

2024年
第08期

先进制造 与新材料

ADVANCED MANUFACTURING
& NEW MATERIALS BRIEFING



上海科学技术情报研究所
上海市前沿技术发展研究中心
技术与创新支持中心(TISC)

轻质材料的创新与突破

编者按

在现代科技飞速发展的今天，轻质材料以其独特的性能和广泛的应用前景，成为材料科学领域的研究热点。近年来，随着航空航天、汽车制造和可穿戴设备等领域对高性能、低重量材料需求的不断增加，轻质材料的研发取得显著进展。最新的研究不仅在材料强度、韧性和耐腐蚀性上有所突破，还在可持续性和成本效益方面取得长足进步。例如，复合材料和新型合金的应用，使得产品在保持优异性能的同时，大幅减轻重量。此外，3D打印技术的发展，也为轻质材料的设计和制造带来新的可能性。未来，轻质材料有望在更多高科技领域发挥关键作用，推动产业技术革新。

本期《先进制造与新材料》简报对轻质材料的相关政策、技术和产业动态进行介绍。

目 录

政策.....	1
深圳市推动新材料产业集群高质量发展.....	1
技术.....	3
中国科学家开发用于隔热的轻质、柔性气凝胶复合材料.....	3
中外科学家合作制备轻质高强金属力学超材料.....	4
先驱体转化 SiBCN 陶瓷的进展与展望.....	4
高能束增材制造铝合金及其复合材料展望.....	7
产业.....	8
中国汽车轻量化前景分析.....	8
福特公司科学家对轻质材料在汽车轻量化中应用的想法.....	9

政策

深圳市推动新材料产业集群高质量发展

2023年9月13日，深圳市工业和信息化局为贯彻落实市委市政府关于“20+8”战略性新兴产业和未来产业集群发展的规划和部署，推动新材料产业集群高质量发展，依据《深圳市人民政府关于发展壮大战略性新兴产业集群和培育发展未来产业的意见》和《深圳市培育发展新材料产业集群行动计划（2022-2025年）》等文件精神，发布《深圳市关于推动新材料产业集群高质量发展的若干措施》。本刊将轻质材料相关内容摘编如下：

重点支持领域：

措施重点聚焦新能源材料、电子信息材料、生物医用材料、先进金属材料、高分子材料、绿色建筑材料、前沿新材料等领域，遵循“有效市场，有为政府”原则，对技术含量高、应用前景好、示范带动作用强、处于产业链关键环节的产品、平台和项目，在产业基础建设、产业链提升及融合发展、产业生态发展等方面予以支持。

突破重点材料领域发展瓶颈：

支持在先进金属材料领域建设高端研究机构。重点围绕高端装备配套结构性金属材料、轻质合金材料、高温合金材料等我国及深圳市下游产业亟需的先进金属材料，鼓励高水平科研院所、国内外知名龙头企业在深圳建设先进金属材料国际化基础研究和应用基础研究机构，采用市区联动方式，在场地建设、设备购置、科技研发、人才引进等方面予以综合支持。

推动新材料集群高质量发展：

（一）引进领先企业及团队优化产业链布局。围绕湿电子化学品、有机发光材料、衬底材料、先进金属材料等新材料薄弱环节，支持引进国内外领先企业、机构及团队在深圳落地研发及产业化项目，给予最高不超过 5000 万元资助。对具有重大促进和产业支撑作用的，可视情况实行“一企一策”，报市政府审定。

（二）支持开展关键环节提升和智能化绿色化改造。支持聚焦新能源、电子信息、生物医用、先进金属、高分子、绿色建材、前沿新材料等深圳市重点新材料领域关键瓶颈，组织实施突破主要性能指标、对产业发展起支撑作用的新材料产业链关键环节提升项目，按一定比例，给予最高 500 万元资助。支持新材料企业以降本提效、绿色环保为目的，积极实施技术装备改造升级和开展以关键工序智能化改造、关键岗位机器换人、生产过程和管理手段智能化控制等为核心的工厂智能化改造，按现行政策，根据项目总投资一定比例给予事后资助。

（三）支持实施新材料中试及产业化项目。支持二维材料、燃料电池材料、3D 打印材料、微纳米材料与器件等新型材料开展科研成果二次开发和中试放大试验，加快工艺、技术、产品高效转化，按项目总投资一定比例予以资助，最高不超过 1000 万元。支持新能源材料、电子信息材料、生物医用材料、先进金属材料、高分子材料等重点发展领域具备技术先进性的新产品开展产业化项目，按项目总投资一定比例给予资助，最高不超过 1500 万元。

