



复合材料产业 技术发展报告

高性能复合材料
绿色节能制造技术

长三角碳纤维及复合材料
技术创新中心
2026年第1期 总5期

作 者 王雨坤、张悾
翻 译 房晓冲
校 对 刘子谦、张悾
审 核 赵文明、益小苏
封面设计 汤云琪
出版日期 2026年1月



目录

摘要	1
作者简介	3
一、引言	4
二、各种节能固化方法的加热机制	7
三、工程实践与项目验证：节能固化技术的可实施 路径	15
四、总结与展望：面向高性能复合材料的绿色节能 制造路径	26
参考文献	29



摘要

高性能纤维增强复合材料因其轻量化和高比强度，被广泛视为航空航天、交通运输和可再生能源等领域实现减排目标的重要材料。然而，行业长期以来往往更关注复合材料在使用阶段带来的节能效益，而对制造阶段的能耗结构与碳排放关注不足。已有研究表明，复合材料制造过程包含多个能耗密集环节，其中成型与固化阶段在整体能耗中占据重要比例，且在实际工程评估中往往被系统性低估。在“净零制造”和供应链碳核算要求不断加强的背景下，传统以热压罐和大型烘箱为核心的固化模式正面临结构性挑战，其能源利用效率偏低、设备投入高且受腔体尺寸和生产节拍限制，逐渐成为制约复合材料制造可持续发展的关键因素。

从技术路径上看，复合材料节能制造的核心并不在于改变材料的选择或力学设计原则，而在于以更高效、更可控的方式将能量输入到材料本体或模具与材料的界面，从而在满足既有固化要求的前提下显著降低能耗、缩短周期并减少资源浪费。与传统对流加热方式相比，定向或局部能量输入能够有效避免“加热空气介质”的能量损失，是实现制造阶段能效提升的关键途径。围绕这一核心理念，近年来逐步形成了以电磁辐射固化、电流驱动加热（如焦耳加热）以及化学放热驱动的前端聚合为代表的多条技术路线，其中部分路线在工程兼容性和产业落地潜力方面表现尤为突出。

在多项已完成或正在进行的研究与工程项目中，包括英国工程与自然科学研究理事会（EPSRC）支持的 ESTEEM、ECOTOOL 及 RECYCLENS 项目，相关工作围绕焦耳加热与界面加热等节能路径开展了系统验证，表明在特定构件与工艺边界条件下，通过更直接的能量输入方式可以在不改变纤维和树脂体系、且基本不改变既有固化工艺的前提下，实现固化阶段能耗的显著降低。这类方法尤其适用于 VARI、RTM 等树脂灌注类工艺，具备与现有制造体系良好兼容的现实基础。进一步地，RECYCLENS 项目中对回收碳纤维与传感功能的探索，展示了节能制造与过程感知、全流程监测及数字化建模之间的协同潜力，为面向未来的数字孪生与智能制造提供了技术支撑。

与此同时，产业界的最新实践也在从装备与系统层面深化上述技术方向，包括直接加热模具、按需供能的设备设计，以及结合模内传感和能耗计量的数据闭环控制。这些发展并非替代节能固化技术本身，而是作为工程化“加速器”，有助于提升节能路径在真实生产环境中的可靠性、可复制性和可验证性。基于现有技术成熟度与工程验证情况，本报告建议产业界优先部署与既有材料体系和灌注工艺高度兼容的节能固化路线，通过中试验证逐步建立能耗、质量与过程稳定性的量化评价体系，并在此基础上有序推进更具变革型的制造路径。通过对技术路线、工程边界与产业实践的系统梳理，本报告旨在为企业、行业组织及政策制定者提供技术路径清晰、工程可行性明确且具备现实可操作性的参考框架。

作者简介

王雨坤，材料科学博士，现任英国华威大学研究助理。其研究方向聚焦于高性能纤维增强复合材料与导电纳米复合材料的设计、制造及性能表征，重点发展节能高效与可持续的复合材料制造技术，并面向汽车、航空航天及可再生能源等高端工程应用场景。

王雨坤本科及硕士毕业于中国地质大学，随后在英国伦敦大学玛丽女王大学获得材料科学博士学位，具备扎实的材料科学理论基础与系统的工程研究训练。在科研工作期间，王雨坤先后在英国多所高校担任研究助理，参与多项由英国研究与创新署（UKRI）、英国工程与自然科学研究委员会（EPSRC）及工业界资助的科研项目。

张悍，英国华威大学准教授，博士生导师，英国材料学会会士（FIMMM），英国皇家特许工程师（CEng），特许科学家（CSci），IOM3复合材料领导团队（原英国复合材料学会）副主席并兼任秘书长，《Composites Part A》副主编，以及英国工程和自然科学研究委员会（EPSRC）制造及循环经济研究青年委员会成员。

其研究聚焦于先进复合材料的绿色与节能制造，涵盖低能耗成型工艺、可持续材料体系以及多功能复合材料在轻量化结构中的工程应用，特别关注通过制造过程创新与结构功能一体化，实现显著降低能耗与碳排放、并延长构件服役寿命的解决方案。

