

铝合金材料发展现状、趋势及展望

管仁国^{1,6}, 娄花芬², 黄晖³, 梁霄鹏⁴, 肖翔², 李慧中⁴, 李芳⁵,
王建军⁶, 运新兵¹, 曾黎滨⁷

(1. 大连交通大学连续挤压教育部工程研究中心, 大连 116028; 2. 中铝材料应用研究院有限公司, 北京 102209;
3. 北京工业大学材料科学与工程学院, 北京 100124; 4. 中南大学材料科学与工程学院, 长沙 410083;
5. 中国有色金属学会, 北京 100814; 6. 东北大学材料科学与工程学院, 沈阳 110819;
7. 中国铝业协会, 重庆 401326)

摘要: 本文综合分析了铝合金材料在航空航天、交通运输等领域的应用现状, 论述了我国铝合金材料的产业规模和技术水平。针对我国在一些关键铝合金材料方面存在的短板, 以及在高性能铝合金开发、加工工艺与智能控制等原创技术方面的不足, 系统梳理了目前我国在铝合金材料方面存在的主要问题。针对汽车、船舶、空天等领域的发展态势, 分析了铝合金材料的市场需求。针对我国铝合金材料的产业现状, 提出以下发展对策和建议: 加强研发体系建设, 完善发展环境; 优化结构, 促进提质增效和协同发展; 加强配套政策支持; 推进人才队伍建设; 推广智能制造和“互联网+”; 加强国际合作, 尤其是“一带一路”国际合作。为解决铝合金材料“卡脖子”问题, 及铝合金材料向高端化、绿色化方向发展提供重要参考。

关键词: 铝合金材料; 汽车工业; 船舶工业; 空天领域

中图分类号: TG146.2 **文献标识码:** A

Development of Aluminum Alloy Materials: Current Status, Trend, and Prospects

Guan Renguo^{1,6}, Lou Huafen², Huang Hui³, Liang Xiaopeng⁴, Xiao Xiang², Li Huizhong⁴,
Li Fang⁵, Wang Jianjun⁶, Yun Xinbing¹, Zeng Libin⁷

(1. Engineering Research Center of Continuous Extrusion, Ministry of Education, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China; 2. Chinalco Materials Application Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China; 3. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 4. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 5. The Nonferrous Metals Society of China, Beijing 100814, China;
6. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;
7. China Aluminum Association, Chongqing 401326, China)

Abstract: This study comprehensively analyzes the application status of aluminum alloy materials in aerospace, transportation, and other fields, and introduces the industry scale and technical level of the aluminum alloy materials in China. Moreover, the main problems of this industry are systematically summarized in view of the shortcomings of some key aluminum alloy materials in China as well as the deficiencies in original technologies such as high-performance aluminum alloy development, processing technology,

收稿日期: 2020-07-16; 修回日期: 2020-08-31

通讯作者: 李芳, 中国有色金属学会高级工程师, 主要研究方向为计算材料学; E-mail: 2006Lfang@163.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“新材料强国 2035 战略研究”(2018-ZD-03)

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

and intelligent control. And the market demand for the aluminum alloy materials is analyzed based on the development trend of automobile, ship, aerospace, and other fields. According to the current status of the aluminum alloy industry in China, the following countermeasures and suggestions are proposed: enhancing the research and development system to improve the development environment; optimizing the production structure to promote production quality and efficiency and coordinate the development; strengthening policy support; promoting talent team construction; promoting intelligent manufacturing and the Internet Plus initiative; and strengthening international cooperation, particularly along the Belt and Road. This study is expected to help solve some critical problems of the industry and provide a reference for promoting the advanced and green development of aluminum alloy materials.