（四）加速首批次重点新材料供应链导入进程。支持符合条件的企业申报工业和信息化部首批次保险补偿项目。支持企业研发生产符合工业和信息化部

及深圳市《重点新材料首批次应用示范指导目录》的首批次新材料产品，按产品销售额的一定比例给予资助，最高不超过 1000 万元。

(五) 培育新材料制造业单项冠军和“专精特新”企业。支持新材料企业聚焦细分领域，在特定细分产品市场形成领先优势，采用事后方式予以奖励。对获得国家“制造业单项冠军示范企业”和“制造业单项冠军产品”称号的，分别给予 300 万元和 200 万元奖励；对获得深圳市“制造业单项冠军示范企业”和“制造业单项冠军产品”称号的，分别给予 200 万元和 100 万元奖励；对获国家专精特新“小巨人”和深圳市专精特新中小企业认定的，分别给予最高 50 万元和 10 万元奖励。

资料来源：深圳市工业和信息化局. 深圳市关于推动新材料产业集群高质量发展的若干措施, 20230913, https://gxj.sz.gov.cn/xxgk/xxgkml/zcfgjzcd/content/post_10834578.html

技术

中国科学家开发用于隔热的轻质、柔性气凝胶复合材料

由于气凝胶在航空航天工业、军事行动和靠近火源等恶劣环境领域的应用潜力，其高温热防护受到研究人员的广泛关注。特别是，聚酰亚胺、酚醛、芳纶等有机气凝胶由于其低密度而非常有利，其中具有高炭产率的酚醛树脂气凝胶（PRA）作为一种有能力的烧蚀剂很受欢迎，为了在高机械应力和高热载荷条件下获得更好的力学性能，必须用坚韧的纤维对脆弱的气凝胶进行加固。

由于具有优异的热稳定性和机械性能，广泛选择碳纤维、石英纤维（QF）和莫来石纤维与 PRA 结合制成热防护复合材料。其中，NASA 开发的酚醛浸渍碳烧蚀剂（PICA）是一种典型的轻质热防护烧蚀复合材料。由于其重量轻、导热系数低、热稳定性好，已被用于美国宇航局的火星探测、“星尘号”返航和 SpaceX 的“龙”太空舱等任务。随着航空航天工业空前快速发展，PICA 的刚性和脆性带来失效应变低、缝缝繁琐、对冷结构适应性低等问题，严重制约刚性 PICA 的实际应用。因此，迫切需要进一步开发轻质、柔韧、隔热的复合材料。

哈尔滨工业大学张幸红与洪长青团队针对开发轻质、柔韧、隔热的复合材料取得最新进展。该文报告一种均匀的化学键合策略，用于制造具有良好烧蚀隔热性能的轻质柔性纤维增强酚醛树脂气凝胶 FRPRA。酚醛树脂气凝胶基质与酚醛纤维增强材料的相容性提高材料的可压缩性（循环应变为 60%）和可弯曲性（循环应变为 30%）以及烧蚀过程中的结构稳定性。此外，低堆积密度和导热系数分别为 0.20 g/cm^3 和 0.043 W/mK ，使复合材料具有高效的保温能力。使

用 8mm 厚的衬垫，可以将 200°C 的温度降低到 70.6°C，通过与 Al 面板结合，可以将 1200°C 左右的温度伪装到 78°C。基于其可弯曲性，该材料还可实现 600°C 的保形隐身。因此，该复合材料在静态和动态绝热方面都具有应用潜力。
资料来源：ACS Appl. Mater. Interfaces 2023, 15, 51, 59866–59875

中外科学家合作制备轻质高强金属力学超材料

金属力学超材料是由特定结构单元在三维空间按一定规律排列而构成的多孔金属材料，也称为金属点阵材料，是新一代先进轻质高强材料。上海交通大学材料科学与工程学院的顾剑锋教授团队联合澳大利亚皇家墨尔本理工大学马前教授团队，成功打印出密度为 1.63 克/立方厘米的钛合金 (Ti-6Al-4V) 力学超材料，其屈服强度和最大压缩强度分别达到 308 兆帕和 417 兆帕。

