

全球交通用铝合金技术发展态势研究——基于 CiteSpace 知识图谱分析

Research Situation Analysis of Global Transportation Aluminum Alloy Technology Based on CiteSpace Knowledge Map

供稿|黄洁, 倪诚蔚, 普康晶, 杨晶媛 / HUANG Jie, NI Chengwei, PU Kangjing, YANG Jingyuan

内容导读

交通运输设备轻量化趋势愈加明朗, 而铝合金因其多种优良特性已成为实现轻量化交通的重要材料。本文通过文献计量学方法, 着重分析全球交通用铝合金领域发文量、机构、国家及关键词等信息, 绘制形成可视化网络图谱。结果显示: 研究主要集中在汽车和航空领域, 包括铝基复合材料和焊接技术; 船舶用铝合金的研究重点为铝合金表面涂层; 而轨道交通用铝合金的研究数量相对较少, 且与汽车、航空领域的文献有较多交叉, 表明其部分技术与汽车、航空用铝合金具有通用性。

近年来, 全球交通运输业呈现出快速发展的态势, 由简易、单一模式转向复杂、多元模式^[1]。随着能源需求与环境污染日益严峻, 节能减排及提高运输效率已成为交通运输业的关注重点。减轻交通工具自重是实现汽车节能减排的有效措施之一, 在保障安全系数的基础上, 铝材料在交通设备中的使用可比钢铁材料减轻自重 30% 以上, 这使其成为实现交通运输轻量化的理想材料。交通用铝合金主要包括车用铝合金、航空用铝合金、轨道交通用铝合金及船舶用铝合金等^[2]。随着铝工业技术的发展和进步, 铝合金在交通运输业的应用将越来越广泛。

研究方法与研究数据源

研究数据筛选

交通用铝合金领域知识谱绘制的数据获取源于 Web of Science 数据库核心合集 SCI-EXPANDED、CPCI-S、CPCI-SSH、ESCI, 采用主题检索方法, 检索策略为: 主题=(aluminum alloy and (Traffic or automobile or bodywork or ship or vessel or aviation or rail)), 检索时间范围为 2010-01-01—2021-06-01, 共检索到交通用铝合金领域相关论文 1932 篇, 去除相关的综述和报道, 将数据集的范围精炼到研究论文和会议论文, 则交通用铝合金领域相关论文数量

作者单位: 云南省科学技术情报研究院, 云南 昆明 650051

为 1851 篇。

研究方法

文献计量学能根据文献体系和文献计量特征等参数,利用数学、统计学等定量方法对文献的分布规律、数量关系和文献之间的内在联系进行统计分析,从而揭示科学技术的某些规律、特征和结构^[3]。CiteSpace 知识图谱能够将一个知识领域来龙去脉的演进历程集中展现在一幅引文网络图谱上,并把图谱上作为知识基础的节点文献和共引聚类所表征的研究前沿自动标识出来,具有“一图谱春秋,一览无余;一图胜万言,一目了然”两大特征^[4]。本研究通过文献计量学方法,采用 CiteSpace 软件对 Web of Science 数据库中 2010—2021 年有关交通用铝合金技术创新领域的文献进行统计分析,根据发文量、机构、国家及关键词等信息,绘制形成可视化网络图谱,梳理全球交通用铝合金领域研究现状、热点和趋势。

分析与结果

论文基础分析

检索到交通用铝合金领域论文 1851 篇,论文共被引频次为 12069 次,平均每篇被引次数为 6.52 次。从数据上来看(图 1 和图 2),近年来,针对交通用铝合金的研究一直被业界关注。根据每年论文发表数量变化分析,2018 年论文发表同比增长率最高,2019 年、2020 年同比增长率较低,但这 3 年的论文发表数在近十年间仍处于领先水平。每年的引文数呈指数级增长趋势,表明业界对该领域保持着高昂的研究热情,理论研究及成果转化效果显现,也说明每年都有新技术涌现,不断完善和丰富该领域的研究内容与成果,未来发展态势较好。

