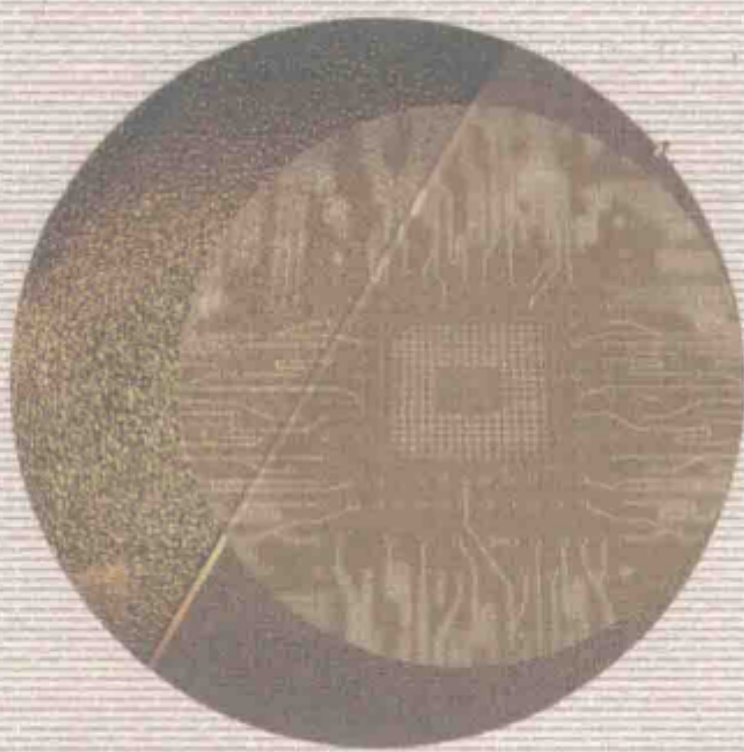


Metal Matrix Composites Industry
Technology Roadmap of Guangdong Province

广东省

金属基复合材料 产业技术路线图

主 编 郑开宏



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

广东省

金属基复合材料 产业技术路线图

主 编 郑开宏

副主编 高义民 王 娟



华南理工大学出版社
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

· 广州 ·

内 容 简 介

技术路线图作为一种技术创新、管理创新的战略集成规划工具,遵循科学规律和科学方法,在产业层面上使用,强调“市场拉动”作用,对产业和技术的发展具有巨大的推动作用。

中国的金属基复合材料产业建设还处于孵化阶段,与国际工业发达国家相比还存在较大差距,如何推动广东省的金属基复合材料的市场应用,乃至产业化、规模化发展,是本技术路线图需要回答的问题。

本书基于广东省金属基复合材料产业的现状,系统分析了产业链的构成,以及金属基复合材料在航空航天、汽车、轨道交通、电工、电子、采矿、冶金、水泥、电力等市场的应用状况;分析了市场需求,确定了产业目标;识别了技术壁垒;对研发需求进行系统优先排序,提出了符合广东实际的金属基复合材料产业技术发展模式;对政府、高校、科研院所和企业的产业政策制定、产业技术研究、产业开发具有指导意义。

图书在版编目 (CIP) 数据

广东省金属基复合材料产业技术路线图/郑开宏主编. —广州:华南理工大学出版社, 2018. 12

ISBN 978 - 7 - 5623 - 5534 - 2

I. ①广… II. ①郑… III. ①金属基复合材料 - 材料工业 - 产业发展 - 研究 - 广东
IV. ①F426. 32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 326050 号

广东省金属基复合材料产业技术路线图

郑开宏 主编

出 版 人: 卢家明

出版发行: 华南理工大学出版社

(广州五山华南理工大学 17 号楼, 邮编 510640)

http: //www. scutpress. com. cn E-mail: scutc13@scut. edu. cn

营销部电话: 020 - 87113487 87111048 (传真)

责任编辑: 吴翠微

印 刷 者: 广州一龙印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 11 插页: 1 字数: 169 千