Keywords: aluminum alloy materials; automobile industry; ship industry; aerospace domain

一、前言

我国是铝合金材料生产和消费大国, 铝合金材料在交通、海洋、空天等领域具有广泛应用, 尤其在汽车、飞机、航天、舰船等领域的一些轻量化关键部件上, 铝合金材料具有不可替代性。而国内绝大部分铝合金材料属于中低端产品, 生产能耗高、效率低、成本高、附加值低, 恶性竞争的情况难以得到改变, 且部分高端产品仍需从国外高价购买 [1], 这无疑阻碍了我国制造业升级的步伐。我国虽在通信、高铁等领域具有显著优势, 但随着国际形势错综复杂地变化, 关键材料领域被卡脖子的风险日渐突出, 自主创新迫在眉睫。在新的产业形势下, 发展高端铝合金材料绿色化、智能化的制备与加工技术对支撑我国关键制造业的可持续优质发展具有重大战略意义。本文主要介绍了国内外铝合金材料发展及研究现状, 分析常用铝合金系的市场需求, 总结目前我国在此领域遇到的问题以及未来发展目标, 并给出相应的发展对策, 以促进相关产业的升级和进步。

二、国内外铝合金材料发展及研究现状

(一) 国外铝合金材料发展及研究现状

总体来看, 工业发达国家铝合金材料开发与应用的历史时间长, 基础好, 研究积累雄厚, 铝合金材料体系系统性强, 产业技术水平较高。尤其是美国、俄罗斯等工业强国较早开展了铝合金材料的研发工作, 申请了大量的铝合金牌号, 广泛应用于汽车、船舶、空天等领域, 现已形成了一定程度的专利霸权。

在汽车领域, 铝合金是实现汽车轻量化的重要材料。在 2XXX 系铝合金方面, 美国的雷伊路

菲公司和法国的西贝内公司相继开发了 2036-T4、AU2G-T4 铝合金板材, 用于汽车车身。在 5XXX 系铝合金方面, 美国铝业公司 (ALCOA) 开发了 X5085-O、5182-O 等铝合金, 用于车身内板。在 6XXX 系铝合金方面, 美国研制了 6009 和 6010 车身铝合金板。挪威海德鲁铝业公司 [2] 在 2018 年开发了 HHS360 合金, 抗拉强度比 6082 合金提高了 10.8%, 达到 360 N/mm^2 , 伸长率达到 10%; 之后, 该公司又在此基础上开发了 HHS400 合金, 抗压强度达到 400 N/mm^2 , 屈服强度 $\geq 370 \text{ N/mm}^2$, 伸长率为 8%, 主要应用于汽车制造。美国的肯联铝业公司 [2] 开发了 HSA6 系列合金, 其中 HSA6-T6 合金挤压型材的最低屈服强度为 370 N/mm^2 , 而最低抗拉强度为 400 N/mm^2 , 与采用传统铝合金材料制造的全铝汽车质量相比, 可减重 30% 以上。目前, 国外先进铝加工企业致力于开发低成本的汽车板。印度的诺贝丽斯铝业公司已经推出 Advanz™ 系列合金 Ac5754R, 进一步减轻了汽车重量。该公司还与捷豹路虎汽车有限公司合作开发了具有优异成形和卷边性能的 AC-170PX 铝合金 [3], 用于汽车覆盖件外板。而美国的奥科宁克公司成功开发了新一代汽车板生产设备与工艺 “Micro-Mill” 技术, 极大地提升了汽车车身和覆盖件用铝板的性能, 综合性能提升 20%, 成本降低 30%。目前, 在汽车车身板领域, 应用最多的为 6082 铝合金, 在前后防撞梁上较多企业尝试使用 6XXX 系或 7XXX 系挤压型材来制备。

在船舶领域, 铝合金在船舶上的应用逐渐扩大。国外发展较早。迄今为止, 主要是 5XXX 系和 6XXX 系铝合金, 分别用于船壳体和船上建筑。在变形铝合金方面 [4], 主要有: 美国的 5086、5456 合金, 日本的 5083 合金, 英国的 N8 (5083) 合金, 前苏联的 AMr6 (5A06)、AMr61、B48-4 (01980)、

K48-1、K48-2 合金。俄罗斯研制了含钪(0.1%~0.3%)的高强度 Al-Zn-Mg 系合金(如 01970、01975 合金等)。在铸造铝合金方面 [4], 主要有: 苏联的 BAΠ5、AΠ4M (ZL111)、AΠ8 (ZL301)、AΠ13、AΠ25、AΠ27 合金, 美国的 356 (ZL101)、SEM328 (ZL106)、514 (ZL302)、515、518 (YL302)、520 (ZL301)、X250 合金等。目前船舶领域对铝合金材料的使用仍然以 5083 合金以及其改进型合金为主, 充分利用其耐腐蚀性能、焊接性能、易成形性能以及力学性能的综合优势。