研究团队从单一变形机制的经典 Gibson-Ashby 模型出发，建立多变形机制（拉伸、弯曲和剪切）共同作用条件下的力学模型，该模型能有效地预测不同孔隙率的金属力学超材料的强度和弹性模量，同时也适用于合金纳米多孔材料、微纳尺度的金属多孔材料和人体骨骼的天然多孔材料的强度和弹性模量预测。此外，该模型可以指导实施对各变形机制的调控，可谓是对 Gibson-Ashby 经典模型从基本原理到应用范围的全方位拓展。

更为重要的是，该模型从变形原理上拓展出一个设计轻质高强金属力学超材料的新概念。研究团队以上述理论创新为基础，成功打印出钛合金力学超材料，其屈服强度和最大压缩强度远高于相同的孔隙率或密度条件下各类金属多

孔材料或超材料的性能，比商用镁合金 WE54 和 AZ91 更轻、更强、更耐蚀，有望在航空航天、生物医学、化学工程、空间和能源技术等领域获得应用。

研究人员表示，该工作的理论创新以及对不同设计方案的实验验证，为后续设计开发各类轻质高强金属力学超材料提供一个新的理论工具。

资料来源：Zhong, Haozhang & Das, Raj & Gu, Jianfeng & Qian, Ma. (2023). Low-density, high-strength metal mechanical metamaterials beyond the Gibson-Ashby model. *Materials Today*. 10.1016/j.mattod.2023.07.018.

先驱体转化 SiBCN 陶瓷的进展与展望

基于先驱体转化法在分子结构调控和加工成形方面的优势，先驱体转化 SiBCN 陶瓷受到广泛关注，在 SiBCN 陶瓷先驱体及其制备多种形态与功能陶瓷材料方面取得比较丰富的研究成果。相关科研人员总结 2016 年以来先驱体转化 SiBCN 陶瓷的进展，介绍 SiBCN 陶瓷先驱体、陶瓷纤维、陶瓷基复合材料和功能陶瓷材料 4 个方面的主要研究。

总的来看，近年来 SiBCN 陶瓷研究取得不少亮点，主要体现在 4 个方面：

(1) 应用导向的先驱体改性与转化技术更加成熟，先驱体的分子结构设计逐步清晰；(2) 对先驱体与陶瓷之间的构效关系认识逐步明确，先驱体转化 SiBCN 陶瓷的理论体系更加深入；(3) SiBCN 陶瓷的功能应用不断被挖掘，结构功能一体化应用更加广泛；(4) SiBCN 陶瓷的制备方法及其形态呈现多样化发展，可应用领域更加多元化。在 SiBCN 陶瓷先驱体方面，突出特点是组成结构调控更加精细化，研究重点是聚硼硅氮烷组成原子比或者某一元素的含量调控及其对陶瓷产物结构与性能的影响，其中难熔金属化合物掺杂改性、抗氧化和自愈合

性能受到广泛关注，也成为多组元陶瓷材料的研究热点。但是，基于 SiBCN 的多元陶瓷体系组成结构的可调控空间很大，而现有研究使用的 SiBCN 先驱体种类很少，多数采用中国科学院化学研究所研制的液态聚硼硅氮烷，从侧面说明国产 SiBCN 陶瓷先驱体在品类方面还不丰富、可选材料类型不多。基于原子键合结构和基元结构的调控，特别是发挥产学研用的协同作用，发展并形成多品种化、低成本化和高稳定性的 SiBCN 陶瓷先驱体产品是支撑未来 SiBCN 陶瓷材料的重要基础。

在 SiBCN 连续陶瓷纤维方面，由于德国 SiBCN 陶瓷纤维没有实现商品化供应，研究者无法获得成熟稳定的 SiBCN 纤维产品，造成 SiBCN 陶瓷纤维的复合材料应用研究极为稀少。国内关于 SiBCN 纤维的制备与性能研究为数不多，主要研究力量是国防科技大学和东华大学，近几年国防科技大学在无定形 SiBCN 陶瓷纤维基础上，进一步提出纳米 SiC 晶粒稳定的 SiBCN 陶瓷纤维，解决了无定形 SiBCN 纤维的碳热还原反应导致的失重问题和相分离造成的缺陷问题，大幅提高 SiBCN 陶瓷纤维的耐高温性能，首次实现 SiBCN 纤维在 2000°C 以上惰性气氛的质量稳定性和结构稳定性。相比于耐高温 SiC 纤维，SiBCN 纤维的性能与应用研究仍处于起步阶段，系统性不足、成熟度不高，高温氧化环境下的服役性能特别是在复合材料中的性能尚属空白。未来，一方面需要大力推动国产化 SiBCN 陶瓷纤维技术成熟，另一方面需要系统研究纤维增强陶瓷基复合材料的基体匹配与复合工艺，阐明 SiBCN 纤维增强陶瓷基复合材料在服役环境下的结构与性能演变，这两个方面是 SiBCN 纤维发展与应用的关键着力点。