版 次: 2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷

定 价: 48.00 元

版权所有 盗版必究 印装差错 负责调换

编写委员会

主 编：郑开宏

副主编：高义民 王 娟

参 编：（按姓氏笔画为序）

王海艳 邓 超 甘春雷 龙 骏 冯 波

闫志巧 罗铁钢 周 楠 郑志斌 林颖菲

徐 静 董晓蓉 路建宁 黎小辉

前 言

金属基复合材料兼具各组分材料性能特征，通过复合效应获得原组分所不具备的新性能，是典型的高新技术材料，是21世纪最具发展潜力的高性能材料之一，在航天航空、汽车、轨道交通、电工、电子、采矿、冶金、水泥、电力等领域具有广阔的应用前景。国务院发布的“《中国制造2025》重点领域技术路线图”、各级地方政府新材料规划对高性能金属基复合材料提出了明确的需求及发展布局。

广东省金属基复合材料的产业发展仍在起步阶段，部分方向发展势头良好，其中耐磨钢铁基复合材料与高强高导铜基复合材料已实现规模产业化。然而，由于金属基复合材料制备技术相对困难和复杂，大部分金属基复合材料发展相当缓慢，主要体现在：制备工艺不成熟、材料性能不稳定，以及由此导致的成本高，不能大批量供应，尤其是难以大规模商业化应用。

为了推动广东省金属基复合材料产业的发展，在广东省科技厅支持下，由广东省材料与加工研究所牵头，建立广东省金属基复合材料产学研创新联盟，承担《广东省金属基复合材料产业技术路线图》的制定工作。技术路线图工作组在收集和整理了200余份专家调研问卷的基础上，邀请了政府机关、高校、科研院所、企业及相关协会的国内知名金属基复合材料管理专家和技术专家，分别在广州、佛山、清远召开大型研讨会，按照产业技术路线图制定的原理和方法，遵循“市场需求—产业目标—技术壁垒—研发需求”路线，对广东省金属基复合材料产业进行系统全面分析，确立广东省金属基复合材料产业目标，识别符合广东省实际的金属基复合材料技术发展模式。

本书共分为9章。第1章介绍了金属基复合材料产业技术背景。对比

了国内外金属基复合材料产业进展,明确了广东省金属基复合材料产业范围和边界,提出了广东省金属基复合材料产业的愿景和目标。第2章介绍了广东省金属基复合材料产业的市场需求。通过分析国内外及广东省金属基复合材料应用市场和发展趋势,筛选出金属基复合材料的市场需求,运用德尔菲法和头脑风暴法,确定广东省金属基复合材料产业市场需求要素。第3章介绍了广东省金属基复合材料的产业目标。以广东省金属基复合材料产业市场需求要素为基础,构建分析矩阵,得出广东省金属基复合材料产业在市场拉动下需要优先实现的产业目标,指明广东省金属基复合材料产业的近期、中期和长期方向。第4章剖析国内及广东省金属基复合材料产业的知识产权,为掌握我国金属基复合材料产业发展趋势及驱动力,明确产业发展定位,识别未来市场的产业需求方面提供有用的竞争情报。第5、6、7和8章分别对金属基复合材料的典型代表——钢铁基复合材料、铝/镁基复合材料、铜基复合材料和钛基复合材料的技术现状、技术壁垒和研发需求进行分析,明确了顶级研发项目。第9章,综合对市场需求、产业目标、技术壁垒和研发需求的分析,形成广东省金属基复合材料产业技术路线图综合版。