在空天领域, 现代空天用铝材朝着高综合性能、低密度、大规格、高均匀性和功构一体化方向发展。针对 2XXX 系铝合金, 美国铝业公司和法国铝业公司开发了具有高强高损伤容限的 2026 和 2027 合金 [5], 其挤压件(厚度为 12~82 mm)和板材(厚度为 12~55mm)比 2024 合金分别提高 20%~25% 和 10%。在 7XXX 系铝合金方面 [5], 美国铝业公司、法国铝业公司以及德国爱励铝业公司开发了具有低淬火敏感性的高强韧铝合金: 7085、7140、7081。在超高强铝合金方面, 法国铝业公司开发了 7056-T79/T76 合金, 已用于 A380 飞机翼壁板等。在 Al-Li 合金方面, 俄罗斯开发了 1460 合金, 美国开发了 Weldlite 系列合金和 2097、2197、2195 铝锂合金。美国肯联铝业公司开发了低密度、高韧性和高损伤容限性能的 2050 和 2198 合金 (Al-Cu-Li-Mg-Ag)。2010 年, 美国肯联铝业公司为 Al-Cu-Li 系合金注册了 Airware 商标。目前空天领域对铝合金材料的需求主要集中在高强度的 2XXX 和 7XXX 系合金, 以及密度较低的铝锂合金。

(二) 国内铝合金材料发展及研究现状

“十三五”以来, 我国铝材生产能力和技术水平取得了巨大进步 [1], 2019 年铝材产量达到 5.252×10^7 t, 居世界首位。我国自主研发了 LC4、LC9、LY12、2A12、2A16、7A04、7B04、7A50、7B50 等系列铝合金 [6,7], 建立了第一代、第二代、第三代铝合金材料加工技术体系。近年来, 我国自行研制的新型高强韧铸造铝合金、第三代铝锂合金、高性能铝合金型材的性能均达到国际先进水平。在《变形铝及铝合金化学成分》(GB/T 3190—2020)中, 近 10 年我国共增加了 29 个国产铝合金牌号。其中

北京工业大学在国际上率先掌握了含铈弥散强化铝合金的制备和加工技术, 研发的含铈 5E83 铝合金冷轧板、5E06 铝合金热轧板、热挤压壁板等 5 个合金牌号列入国家标准 [8], 在国防及汽车等领域获得重要应用, 部分品种替代了进口产品。

针对高性能铝合金型材的挤压成形工艺与装备, 中车联合高校开发出了铝合金精炼、净化、锭坯均匀化等技术, 研制出了大型挤压模具和设备, 使铝合金型材的开发周期缩短了 25%, 成本降低 15%, 成品率提高到 62%。东北大学和大连交通大学分别开发了液态金属、半固态金属与固态金属的连续挤压短流程加工技术, 实现了产业化, 在该技术领域达到国际先进或领先水平。山东南山铝业股份有限公司顺利进入波音公司的全球供应商名录。中国忠旺控股有限公司先后收购了德国乌纳铝业股份有限公司和以澳大利亚为生产基地的全铝超级游艇制造商 Silver Yachts Ltd. 的控股权。中铝东北轻合金有限责任公司、西南铝业(集团)有限责任公司、西北铝业有限责任公司提供的由关键铝合金材料制造的大批先进武器亮相、点兵沙场。此外, 东北大学、上海交通大学、中铝材料应用研究院有限公司、吉林大学等在超高强高导变形铝合金、汽车用铝合金和铸造铝合金方面达到国际先进或领先水平。目前, 具有我国知识产权的部分铝合金材料已经应用于汽车、船舶、空天等领域。

在汽车领域, 我国的铝合金汽车板已初具规模化生产能力, 但成熟产品仅限 6016 与 5182 牌号, 其他牌号仍未具备批量供货能力。近年来, 中国铝业集团有限公司在汽车轻量化领域取得了一定的成果, 开发了汽车用 6016、6014、5182、5754 合金, 并在吉利汽车、海马汽车制造中实现小批量应用。

