力 [2]。

1. 改变了人们的生活方式,推动了社会文明进步

改变了人类的出行方式。催化裂化等技术的诞生满足了汽车工业规模化生产和战争对汽油、柴油、航煤等燃料的需求。通过不断的技术进步,逐渐提高其经济性和产品实用性,石油炼制产品替代煤炭,迅速成为主要交通燃料,人类进入石油时代 [3]。流化催化裂化等颠覆性炼油技术改变了人们的出行方式,极大便捷了人们的物流需要 [4]。

颠覆了世界粮食生产历史轨迹。合成氨工业化技术被公认为化学领域最重要的发明之一,从 20 世纪初该技术实现工业化以来,世界总人口增长了 4.5 倍,而粮食产量增长了 7.7 倍。据联合国粮食及农业组织 (FAO) 统计,化肥对粮食生产的贡献率占 50%。如果没有合成氨的发明,地球上将有 50% 的人口面临饥饿。由此可见,合成氨工业技术为世界粮食安全和人类生存发展作出了不可磨灭的贡献,至今仍处于不可替代的地位。

提供人类穿衣、住宿等生活物质保障。世界人口快速增长,天然染料、天然纤维、天然橡胶等已无法满足快速增长的市场需求。合成染料和三大合成材料化工技术的发明使染料、纤维、橡胶和树脂的来源转向石油化工,使丰富的石油资源为人口快速增长提供了充足的物质保障。合成染料、合成纤维和合成树脂的使用性能在某种程度上已优于天然材料,带来了衣料和建材革命。人们穿衣、住房不

再仅限于保暖和挡风蔽雨，更多的是美化生活，极大地提高了人们的生活质量。

2. 改变了原有生产方式，提高了生产力，促进了产业变革和能源革命

热裂化技术的诞生使石油炼制由一次加工发展成二次加工，由物理变化发展到化学反应，催化裂化技术使石油炼制过程由热加工转变为催化加工，这些技术都显著地提高了原油利用率，并生产出石油基化工原料。利用催化反应的优越性，原油的轻油收率提高到70%以上，产物中富含的异构化组分有效提高了汽油的辛烷值和柴油的安定性。加氢裂化技术可以加工催化裂化难以转化的重油，生产的石脑油辛烷值较高，生产的航空煤油和低凝柴油都表现出较高的燃烧性能和稳定性，生产的尾油可作为润滑油的原料。加氢技术不仅提高了原料的利用率，而且还是增产石脑油、喷气燃料、清洁燃料最重要的途径之一 [5]。

改变了原有生产方式。连续蒸馏实现了时间和空间上的连续运行状态，极大地提升效率，降低生产成本，奠定了石油化工成为流程工业的基础。加氢技术突破了原有炼油技术的反应理念，引入氢源，提高了原料适应性、产品清洁性和经济性，是炼油行业应对资源变化和环保限制等挑战的关键技术。从20世纪20年代开始，以石脑油为原料生产乙烯和芳烃的石油化工技术颠覆了传统的以煤为原料生产有机化工产品技术。当前，乙烯产量已成为衡量一个国家石油化工发展水平的标志 [6]。

## （二）冶金领域

18世纪60年代，机器的发明促进了第一次工业革命的兴起，制造机器则需要大量的金属材料，从而也促进了冶金工业的快速发展。冶金工业包括黑色冶金工业（即钢铁工业）和有色冶金工业两大类。纵观冶金生产流程的演变，在20世纪称得上颠覆性技术的是氧气转炉和连续铸钢，以及有色金属冶金方面的电解铝大型预焙槽和连续挤压等技术。