希望本书能为我国从事金属基复合材料产业有关的政府部门、行业组织及高校、科研院所和企业界科技工作者等提供参考。

目 录

1	制定广东省金属基复合材料产业技术路线图的背景	1
1.1	我国的金属基复合材料产业	1
1.2	国内外产业的对比	2
1.3	广东省金属基复合材料产业现状与 SWOT 分析	4
1.4	任务和愿景	5
1.5	广东省金属基复合材料产业范围和边界	6
1.6	产业技术路线图制定过程和方法	7
1.6.1	基本流程	7
1.6.2	制定方法	10
2	广东省金属基复合材料产业的市场需求	13
2.1	金属基复合材料的应用市场分析	13
2.1.1	航空航天	13
2.1.2	汽车、轨道交通	15
2.1.3	采矿、冶金、水泥、电力	17
2.1.4	电工、电子	19
2.2	广东省金属基复合材料的市场需求要素	21
3	广东省金属基复合材料的产业目标	23
3.1	广东省金属基复合材料的产业目标要素	23
3.2	广东省金属基复合材料产业的绩效目标	25

4	我国金属基复合材料产业的知识产权分析	27
4.1	数据来源	27
4.2	颗粒增强金属基复合材料的国内专利概况	28
4.2.1	申请量趋势分析	28
4.2.2	专利地域分布分析	29
4.2.3	专利权人分析	30
4.2.4	专利技术领域特征分析	32
4.3	广东省颗粒增强金属基复合材料产业知识产权状况	40
4.3.1	专利权人分析	40
4.3.2	专利法律状态分析	41
4.3.3	专利技术特征分析	43
5	钢铁基复合材料	45
5.1	概述	45
5.2	技术现状分析	46
5.2.1	颗粒增强钢铁基复合材料的制备技术	46
5.2.2	非氧化物陶瓷颗粒增强钢铁基复合材料	48
5.2.3	氧化物陶瓷颗粒增强钢铁基复合材料	51
5.3	技术壁垒分析	54
5.4	研发需求分析	56
5.5	研发项目描述	57
6	铝/镁基复合材料	63
6.1	概述	63
6.2	技术现状分析	64
6.2.1	颗粒增强铝/镁基复合材料的制备技术	65
6.2.2	颗粒增强铝/镁基复合材料的后续加工及处理技术	88

6.2.3	颗粒增强铝/镁基复合材料的连接技术	93
6.3	技术壁垒分析	95
6.4	研发需求分析	98
6.5	研发项目描述	100
7	铜基复合材料	110
7.1	概述	110
7.2	技术现状分析	111
7.2.1	颗粒增强铜基复合材料增强相的选择	112
7.2.2	颗粒增强铜基复合材料的制备技术	114
7.2.3	颗粒增强铜基复合材料的后续加工技术	116
7.2.4	颗粒增强铜基复合材料的应用	119
7.3	技术壁垒分析	122
7.4	研发需求分析	124
7.5	研发项目描述	125
8	钛基复合材料	130
8.1	概述	130
8.2	技术现状分析	131
8.2.1	非连续增强钛基复合材料增强体与钛基体的选择	132
8.2.2	非连续增强钛基复合材料的制备技术	134
8.2.3	非连续增强钛基复合材料的后续加工技术	136
8.2.4	非连续增强钛基复合材料的应用	143
8.3	技术壁垒分析	145
8.4	共性技术壁垒	146
8.5	研发需求分析	148
8.6	研发项目描述	148

9 广东省金属基复合材料产业技术路线图 (综合版)	154
9.1 广东省金属基复合材料产业分领域技术路线图	154
9.2 广东省金属基复合材料产业链技术路线图	157
附录1 参与本路线图制定工作的专家	160
附录2 广东省金属基复合材料产业技术创新联盟简介	161
附录3 广东省材料与加工研究所简介	162
致谢	163

1 制定广东省金属基复合材料产业 技术路线图的背景

1.1 我国的金属基复合材料产业

目前，金属基复合材料的应用广度、生产发展的速度和规模，已成为衡量一个国家材料科技水平的重要标志之一。以用量计算，美国、欧洲、日本是位列前三的金属基复合材料消费大国和地区，超过2/3的金属基复合材料为其所用，这与它们作为发达国家和地区的地位相符。我国尚未形成全面的金属基复合材料产业及行业标准与军用标准，仅少数研制单位具有小批量的配套能力。虽然我国的金属基复合材料产业品种、规格单一，但仍然为我国国防和军工建设提供了有力的支撑。

