

文章编号:2097-1923(2022)01-0007-05

# 增材制造在轨道交通领域的应用与挑战

吴正凯,钱伟建,吴圣川

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室,四川成都610031)

**摘要:**先进轨道交通装备作为高端制造的典型代表,其技术与产业革新具有重要战略意义和经济社会价值。增材制造技术的出现为先进材料、结构和装备的研发及应用带来了前所未有的机遇。文章首先介绍了增材制造的技术内涵与优势,然后结合轨道交通装备制造的内在要求和发展趋势,深入讨论了增材制造技术在轨道交通领域的应用现状、发展潜力及技术挑战,给出了增材制造技术与轨道交通装备制造的双向需求及结合点,指明了相关技术领域的协同创新及跨行业、跨领域合作是实现增材制造轨道交通装备的应有之义,从而为有序促进增材制造技术在轨道交通领域的应用,实现我国轨道交通高端装备智能制造产业的突破式发展提供参考。

**关键词:**增材制造;轨道交通;轻量化设计;智能制造

**中图分类号:**U270.6 **文献标识码:**A

**参考文献引用格式:**吴正凯,钱伟建,吴圣川.增材制造在轨道交通领域的应用与挑战[J].轨道交通材料,2022,1(1):7-11.

## Application and challenge of additive manufacturing in rail transit field

WU Zhengkai, QIAN Weijian, WU Shengchuan

(National Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** As a typical example in high-end manufacturing industry, advanced rail transit equipment is of great strategic importance and economic and social value in terms of technical development and industrial innovation. The arrival of additive manufacturing (AM) has brought about unprecedented opportunities to the development and application of advanced materials, structures and equipment. This paper presents the concepts and advantages of AM technology, starts an in-depth discussion on its application status, development potential and technical challenges in consideration of the intrinsic requirements and development trend of rail transit equipment manufacture, puts forward the both-way demands and bonding point of AM and rail transit equipment manufacture, indicates the significance of collaborative innovation of various relative technical sectors and the cooperation of multiple industries in order to introduce AM to the manufacture of rail transport equipment, so as to promote orderly the application of AM technology in rail transit field and make a breakthrough in the intelligent manufacture of high-end rail transit equipment.

**Keywords:** additive manufacturing; rail transit; lightweight design; intelligent manufacturing

## 0 引言

装备制造业是工业发展的基础,也是建设工业化强国的根本保证。作为创新驱动、智能转型、绿色发展的典型代表,我国先进的轨道交通装备制造业已然成为中国高端装备制造走向世界的一张“亮丽

名片”。然而,随着全球新一轮的以信息技术、智能制造、新材料、新工艺等为代表的科技革命和产业革命的到来,全球轨道交通装备制造领域也孕育着新一轮的产业变革<sup>[1]</sup>。轨道交通装备制造业作为高端制造的代表,众多全球领先的轨道交通企业都竞相在数字化产品设计、智能化制造、信息化服务等方面实施全方位战略布局。中国具有全球大规模的轨道交通装备制造产业,在轨道交通高端装备制造、智能制造、新材料、新技术的应用与发展等方面同样面临着巨大的机遇与挑战。

增材制造亦称为3D打印、快速原型制造、实体

**基金项目:**国家自然科学基金大科学装置联合基金(U2032121)

**收稿日期:**2022-09-12

**作者简介:**吴正凯(1994—),男,博士研究生,从事增材材料结构完整性评估研究。

自由制造等,是一种基于“数字建模,分层制造,逐层叠加”原理,以粉末或丝材为原料,由数字化软件将目标实体分成许多薄层,利用高能热源将材料熔化并逐层堆积成形的先进制造方法,具有数字化、网络化、定制化等特点,被认为是制造技术领域的一次革命性突破。增材制造技术的出现给工业产品的设计思想和制造方法带来了颠覆性变化,为产品的优化设计、原型制造、快速生产和定制生产等带来了全新的技术途径,并已成功应用于航空航天、生物医疗、汽车工业等先进工业领域<sup>[2]</sup>。

