DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.01.005

我国航空铝合金产业发展战略研究

熊柏青[1,2]，闫宏伟[1,2,3]，张永安[1,2,3]，李志辉[1,2]，李锡武[1,2,3]

（1. 中国有研科技集团有限公司有色金属材料制备加工国家重点实验室，北京 100088；2. 中国有研科技集团有限公司，北京 100088；3. 有研工程技术研究院有限公司，北京 101407）

摘要：航空铝合金作为航空器机体结构中最重要的结构材料之一，是我国国防科技工业发展、现代化经济体系建设、深入实施制造强国战略的重要物质基础。当前国际上已发展形成高强高韧铝合金、高比强/高比模铝合金、含钪高性能铝合金等三类主要航空铝合金体系，新一代高性能合金研究、高灵活度制备加工以及数据驱动的高效合金设计是主要的发展趋势。当前我国航空铝合金产业与国际发达国家总体“并跑”、部分“跟跑”，特别是在日趋复杂的国际国内宏观形势下，发展机遇与挑战并存，自主创新能力难以支撑航空铝合金材料创新引领、部分品种材料及装备“卡脖子”问题突出、产品国际市场竞争力不足、测试和应用数据积累及过程管控等基础体系能力短板尚存等问题更为突出。需从航空铝合金材料竞争力提升、新材料研发先行、高效上下游合作研发、新材料应用推广、材料指标和应用指标评价体系建立等方面发力，提升我国航空铝合金产业创新发展水平。

关键词：航空；铝合金；高强高韧；高比模量

中图分类号：TG146.2　　**文献标识码：**A

Development Strategy for the Aviation-Grade Aluminum Alloy Industry in China

Xiong Baiqing[1,2], Yan Hongwei[1,2,3], Zhang Yong'an[1,2,3], Li Zhihui[1,2], Li Xiwu[1,2,3]

(1. State Key Laboratory of Nonferrous Metals and Processes, China GRINM Group Co., Ltd., Beijing 100088, China; 2. China GRINM Group Co., Ltd., Beijing 100088, China; 3. GRIMAT Engineering Institute Co., Ltd., Beijing 101407, China)

Abstract: Aviation-grade aluminum alloy is one of the most important structural materials for aircraft body structure. It is the material basis for developing national defense industry, constructing a modern economic system, and strengthening the manufacturing sector of China. Aluminum alloys with high strength/toughness, high specific strength/modulus, and Sc addition have been developed in the recent decades. At present, research on next-generation alloy design, processing methods, and new alloy research and development paradigm have been drawing attention. The aviation-grade aluminum alloy industry in China has been developing rapidly. Especially in the increasingly complex international and domestic macro situation, development opportunities and challenges coexist. However, deficiencies are becoming increasingly apparent, such as lacking independent innovation capability to support the leadership of aviation-grade aluminum alloy materials, prominent risks of specific materials and equipment, lacking competitiveness in the international market, and the accumulation of test and application data. It is necessary to improve the competitiveness of aviation-grade aluminum alloy materials, develop new materials, cooperate with upstream and downstream research and development, promote the application of new materials, and establish material and application evaluation systems to improve the innovation and development of the

收稿日期：2022-11-08；**修回日期：**2022-12-27

通讯作者：熊柏青，中国有研科技集团有限公司高级工程师，主要研究方向为有色金属结构材料；E-mail: xiongbq@grinm.com

资助项目：中国工程院咨询项目“我国先进有色金属材料发展战略研究”(2022-XZ-20)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

aviation-grade aluminum alloy industry in China.
Keywords: aviation; aluminum alloys; high strength and high toughness; high specific modulus