轻质高强多功能金属基复合材料在航天、航空、国防先进武器等军事领域的应用具有不可替代性，是典型的军民两用新材料。也正是由于金属基复合材料特殊的国防应用背景，国外对核心技术和产品严格保密。随着我国在空间技术、航天航空、高速交通、通讯电子等领域的综合实力的提升，对高性能金属基复合材料的需求日益增加，例如汽车发动机零部件、高速列车制动系统、电子封装及核废料辐射防护等。近年来，瞄准中国的金属基复合材料巨大的市场空间，西方一些金属基复合材料公司在中国建立了若干合资或独资企业，但是并没有也不可能转移相关技术。为了避免受制于人，必须尽快提升我国自主的金属基复合材料生产和应用水平。

金属基复合材料的应用是一项系统工程，包括原材料开发、制备技术与设备、复合材料研制、材料标准化、材料成本控制、材料加工、材料表面处理、材料的焊接以及结构设计师对金属基复合材料的认知程度、社会保障机制等，在这些系统性环节中，我国的研发能力是优越的，但其他工

业环节十分薄弱，金属基复合材料评价体系、标准等软环境，还有相关精密加工、焊接、成形等后续关联技术目前开展得很少，不能支撑金属基复合材料大范围应用。目前，我国金属基复合材料还处于分散经营、各自为政的状态，大部分的金属基复合材料产品研发阶段为初试和中试阶段，只能满足小批量配套供应。

1.2 国内外产业的对比

据 BCC Research^① 的数据显示，预计 2020 年全球轻金属基复合材料产量为 8859 吨，规模为 43.1 千万美元，年复增长率保持在 5.8%，市场主要分布在亚太、北美、欧洲等地区。近年来受全球经济危机及世界各国经济发展进程不同的影响，全球金属基复合材料市场结构正在逐步发生变化，美、日、欧等发达国家和地区金属基复合材料市场相对饱和，增速较为缓慢，而亚太地区长期以来人均复合材料消费水平较低，市场潜力巨大，因此保持稳定增长。目前，亚太地区是全球产能占比最大的地区，占全球总产能 1/3。根据应用领域不同，金属基复合材料市场可细分为陆上运输、电子/热控、航空航天、工业、消费产品等 5 个部分，其中，陆上运输（包括汽车和轨道车辆）和高附加值散热组件仍是金属基复合材料的主市场，用量占比分别超过 60% 和 30%。

国外的金属基复合材料的研究与开发始于 20 世纪 50 年代，制备技术成熟，主要在航空航天领域有较大范围的应用，在汽车、热控、电子、医疗等其他方面，金属基复合材料也取代了部分传统金属，用于高端产品中。20 世纪 80 年代，金属基复合材料迅速发展，西方发达国家开始注重颗粒增强金属基复合材料的开发。美国著名的武器制造公司洛克希德·马丁公司开发将碳化硅增强铝基复合材料作为飞机上承放电子设备的支架来使用。在美国国防部“Title”项目的支持下，洛克希德·马丁公司和

^① <https://www.bccresearch.com/market-research/advanced-materials/metal-matrix-composites-market-report.html>.