2019年底,国家高速列车技术创新中心与国家增材制造创新中心挂牌成立了“国家高速列车技术创新中心增材制造技术研究所”,并成功举办“战略发展推进会及轨道交通增材制造/轻量化技术研讨会”,旨在促进跨行业、跨领域合作,助力我国轨道交通装备增材制造技术的发展。虽然整体而言增材制造技术在轨道交通领域的发展仍处于探索阶段,但其发展趋势仍是不可阻挡的。本文从增材制造技术在轨道交通领域的应用现状出发,指出了其巨大的应用潜力及发展方向,然后结合轨道交通装备发展的内在需求,总结分析了增材制造技术在轨道交通装备制造领域应用的机遇和挑战,并提出了克服当前挑战的潜在设计方法,以期助力我国轨道交通装备制造业的创新发展与智能转型。

## 1 国内外应用与发展

经过近40多年的发展,增材制造已成为世界先进制造领域发展最快、技术研究最活跃、关注度最高的学科方向之一。增材制造的原理结合不同的材料和实现方法,形成了众多类型的增材制造技术和装备。例如基于粉末床的激光选区熔化成形等技术,其成形精度高,成形零件复杂度高,但成形体积较小、效率较低,常用于成形具有复杂结构的小型零部件;基于定向能量沉积的激光立体成形、电弧熔丝增材成形等技术,其成形效率高,能够成形中大型部件,但由于成形精度较低、变形大,故多数零部件仍需后续加工。不同类型的增材制造技术可以实现优势互补,在复杂三维结构近净成形、整体式构件一体化加工、短流程低成本快速制造、受损零件快速修复等方面应用愈加广泛<sup>[3]</sup>。而对于轨道交通领域而言,增材制造技术的应用则是从近十年以来逐渐开始的,随着越来越多的铁路公司和研究人员开始考虑将增材制造技术应用于轨道交通行业,相关研究从受损零件的激光熔覆修复,到稀缺备件的低成本快速制造,再到关键结构件的优化设计均有涉及。表1总结了目前国内外增材制造技术在轨道交通领域的应用与研究案例,可见增材制造技术在轨道交通装备制造领域的应用前景十分广阔。

表1 国内外增材制造在轨道交通领域的应用现状<sup>[4-24]</sup>

企业/研究机构	国家	应用及研究案例
德国联邦铁路	德国	咖啡机备件、衣帽钩、方向盘盖、头枕框架、盲文路标、聚合物风扇轮、空调风机护罩;机车轮对轴承盖、列车横向止挡、蒸汽机车涡轮叶片、砂型铸造模具
中国中车	中国	高压接地开关、转向架垂向减振器座、转向架抗蛇形减振器座、铁路轴箱箱体、散热器板、磁悬浮转向架托臂、砂型铸造模具
阿尔斯通	法国	转向架抗侧滚扭杆安装座、橡胶排水塞、排气系统组件、风管、外壳和电缆支架
西门子	德国	地铁车辆转向架制动连杆、用于列车转向架维护的连接器工具
Angel Trains	英国	电气连接盖、握柄扶手和椅背折叠桌面
CAF	西班牙	杯座、无线电支架、窗框、雨刮器盖和门支架
SJ AB	瑞典	卫生间门锁、窗帘衣架、轮毂轴承盖
ÖB-TS	奥地利	打印框架、热交换器盖、钮子开关
联合太平洋	美国	遥控设备原型,无线电系统面板
英国焊接研究所	英国	铁路车轴激光熔覆
西南交通大学	中国	磁悬浮转向架托臂架,铁路车轴激光熔覆
莫纳什大学	澳大利亚	重载铁路钢轨激光熔覆
墨尔本理工大学	澳大利亚	铁路车轴激光熔覆

激光熔覆技术作为一种新型的表面增材技术,在损伤零部件的修复再制造领域备受关注<sup>[4]</sup>。针对铁路车轴表面损伤,墨尔本理工大学、英国焊接研究所、中国中车、西南交通大学等先后采用激光增材修复技术开展损伤修复研究,旨在延长车轴的疲劳寿命并降低报废率。除车轴外,激光增材修复还被用于修复钢轨、车轮踏面、辐条板、齿轮箱等。然而,目前研究都集中在恢复部件尺寸和研究熔覆层的基本力学性能上,在终端用户接受此类维护修复之前,仍然需要明确激光增材修复引入的非稳态组织及缺陷对修复部件服役性能的影响。