1. 改变了人们的生活方式，推动了社会文明进步

金属是人类文明，尤其是农业文明和工业文明最重要的物质基础。自青铜器时代以来，金属一直是人类制造生产工具和兵器的重要材料。金属的冶

炼水平决定了社会生产力的发展，随着工业革命的迅猛发展，19世纪中后期，转炉和平炉炼钢技术的出现，特别是20世纪中叶具有颠覆性技术意义的氧气顶吹转炉和连续铸钢技术的涌现，使人类真正进入了现代钢铁时代 [7,8]。在有色工业方面，拜耳法制取氧化铝和铝电解技术、铜闪速熔炼、锌湿法冶金等使有色金属工业得到快速发展，铝、铜、铅、锌等金属也得到大量应用，稀有金属和贵金属也进入规模工业化生产 [9]。金属材料在材料工业中无论是作为结构材料，还是作为功能材料（导电、电磁、防蚀等）都一直占有主导地位。

在近现代社会中，由于各种高科技技术的迅猛发展，在航空航天、国防、交通运输、家用电器，甚至文化艺术等诸多方面都有了金属材料的身影，可见金属材料早已融入了人们的日常生活，特别是高层建筑、家庭汽车的普及，彻底改变了人们的居住和出行方式，这一切都与以上所述的冶金领域颠覆性技术发展密不可分。

2. 改变了原有生产方式，提高了生产力，促进节能环保

氧气顶吹转炉炼钢是一种炼钢方法，自20世纪50年代初投入工业生产以来，在世界范围内迅速推广，目前已经全部取代空气转炉和平炉炼钢，彻底颠覆了传统的炼钢工艺，成为现代炼钢的主要方法。从转炉顶部吹入适量的氧气进行搅拌，可以强化冶炼过程，改善冶金条件，提高金属收得率和生产效率，降低原材料消耗，特别是对提升钢水质量，降低能源消耗具有重要意义。因此，氧气顶吹转炉炼钢工艺是钢铁冶金领域一项具有重大意义的颠覆性技术 [10]。

在生产各类钢铁产品过程中，钢水凝固成型有两种方法：传统的模铸法和连续铸钢法。20世纪50年代欧美国家相继出现了连续铸钢技术，将钢水直接浇注成形。连续铸钢技术是一种将钢水不断地通过水冷结晶器，凝成硬壳后从结晶器下方出口连续拉出，经喷水冷却，全部凝固后切成坯料的铸造工艺。它与通常钢锭模铸相比，具有提高生产效率、增加金属收得率，节能减排，提高铸坯质量，改善劳动条件，便于实现机械化、自动化等优点。20世纪70年代的两次能源危机以后的能源价格上涨，有力地推动了连续铸钢技术的发展，目前除少量特钢外其他都实现了全连铸生产，彻底颠覆了传统的

模铸生产,大幅度降低了成本,大幅度提高了生产效率和生产规模,改变了钢厂发展模式[11]。

近几十年来,有色金属工业的生产效率得到很大提高。高效拜耳法氧化铝生产和大型电解铝预焙槽技术使原铝产量显著提高而能耗下降;铜的富氧闪速熔炼和熔池熔炼在保证大规模生产的同时,环境也得到了改善;新的湿法冶金工艺,如加压浸出、溶剂萃取、离子交换、生物冶金及新型电解技术使锌、铜、镍、钴及许多稀有金属和贵金属生产效率提高,成本明显降低。有色金属工业生产过程的装备大型化、连续化和自动化得以逐步推广应用。连续挤压技术由于没有挤压余量,有材料利用率高、产品成品率高、生产效率高以及耗能少等优点,在有色金属领域得到广泛应用,从而颠覆了传统的长材加工流程[12]。

### (三) 材料领域

材料是人类文明、社会进步的物质基础。人类生活使用的器物都是由各种材料制作的,由于工业革命与科学技术的发展促使材料不断更新换代,新材料不断涌现,新材料种类更加多样化[13]。在先进结构材料、生物医用材料、高性能纤维材料、新能源材料、无机非金属材料、稀土材料、超导材料、传感材料及石墨烯材料等领域都涌现出一些颠覆性技术的典型案例。下面以先进结构材料、生物医用材料和新能源材料为例来阐述颠覆性技术对人们生活方式和生产方式带来的变革。