对交通用铝合金研究领域论文进行数据分析发现:2010—2021 年发文量排名前 10 的国家分别是印度、中国、美国、韩国、日本、德国、波兰、俄罗斯

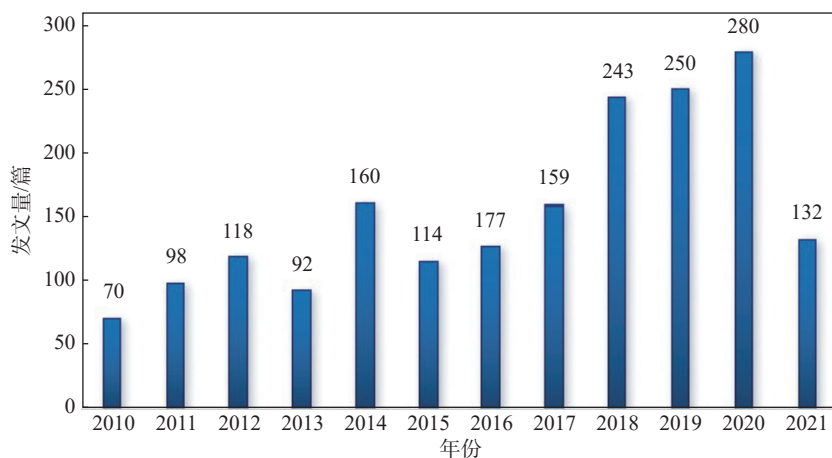


图 1 2010—2021 年发表的论文量

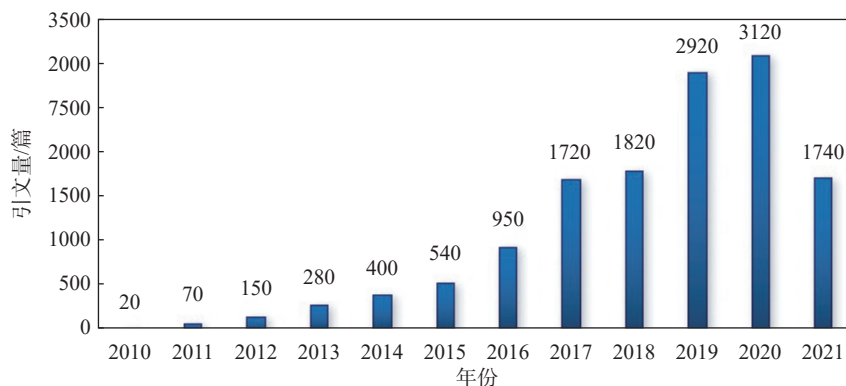


图 2 2010—2021 年的引文量

斯、土耳其和英格兰（见表1）。

研究排名前10的机构为：哈尔滨工业大学、印度国立理工学院、中国科学院、安娜大学（印度）、印度理工学院、西北工业大学、西南交通大学、中南大学、北京科技大学和印度韦洛尔理工大学（见表2）。

从文献数据的分析来看，印度和中国在交通用铝合金领域的发文数量占比超过了总数的50%，研究排名前10的机构也多集中于中国和印度。中国是全球铝主产国，对疫情的控制得当，恢复生产迅速，而印度是亚洲除中国以外最大的铝生产国家，国内有三水铝土矿资源，分布在奥利萨邦、安得拉邦、吉吉拉特邦等地区，且铝工业上游产业发展相对密切，拥有3家大型的上市铝企业集团，分别是韦丹塔资源（Vedanta）、印度铝工业公司（Hindalco）和印度国家铝业公司（Nalco），这

表1 交通用铝合金技术领域发文量排名前十的国家

序号	国家	发文量/篇	占比/%
1	印度（INDIA）	487	26.31
2	中国（PEOPLES R CHINA）	459	24.80
3	美国（USA）	130	7.02
4	韩国（SOUTH KOREA）	128	6.91
5	日本（JAPAN）	75	4.05
6	德国（GERMANY）	71	3.84
7	波兰（POLAND）	64	3.46
8	俄罗斯（RUSSIA）	61	3.30
9	土耳其（TURKEY）	58	3.13
10	英格兰（ENGLAND）	46	2.49