增材制造的另一主要优势是能够实现短流程快速制造。当涉及到小批量备件生产时,重新设计零件并使用传统方式生产零件会导致大量的时间成本和经济成本增加。尤其是当有些旧式车辆部件发生故障时,有些备件可能已经停止了生产,这对于需要安全运行30年以上的轨道交通车辆来说是极有可能的。过量的备件库存无论是备件本身的制造成本还是仓储成本都是不容忽视的,无疑也是对资源的一种浪费。一个典型的例子是当德国ICE列车发生故障,两节车厢急需新的横向止挡部件时,供应商需

要10个月来交付铸件。最后采用电弧熔丝增材制造技术成功制备这两个重型钢制部件,不仅总体时间缩减为5个月,而且总体成本降低了30%<sup>[5]</sup>。随着越来越多的铁路公司实现库存数字化、制造定制化,按需生产备件逐渐成为现实。这不仅减少了对大量备件库存和仓库的需求,而且可以大大加快车辆的维护和维修速度。

此外,采用增材制造技术基本无须考虑传统制造工艺约束,极大地释放了设计自由度。在增材设备所允许的制造尺寸范围内,能够实现整体化复杂三维几何构件的“所想即所得”。将增材制造技术与拓扑优化和点阵结构优化等技术相结合,能够在很大程度实现零部件的轻量化及一体化结构设计。例如,法国阿尔斯通对传统铸造轨道列车转向架抗侧滚扭杆安装座进行结构强度分析,发现其存在安全系数过高、总体重量和结构尺度过大等问题,如图1(a)所示。为优化整体结构设计,阿尔斯通首先采用拓扑优化设计方案获得轻量化仿生结构的安装座,然后通过增材制造技术完成零部件快速制造,最终实现了在保证结构性能的前提下,结构重量减少70%的目标,优化设计流程如图1(b)所示<sup>[10]</sup>。

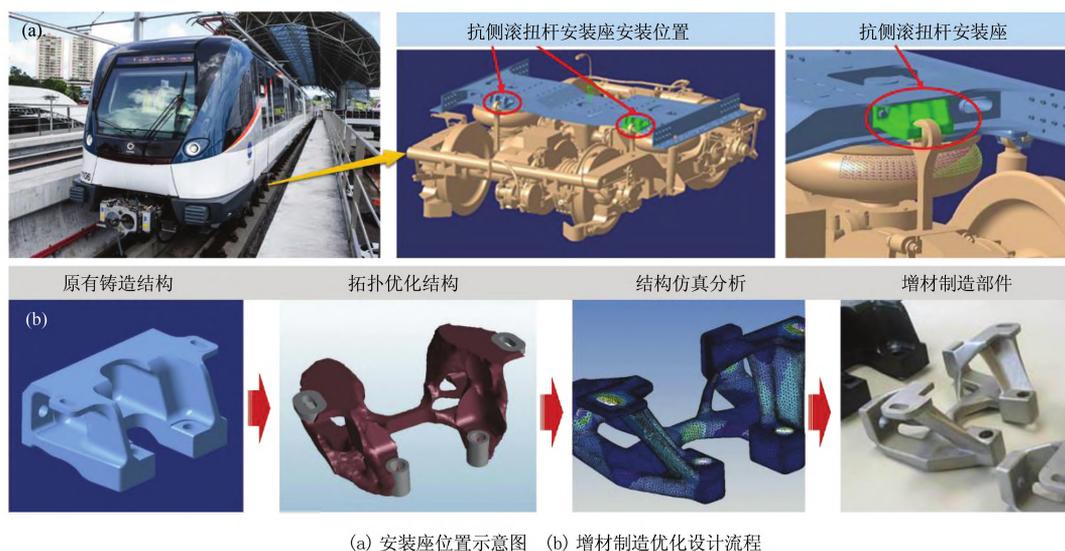


图1 法国地铁列车转向架抗侧滚扭杆安装座增材制造设计<sup>[10]</sup>

## 2 面临的机遇与挑战

目前增材制造部件在轨道交通领域的实际应用中仍以车辆内饰部件、非关键承载的功能件或制造过程中所需的工装、模具为主,直接涉及轨道车辆运营安全的关键承载部件的相关应用还较少。尤其对一些经过结构优化设计的部件多为探索性研究,采用增材制造进行试制的也多为缩比部件。2019年8