1. 改变了人们的生活方式,推动了社会文明进步

超超临界火电机组是世界电力构成的最主要组成部分,大容量、高效率、低能耗的高蒸汽参数超超临界电站是未来我国电力能源发展的必然趋势。高强韧和长寿命的铁基、铁镍基、镍基耐热材料研发及其关键部件制造是超超临界火电机组的核心问题,是实现火电机组效率提高和电站安全、可靠运行的关键,其大规模应用能降低煤耗,降低二氧化碳等污染气体的排放量,具有很高的经济性。

生物医用材料是用于对生物体进行诊断、治疗、修复或替换其病损组织、器官或增进其功能的新型高技术材料。它是研究人工器官和医疗器械的基础,已成为材料学科的重要分支。其应用不仅挽救了数以千万计危重病人的生命,而且极大地提高了人类

的健康水平和生命质量[14]。

新能源材料主要有太阳能电池材料、储氢材料、燃料电池材料等。本文只选取薄膜太阳能电池材料技术和高能量密度锂离子动力电池材料技术作为颠覆性技术的典型案例。太阳能电池是通过光伏效应将太阳能转化为电能的一种装置,是利用太阳能的重要形式。薄膜太阳能电池则是以光电功能薄膜作为吸收层的太阳能电池,其吸收层材料用量少、生产成本低,也可以采用柔性基体,易于实现光伏建筑一体化[15]。

我国是汽车保有量的大国,但内燃机汽车核心技术缺乏自主知识产权,而电动汽车的技术水平与国外无明显差别,并在高能量密度锂离子动力电池材料领域开发出颠覆性技术,它凸显的技术经济性和竞争实力,有助于实现我国汽车产业反超传统汽车强国的捷径,对我国经济发展、提升国际竞争力具有长远战略意义。

2. 改变了原有生产方式,提高了生产力,促进节能环保

新材料领域的颠覆性技术给人们的日常生活带来重大影响,对经济社会发展具有重要的推动作用,是世界科技强国战略竞争的前沿。下面仅就3D打印、超导材料、石墨烯及其他新型二维材料、材料基因工程等举例阐述。

3D打印技术作为制造业领域迅速发展的一项新兴技术,催生着材料领域的变革。在3D打印领域,材料是技术的核心之一,3D打印过程不仅涉及到了成形工艺,还包含了材料的制造工艺,材料技术的深度参与,将材料工艺嵌入3D打印工艺当中,实现材料、成形工艺同步开发。3D打印广泛应用在机械制造、医疗、建筑、汽车制造等行业,突破金属粉末材料的制备技术,是未来3D打印技术面向高端制造领域的关键。

超导材料具有常规材料所不具备的零电阻、完全抗磁性和宏观量子效应,是当代凝聚态物理中最重要的研究方向之一,也是新材料领域一个十分活跃的重要前沿,它与凝聚态物理中一系列有重大意义的基本科学问题都有紧密联系。超导应用技术伴随着材料制备技术的突破、材料性能的不断提高以及低温系统成本的降低,目前在国际上已处于大规模应用突破前的准备期。超导材料的广泛应用,可以节省能耗、减少二氧化碳排放,对推动节能环保

产业技术升级发挥着重要作用。

石墨烯及其他新型二维材料是凝聚态物理与材料科学领域研究的前沿。大尺寸、高质量二维材料的制备对探索新的物理现象和性能非常重要，并且在未来的电子、光电子器件领域具有巨大的应用价值。近年来，以磷烯、硅烯、锗烯、铅烯、锡烯、氮化硼、硒化铟、硫化钼为代表的过渡金属硫化物及过渡族金属碳化物等二维材料都取得了一定的研究进展，极大地拓展了二维材料的性能和应用。未来基于二维材料的器件应用有望突破传统半导体工艺面临的各种限制与挑战，促进微纳电子领域的创新与发展。

材料基因工程给材料传统研发模式及思维方式带来变革，实现快速、低耗、创新发展新材料。它的核心关键问题为建立高通量自动流程计算模型，实现与高通量材料组合设计制造与检测，以及材料数据库融合协同运作。通过建模与计算实现对材料成分设计、结构预测、加工制备以及服役行为和过程的定量表述，揭示材料化学因素和结构因素与材料性能、功能之间的相关机制及内在规律，为创制新材料、实现按需设计材料提供科学基础。