一、前言

铝合金具有比重轻、比强度高、成本低、易加工、耐腐蚀等特点，长期以来一直是全球航空航天领域不可缺少的关键结构材料[1, 2]。在当代航空制造业中，铝合金一直是航空器机体结构中最重要的选材之一，其用量约占机体结构重量的 40%~70%，广泛应用于飞机主承力框、梁、壁板、蒙皮等部位[3]。经过近百年的发展，航空铝合金已经成为了代次特征鲜明、状态规格齐全的航空航天用核心关键配套材料，是航空主干材料的重要组成部分。航空铝合金主要包括高强/超高强高韧型 Al-Zn-Mg-Cu 系（7xxx 系）、中高强耐损伤型 Al-Cu 系（2xxx 系）、中强可焊型 Al-Mg-Si 系（6xxx 系）、以及高比强高比模轻质型 Al-Li 合金和少量其他体系铝合金，主要包括预拉伸厚板、薄板、锻件、挤压材、铸件等。近年来，树脂基复合材料由于其在比强度、比模量、耐腐蚀等方面的性能优势，在更为关注燃油经济性的先进民航客机中的用量大幅提升，如波音 B787、空客 A350 等客机中复合材料的用量均超过 50%[4]，但仍存在装机成本高、可回收性差、无损检测困难等局限。因此在当前和未来很长一段时间，铝合金仍然是世界航空制造业的核心结构材料。

航空铝合金是我国国防科技工业发展、现代化经济体系建设、深入实施制造强国战略的重要保障。从国家重大战略需求看，所谓“一代装备、一代材料”，航空铝合金是保障国产大型飞机、先进战机、航天飞行器等重大型号自主可控的物质基础；从铝加工行业高质量发展需求看，航空铝合金作为一种高技术含量、高附加值的产品，工业发达国家一直将其看作是反映一个国家铝加工业综合实力和科学技术发展水平的重要标志，是带动铝加工行业高质量发展的核心引擎。自“十五”以来，特别是在大型飞机重大科技专项的带动下，我国航空铝合金产业快速发展，多项合金关键技术取得突破，第三代/第四代多种高强高韧铝合金材料实现自主保障，总体达到了国际先进水平，有力保障了先进战机、大型飞机等的研制生产。本文通过梳理航空铝合金产业国内外发展现状、我国新形势下对航空铝合金产业的发展需求，分析我国存在的差距和不足，总结凝练中长期发展目标，并提出发展对策与建议，助力我国航空铝合金产业高质量、创新发展。

二、国外航空铝合金的发展现状与趋势

西方发达国家研究开发和生产制造航空铝合金材料已有近百年历史。国际上以奥科宁克公司（Arconic）、肯联铝业（Constellium）、诺贝利斯（Novelis）铝业公司、爱励铝业公司（Aleris）、凯撒铝业公司（Kaiser）、奥地利金属公司（AMAG）等为代表的美欧等发达国家和地区的企业引领全球航空铝合金领域创新发展，产品大量用于制造飞机的关键结构件，如机翼蒙皮、机翼壁板、机翼翼梁和翼肋、机身蒙皮、机身承力框架和隔板、机舱地板梁等。

（一）航空铝合金的成分设计

1. 高强高韧航空铝合金

7xxx 系和 2xxx 系高强韧铝合金在所有航空铝合金中用量最大、品种和规格最多，是最具代表性的航空铝合金。欧美等工业发达国家和地区在不同的历史阶段，通过调整主合金元素的含量和配比、微合金化元素的添加种类和数量等，至今已经先后发展了四代商业化航空铝合金，满足了不同时期航空航天飞行器制造发展的需要。国际上新一代 7xxx 系/2xxx 系航空铝合金正处于研发攻关与小批量应用阶段。如在 500~600 MPa 强度级别的 7xxx 系铝合金的基础上，通过大幅度提高 7xxx 系铝合金的 Zn 含量及优化主合金元素配比，同时控制微量元素及杂质元素含量，开发出强度级别达到 600~650 MPa、具有优异综合性能的新一代超高强高韧铝合金材料，如 7056、7065、7255 等；在传统 2xxx 系铝合金的基础上，通过调整主合金元素配比、持续降低 Fe、Si 杂质元素含量以及复合微合金化等，实现了在强度水平相当的情况下，断裂韧性提高了 20% 左右，疲劳裂纹扩展速率水平降低了 15%，开发出了一系列中高强损伤容限 2xxx 系铝合金材料，如

2524、2624等。未来7xxx系/2xxx系航空铝合金发展主要在强度级别提升的同时保持高综合性能匹配为主线，聚焦超高合金化程度条件下的合金成分优化设计原理，重点突破7xxx系超高强铝合金、高强耐损伤容限2xxx系铝合金、中高强耐热2xxx系铝合金等。