在 SiBCN 陶瓷基体方面，得益于国产液态 SiBCN 陶瓷先驱体的保障能力提升，我国成为 C/SiBCN 和 SiC/SiBCN 两类代表性陶瓷基复合材料的主要研究力量。在 PyC、BN 界面相以及多层界面相，CVI、PIP 以及 CVI+PIP 等复合工艺，SiBCN 基体和 SiC-SiBCN 复合基体 3 个方面开展系统研究。对 C/SiBCN 和 SiC/SiBCN 两类陶瓷基复合材料的力学性能、吸波性能以及耐高温性能与耐烧蚀性能开展了深入分析，取得丰富的研究结果和显著的技术进步，已经成为陶瓷基复合材料的研究热点之一。同时，SiBCN 陶瓷基复合材料的发展仍处于初步探索阶段，研究方法和结果属于原有复合材料技术的延长线，虽然通过多种先驱体或多种复合技术分步复合方法能够调控复合材料的成分，但是多种陶瓷基体复合必然存在空间组织结构的不均匀，在高温以及热震条件下产生的热应力会带来应用风险，在性能水平和功能应用方面仍表现出散点状结果、缺乏系统性。未来，面向应用需求发展高性能 SiBCN 基复合材料，需要从陶瓷先驱体和复合技术两个方面协同发力，充分发挥多元组成结构的调控潜力，研制出新型、独特的复合材料。

先驱体转化 SiBCN 陶瓷的结构功能一体化研究进展很快，在传统结构应用的基础上开辟了新的功能方向。利用先驱体优异的可加工特点有利于形态上多样化，既可以通过 3D 打印技术制造复杂三维结构和元器件，又可以通过静电纺丝技术和溶胶凝胶技术制备纳米陶瓷纤维和陶瓷气凝胶；同时得益于 SiBCN 陶瓷微结构与介电性能宽域可调的优势，通过 SiBCN 陶瓷先驱体的掺杂或改性便于调节带隙宽度，为吸波、传感、催化和电池方面的应用奠定基础。目前，功能化 SiBCN 陶瓷的性能水平与实用化要求还有差距，技术成熟度还比较低，

但是随着电磁功能和电子功能材料的快速发展，SiBCN 陶瓷也将迎来更大发展潜力，有望在复杂环境传感器、高温吸波材料和高性能电池方面出现新的突破。

经过近 30 年的持续研究，SiBCN 陶瓷相关研究取得很大进展，现阶段仍然存在不少共性难题亟待解决。首先，SiBCN 作为典型的无定形多元陶瓷，从元素组成和组织结构上均呈现出复杂的组合形态，SiBCN 陶瓷相关的基础研究进展相对缓慢，还没有建立完整的理论体系。目前，轻原子非晶结构的高分辨精确表征能力不足，借助先进计算手段和深度学习方法，阐明 SiBCN 陶瓷结构与性能的映射关系，为功能导向的材料设计提供可靠指导。先驱体转化 SiBCN 陶瓷的发展空间很大，随着上述关键科学与技术的突破，学科交叉融合的快速发展，更多新的独特性能将被发现，新的应用场景也将不断拓展。

资料来源：邵长伟,王驰原,龙鑫,王小宙.先驱体转化 SiBCN 陶瓷的制备、性能与应用[J].航空制造技术,2024,67(1):40-65

高能束增材制造铝合金及其复合材料展望

增材制造技术的快速发展为铝合金及其复合材料构件的快速设计制备、表征、性能评价提供了便利，为高性能铝合金及其复合材料的快速开发带来了机遇。为推动高性能铝合金及其复合材料的开发应用，相关科研人员从增材制造技术发展现状、缺陷形成与控制机理等方面综述了增材制造铝合金及其复合材料最新研究进展，得出的主要结论如下。