### 三、展望

未来经济发展应该是一种高效、安全、环保和可持续性的科学发展模式。作为国民经济基础产业，化工、冶金与材料工程领域所发生的颠覆性技术，不仅对本行业的生产方式起到引领作用，而且还会对其他行业产生重大影响。

#### （一）化工领域

当前我国经济发展进入“新常态”，更加注重发展质量、环境保护和资源节约，实现能源清洁生产与能源和资源的高效利用以及开辟重要基础石化原料资源路线是我国石油化学工业绿色清洁可持续发展面临的主要难题，浆态床渣油加氢转化技术和甲烷直接制烯烃/芳烃技术将可能成为我国化工领域的颠覆性技术。

浆态床渣油加氢转化技术兼顾经济性和清洁性，是未来实现重劣质原油清洁高效转化的关键技术，代表了当今炼油工业的先进水平，具有广阔的应用前景。随着浆态床渣油加氢转化技术的不断成

熟，将逐步取代焦化等轻质油收率较低的劣质渣油加工技术。浆态床渣油加氢转化技术的大规模工业应用，将显著提高石油资源的利用率并改善产品清洁度和渣油加工过程的清洁化程度，极大地促进炼油工业实现绿色低碳和转型发展，对人类生存环境产生积极的影响 [16]。

甲烷直接制烯烃/芳烃技术包括甲烷氧化偶联制乙烯技术、甲烷无氧转化制烯烃/芳烃技术。甲烷氧化偶联制乙烯技术经历了初期快速发展、衰退、再复兴的历程，目前进入工业示范阶段；甲烷无氧转化制烯烃/芳烃技术尚处于实验室研究阶段。甲烷直接制乙烯/芳烃技术将颠覆以石脑油为原料的传统乙烯/芳烃生产模式，改变现有石油产品结构，开辟一条重要的基础石化原料生产的新资源路线，对于拓展我国石化原料来源、满足我国日益增长的石化产品需求均将发挥重要作用。同时，新技术路线在碳原子利用效率上具有相对优势，更有利于石化工业向绿色低碳方向转型发展。

#### （二）冶金领域

在工业化后期，资源匮乏、能源危机、环境恶化日趋严重，冶金工业发展受到严重挑战。同时也为现有冶金工业发展提供了机遇，在冶金流程工程学指导下，冶金制造流程功能拓展，发挥其废弃物消纳—再资源化功能，与其他行业或社会构建循环经济生态链，一方面变“废”为宝，在减少自身排放量的同时，消纳城市废弃物；另一方面寻求废弃物资源化、高值化利用途径，在满足废弃物排放要求的同时，提升废弃物的价值，使得传统的冶金工业生产模式成为绿色生产的循环经济发展模式。冶金产业循环经济发展模式的应用将影响冶金制造流程废弃物的排放量、排放形态，冶金行业与其他行业，冶金企业与城市、社会的关系。绿色生产的循环经济发展模式的概念已被大多数钢厂接受并进行应用（如高炉渣供应水泥、副产煤气供应化工过程生产化工产品），但尚未形成颠覆性影响；有色冶金企业创新高效分离和提取的绿色有色冶金技术，使原料（包括二次资源和矿石）中的有毒有害元素尽可能资源化或无害化，对环境的影响减到最小 [17]。

此外，在当前钢铁工业去产能的趋势推动下，未来废钢资源将逐步丰富，加之铁矿资源的限制，

为电炉炼钢技术的发展和應用提供了资源前提，低碳（废钢）时代的新型电炉技术将成为黑色冶金领域改变现有传统生产流程工艺的一种创新技术，对中国钢铁工业流程结构、模式和布局、铁素资源消耗、能源消耗和碳排放产生重要影响 [18]。