在船舶领域, 我国近些年来开发的可以商业化应用的船用铝合金板材/型材为 5083、6061、6082 铝合金, 随着国家深蓝战略的实施, 中国已开始建造自己的邮轮、“海上牧场”、钻井平台、发电站、直升机平台, 招商局集团有限公司的第一艘极地号邮轮已交付使用。船体其他部位以及符合我国海洋与河流环境的铝合金材料开发仍存在大量空白, 尚需多领域、多学科交叉合作。

在空天领域, 中国铝业集团有限公司下属的铝加工企业、北京航空材料研究院、有研科技集团有

限公司和中南大学等开发了超高强铝合金、高纯高损伤容限铝合金、铝锂合金和稀土铝合金等，并以此为基础开发了 2124-T351、2024-T851、2024HDT 板材，7050/2124 超宽超厚板，7B50-T7751 厚板，7A55-T7751 厚板，2A97 铝锂合金薄板及型材，2297 铝锂合金厚板等产品，实现了多种产品的国产化。开发出高强高韧低淬火敏感性 7A85 锻件，实现批量应用，填补了国内空白。西南铝业（集团）有限责任公司研制出的 10 m 整体环件，连续刷新了铝合金整体环件的世界记录。

三、我国铝合金材料领域存在的问题

值得注意的是，虽然我国铝合金材料在产业规模与技术水平上成绩斐然，但是我国现代工业体系建设起步晚、底子薄，追赶发达国家难度较大，相当部分关键基础材料、核心零部件仍不能自给。我国在未来较长一段时期内都是关键基础材料的需求大国，对此类材料数量和种类的需求将持续增加。而高端材料在产业体系中所占比例不高，原始创新偏少、基础共性关键技术和精深加工技术研发不足。美国铝业公司有 3 万项专利，与之相对的是中国企业原创性专利少，几百个常用牌号，中国自己研发的却很少，同时产品质量的一致性、均匀性、稳定性不高。大飞机用预拉伸厚板和蒙皮板、乘用车面板等质量稳定性有待提高，部分高端铝板带箔材等仍依赖进口。此外，我国铝合金材料产业粗放式发展的问题严重，产业规模增长虽快，但研制少，“产学研”一体化的技术创新力量薄弱，高校与企业之间无法发挥协同创新优势。所以，逐步推进相关研究和产业向高质量、高创新、高效率发展十分重要。

在汽车领域，我国汽车用铝合金板材仍面临三大问题：①缺少具有自主知识产权的汽车用铝合金，高端汽车用铝未实现系列化，难以满足汽车公司的个性化需求；②汽车板应用技术研发平台建设不足，在先进成形、异种材料连接、低成本与环保的零部件制造与表面处理方面都需加强研究；③需加强铝合金型材在新能源汽车上的应用，建立相应技术创新平台，开发车身结构、电驱系统、电池托盘、副车架、表面处理等相关产品。

在船舶领域，我国船舶用铝合金仍存在两方面的技术瓶颈：一是船舶用铝合金的开发种类偏少，合金综合性能、质量稳定性低于国外同牌号板材；二是铝合金材料的船舶应用技术，主要体现在焊接技术上。我国在搅拌摩擦焊和激光焊方面与国外仍有差距，限制了船舶用铝合金的发展。

在空天领域，我国在空天铝合金的研发和应用方面与发达国家仍有明显差距。我国对新合金的开发处于仿制阶段，研制的合金品种较少；对合金化基础理论研究较少。我国航空材料产品的质量稳定性、成本与进口材料还存在一定差距。

四、各系铝合金材料的市场需求及发展趋势

铝合金的市场需求往往决定了铝合金制品的种类、产量及性能特征。由于铝合金种类繁多，国内外发展过程及现状也不尽相同，且一部分铝合金会交叉应用于汽车、船舶及航空航天领域，所以该部分以铝合金系来进行分类阐述。