DWA 复合材料公司及空军军方合作，将 SiC_p/Al 复合材料大胆尝试用作 F-16 战斗机的腹鳍材料，其刚度比 7075 合金提高了 65%，有效保证了飞行安全性。20 世纪 90 年代末，开始尝试将 SiC_p/Al 复合材料应用在大型客机上，惠普公司从 PW4084 发动机开始，将挤压态的 SiC_p/Al 复合材料用作生产风扇出口导流叶片，用于采用 PW4000 系列发动机的波音 777 客机上。美国于 20 世纪 90 年代中后期提出铝基复合材料产业联盟的方案，由几个国家制造中心（NCMS）组成，联盟的成立得到美国材料和制造总局的大力支持，在 1997 年 12 月正式签署协议书。联盟最初集中研究非连续增强铝基复合材料，其主要产品有：雪佛兰 Corvette 和通用 S/T 皮卡驱动、plymouth Prowler 刹车转子和通用 EV-1 刹车片、丰田柴油汽车发动机活塞、Pratt & Whitney 4000 系列引擎风扇等。金属基复合材料可作为非结构功能材料应用，提高陶瓷增强体体积分数，有效降低其热膨胀系数，同时保持较高的热导率，在微电子封装领域得到应用。典型应用如摩托罗拉公司的铱星计划和通用公司的电子封装材料。金属基复合材料在一些对性能要求较高的民用产品领域也具有较大的应用潜力，现在已研制出可批量生产的纳米复合材料赛车传动轴。在体育休闲领域，如自行车车架及零件，赛艇和游艇的发动机活塞、传动轴等。另外，金属基复合材料还可应用于高速切削刀架、核废料储存设备和煤矿绞车离合器等。总体上，国外金属基复合材料在航天航空、汽车、热控和民用方面的应用起步较早，已经解决金属基复合材料的设计、生产和工程化的问题，并在重要结构上实现了应用。

相对于国外，我国在金属基复合材料方面的研究起步于 20 世纪 80 年代初期，90 年代末成功开发大气环境下的压力浸渗技术，推动了颗粒增强复合材料、晶须增强复合材料、碳纤维增强复合材料在航天领域的应用。2000 年后，随着我国粉末冶金法、搅拌铸造法、原位生成法等制备方法的成熟，在海、陆、空、天、电子等各军事领域开始了普及应用。2010 年后，在民用设施中，例如矿山机械的球磨机衬板、锤头等也开始

了批产。目前,我国已经形成若干金属基复合材料新技术产业链,特别是面向电子行业的电子封装复合材料发展迅速,已经成为大功率电子器件、微波器件壳体、热沉的标准配置。

美国对金属基复合材料研究起步最早,投入最大,也是得到应用终端产品最多的国家,日本和英国紧跟其后,也出现了一些拥有成熟生产工艺的生产企业。目前国内与国外金属基复合材料技术发展、产业化发展相比仍存在一定差距,一是市场还不成熟,设计者对金属基复合材料的认知还有待于材料研究者做更多的证明性工作;二是缺少企业间的联合,技术壁垒较强;三是缺少权威性的国家标准等。

1.3 广东省金属基复合材料产业现状与 SWOT 分析

为了应对市场和技术发展的需求,专家们对广东省金属基复合材料产业领域的优势(strengths)、劣势(weaknesses)、机会(opportunities)和威胁(threats)进行了分析,获得本技术领域的 SWOT 如表 1-1 所示。

表 1-1 广东省金属基复合材料产业 SWOT 分析

内部因素	内部优势(S): 1) 金属基复合材料性能优于基体金属 2) 兼具结构性和功能性	内部劣势(W): 1) 缺乏系统的基础理论研究 2) 材料的结构与制备工艺需设计 3) 制备工艺不完善 4) 制造成本较高,难以大规模生产
外部因素	外部机会(O): 1) 国家对金属基复合材料研发的支持力度较大 2) 航空航天领域轻量化结构的发展趋势 3) 金属基复合材料在民用领域的巨大市场需求	外部威胁(T): 1) 原材料价格上涨 2) 节能降耗、环境保护形势严峻 3) 其他复合材料对金属基复合材料的冲击

通过对 SWOT 的分析,形成的 SO、WO、ST、WT 战略分别如下。

SO 战略（依靠内部优势，利用外部机会）

- ①开展新型金属基复合材料研发，提高其综合性能；
- ②拓展金属基复合材料在航空航天领域的应用；
- ③开发低成本金属基复合材料，扩大其在民用领域的应用。

WO 战略（利用外部机会，克服内部劣势）

- ①加大对金属基复合材料基础理论研究的投入；
- ②开展航空航天用金属基复合材料的复合构型设计；
- ③降低金属基复合材料的加工与制造成本。

ST 战略（依靠内部优势，回避外部威胁）

- ①开发兼具结构性与功能性的低成本金属基复合材料；
- ②开发节能环保的金属基复合材料制备工艺，实现绿色制造；
- ③拓展金属基复合材料的应用领域。

WT 战略（减少内部劣势，回避外部威胁）

- ①开展金属基复合材料增强体与基体的润湿、界面反应等基础理论研究；
- ②开发高效低成本的制造工艺及装备，实现大规模生产；
- ③完善金属基复合材料结构与工艺设计理论。