在氧化铝生产领域具有颠覆性的技术为零排放清洁生产氧化铝技术，该技术首先从理论上摆脱了拜耳法生产氧化铝对铝土矿铝硅比品位的限制，低品位铝土矿也可以生产氧化铝；其次，是实现了大幅度降低赤泥中钠和铝的含量，从根本上解决了赤泥的大规模、低成本、无害化和资源化再利用难题。由此取得了零排放清洁生产氧化铝技术和低成本规模化消纳赤泥技术，具有显著的经济效益和良好的应用前景。

### （三）材料领域

习近平总书记曾指出：材料是制造业的基础，目前我国在先进高端材料研发和生产方面差距甚大，关键高端材料远未实现自主供给。因此先进高端材料研发刻不容缓，如石墨烯、超材料等。

石墨烯是碳的一种同素异形体，虽然结构简单，却集中了一系列优异的理化性质，使得石墨烯有望在诸多应用领域中催生出一系列颠覆性技术，可以为一大批传统材料的性能提升与应用提供有力支撑，在新能源、石油化工、电子信息、复合材料和生物医药等领域的应用将引起相关行业的变革，成为引领新一代工业技术革命和未来高技术竞争的战略前沿新材料 [19]。

超材料指的是利用人工结构获得的、具有自然材料所不具备的超常性质的人工材料。近年来，超材料也从电磁领域逐渐走向了力学、声学、热学以及传质等领域，一系列具有超常性质和奇异功能的新型超材料相继问世，其中备受瞩目的是电磁隐身材料。超材料隐身技术将超越让电磁波反射和吸收的隐身手段，通过制备超材料覆盖物引导电磁波绕射传播，达到隐身目的。由于这类材料提供了诸多颠覆传统理论和常识的新功能，可促使一系列新的颠覆性技术的诞生。

总之，化工、冶金与材料工程领域为各行各业提供安全、环保、可靠的绿色材料，极大地改变了人们的生活方式，未来也必将为人类的文明进步做出更大的贡献。

## 四、政策建议

### （一）加强基础科学研究

基础理论研究和原始创新是颠覆性技术的源头，没有基础研究的厚积薄发，就没有能力掌握颠覆性技术，产业发展也就无异于无源之水、无本之木，就难以迈向中高端水平。对于化工、冶金与材料领域应进一步加强前瞻性、导向性的应用基础研究，为新材料的涌现和化工、冶金领域新工艺和新流程的涌现奠定坚实的科学技术基础。化工、冶金与材料领域基础研究竞争力的提升不但有利于解决国民经济与社会发展中的关键科学问题，而且可以通过基础理论的源头创新促进颠覆性技术的产生与发展。

### （二）重视学科交叉

人类社会正面临越来越复杂的发展难题，靠单一学科往往难以解决，多学科交叉越来越受关注。突出学科交叉融通性，就是要考虑科技创新的上下游融通和不同学科的融通，在交叉学科领域耕耘具有颠覆性意义的原创性成果。要从根本上破除原有学科划分的科研管理和学科组织模式，打造一套交叉、开放和共享的学科运行机制，各学科互相配合，联合攻关，培养复合型科研人才。重视材料生产与转化过程中的工程设计和工程技术研究。对于化工、冶金与材料领域，不仅各领域内部新技术相互渗透、相互借鉴促成各领域颠覆性技术的产生与发展，同时，提供原材料、燃料的其他领域也可以相互交叉融合，促进颠覆性技术的产生。

### （三）营造颠覆性技术的成长环境

颠覆性技术由萌芽到飞跃需要必要的基础技术积累，而且是长期的过程，且具有不确定性。因此需要加强顶层设计，建立颠覆性技术的长效研究机制。建立更为灵活、宽容的颠覆性技术发展环境，优化科研项目筛选与评审机制。营造敢于挑战权威、宽容失败、自由探索的创新氛围，鼓励科研人员勇于超越现有技术体系与模式，尝试新的研究思路，充分激发科研人员的创造力。营造出适合颠覆性技术产生的土壤与环境，为颠覆性技术完成由萌芽到成长所需要的时间和技術积累提供保障。