（一）2XXX 系铝合金

2XXX (Al-Cu-Mg) 系铝合金具有高的抗拉强度、韧性和疲劳强度，良好的耐热、加工及焊接性能，被广泛应用于空天、汽车及兵器工业等领域。主要牌号有 2A01、2A02、2A06、2A11、2A12 等。针对提高强度、强韧性匹配、耐损伤容限性能相继开发了一系列合金，如 2024、2124、2524、2324 合金等。我国装备型号向轻量化、长寿命、高可靠、低成本方向发展，对机身蒙皮材料的断裂韧性、抗裂纹扩展能力和耐蚀性能具有较高的要求。国外在 2024-T351 铝合金厚板基础上，已开发出了具有不同强度、韧性、疲劳、耐腐蚀性能匹配的 2324、2624 等机翼下翼面用高损伤容限铝合金，并实现装机应用。我们迫切需要开展高损伤容限 2XXX 系铝合金的开发工作，未来，复合微合金化将是 Al-Cu-Mg 系高强铝合金一个重要发展方向。

（二）4XXX 系铝合金

目前我国汽车活塞主要使用共晶和亚共晶 Al-Si 合金，但是随着对发动机性能要求的不断提高，难以满足性能要求。过共晶 Al-Si 合金密度低，

线膨胀系数小,抗磨性和体积稳定性更高,与亚共晶和共晶 Al-Si 合金相比是更为理想的活塞材料。国外已批量生产过共晶 Al-Si 合金活塞,并应用于载重汽车和轿车,如美国的 A390 合金,日本的 AC9A 和 AC8A (ZL109) 合金,澳大利亚的 A390 合金。但是目前我国生产过共晶 Al-Si 合金活塞的厂家很少,大部分依赖进口。另外,汽车涡轮增压铝合金材料与国外也存在较大差距,高性能汽车涡轮增压铝合金材料主要依赖日本等国家。因此,开发高性能活塞、涡轮增压叶轮关键汽车铝合金材料势在必行。

(三) 5XXX 系铝合金

Al-Mg 合金特别是高 Mg 含量的 Al-Mg 合金具有高的比强度、良好的焊接性和耐蚀性,将成为未来空天、高速列车、海洋等领域极具竞争力的材料。目前,空天、列车、海洋等应用的 Al-Mg 合金板材、型材以及焊丝主要依靠进口,高端焊丝市场基本上被美国 ALCOA 所垄断,ER5183、ER5356 合金主要依靠进口,进口量约占其销量的 70%,舰艇用 Al-Mg 合金主要依赖于俄罗斯。高 Mg 含量的合金常规铸锭中枝晶发达、共晶相偏析严重,成形性能差,目前加工方法仍存在诸多问题,如性能低、表面质量差、工序长、质量不稳定、成品率低等。亚快速凝固与成形可以抑制 Mg 的析出,同时可以调控得到细小等轴晶和纳米析出相,大幅度提高材料的性能与均一性。因此,开发高性能 Al-Mg 合金亚快速凝固连续流变挤压和轧制技术,有望解决高品质 Al-Mg 合金的需求。

(四) 6XXX 系铝合金

6XXX 系铝合金材料是轨道交通、汽车、电子等领域的关键材料。从 20 世纪 80 年代起,欧美、日本等发达国家和地区研发了车用铝合金,注册了 6009、6016、6010、6111、6022、6082 等牌号,形成了较完整的汽车车身板、挤压材、锻件等生产和应用体系。我国 6XXX 系铝合金车身板和锻件的产业化研发刚刚起步,存在明显差距。我国工业和信息化部提出重点发展的车用铝合金薄板是:6016-S、6016-IH、6016-IBR、6A16-S、6A16-IBR、6022 等,典型 6XXX 系铝合金板材伸长率 $A_{50} \geq 25\%$, r 值

≥ 0.60 , 60 d 停放屈服强度 $R_{p0.2} \leq 140 \text{ N/mm}^2$, 烤漆硬化屈服强度增量 $\geq 80 \text{ N/mm}^2$ 。针对不同需求,开发 6XXX 系铝合金的设计、制备及加工技术成为发展的必然趋势。