1.4 任务和愿景

广东省金属基复合材料技术路线图制定的重要任务是：通过技术路线图这一技术创新管理工具，分析和掌握广东省金属基复合材料的产业地位、状况、市场需求、产业目标和技术壁垒，立足广东、放眼全国，提出在国内外有影响的金属基复合材料产业当前与未来发展的战略思路。凝练出金属基复合材料领域所涉及的主要技术、重大研发需求和技术项目，确定其优先排序并指出项目的技术难点及风险、完成时间节点、效益和回报等，并制定出相应的实施计划，就广东省金属基复合材料产业的发展提出

相关的建议。

愿景目标

通过5~10年的努力，发挥广东省制造业的规模优势，进一步突破金属基复合材料的制备与成形加工技术，实现稳定化规模化制造，开拓金属基复合材料在民用领域的应用市场，使广东省成为国内重要的金属基复合材料研发与产业化基地。

1.5 广东省金属基复合材料产业范围和边界

金属基复合材料范畴的界定是一个长期以来存在争议的话题。从复合材料的定义出发，凡是包含金属相在内的双相和多相材料都可归于广义的金属基复合材料，如定向凝固共晶层片或纤维组织（如 $\text{Al}_3\text{Ni-Al}$ ， Al-CuAl ， Ni-TaC ， Ni-W ）、双相金属间化合物层片组织（如 $\gamma\text{-TiAl}$ ）、珠光体钢、高硅铝合金（ Al-Si ）等，然而这些材料习惯上被看作是金属合金，而不是金属基复合材料。

对于比较狭义的金属基复合材料而言，依据基体合金的种类可分为：轻金属基复合材料、高熔点金属基复合材料、金属间化合物基复合材料。按增强相形态的不同可划分为：连续纤维增强金属基复合材料、短纤维增强金属基复合材料、晶须增强金属基复合材料、颗粒增强金属基复合材料、混杂增强金属基复合材料。按增强体的引入方式不同可分为：外加增强金属基复合材料、原位生成金属基复合材料。

颗粒增强金属基复合材料兼具金属与非金属的综合性能，材料的强韧性、耐磨性、耐热性、导电导热性及耐候性能适应广泛的工程要求，且比强度、比模量及耐热性超过基体金属，对航空航天等尖端领域的发展具有重要作用。目前已发展为铝基、镁基、钛基、铜基以及钢铁基等多种材料。在过去的二十几年中，颗粒增强金属基复合材料以其更好的性价比和可加工性能，逐渐地从军事国防向民用领域渗透，如今已在交通运输、电

子封装、民航、工业和体育休闲产业等诸多领域实现商业化的应用，形成了初具规模的产业。

广东省金属基复合材料产业技术路线图的产业链构成与边界是依据产业当前的发展现状和今后一段时期市场需求的产品以及发展的趋势来界定的。因此经专家讨论，将颗粒增强金属基复合材料作为广东省金属基复合材料产业技术路线图的主要内容。按材料分，主要包括铝/镁基复合材料、钢铁基复合材料、铜基复合材料、钛基复合材料等4个主要部分的材料开发、制备工艺、生产装备以及应用技术等方面。