#### (四) 重视技术积累与投入力度

颠覆性技术的发展，源自于各领域技术的融合或传统技术深化后实现的飞跃突破。如果缺少必要的应用技术积累，即使发现了颠覆性技术的潜在方向，也很难实现持续提升与突破，因此必须扎扎实实地完成技术积累。深入推进化工、冶金工业强基工程，关键基础材料、先进基础工艺和质量技术基础发展不足，不仅制约我国化工、冶金工业的发展，也是航空、航天和交通领域发展的重要短板，因此要以国家重大项目、重大工程的需求为导向，加强化工、冶金与材料领域应用技术的积累，并加大支持力度，特别是对一些冷门的技术创新项目进行择优资助。

#### (五) 建立科学的评判标准

早期预测、识别颠覆性技术是开展颠覆性技术研究的关键，但其评判标准和方法却是一把双刃剑，用好了可以促进颠覆性技术的培育与发展，用得不好会阻碍甚至会扼杀颠覆性技术。因此，建议主管部门进一步加强理论研究，提高科技政策制定的前瞻性，逐步建立颠覆性技术的识别、培育机制与评判标准，使其评判标准愈加科学，顺应国际最新发展趋势，实施前瞻性的战略举措。根据国民经济和社会发展重大需求及科技前沿发展趋势，着眼未来国家竞争力，抢占科学制高点，聚焦创新链的前端，提前对产业链进行战略性部署。

#### (六) 培养与调动科技人员的积极性

人才是建设科技强国的重要支撑。党的“十九大”报告指出，要培养造就一大批具有国际水平的战略科技人才、科技领军人才、青年科技人才和高水平创新团队。充分调动科技人员的积极性，是形成颠覆性技术的必要条件，是我国走在世界创新前列的可靠保证。激发科技人员持久的创新动力，加快改革科研项目管理机制，砍掉繁文缛节，让科技人员把更多精力用到研究上。要加快改革科研评价机制和人才评价机制，防止短期效应。让更多优秀人才脱颖而出，扩大高校和科研院所自主权，赋予领军人才更大的科研决策权。

#### (七) 建立“产学研用”融合的颠覆性技术培育机制

颠覆性技术从发现到成熟再到工业应用需要一

个长期的培育过程，建议完善以企业为主体、“产学研用”深度融合的颠覆性技术培育机制；建议设立颠覆性技术发展基金，支持潜在的颠覆性技术研究，降低企业颠覆性技术创新的风险；对于趋于成熟的颠覆性技术，通过税收减免、贴息贷款等政策支持推动工业化项目的建设，营造适合于颠覆性技术产业化发展的综合环境。

#### 致谢

非常感谢邱定蕃院士、周济院士对本文提出的宝贵意见和进行的修订工作。

#### 参考文献

- [1] 师昌绪. 关于构建我国“新材料产业体系”的思考 [J]. 工程研究, 2013, 5(1): 5-11.  
Shi C X. Reflections on the construction of China's "new material industry system" [J]. Journal of Engineering Studies, 2013, 5(1): 5-11.
- [2] 王才良, 周珊. 炼油工艺技术发展史话 [J]. 石油知识, 2013 (2): 32-36.  
Wang C L, Zhou S. History of refining process technology development [J]. Petroleum Knowledge, 2013 (2): 32-36.
- [3] 曹湘洪. 面向未来, 我国生产汽油的技术路线选择 [J]. 石油炼制与化工, 2012, 43(8): 1-6.  
Cao X H. The choice of China's gasoline production process route for the future [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2012, 43(8): 1-6.
- [4] 陈俊武. 催化裂化工艺与工程 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2005.  
Chen J W. Catalytic cracking process and engineering [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2005.
- [5] 任文坡, 李振宇, 李雪静, 等. 渣油深度加氢裂化技术应用现状及新进展 [J]. 化工进展, 2016, 35(8): 2309-2316.  
Ren W P, Li Z Y, Li X J, et al. Application situation and new progress of residuum deep hydrocracking technologies [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(8): 2309-2316.
- [6] 袁晴棠. 中国劣质原油加工技术进展与展望 [J]. 当代石油石化, 2007, 15(12): 1-6, 49.  
Yuan Q T. Technical advances in China's bad crude oil processing and its prospect [J]. Petroleum and Petrochemical Today, 2007, 15(12): 1-6, 49.
- [7] 殷瑞钰. 新世纪以来中国炼钢-连铸的进步及命题 [J]. 中国冶金, 2014, 24(8): 1-9.  
Yin R Y. Progress and propositions of Chinese steelmaking and continuous casting since the new century [J]. China Metallurgy, 2014, 24(8): 1-9.
- [8] 王一德, 唐荻, 党宁. 国外特殊钢产业的特点及发展趋势 [J]. 钢铁, 2013, 48(6): 1-6.  
Wang Y D, Tang D, Dang N. Characteristics and development trend of foreign special steel industry [J]. Iron and Steel, 2013,