(1) 增材制造技术发展趋势。以激光增材制造和电子束增材制造为主的增材制造技术在铝合金及铝基复合材料中已广泛应用，且已经取得较多研究成果；

打印材料的显微组织对增材制造工艺敏感，但对增材制造工艺的优化缺乏机理层面的理论指导。因此，需深刻理解增材制造工艺参数对材料显微组织的影响机理。此外，考虑到铝合金对激光的高反射特性导致铝合金与激光增材制造工艺的不兼容，需针对新型增材制造技术（如黏结剂喷射及浆料直写技术等）开展铝合金及其复合材料的相关研究。

(2) 增材制造缺陷控制。由于铝合金半固态区间宽、热导率高、对激光的高反射率，以及增材制造的大升降温速度、高温梯度等特点，增材制造铝基复合材料中容易出现组织粗大的柱状晶并存在微裂纹、孔洞等缺陷。目前，对增材制造铝合金及其复合材料进行缺陷控制主要集中在优化调整增材制造工艺和对铝粉进行修饰两个方面，以改善其激光吸收特性和熔池凝固特性。然而，通过原位试验手段对铝合金及其复合材料缺陷控制机理的揭示仍然较少。此外，针对新型增材制造技术，如黏结剂喷射成形和浆料直写成形技术，仍缺乏缺陷形成及控制机理的相关研究。

(3) 增材制造专用铝合金粉末的研发。依据增材制造铝基复合材料缺陷控制机理，对铝粉进行纳米颗粒修饰。根据设计需求，纳米修饰颗粒可以是金属、金属氢化物及可溶解、不可溶解陶瓷。基于此，未来可开发增材制造专用的铝合金及其复合材料复合粉体，以解决激光增材制造中熔池不稳定、打印组织粗大及热裂纹等问题。

资料来源：李建超,鲁晓楠,王欢,高翔.高能束增材制造铝合金及其复合材料缺陷形成与控制机理[J].航空制造技术,2024,67(1):87-96

中国汽车轻量化前景分析

汽车轻量化是汽车工业发展的大趋势，轻量化实现路径主要包括材料、工艺、结构三个方面，可从动力、车身、底盘、内外饰等多个部位减重。根据《中国汽车轻量化行业发展趋势分析与投资前景预测报告（2023-2030年）》显示。目前来看，车企轻量化方向包括：1) 在汽车底盘、动力、车身、电池盒等部件上用铝合金代替钢；2) 内外饰件使用塑料代替钢；3) 使用一体化压铸工艺。汽车零部件每个环节都能实现轻量化制造，国内外主流零部件公司均在致力于轻量化制造。

汽车轻量化可实现零部件方向：

一、铝合金、镁合金等是汽车轻量化的关键材料

1、铝合金

铝合金是现阶段较好的轻量化材料之一。当前众多主流车型均采用全铝车身，前后悬架大部分材料也采用铝合金，用铝化程度越来越高，最大程度实现轻量化制造。

目前底盘、车身、刹车系统等用铝转化比率较低，未来十年内汽车的多个主要部件用铝渗透率都将明显提高。工信部《节能与新能源技术路线图》提出我国 2025/2030 年单车用铝量目标为 250kg/辆和 350kg/辆，2030 年单车铝合金用量相较于 2021 年有望翻倍增长。

2、镁合金

镁合金有着减震等独特的优势：

- 1) 密度较低但强度高，在主要金属中，镁的密度相较于铝降低 35%，是目前商用最轻的金属结构材料；
- 2) 韧性好、阻尼衰减能力强，可以有效减少振动和噪声；
- 3) 热容量低、凝固速度快，压铸性能好；
- 4) 具有优异的切削加工性能；
- 5) 资源丰富且易于回收再生。

综上，镁合金可满足军民多领域对轻质、高强、抗冲击、防辐射等要求，目前镁合金压铸工艺处于高速成长阶段。

据《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》规划，未来 10 年汽车轻量化发展趋势不变，铝、镁等轻量化材料在车身的应用比例有望不断上升。2020 年、