2. 高比强/高比模航空铝合金

铝锂合金是近年来航空材料中发展最为迅猛的先进轻量化结构材料，具有密度低、弹性模量高、比强度和比刚度高、疲劳性能好、耐腐蚀、易焊接的特点，机械性能等同或者优于常用航空铝合金。国际上铝锂合金的研发已有70多年的历史，已开发出第三代产品。受材料自身性能的影响，前两代铝锂合金产品中，除前苏联的第二代铝锂合金1420外，大部分未获得规模应用。近十年来开发的2097，2197、2297、2397、2099、2199、2195、2196、2098、2198和2050等第三代铝锂合金具有密度低、耐损伤、各向异性小、耐腐蚀、加工成形性好等特点，其中2197合金应用于F-16战机的后机身舱壁和其他部件，2099-T8511和2196-T8511合金应用于空客A380客机的地板梁、座椅导轨、辅助导轨、座舱、紧急舱地板等部位[5]。从2010年发展至今，以2050、2055、2060等为代表的第四代铝锂合金正在向着更高强度、高淬透性、优良的耐损伤以及焊接性能不断发展，如Arconic开发的2060铝合金已应用于我国C919大型客机机身蒙皮。

3. 含钪高性能航空铝合金

微量钪元素的添加对高强高韧铝合金晶粒细化、抑制再结晶、提升焊接性能等方面具有显著作用[6]，自20世纪60年代起，美国、俄罗斯等率先将钪应用于商业化铝合金中，发展至今已形成Al-Mg-Sc、Al-Zn-Mg-Sc、Al-Li-Sc等体系合金。含钪高性能铝合金目前在航天领域应用相对更多，如俄罗斯“火星一号”仪表盘、导弹导向尾翼、X-33型运载火箭上液氧储箱、燃料储箱、航天飞行器密封舱主结构等，在航空领域只有俄罗斯将其应用于米格-20、米格-29、图-204客机和雅克-36直升机等机型的承载结构件以及安东洛夫运输机机身纵梁等，在民用航空领域尚未规模化应用。制约其批量应用的主要原因为钪的添加导致的合金成本大幅提升，如在铝合金中添加0.2 wt%的钪将导致其原材料成本提高4~5倍[7]。随着钪提取技术不断成熟，其价格呈现下降趋势，国际上对于含钪高性能航空铝合金的重视程度重新提升。俄罗斯联合铝业公司于2021年推出了一种商标为“ScAlution”的含钪系列铝合金[8,9]；空客公司研发了牌号为Scalmalloy的新一代Al-Mg-Sc高强3D打印用铝合金粉末，新合金的抗拉强度与屈服强度比AlSi10Mg合金高约70%[10]。

此外，航空用6xxx系铝合金先后发展了6061、6063、6013、6056等合金，用于飞机保护板、蒙皮、法兰盘等零部件。

（二）航空铝合金制备加工方法

高强高韧铝合金材料的制备加工总体流程发展至今并未发生本质改变，美国、欧洲、日本等发达国家和地区在传统的“连续化、大规模和大规格工业化制造”的基础上，重点围绕高合金化大规格高品质铸锭成型、高组织均匀性大规格铝合金材料热变形、多相协同调控的精密热处理、残余应力精确表征及控制技术等方面开展工艺改进研究。部分合金的制备工艺向节能降耗、精简连续、高速高效发展，如美国铝业公司开发的水平式高速铸轧高效铝合金薄板生产技术（Micromill），从铝液到卷板的时间由20 d缩短到20 min，其已应用于中强的汽车铝合金板材。传统的航空铝合金制备工艺流程有力支撑了铸造、锻造等“等材制造”以及整体机加工等“减材制造”工艺的大型整体铝合金结构件制备，但随着未来航空结构件进一步轻量化发展，其结构设计更侧重结构拓扑优化设计，导致结构件尺寸、形状趋于复杂，甚至向复杂、多层级组织结构的“仿生”材料发展。增材制造技术在复杂、多层级组织结构件制备中的应用不断拓展，超高强、大规格铝合金零部件增材制造技术正逐步发展为支撑高端装备结构轻量化发展的重要技术路线。此外，“新材料–新制造技术–工程化应用技术同步一体化开发”的趋势越来越明显，航空铝材研发至应用的时间周期不断缩短。