(五) 7XXX 系铝合金

7XXX 系铝合金具有较好的耐应力腐蚀性能,是铝合金中强度最高的一个系列,是国际上公认的航空主干材料。最近,国外开发了 7055 合金 (Al-8Zn-2.05Mg-2.3Cu-0.16Zr),其在 T77511 状态下屈服应力超过了 620 MPa,用于波音 777 飞机,减重 635 kg。目前我国航空用 7XXX 系铝合金缺乏系统的合金设计和制备加工技术,某些产品完全依靠进口。由于 7XXX 系铝合金大规格铸锭合金元素多、凝固区间宽、铸造应力大、合金元素易氧化/偏析等,铸锭冶金质量较差,室温成形性能较低,开发新型 7XXX 系铝合金具有重要意义。

(六) 铝锂 (Al-Li) 合金

铝锂合金是近年来航空材料中发展最迅猛的轻量化材料,具有密度低、弹性模量高、比刚度高、疲劳性能好、耐腐蚀等特点,取代常规铝合金后,质量可减轻 10%~20%,刚度提高 15%~20%。美国 ALCOA 公司在 21 世纪初启动了“ALCOA 航空 20/20 计划”,目标是在 20 年内将航空铝合金成本和重量各减少 20%。肯联铝业公司开发了低密度、高韧性和高损伤容限性能的 2050 和 2198 铝锂合金 (Al-Cu-Li-Mg-Ag)。我国自主研发的 Al-Li 合金牌号极少,仅 1420 合金获得应用,C919 客机使用的铝锂合金由美国铝业公司提供。国内仅能生产 1420、2195、2197、2A97 等有限合金牌号,铸锭仅为 ((310~400) × 1280 × 4000) mm 以下扁锭及 $\phi 650$ mm 以下圆锭。航空高端应用领域厚度 60 mm 以上、宽 1500 mm 以上的扁锭 (2B16),以及直径 1500 mm 以上铸锭 (2B16) 尚未实现工业生产。因此开展新型铝锂合金设计、超大规格铸锭制备和深加工技术具有重要意义。

(七) 耐热铝合金

耐热铝合金通过调控 Si、Fe、Ni、Ag、稀土等元素,使铝合金在高温下具有抗氧化及抗蠕变

能力 [9], 是空天、汽车、轨道交通等领域的关键基础材料。传统的耐热铝合金有: 2519、2618、2219、2D70 等。随着空天和汽车工业的迅速发展, 对耐热铝合金提出了更高的要求。新一代战机巡航速度高, 机身蒙皮工作温度达 150℃ 以上, 而目前 2618、AK4-1ч 和 2D70 等耐热铝合金的长期使用温度均在 150℃ 以下, 开发新型耐热铝合金势在必行。

(八) 超低钪 (Sc) 含量的 Al-Sc 合金

Al-Sc 合金具有高强度、塑性好、耐蚀性等优异性能, 成为继 Al-Li 合金后新一代空天、舰船等的轻质材料。含微量钪的 Al-Mg 合金抗拉强度比 5083 合金高 30%, 屈服强度高一倍以上。其可焊性与常规 5XXX 系合金相当, 热影响区与焊缝的力学性能约与基体相等, 抗腐蚀性能与 5083 合金相当, 取代 5XXX 系或 6XXX 系合金制造空天零部件可取得显著的减量效果, 也是汽车与轨道车辆的上乘材料。俄罗斯在含钪铝合金研制方面居世界前列, 已形成 Al-Mg-Sc、Al-Mg-Li-Sc、Al-Zn-Mg-Sc、Al-Zn-Mg-Cu-Sc、Al-Cu-Mg-Sc 系合金, 钪含量为 0.18%~0.5%。为了推动铝钪合金在空天、汽车上的应用, 我国工业和信息化部已将含钪的铝合金作为优先发展的新材料之一。我国钪资源丰富, 并建成了高纯氧化钪提取生产线, 为铝钪合金发展奠定了基础。

(九) 500 MPa 级汽车用热冲压铝合金

我国的热冲压高强铝合金材料尚属空白。新材料和新成形工艺开发相结合, 是解决高强铝合金汽车零件成形的有效手段。以 7XXX 系合金为重点, 积极探索 2XXX 合金, 开发 500 MPa 级热冲压用铝合金材料, 用以制造复杂形状的汽车零件具有重要前景。