广东省金属基复合材料产业范围与边界如图1-1所示。

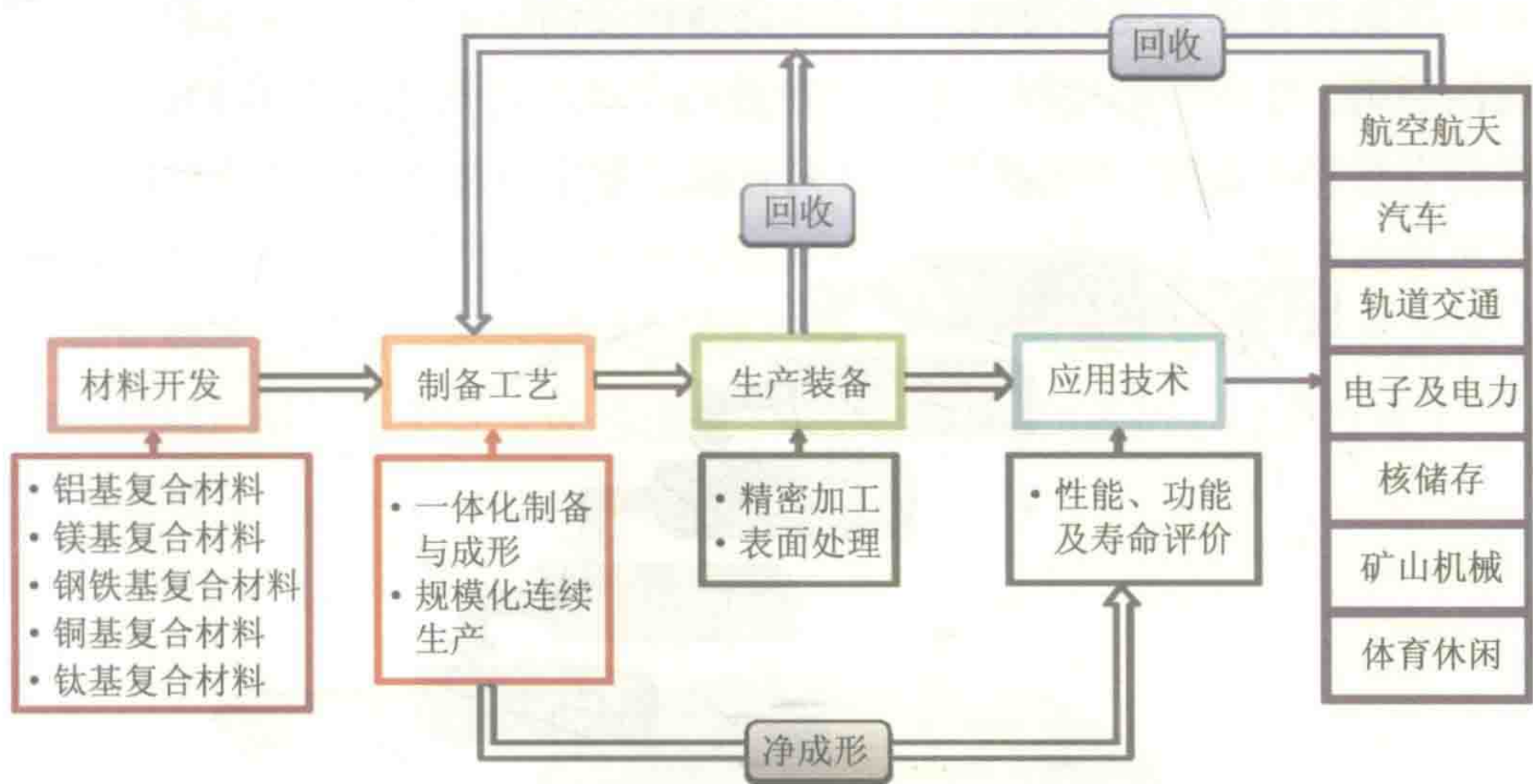


图1-1 广东省金属基复合材料产业范围与边界

1.6 产业技术路线图制定过程和方法

1.6.1 基本流程

技术路线图在北美、欧洲和日本等工业发达国家得到广泛的应用，经历了近40年的发展。现在，技术路线图一词不仅关注技术路线图本身，而且也关注技术路线图的构建过程，它反映了对某一领域前景的看法，以