（三）航空铝合金的研发范式

如同新材料的研发范式的发展，航空铝合金的研发也经历了经验试错、理论设计、计算机辅助设计等不同研发阶段。随着航空铝合金的合金化程度提升，其微观组织结构趋于复杂，多尺度耦合系统特征更为明显，基于理论设计与计算机辅助设计的

方法均遇到了基础研究、计算机算力等方面的局限。美国2011年启动的材料基因组计划促进了材料大数据的发展，推动了人工智能技术在材料领域的全面应用，数据驱动的材料研发第四范式正在形成[11]。数十年来全球各国在航空铝合金领域积累了大量的研究数据，利用机器学习方法实现基于数据的新材料研发已经成为材料研究的前沿方向和热点领域。在航空铝合金领域，已经有研究者引用机器学习方法实现了800 MPa以上级别超高强铝合金设计、不同时效状态合金性能预测等。

三、我国航空铝合金的发展现状与挑战

我国航空铝合金是伴随着航空航天装备发展，从仿制苏联、美国产品开始起步，历经引进、消化、改进和创新研制，逐步建立起自主体系。近年来，随着国家经济实力的增强，国家科技计划对自主创新支持力度不断加大，已取得了众多重要成果，使我国在国际上处于总体“并跑”、局部“跟跑”状态，并由“跟踪研仿”向“自主创新”转型。当前国际形势日趋复杂，新一轮科技革命和产业变革深入发展，同时我国已进入新发展阶段，向创新型国家转型的需求空前急迫，航空铝合金产业的发展机遇与挑战并存。

（一）我国航空铝合金的发展基础

经过多年的发展，我国已形成了覆盖“铝土矿—氧化铝—电解铝—铝加工—铝应用—再生铝”产业链上下游的产业体系，铝加工行业已经形成一定规模，已成为全球最大的铝材生产国。自“十五”以来，特别是在大型飞机重大科技专项的带动下，我国航空铝合金产业快速发展，总体达到了国际先进水平，在航空、航天等装备中获得了大量应用，同时也为高铁、机械等工业部门提供了所需的关键材料，部分产品出口国外，已逐步发展为除美国、法国、德国、俄罗斯等工业发达国家之外的全球又一重要分支。

“十二五”以来，我国航空铝加工产业呈现出了规模化、设备现代化、产品结构调整、体制机制变革的趋势，具体表现为：① 新项目技术装备水平高。随着近年来航空铝加工行业资本及资源的快速流入，熔铸、热处理、轧制、挤压、锻造、后处理、精加工装备全面升级。新兴的南山铝业股份有限公司、天津忠旺铝业有限公司、广西南南铝加工有限公司等企业拥有大量的进口先进设备，企业装备水平世界一流；先进连续化生产线和大型装备的数量世界第一，建成了全世界吨位最大的800 MN超大型模锻机组和120 MN厚板预拉伸机组等。② 产业链一体化程度不断提高。电解铝生产企业开始向铝加工方向延伸，铝液直供短流程生产铝挤压圆锭、轧制板坯比例不断加大，节能降本增效显著。此外，铝加工企业也逐步向产品深加工发展，探索提供产品粗加工、产品表面处理的业务新模式。③ 产业集群化、规模化和专业化特色明显。大型的航空铝加工企业正在不断扩大规模，引进世界一流的生产设备，实现老旧设备的现代化改造，向建成具有国际一流水平的现代化大型综合性铝加工企业发展，形成了一批规模化、实力强、有影响力的铝加工企业，在骨干企业带动和地方政府推动下形成了一批特色产业集群和铝加工基地。④ 开发能力提升，产品结构逐步优化，进口替代进程加快。航空铝加工企业不断开发高技术含量产品，现已打破了航空铝材产品国外垄断并逐步替代进口，有力保障了我国航空工业特别是国防领域的自主发展。