2025年、2030年，单车用镁量计划达到15kg、25kg、45kg，镁合金整车占比分别为1.2%、2%、4%，发展空间广阔。

二、一体化压铸是轻量化的前沿技术，先发企业将构筑高壁垒

传统汽车生产制造由冲压、焊装、涂装、总装四大工艺组成。其中，冲压就是将金属板材压制成车身所需的各个组成部件，而后再采用焊接或铆接组合的方式制造出大型铝制件。而一体化压铸则是采用特大吨位压铸机，把冲压与焊装改为压铸，前两步合成一步，将多个单独、分散的零部件高度集成，直接铸造出大部件。

一体化压铸有两种业务模式，一种是自研模式：主机厂直接采购压铸机、材料和模具等物料，自建工厂生产压铸件，代表车企有特斯拉、小鹏和沃尔沃。另一种为采购模式：主机厂直接向压铸厂商采购压铸件，由压铸厂商采购相关的物料，生产压铸件后交付给主机厂，代表车企有蔚来、理想。长期来看，由于主机厂自建厂房与产线成本较高，并且汽车销量可能会成为产能利用率的压制因素，因此采购模式有望成为长期主流。

从产业链来看，一体化压铸产业链的上游为压铸机、材料与模具厂商，中

游为铝合金压铸厂和自研主机厂，下游为采购主机厂。

资料来源：中欧 SENIA. 中国汽车轻量化行业发展趋势分析与投资前景预测报告（2023-2030 年）. <https://mp.weixin.qq.com/s/PU5eWFNvUULVwFLS7jBUCQ>

福特公司科学家对轻质材料在汽车轻量化中应用的想法

福特汽车公司的英国轻量级创新经理艾伦·班克斯，近期在接受媒体采访时，发表了轻质材料在汽车轻量化中应用的想法。班克斯在福特汽车公司有大约 39 年的工作经验，除了是英国复合材料公司的董事会主席外，他还是英国汽车委员会轻量化战略小组主席，以及车辆复合材料领导论坛主席。

一、车辆的重量对燃料消耗有多大影响，通过过渡到更轻的材料可以节省多少消耗？

班克斯的工作领域是商用车，虽然燃油经济性是客户购买的一个关键因素，但福特把有效载荷效率和总拥有成本作为客户群的最大衡量标准。随着世界范围向零排放车辆过渡，减少二氧化碳是至关重要的。这不仅需要车辆在运行过程中不产生二氧化碳，还需要意识到嵌入式二氧化碳足迹。

班克斯表示，有一个明确的可持续发展计划，并理解车企对客户和环境的责任，是相辅相成的。

二、您能否介绍一些轻质先进材料的例子，无论是现在还是不远的将来，这些材料在优化车辆性能方面会产生重大影响？

当下，汽车轻量化已经被铝加工和复合材料的先进技术所覆盖。然而，不应该忽视钢铁这种材料。由于其高效的成本/重量参数，钢铁仍将是大多数 OEM 的首选材料。但是，对于钢铁的研究也在增加，就像材料行业的其他部分一样快。

要在正确的场合使用正确的材料，这在钢铁材料，如先进的高强度钢上，尤其如此。班克斯认为，用基础强度为 1000 兆帕的材料提供轻质钢的设计是完全可行的，这些材料可以成型，可以焊接，可以减少多达 25% 的重量。此外，使用减少的规格意味着成本更低。在不影响设计的回收和可持续性的情况下，减轻重量、提高性能、降低成本是一个三赢的方案。最后，希望车辆携带更多有效载荷，减少对世界自然资源的负担。这是迄今为止最大的关注点。

在未来，纳米技术的进步将进入人们的视野。石墨烯和碳纳米管不是科幻小说，它们是科学事实。福特在过去将石墨烯注入一些车底部件中取得巨大的成功，这种情况应该继续下去。石墨烯非常昂贵，但由于使用量很少（通常小于 0.1% 的体积），它可以在重量、NVH 特性（Noise、Vibration、Harshness）、耐久性和潜在成本方面有巨大的好处。石墨烯也有能力被功能化，以便在一些关键结构中使用传感器进行预防性维护。这可能会在未来的自动驾驶中带来红利。

资料来源：中国复合材料工业协会. 轻质材料在汽车轻量化中的思考. 20220623. <https://www.ccia.xin/zhuantibaogao/647.html>



地址：上海市永福路 265 号
邮编：200031
编辑：温一村
责编：崔晓文
编审：林鹤
电话：021-64455555
邮件：istis@libnet.sh.cn
网址：www.istis.sh.cn