(十) 铝基复合材料

铝-钢多层复合板: 铝与钢质甲板的有效连接已成为大型舰船上层建筑轻量化的制约因素之一。铝与钢质船体之间焊接用的铝-钢复合过渡接头为取代传统铆接工艺提供了解决方案。本田公司开发出了钢和铝的接合技术, 将在全球应用于量产车骨

架。目前, 国内所用的铝-钢复合接头主要是从国外进口, 价格高达 4×10^5 CNY/t。随着未来舰船大型化, 对过渡接头提出了更高施焊温度、更大承载应力、更强结合界面等要求, 亟待开发高性能的铝-钢接头。

汽车散热器用铝合金复合材料: 铝合金复合箔、带、板是制造汽车空调器、散热器、干手器等钎焊式热交换器的关键材料。复合材料是由 2~3 种合金经叠合压延后制成, 包覆层多为高硅合金或低电位合金, 如 4004、4045、4047、4A13、7A01 合金等, 芯材主要是 3003、3003+1.5%Zn 和 3004 合金等。

铝蜂窝板: 通常由两层薄而强的面板和中间蜂窝芯复合而成, 具有重量轻、强度高、刚性大、稳定性好、隔热、隔声等优点, 已在飞机、列车、船舶中使用。市场现有产品除航空专用的进口材料为焊接产品外, 一般均为胶黏产品, 在湿度大、振动强、温度高等环境下, 面板容易脱胶。开发轻质、高强、耐蚀、可钎焊的蜂窝结构板用面板和芯板是蜂窝板的发展趋势。国外一些国家在 20 世纪 90 年代初就研制了钎焊铝蜂窝板, 开发出高强度、可时效强化、耐蚀、可钎焊的蜂窝材料。近五年我国的蜂窝铝材产量一直保持平均 22% 的增长速度。2012 年我国仅建筑市场的胶黏蜂窝铝产品的市场容量已达 76.74 亿元。预计到 2035 年, 对高强、耐蚀蜂窝复合板的需求将达到 7×10^7 m², 前景十分广阔。

五、我国铝合金材料中长期发展目标

结合我国实际情况与我国铝合金领域所遇瓶颈, 提出以下中期发展目标: 到 2030 年, 高性能铝合金材料达到国际先进水平, 部分达到国际领先水平, 材料综合力学和工艺性能满足现代制造业指标要求, 实现空天飞行器、新能源汽车、轨道交通和厢式货车等领域的大规模应用, 第五代铝合金国产化率达到 80% 以上, 空天用轻合金产量和应用达到 2×10^5 t/a, 交通运输用轻合金产量达到 3×10^5 t/a。

长期发展目标: 到 2035 年, 铝合金材料达到国际领先水平, 实现绝大部分铝合金材料的自给和

输出, 领导全球铝合金产业的发展。第五代铝合金全面国产化, 研制成功第六代铝合金, 空天轻合金产量和应用达到 3×10^5 t/a, 交通运输用轻合金达到 4×10^6 t/a。

六、我国铝合金材料发展对策

围绕上述铝合金材料的问题、发展趋势和发展目标, 着力提高自主创新能力, 建立产业链上下游优势互补、密切合作机制, 缩短周期, 形成持续创新能力, 实现我国从材料大国向材料强国的战略转变, 仍需在以下方面不懈努力。

(一) 加强研发体系建设, 完善发展环境

围绕国家重大工程建设需求, 加强“产学研用”协同创新, 开展“产学研用”合作机制、利益分配、产权保护、诚信体系、保障政策等课题研究, 解决目前“产学研用”间的壁垒, 建立科学有效的创新机制。同时, 加快制定铝合金材料产业发展指导目录和投资导向意见, 完善产业链、创新链、资金链。发挥市场的资源配置作用, 科学引导, 理性投资, 协调国家对重点基础材料行业的聚焦支持, 帮助高性能铝合金材料中小企业健康成长, 营造具有国际竞争力的产业生态环境。

(二) 优化结构, 促进提质增效和协同发展

推进产能置换和淘汰落后产能。积极扩大应用领域和应用水平, 提升高性能铝合金产品质量的稳定性, 降低生产成本, 增强产业支撑能力。推动优势高端铝材企业与高端装备制造企业建立供应链协作关系。通过“产学研”合作, 优化品种结构, 促进产品融入全球高端制造业供应链, 建立综合评价体系, 提高国际竞争力。