3家公司在疫情封锁时期，上中游业务几乎都在正常运转，甚至有扩张计划^[5]。因此，铝工业领域中，中国和印度的交通用铝合金的研究均相对比较集中。此外，美国、德国、俄罗斯等老牌工业强国在该领域的研究仍保持优势地位。

表2 交通用铝合金技术领域发文量排名前十的研究机构

序号	研究机构	发文量/篇	占比/%
1	哈尔滨工业大学（HARBIN INST TECHNOL）	36	1.93
2	印度国立理工学院（NATL INST TECHNOL）	30	1.61
3	中国科学院（CHINESE ACAD SCI）	28	1.51
4	安娜大学（ANNA UNIV）	21	1.13
5	印度理工学院（INDIAN INST TECHNOL）	19	1.02
6	西北工业大学（NORTHWESTERN POLYTECH UNIV）	19	1.02
7	西南交通大学（SOUTHWEST JIAOTONG UNIV）	18	0.97
8	中南大学（CENT S UNIV）	17	0.91
9	北京科技大学（UNIV SCI TECHNOL BEIJING）	16	0.86
10	印度韦洛尔理工大学（VIT UNIV）	15	0.81

技术主题聚类分析

基于 Web of Science 文献引擎，使用 CiteSpace 对 2010—2021 年区间内搜索出的 1851 篇交通用铝合金领域的文献进行可视化分析，为了保证聚类结果明显，尽可能地将数据集中的文献纳入分析范畴，将数据集分为 11 个切片，以每 1 年为一个切片，将交通用铝合金领域文献按被引次数排序，保留每年被引频次最高的 45 篇文献（topN 45），进行关键词共现聚类分析，以分析相关领域内技术的研究重点和演化过程，推测技术发展方向。

从技术主题聚类图谱（图3）中可以看出，所示的几个大聚类分别为：#0 有限元模拟；#1 金属基复

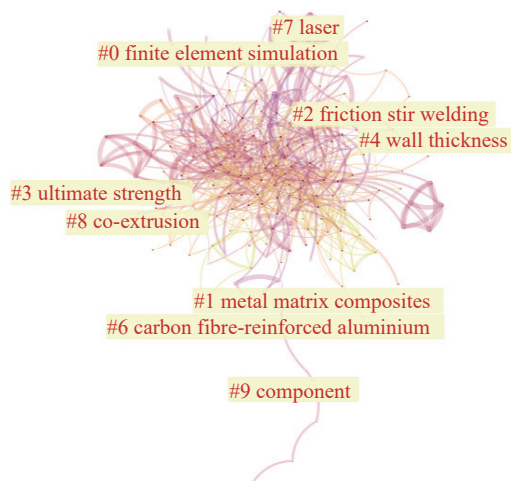


图3 交通用铝合金领域技术主题聚类

合材料；#2 摩擦搅拌焊；#3 极限强度；#4 铸壁厚度；#6 碳纤维增强铝；#7 激光；#8 双金属挤压；#9 元件（聚类标签编号越小，聚类技术主题涵盖技术布局越完整）^[6]。几大聚类反应出在 2010—2021 年间，交通用铝合金的相关文献主要研究及应用的