（二）新形势下航空铝合金产业发展的机遇与挑战

在当前国际国内宏观形势下，我国航空铝合金材料产业的发展机遇与挑战并存。从外部形势看，国际环境日趋复杂，新一轮科技革命和产业变革深入发展。“十三五”以来，中美贸易摩擦、全球新型冠状病毒感染疫情、俄乌冲突等对我国铝资源保障、高端铝加工装备进口、先进航空铝材自主供应带来严峻挑战。在铝资源供应风险方面，我国以全球3.1%的铝土矿储量支撑着全球22.1%的铝土矿产量，对海外铝土矿资源进口依赖度极大。近年来，我国自几内亚、澳大利亚和印度尼西亚进口的铝土矿占总进口量的90%以上，面临着资源国政策变化、疫情影响国际物流运输等带来的诸多风险。在先进航空铝合金材料自主保障风险方面，当前国际形势下，我国先进制造业成为西方发达国家关注的焦点，高端铝合金材料逐渐出现采购周期长、订货起点高、成本高昂等问题，产业链安全存在一定风险。在高端铝加工装备进口方面，由于我国先进铝

合金材料产业的发展与国际一流加工装备引进密不可分，如今成套进口铝锂合金熔铸机组进口受限，装备的底层控制、参数调整权限不开放，疫情影响下国外技术人员无法入境调试设备直接导致产线投产进度滞后，先进铝加工装备成为制约我国先进铝合金材料创新引领的潜在风险。从内部环境看，我国已转向高质量发展阶段，“十四五”时期经济社会发展要求构建以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局，“碳达峰、碳中和”目标明确，我国先进航空铝合金材料的发展同时也处于重要的战略机遇期。贸易摩擦、科技竞争等因素都促使国内下游用户更加重视国内先进铝合金材料供应商，对大飞机用先进铝合金材料等国际竞争力提升的牵引显著加速。

四、我国航空铝合金发展存在的问题

面向国际复杂形势以及我国建设高水平科技强国的需求，我国航空铝合金产业仍存在自主创新能力难以支撑航空铝合金材料创新引领，部分品种材料及装备“卡脖子”问题突出、产品国际市场竞争力不足、测试和应用数据积累及过程管控等基础体系能力存在短板等问题。

（一）产品国际市场竞争力不足

国外拥有近百年的研发和生产历史，已与航空配套企业和整机制造企业建立起完善、成熟的供需衔接体系。我国先进铝合金材料研制从20世纪70年代末才起步，特别是当前型号装备用量最大的第三代、第四代航空铝合金，国内立项研制不足10年，材料研发、生产及应用数据积累较少，产品一致性和稳定性较差，成品率低；此外，一条航空铝合金预拉伸厚板生产线建设投资规模一般要达到数十亿元，与国外企业早已度过固定资产折旧计提高峰时期相比，我国主要企业生产线均为近年来新建，设备折旧压力较大，加之实际产量远未达到设计目标产能规模，客观上也造成了国产材料成本高、性价比缺乏竞争力的不利局面。

（二）自主创新能力难以支撑新材料创新引领

我国铝加工行业所取得的各项成果仍然主要是基于跟踪研仿和局部革新的方式，很多企业仍处于20世纪90年代的生产水平，大量研究工作仍采用传统的“跟随法”和“试错法”进行，工程化研究基础相对薄弱，研究工作的广度、深度和创新性不足。国家项目支持也致力于解决“有无”问题，导致针对每个牌号合金的基础理论和产业技术基础问题研究的系统性、完整性和深入程度有待加强，对前瞻性和原始创新性研发投入明显不足，未形成“技术引领、材料先行”的良性发展局面，所研发的新产品和新技术很难率先抢占技术、产品和市场的制高点。