张悍博士在复合材料与可持续制造领域荣获了多项国际权威奖项，包括2022年由英国材料、矿业与矿物学会（IOM3）颁发的银质奖章（Silver Medal，全球每年仅授予一人），以表彰其在复合材料领域做出的突出和系统性贡献，2010年RH Craven奖，以及2024年Composite Award。

一、引言

纤维增强复合材料凭借优异的力学性能、轻量化与耐腐蚀等优势，在航空航天、汽车制造、船舶工业及可再生能源等领域得到广泛应用，成为支撑关键装备性能提升的重要材料。然而，关于复合材料“低碳优势”的讨论，长期以来更多聚焦于使用阶段（例如轻量化带来的燃油/能耗下降），而对制造阶段的能耗结构以及退役报废处理阶段的环境影响关注不足。

从全生命周期视角看，复合材料的环境影响不仅来自原材料（纤维与树脂）的隐含能耗，也来自制造、服役与退役处置等环节的累积。其中，制造阶段往往包含多道能耗密集步骤，尤其在成型与固化环节，常见工艺仍依赖大体积空间加热与较长保温周期，导致能源利用效率偏低。相关研究指出，复合材料成型过程的单位能耗在某些情况下可达到较高水平，因此制造环节的节能潜力不应被继续忽视。

在现有工业体系中，热压罐固化与烘箱固化仍是高性能热固性复合材料的重要工艺路线，但其典型特征是：需要先加热腔体空气与设备本体，再通过对流将热量传递至制件，能量损失较大；同时设备投入高、受腔体尺寸限制、生产节拍与工艺柔性不足。相比之下，部分非热压罐工艺（例如树脂灌注类工艺）在成本与规模化方面具有优势，但在固化效率、质量一致性与过程可控性方面仍存在进一步优化空间。随着“净零制造”和供应链碳核算要求不断强化，制造阶段的能耗与碳足迹将直接影响复合材料部件的综合成本、交付能力与可持续竞争力。

因此，本报告聚焦于复合材料制造阶段的节能路径，核心目标在于探究如何在满足既有材料性能与质量要求的前提下，更高效、更可控地将能量输入到材料或模具与材料的界面，从而减少“加热空气介质”的系统性损耗，并降低固化与成型过程的总能耗。围绕这一问题，后续章节将系统梳理节能固化/加热的主要技术路线（包括电磁辐射加热、电流驱动加热如焦耳加热，以及前端聚合等），并结合工程实践与产业案例讨论其适用边界与落地路径，重点关注与 VARI、RTM 等树脂灌注类工艺的集成应用。为直观呈现制造阶段的节能空间及固化技术演进背景，图1总结了制造能耗强度对比与研究关注趋势。

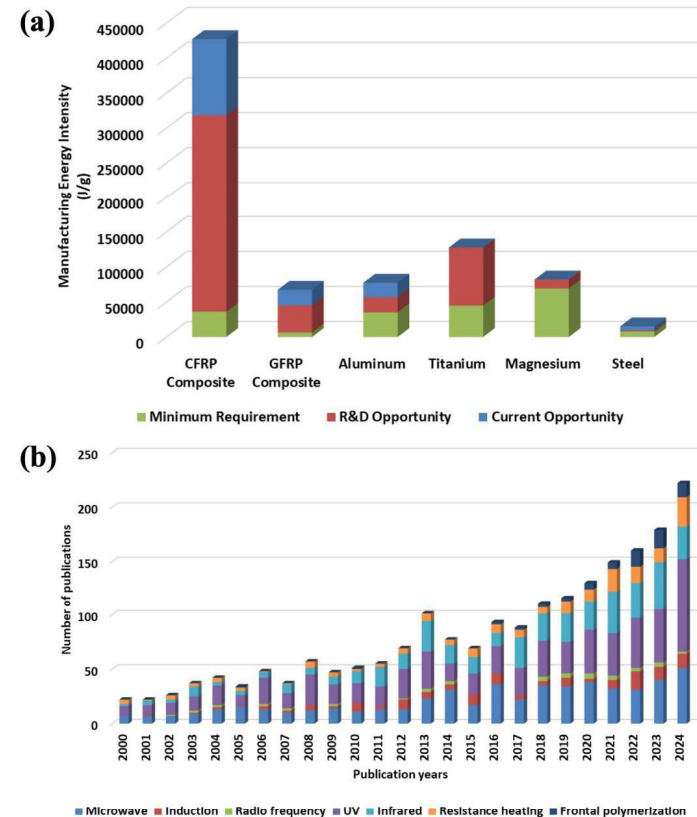


图1 复合材料制造阶段的节能潜力与研究关注趋势：(a) 不同材料体系在制造阶段的能耗强度对比，显示纤维增强聚合物复合材料在制造环节仍具有显著的节能优化潜力；(b) 2000–2024 年期间复合材料不同固化方法相关研究的文献发表趋势，反映出节能固化技术在近十余年的持续关注与发展。注：能耗数据基于文献模型计算，涵盖复合材料制造主要子流程；金属数据不包含二次加工能耗[1]。

获取更多正文内容，请联系0519-83205321