方向。

为分析技术的演化过程，在生成关键词和主题词共现聚类图谱之后，将聚类编号作为 Y 轴，引文发表年份作为 X 轴，得到共现词网络的时间线图（图 4）。

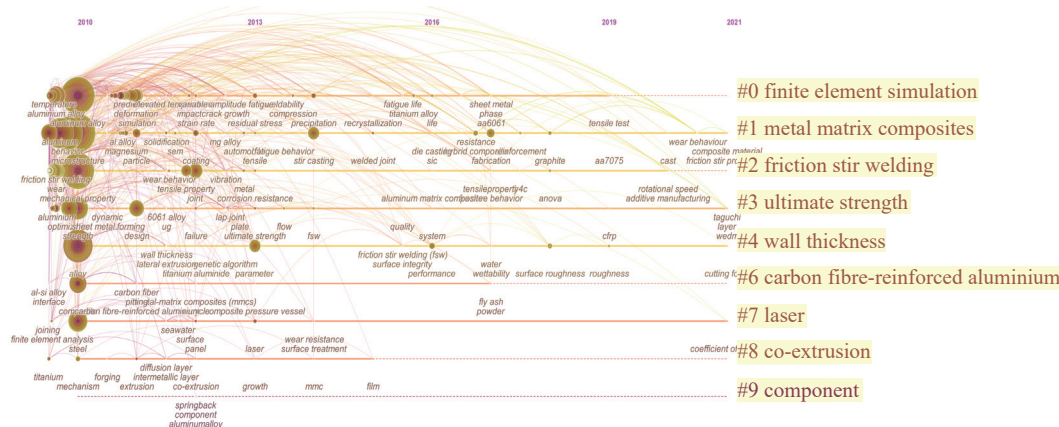


图 4 交通用铝合金领域技术演变时间图谱

时间线图，可以展现各个聚类（即子领域）发展演变的时间跨度和研究进程。从图 4 可以看出，4 个聚类（#1 金属基复合材料、#3 极限强度、#4 铸壁厚度、#7 激光）的研究从 2010 年一直持续到了 2021 年；1 个聚类（#2 摩擦搅拌焊）研究持续到 2020 年；1 个聚类（#0 有限元模拟）研究持续到 2019 年，说明这些技术一直是该领域研究热点。而聚类#9 元件研究、#8 双金属挤压、#6 碳纤维增强铝研究分别停止于 2010 年、2014 年、2017 年，说明业界对这些技术研究热情减退，不再是该领域研究重点。关键词的频次（Frequency）、中心度（Centrality）在一定程度上能够显示该领域的研究热点。频次表示关键词出现的次数，中心度表示一个关键词连接另外两个关键词之间最短路线的次数，中心度越高，表示该关键词越重要。对 Web of Science 数据库中交通用铝合金领域文献相关技术主题聚类进行统计分析，将技术点关键词按中心度，从高到低的顺序排列保留与交通用铝合金领域关联较大的技术点，得到表 3。

根据上表统计出的研究热点分析，2010—2021 年间，Web of Science 数据库中，关于交通用铝合金研究热点主要集中在铝合金及其复合材料焊接（1.金

表 3 技术主题研究热点统计

序号	频率	中心度	技术热点关键词	中文含义
1	73	0.15	Metal matrix Composite	金属基复合材料
2	319	0.07	Mechanical property	机械性能
3	78	0.07	Friction stir welding	搅拌摩擦焊接
4	75	0.06	Optimization	优化
5	24	0.06	Tensile strength	抗拉强度
6	2	0.06	Springback	回弹
7	360	0.05	Microstructure	微观结构
8	26	0.03	Numerical simulation	数值模拟
9	12	0.03	Finite element analysis	有限元分析
10	9	0.03	Extrusion	挤压
11	70	0.02	Corrosion	腐蚀
12	46	0.02	Stir casting	搅拌铸造
13	42	0.02	Tensile property	拉伸性能
14	40	0.02	Friction	摩擦
15	32	0.02	Heat treatment	热处理
16	21	0.02	Coating	涂层
17	18	0.02	Formability	成形性
18	17	0.02	Resistance	电阻
19	16	0.02	Powder metallurgy	粉末冶金
20	15	0.02	Graphite	石墨
21	3	0.02	Surface treatment	表面处理
22	21	0.01	Surface roughness	表面粗糙度
23	18	0.01	Matrix composite	基体复合材料

属基复合材料、3.搅拌摩擦焊接、12.搅拌铸造、19.粉末冶金、23.基体复合材料)、力学性能(2.机械性能、5.抗拉强度、6.回弹、8.数值模拟、9.有限元分析、10.挤压、13.拉伸性能、14.摩擦)、微观结构(4.优化、7.微观结构、17.成形性、20.石墨)、耐蚀性及表面处理(11.腐蚀、15.热处理、16.图层、18.电阻、21.表面处理、22.表面粗糙度)等方面。

研究现状分析

结合共现词网络和技术热点关键词分析近 10 年交通用铝合金相关技术领域的研究现状,可分为以下 4 类:

(1) 汽车用铝合金研究

汽车轻量化是全球汽车工业的发展方向,而铝合金具有密度小、成形性好、耐腐蚀性能优良等特点,成为实现汽车轻量化的重要途径^[7]。汽车用铝基复合材料和铝合金焊接技术优化是该领域研究的两个重点。汽车用铝基复合材料的研究热点主要包括:二硼化铝钛复合材料的制备、组织和力学性能研究;碳化硅增强铝基纳米复合材料研究;碳纳米管增强铝基复合材料拉伸性能研究;陶瓷粉末增强铝合金复合材料力学性能研究;搅拌铸造铝基复合材料的硬度和磨损特性研究;搅拌铸造石墨颗粒增强铝基复合材料的力学性能研究等^[8-13]。汽车用铝合金焊接技术优化的研究热点主要包括:车用铝与钢的超声波点焊研究;工艺参数对铝合金搅拌摩擦焊接头抗拉强度的影响研究;搅拌摩擦焊(FSW)连接铝和镁合金研究;焊接时间对铝-碳纤维增强塑料搅拌摩擦点焊疲劳性能的影响研究;异种铝合金搅拌摩擦焊工艺参数的建模与优化研究等^[14-18]。

(2) 航空用铝合金研究

在航空工业中,铝材是首选的轻量化结构材料,用量达到 80% 以上,其中常用的铝合金为 2xxx 系和 7xxx 系,广泛应用于航空飞行器结构的制造,机身的蒙皮、框架、壁板、油箱、发动机和起落架等部件^[19-20]。从发表的研究论文来看,航空用铝基复合材料优化和焊接改进是该领域的研究重点。航空用铝基复合材料优化的研究热点包括:航空航天用铝锂基复合材料研究;7075 铝基复合材料性能研究;TiB₂ 颗粒的分布及其对 A390 合金力学性能的影响研究;氮化铝合金基复合材料合成及力学性能

评价研究;B₄C 和 SiC 含量对航空用铝基复合材料力学性能的影响研究等^[21-25]。航空用焊接过程改进的研究热点包括:7050 铝合金搅拌摩擦焊焊缝温度分布及力学性能的改善研究;无涂层激光冲击强化对 A6061 铝合金搅拌摩擦焊接头疲劳性能的改善研究;新型铝锂合金光纤激光焊接组织与力学性能研究;铝合金机身面板用双面激光束焊接 T 型接头的工艺、微观结构和机械性能研究;航空级铝合金搅拌摩擦焊的热循环、力学和冶金性能研究等^[26-30]。

(3) 轨道交通用铝合金研究

轨道交通装备轻量化是现代高速列车升级的必由之路。目前,各国的高速列车车体已基本采用铝合金构架。此外,车体顶盖、齿轮箱箱体等诸多部件也已采用铝材制造^[31]。轨道交通用铝合金焊接技术一直是该领域的研究重点,其主要研究内容涉及:6005A-T4 铝合金薄板搅拌摩擦焊接头的组织与力学性能研究;不同形状工具和工艺参数对 6061 铝合金搅拌摩擦焊接缺陷和力学性能的影响研究;铝夹层激光焊接力学性能研究等^[32-34]。

(3) 船舶用铝合金研究

铝合金除了具有密度低、比强度高、良好的加工及焊接性能成为造船工业很有发展前景的材料之外,其具有比钢更优异的耐腐蚀性能使其在船舶工业中成为主要结构材料之一^[2]。近 10 年,船体材料选择和船舶用铝合金表面涂层是该领域的研究重点。船体材料选择研究热点包括:SiC、Al₂O₃ 和赤泥增强 6061 铝合金基复合材料磨损行为的比较研究;陶瓷增强体对 Al-Cu 合金-金属基复合材料微观结构、力学和摩擦学性能的影响研究;船用铝合金在海水中的力学和电化学特性研究等^[35-37]。船舶用铝合金表面涂层研究热点包括:铝合金保护用镁基牺牲阳极(富镁底漆)的研制及其性能研究;船用 Al5083 铝合金超疏水涂层的空蚀行为研究;Al₂O₃ 氧化涂层用于铝合金船体耐腐蚀性研究;WC-Co-Cr 热喷涂层对 Ni-Al 青铜合金腐蚀性的影响研究;使用等离子体电解氧化(PEO)涂层铝合金在海洋环境中的抗腐蚀性研究等^[38-42]。