（三）产业链部分环节存在“卡脖子”风险

当前，国内外形势发生深刻复杂变化，各国围绕关键领域核心技术的竞争日趋激烈，尤其是国际间贸易摩擦加剧，以“大飞机”为代表的先进制造业成为西方发达国家关注的焦点。在铝资源保障方面，铝土矿资源高度依赖几内亚、澳大利亚和印度尼西亚等国，面临着资源国政策变化、国际物流运输等带来的诸多风险。在部分高端航空铝合金品种方面，国内部分紧固件用铝合金丝材、铝锂合金等品种仍需依赖美国铝业公司、肯联铝业、凯撒铝业公司等国外供应商。近5年来，我国进口铝材基本维持在4×10^5 t左右，进口国家为韩国、日本、美国、德国等，其中航空用高强高韧铝合金是重要品种之一。高端高强高韧铝合金进口采购周期长、订货起点高、成本高昂等问题一旦出现，将直接影响我国大飞机等重点型号研制及生产进展。在生产与测试装备方面，目前成套进口铝锂合金熔铸机组进口受阻，装备的底层控制、参数调整权限不开放，装备调试及核心组件维护依赖国外技术人员，高端装备已成为制约我国先进有色金属材料创新的潜在风险。

（四）尚未建立完善的过程管控体系

只有材料生产过程“可预测、可控制、可重复、可追溯”，保障材料的批次稳定性和一致性，才能有效提高国产材料的市场竞争力。国产大飞机对国产材料提出了严格的适航符合性验证标准，需通过连续多批次的材料生产，验证批次内和批次间材料基本性能稳定性。长期以来，受国内工业基础薄弱的影响，我国军工材料研制基本上是沿用基于“结果导向”的材料研发和应用模式，没有树立起

基于“过程管控”的先进管理理念，尚未建立起完善合理的研发和生产过程控制及质量管理体系，此外，国内多数企业两化融合水平相对偏低，生产工艺和过程控制能力不强，与国外先进铝合金材料生产企业对标还存在较大差距。

（五）材料测试和应用评价数据积累不足

我国针对先进铝合金的性能数据库建设尚处于起步阶段，满足应用要求的研究和测试数据严重匮乏。特别是民机材料的应用考核采用等同性评价体系，引入许用值作为材料是否达标的主要评价标准，并以此作为结构设计的依据。依托主干材料体系建设工作，部分品种铝材的设计许用值研究正在进行中，但尚未覆盖全面的航空铝合金体系，仍需开展大量工作。由此造成高强高韧铝合金的标准制定多参考美国宇航材料规范（AMS），没有详实、准确的材料数据库支撑。各型号单位沿袭各自选材习惯，大多数单位各自管控高强高韧铝合金材料的标准选用、专用标准制定以及各级标准的贯彻采标活动，“同一材料、不同型号、不同标准、不同管理”的现象大量存在，不仅造成标准重复建设和资源浪费，还给高强高韧铝合金材料的选用、生产、制造、验收、使用和全寿命周期管理带来混乱和风险，不利于我国高强高韧铝合金产业的体系化发展。

五、发展目标与发展战略

（一）发展目标

通过全面实施航空铝合金材料竞争力提升工程，推动现有产品制造技术提升和新产品开发，推进统一建立材料性能指标和应用指标评价体系，彻底解决国产航空铝合金材料质量一致性和稳定性问题，掌握产品定价权和市场主动权，加速创制国际知名产品，全面提升国产航空铝材的市场竞争力，占领国内外市场，快速实现我国航空铝材强国梦。

到2025年，针对重点品种航空铝材开展专项攻关，解决有无问题，关键材料组织性能一致性和稳定性达到国际先进水平，摆脱航空铝材受制于人的风险。大宗材料性价比达到国际先进水平，自主研发的新一代材料实现典型应用。

到2035年，形成“产学研用”相结合的成熟产业创新体系，建立全面、完善的自主航空铝合金材料体系；材料质量水平全面提升，满足国内产业需求的同时，在国际市场上具备较强的竞争力；自主创新能力与国际先进水平“并跑”，国内航空铝材产业达到国际一流水平。

（二）国内市场需求及下游应用发展

在国产大飞机、先进战机等重点型号中，7075、7475、7050、7150、7055、7085 等系列牌号、状态、规格的厚板、型材、锻件等产品被广泛应用于飞机中的机身框梁、长桁以及机翼壁板、肋、对接接头等关键承力结构件，采用该类材料制造的结构件占到了飞机结构总重量的40%~70%。