(三) 加强配套政策支持

加强知识产权保护, 加大财政、金融、税收等政策对高性能铝材的扶持力度, 完善风险投资运行、避险和退出机制, 形成鼓励使用国产高性能铝材的健康体系。加大深加工铝产品的政策扶持力度, 落实高新技术企业税收优惠政策等, 促进铝合金的应用发展。

(四) 推进人才队伍建设

实施创新人才发展战略, 加强中青年创新人才和团队培养, 鼓励企业“产学研用”结合, 采取柔性引进等灵活政策, 建立国家铝产业创新中心, 培养自主创新人才队伍, 培养一批学科、专业技术带头人, 有效提高人才要素在产业科技创新中的活跃度和推动作用, 提升自主创新能力, 实现铝产业转型升级。

(五) 促进智能制造和“互联网+”融合

提升企业研发、生产和服务的智能化水平, 建立以大数据为基础的工艺模型化、控制智能化的数字化工艺体系。试点示范工厂, 提高产品性能稳定性和质量一致性。鼓励企业模式创新, 促进“互联网+”与企业生产经营全过程融合, 推广个性化定制、柔性化制造, 满足多样化、多层次需求。

(六) 加强国际合作, 尤其是“一带一路”国际合作

积极落实“一带一路”合作, 提升装备、产品、技术、标准、服务的全产业链国际化经营能力。按照《国务院关于推进国际产能和装备制造合作的指导意见》, 充分发挥技术、装备和人才优势, 综合考虑资源、能源、政治、法律、市场等因素, 鼓励有实力的企业在资源丰富的地区投资建厂, 同时积极学习国外企业先进的技术和管理经验, 不断优化产品与装备, 提升国际竞争力。

参考文献

- [1] 中国工程院. 先进基础材料发展战略研究报告(有色金属类) [R]. 北京: 中国工程院, 2019.
Chinese Academy of Engineering. Research report on the development strategy of advanced basic materials (Non-Ferrous Metals) [R]. Beijing: Chinese Academy of Engineering, 2019.
- [2] 余栋梅. 电动汽车挤压铝合金新进展 [J]. 铝加工, 2020, 252(1): 4-7.
Yu D M. New progress in extruded aluminum alloys for electric automobiles [J]. Aluminium Fabrication, 2020, 252(1): 4-7.
- [3] 洪腾蛟, 董福龙, 丁凤娟, 等. 轻合金在汽车轻量化领域的应用研究 [J]. 热加工工艺, 2020, 49(4): 1-6.
Hong T J, Dong F L, Ding F J, et al. Application of aluminum alloy in automotive lightweight [J]. Hot Working Technology, 2020, 49(4): 1-6.
- [4] 侯世忠. 舰船用铝合金的研究与应用 [J]. 铝加工, 2019, 250(5):

- 4-8.
Hou S Z. Research and application of aluminum alloy for ships [J]. *Aluminium Fabrication*, 2019, 250(5): 4-8.
- [5] 邓运来, 张新明. 铝及铝合金材料进展 [J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(9): 2115-2141.
Deng Y L, Zhang X M. Development of aluminium and aluminium alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(9): 2115-2141.
- [6] 王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2000.
Wang Z T, Tian R Z. *Handbook of aluminum alloy and its processing* [M]. Changsha: Central South University Press, 2000.
- [7] 肖亚庆. 铝加工技术实用手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- Xiao Y Q. *Practical manual for aluminum processing technology* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press Co., Ltd., 2005.
- [8] 聂祚仁, 文胜平, 黄晖, 等. 钪微合金化铝合金的研究进展 [J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(10): 2361-2370.
Nie Z R, Wen S P, Huang H, et al. Research progress of er-containing aluminum alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(10): 2361-2370.
- [9] 孙德勤, 陈慧君, 文青草, 等. 耐热铝合金的发展与应用 [J]. *有色金属科学与工程*. 2018, 9(3):65-69.
Sun D Q, Chen H J, Wen Q C, et al. Development and application of heat-resistant Al alloy [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2018, 9(3): 65-69.