研究趋势分析

为继续分析本数据集中交通用铝合金的研究热点持续度,进行了 Burstness 分析,得到图 5。

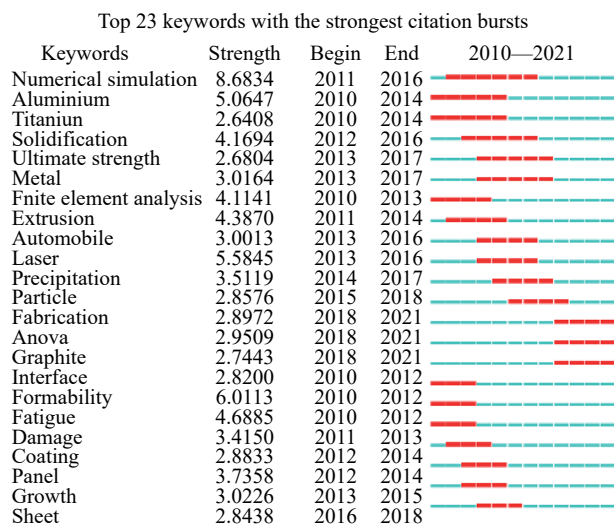


图5 交通用铝合金领域技术点突变图谱（阴影表示持续时间）

Web of Science 数据库中, 取 Minimum Duration 为 3, 得到 23 个突变词 (Keywords), 表示交通用铝合金研究领域热度持续 3 年以上的研究点有 23 个, 而近 5 年的研究, 主要集中于铝合金的制造 (Fabrication)、数学方差分析 (Anova) 和碳纤维增强铝 (Graphite) 3 个方面, 表明铝合金和新型纳米碳纤维结合, 制造新型实用铝合金复合材料已成为目前交通用铝合金技术发展的一个研究热点。

结束语

本文通过文献计量学方法, 以 Web of Science 数据库核心合集为数据源, 对全球交通用铝合金领域的发文量进行统计与分析, 在研究该领域技术整体发展态势的基础上, 采用 CiteSpace 软件绘制形成交通用铝合金领域技术发展态势和研究热点可视化网络图谱。综上分析, 交通用铝合金的研究主要集中在汽车和航空领域, 包括铝基复合材料和焊接技术研究, 以期提高铝合金材料性能; 船舶用铝合金的研究重点为铝合金表面涂层的研究, 用以提高船体对海洋微腐蚀环境的耐受性; 而轨道交通用铝合金的研究数量相对较少, 且与汽车、航空领域的文献有较多交叉, 表明其部分技术与汽车、航空用铝合金具有通用性。

在“碳达峰”、“碳中和”指引下, 我国力争于 2030 年前控制二氧化碳的排放达到峰值, 2060 年前实现碳中和, 交通运输业是推动节能减排的重要产

业。而铝合金材料作为交通工具轻量化的理想材料, 可有效降低油耗、提高运输效率, 对减轻环境污染有着重要意义。近年来, 我国交通用铝合金技术和产业得到了迅速发展, 论文发表数量及发文机构占比, 皆居世界前列。但与欧美等发达国家相比, 我国铝合金材料技术研发水平仍存在一定差距。因此, 我国应从国家层面加强宏观指导, 继续加大铝合金材料科研投入, 积极开展基础研究及前沿研究, 深化国际间科技合作与交流, 加强人才培养与引进, 推动我国交通用铝合金材料高质量发展。