国内主要航空制造企业目前主要使用的航空铝合金包括2xxx系铝合金、7xxx系铝合金、铝锂合金以及其他系列的变形铝合金，需求近 3×10^4 t/a，目前国内航空制造企业选用国产航空铝合金材料的比例大约为40%~50%。预计国内航空制造企业对航空铝合金的需求预计在2025年将达到 5×10^4~1×10^5 t/a；到2035年将达到 1.5×10^5~2×10^5 t/a。

（三）发展战略

1. 实施航空铝合金材料竞争力提升工程

高度重视现有产品的工业化制造技术提升，着力解决国产材料质量一致性和批次稳定性问题，推动企业建立完善的先进铝合金材料产业技术管理体系，通过精细化生产制造，并结合降本增效，实现产品“从有到好”的跨越。通过开发更高性能的新一代产品，率先满足客户需求、甚至引领客户需求，取得航空铝材产品定价权，从而全面提升国产材料的品质及市场竞争力。

2. 强化航空铝合金前沿技术布局

打破“跟踪研仿”思维模式，强化航空铝合金前沿技术布局，围绕新一代超高综合性能航空铝合金设计开发、数据驱动的航空铝合金设计方法、全流程制备加工工艺模拟仿真、航空铝合金高效短流程制备工艺、承力构件用增材制造铝合金设计及制造策略等方面开展前沿布局，鼓励基于深入基础研究的原创性材料或技术创新，建立技术成熟度动态跟踪机制，对于发展前景较好的技术集中力量进行工程化技术突破，抢占国际航空铝合金领域科技创新制高点。

3. 推动航空铝合金研发高效协同与产业链交叉延伸

整合行业材料企业、零部件企业、高校等资源，用好民机材料产业联盟、大飞机先进材料创新联盟等资源，基于企业需求，组建“产学研用”早期供应商参与（EVI）合作模式和合作机制，形成需求明确、协同设计、高效验证、迭代优化的协同创新模式，推动建立“新材料–新制造技术–工程化应用技术同步一体化开发”能力，加快先进铝合金材料产业化进程。深化铝加工企业与结构件加工企业的交叉融合，延伸航空铝材产业链，实现生产加工一体化，不仅为企业创造更大的利益，同时能大幅缩短型号装备用户的生产制造周期，实现应用数据高效积累，保障国家重点装备型号的研制生产需求。

4. 统一建立材料指标和应用指标评价体系

结合主干材料体系建设，推动上下游协同规范材料使用标准要求，推进建立统一材料指标和应用指标评价体系，为体系化推进国产航空铝合金材料应用保驾护航。

六、对策建议

（一）强化“材料先行”概念，加大对新材料研发支持力度

加强顶层设计和部署，充分发挥我国制度优势，选定一批掌握优质资源的国有企业和研究机构，健全和完善创新体系，着力构建开放型创新生态，鼓励并支持国家实验室、国家工程中心等创新平台在全球范围内引进人才、留住人才、用好人才，提高航空铝合金领域科研和产业创新能力及应用水平。集中资源和力量，分类攻关、重点突破，提升原始创新能力。加快新材料专项等落地实施，大力扶持优势企业的自主创新能力，形成国内自主的材料保障体系。

（二）整合产业链力量，加速国产铝材应用

国内企业在材料研制前期投入了巨大的人力、物力和财力，建议在国内高端装备型号选材及采购中，给国产材料更多的发展机会，结合新材料首批次保险补偿机制等，进一步加快成熟材料应用，促进形成“研发–生产–应用”持续迭代的良性循环体系。通过上层引导，结合主干材料体系建设，推动上下游协同规范下游用户材料标准要求，推进建立统一材料指标和应用指标评价体系，为体系化推进国产先进铝合金材料应用保驾护航。抓住新材料开发与应用战略机遇，整合行业材料企业、零部件企业、高校等资源，用好民机材料产业联盟、大飞机先进材料创新联盟等资源，基于企业需求，形成需求明确、协同设计、高效验证、迭代优化的协同创新模式，加快先进航空铝合金材料产业化进程。