- 48(6): 1-6.
- [9] 邱定蕃. 有色工业的可持续发展之路 [J]. 世界有色金属, 2013 (9): 22-23.  
Qiu D F. The sustainable development of nonferrous industry [J]. World Nonferrous Metals, 2013 (9): 22-23.
- [10] 王新华, 李金柱, 刘凤刚. 转型发展形势下的转炉炼钢科技进步 [J]. 炼钢, 2017, 33(1): 1-11, 55.  
Wang X H, Li J Z, Liu F G. Technological progress of BOF steelmaking in period of development mode transition [J]. Steelmaking, 2017, 33(1): 1-11, 55.
- [11] 张兴中. 我国连续铸钢技术的发展状况和趋势 [J]. 钢铁研究学报, 2004, 16(6): 1-6.  
Zhang X Z. Evolution and trend of continuous casting technology in China [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2004, 16 (6): 1-6.
- [12] 刘静安, 谢水生, 赵云路. 几种铝加工新技术 [J]. 轻合金加工技术, 2017, 45(3): 6-18.  
Liu J A, Xie S S, Zhao Y L. New aluminum processing technologies [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2017, 45(3): 6-18.
- [13] 屠海令, 张世荣, 李腾飞. 我国新材料产业发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2016, 18(4): 90-100.  
Tu H L, Zhang S R, Li T F. Research on development strategies for China's advanced materials Industry [J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(4): 90-100.
- [14] 张兴栋, 蔡开勇, 张璇. 生物医用材料展现经济转型步伐 [J]. 中国战略新兴产业, 2014 (22): 50-51.  
Zhang X D, Cai K Y, Zhang X. Biomedical materials show the pace of economic transformation [J]. China Strategic Emerging Industry, 2014 (22): 50-51.
- [15] 赛迪智库. 锂离子电池产业发展白皮书2017 版 [R]. 北京: 工业和信息化部赛迪研究院, 2017.  
Sadie Think Tank. Lithium-ion battery industry development white paper 2017 [R]. Beijing: Saidi Institute of Industry and Information Technology, 2017.
- [16] 曹湘洪, 袁晴棠, 刘佩成. 中国石化工程科技2035 发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2017,19(1): 57-63.  
Cao X H, Yuan Q T, Liu P C. Development strategy for China's petrochemical engineering science and technology to 2035 [J]. Strategic Study of CAE, 2017, 19(1): 57-63.
- [17] 殷瑞钰. 钢铁制造跨入新流程时代 [J]. 中国经济和信息化, 2013 (23): 18-19.  
Yin R Y. Steel manufacturing enters the new process era [J]. China Economy and Informatization, 2013 (23): 18-19.
- [18] 邱定蕃. 资源、环境、能源是影响中国有色金属工业可持续发展的基本要素 [J]. 矿冶, 2003, 12(3): 34-36.  
Qiu D F. Resource, environment and energy regarded as basic factors to affect sustainable development of China nonferrous metals industry [J]. Mining and Metallurgy, 2003, 12 (3): 34-36.
- [19] 刘兆平, 周旭峰. 浅谈石墨烯产业化应用现状与发展趋势 [J]. 新材料产业, 2013 (9): 4-11.  
Liu Z P, Zhou X F. Talking about the present situation and development trend of graphene industrialization application [J]. Advanced Materials Industry, 2013 (9): 4-11.