参考文献

- [1] 李焱. 浅谈我国交通运输经济现状与未来发展方向. 绿色环保建材, 2019(9): 254
- [2] 聂德键, 罗铭强, 陈文泗, 等. 交通运输用铝合金材料研究进展. 有色金属加工, 2016, 45(5): 15
- [3] 梁国强. 国内文献计量学综述. 科技文献信息管理, 2013, 27(4): 58
- [4] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能. 科学学研究, 2015, 33(2): 242
- [5] 天风期货. 印度第二波疫情浪潮来袭, 对铝工业有何影响? (2021-05-06) [2022-07-01]. <http://db.cnmm.com.cn/NewsShow.aspx?id=427590>
- [6] 李杰, 陈美超. CiteSpace: 科技文本挖掘及可视化. 2 版. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 2017
- [7] 李家奇, 杨钢, 陈俊宇, 等. 汽车轻量化铝合金研究进展. 云南冶金, 2020, 49(5): 68
- [8] Mohanavel V, Rajan K, Arul S. Production, microstructure and mechanical behavior of AA6351/TiB₂ composite synthesized by direct melt reaction method. *Mater Today Proc*, 2017, 4(2): 3315
- [9] Reddy A P, Krishna P V, Rao R N, et al. Silicon carbide reinforced aluminium metal matrix nano composites: A review. *Mater Today Proc*, 2017, 4(2): 3595
- [10] Jagannatham M, Prathap C, Bakshi S, et al. Tensile properties of carbon nanotubes reinforced aluminum matrix composites: A review. *Carbon*, 2020: 16014
- [11] Gupta P K, Srivastava R K. Fabrication of ceramic reinforcement aluminium and its alloys metal matrix composite materials: A review. *Mater Today Proc*, 2018, 5(9): 18761
- [12] Sarada B N, Murthy P L S, Ugrasen G. Hardness and wear characteristics of hybrid aluminium metal matrix composites produced by stir casting technique. *Mater Today Proc*, 2015, 2(4/5): 2878
- [13] Mohanavel V, Rajan K, Kumar S S, et al. Study on mechanical properties of graphite particulates reinforced aluminium matrix composite fabricated by stir casting technique. *Mater Today Proc*, 2018, 5(1): 2945