（三）整合国家级创新平台力量，补齐产业链短板

针对航空铝合金产业链部分“卡脖子”问题，充分发挥国家实验室、国家科研机构、高水平研究型大学、科技领军企业等国家战略科技力量创新效能，坚持问题导向，以应用为牵引，梯次布局对“卡脖子”问题开展基础理论和技术原理研究、技术开发、工程化及应用，充分发挥国家级平台在科技创新和产业化方面的引领作用。加快构建以企业为创新主体，以高校院所为支撑，各创新主体相互协同的“产学研用测”创新联合体，形成跨领域、大协作、高强度的创新基地，加强我国科技创新和产业链供应链各层次系统间的耦合性，开展产业共性关键技术研发，提高科技成果转移转化成效，疏通先进基础材料领域的堵点卡点，强化科技创新和产业链供应链韧性。

（四）建立、完善知识产权和标准保障体系

制定和实施强制有效的知识产权保护法律及法规，对侵权行为给予严厉打击；建立知识产权整体战略布局，引导航空铝合金上下游单位加强专利保护和标准化工作，加强专利和标准战略；组织制定统一的设计规范、材料标准和工艺质量控制规范，建立与国际接轨又有我国特色的航空铝合金材料标准体系；建立专利、标准信息服务平台，培育和提升行业、企事业单位技术创新及运用知识产权保护的能力和水平。

参考文献

[1] 管仁国, 娄花芬, 黄晖, 等. 铝合金材料发展现状, 趋势及展望 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 68–75.
Guan R G, Lou H F, Huang H, et al. Development of aluminum alloy materials: Current status, trend, and prospects [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 68–75.

[2] 杨守杰, 戴圣龙. 航空铝合金的发展回顾与展望 [J]. 材料导报, 2005 (2): 76–80.
Yang S J, Dai S L. A glimpse at the development and application of aluminum alloys in aviation industry [J]. Materials Reports, 2005 (2): 76–80.

[3] 臧金鑫, 陈军洲, 韩凯, 等. 航空铝合金研究进展与发展趋势 [J]. 中国材料进展, 2022, 41(10): 769–777, 807.
Zang J X, Chen J Z, Han K, et al. Research progress and development tendency of aeronautical aluminum alloys [J]. Materials China, 2022, 41(10): 769–777, 807.

[4] 李红萍, 叶凌英, 邓运来, 等. 航空铝锂合金研究进展 [J]. 中国材料进展, 2016, 35(11): 856–862.
Li H P, Ye L Y, Deng Y L, et al. Progress of aerocraft Al-Li alloys [J]. Materials China, 2016, 35(11): 856–862.

[5] Wanhill R, Bray G. Aluminum-lithium alloys: Processing, properties, and applications [M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014.

[6] Venkateswarlu K, Rajnikanth V, Ray A K. High strength Aluminium alloys with emphasis on scandium addition [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal, 2008, 27(2): 28–37.

[7] 张思平. 含 Sc 铝合金的应用研究新进展与前景展望 [J]. 铝加工, 2019 (2): 4–9.
Zhang S P. Progress and prospect of application research of Sc-containing aluminum alloy [J]. Aluminum Fabrication, 2019 (2): 4–9.

[8] RUSAL. RUSAL launches ScAlution-a new brand for its aluminum-scandium solution products [EB/OL]. (2021-09-15) [2022-11-21]. https://rusal.ru/en/press-center/press-releases/rusal-launches-scalution-a-new-brand-for-its-aluminium-scandium-solution-products/.

[9] 王祝堂. 俄罗斯联合铝业公司批量生产含钪的铝合金 [J]. 轻合金加工技术, 2022, 50(5): 69.
Wang Z T. RUSAL mass-produces aluminum alloys containing scandium [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2022, 50(5): 69.

[10] 熊慧, 王祝堂. 世界铝–钪合金产业的进展 [J]. 轻合金加工技术, 2021, 49(6): 1–17.
Xiong H, Wang Z T. The development of global Al-Sc alloy industry [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2021, 49(6): 1–17.

[11] 谢建新, 宿彦京, 薛德祯, 等. 机器学习在材料研发中的应用 [J]. 金属学报, 2021, 57(11): 1343–1361.
Xie J X, Su Y J, Xue D Z, et al. Machine learning for materials research and development [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(11): 1343–1361.