- [14] Prangnell P, Haddadi F, Chen Y C. Ultrasonic spot welding of aluminium to steel for automotive applications-microstructure and optimisation. *Mater Sci Technol*, 2011, 27(3): 617
- [15] Dwivedi S P. Effect of process parameters on tensile strength of friction stir welding A356/C355 aluminium alloys joint. *J Mech Sci Technol*, 2014, 28(1): 285
- [16] Kayode O, Akinlabi E T. An overview on joining of aluminium and magnesium alloys using friction stir welding (FSW) for automotive lightweight applications. *Mater Res Express*, 2019, 6(11): 2005
- [17] Ogawa Y, Akebono H, Tanaka K, et al. Effect of welding time on fatigue properties of friction stir spot welds of al to carbon fibre-reinforced plastic. *Sci Technol Weld Joining*, 2019, 24(3): 235
- [18] Kumar A, Khurana M K, Singh G. Modeling and optimization of friction stir welding process parameters for dissimilar aluminium alloys. *Mater Today Proc*, 2018, 5(11): 25440
- [19] 张新明, 刘胜胆. 航空铝合金及其材料加工. 中国材料进展, 2013, 32(1): 39
- [20] 刘牧东. 航空铝合金材料低温裂纹扩展研究现状与展望. 航空工程进展, 2020, 11(1): 10
- [21] Rioja R J, Liu J. The evolution of Al-Li base products for aerospace and space applications. *Metall Mater Trans A*, 2012, 43(9): 3325
- [22] Imran M, Khan A R A. Characterization of Al-7075 metal matrix composites: a review. *J Mater Res Technol*, 2019, 8(3): 3347
- [23] Li P T, Li Y G, Wu Y Y, et al. Distribution of TiB₂ particles and its effect on the mechanical properties of A390 alloy. *Mat Sci Eng A*, 2012, 546: 146
- [24] Vinayagam M. Synthesis and evaluation on mechanical properties of LM₄/AlN alloy based composites. *Energ Source Part A*, 2022, 44(1): 1888
- [25] Bommana D, Dora T R K, Senapati N P, et al. Effect of 6wt% particle(B₄C+SiC) reinforcement on mechanical properties of AA6061 aluminum hybrid MMC. *Silicon*, 2022, 14(8): 4197
- [26] Fu R D, Sun Z Q, Sun R C. et al Improvement of weld temperature distribution and mechanical properties of 7050 aluminum alloy butt joints by submerged friction stir welding. *Mater Design*, 2011, 32(10): 4825
- [27] Sano Y, Masaki K, Gushi T, et al. Improvement in fatigue performance of friction stir welded A6061-T6 aluminum alloy by laser peening without coating. *Mater Design*, 2012, 36: 809
- [28] Fu B L, Qin G L, Meng X M, et al. Microstructure and mechanical properties of newly developed aluminum-lithium alloy 2A97 welded by fiber laser. *Mat Sci Eng A*, 2014, 617: 1
- [29] Yang Z B, Tao W, Li L Q, et al. Double-sided laser beam welded t-joints for aluminum aircraft fuselage panels: process, microstructure, and mechanical properties. *Mater Design*, 2012, 33: 652
- [30] Verma S, Gupta M, Misra J P. Study of thermal cycle, mechanical, and metallurgical properties of friction stir welded aviation grade aluminum alloy. *Proc Inst Mech Eng Part G*, 2019, 233(11): 4202
- [31] 罗彦云, 蒲全卫, 左国良. 铝合金和镁合金在轨道交通装备轻量化上的应用. 电力机车与城轨车辆, 2020, 43(3): 1
- [32] Sheng X F, Li K, Wu W K, et al. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded joint of an aluminum alloy sheet 6005A-T4. *Metals*, 2019, 9(11): 1152
- [33] Daneji A, Ali M, Pervaiz S. Influence of tool geometry and processing parameters on welding defects and mechanical properties for friction stir welding of 6061 aluminium alloy. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2018, 346: Art No. 012041
- [34] Barbieri G, Cognini F, Lapi G, et al. Mechanical behavior of aluminum sandwiches made by laser welding. *Procedia Eng*, 2015, 109: 427
- [35] Singla Y K, Chhibber R, Bansal H, et al. Wear behavior of aluminum alloy 6061-based composites reinforced with SiC, Al₂O₃, and red mud: a comparative study. *JOM*, 2015, 67(9): 2160
- [36] Sohag M A Z, Gupta P, Kondal N, et al. Effect of ceramic reinforcement on the microstructural, mechanical and tribological behavior of Al-Cu alloy metal matrix composite. *Mater Today Proc*, 2020, 21: 1407
- [37] Kim S J, Jang S K, Han M S, et al. Mechanical and electrochemical characteristics in sea water of 5052-O aluminum alloy for ship. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2013, 23(3): 636
- [38] Pathak S S, Mendon S K, Blanton M D, et al. Magnesium-based sacrificial anode cathodic protection coatings (Mg-Rich Primers) for aluminum alloys. *Metals*, 2012, 2(3): 353
- [39] Fahim J, Hadavi S M M, Ghayour H, et al. Cavitation erosion behavior of super-hydrophobic coatings on Al5083 marine aluminum alloy. *Wear*, 2019, 424: 122
- [40] Lee S J, Han M S, Kim S J. Evaluation of corrosion resistance for two-step aluminum anodizing with processing time. *J Nanosci Nanotechnol*, 2016, 16(11): 11262
- [41] Lee L D, Kim S J. Influence of thermally sprayed WC-Co-Cr coatings on the corrosion characteristics of Ni-Al bronze alloy. *Int J Electrochem Sci*, 2021, 16(7): 1
- [42] Egorkin V S, Vyalyi I E, Gnedenkov S V. Corrosion properties of Amg3 aluminum alloy treated by short-Pulse plasma electrolytic oxidation in marine conditions. *Mar Intellect Techno*, 2021(4): 117

基金项目：云南省科技计划资助项目（202004AL030015；202104AL030005）。

作者简介：黄洁（1986—），女，哈尼族，硕士，副研究员，工作于云南省科学技术情报研究院，主要从事科技情报与产业分析研究、决策咨询研究。通信地址：云南省昆明市盘龙区人民东路246号云南省科学技术情报研究院，E-mail: 61454717@qq.com。

通信作者：倪诚蔚（1983—），女，汉族，硕士，副研究员，工作于云南省科学技术情报研究院，主要从事科技情报与产业分析研究、环境技术研究。E-mail: 43422682@qq.com。