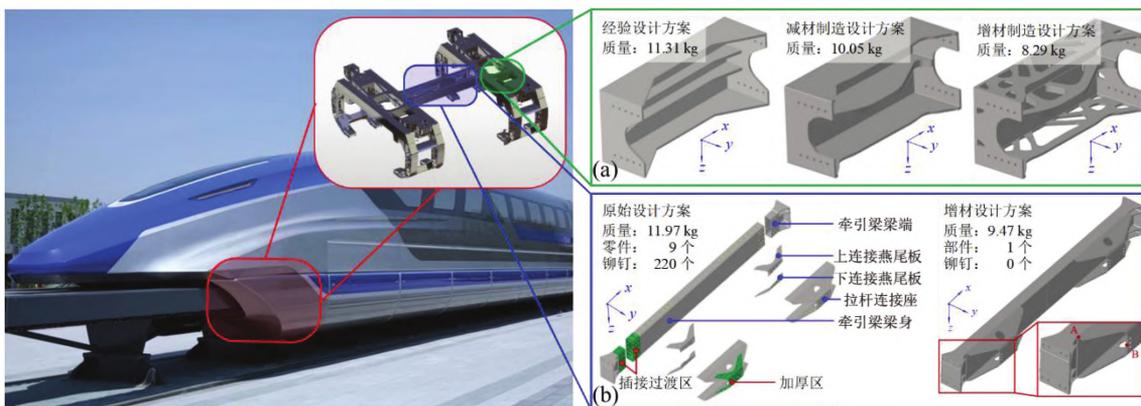
月,欧洲移动增材制造(Mobility goes Additive, MGA)网络宣布在德国Hamburger Hochbahn AG公司的地铁车辆上采用金属增材制造的制动拉杆(见图2),TÜV南德意志集团负责质量认证和审批,这成为了增材制造技术应用于轨道车辆关键承载部件的首例报道<sup>[12]</sup>。虽然该部件保持了传统部件的尺寸结构,但安全相关的部件的批准则是增材制造在轨道交通领域迈出的一大步。



图2 首个获批应用的增材制造轨道车辆关键承载部件<sup>[12]</sup>

众所周知,对于轨道交通装备,其服役安全性永远是第一位的。基于行业本身特点,所有车辆装备在上线前均需要做标准符合审查,不符合标准或无标准可依也就无从上线,因此轨道交通装备的技术革新必须紧随的便是标准革新,没有安全可靠的质量认证与评价标准体系则难以保证产品质量,也难以推动技术落地。相比于航空航天、汽车工业等领域,轨道交通领域的新型装备体系变革和技术迭代周期相对更长,其一方面面临着现行轨道交通装备的安全运营与维保压力,另一方面还需要着眼未来,向更高速、更高效、更低能的方向持续攻关。最近,一个典型的案例是增材制造技术在高速磁浮列车悬浮架结构优化设计中的探索性研究。原始高速磁浮列车悬浮架结构设计存在自重大、功能集中性差、制

造成本高和装配、拆卸困难、关键部件安全裕度低等问题。利用增材制造高设计自由度优势,可实现多部件集成化,结构拓扑优化及点阵结构优化设计,极大改善甚至彻底解决上述问题,所述增材铝合金悬浮架设计方案如图3所示<sup>[21]</sup>。更进一步的增材铝合金悬浮架结构完整性评估工作中,准确分析悬浮架服役载荷并建立可靠有效的质量认证与评价标准体系是关键。为此,西南交通大学吴圣川研究员借鉴在工程装备领域广泛使用的BS 7910标准,在保持现行静强度准则、疲劳强度准则、名义应力准则、损伤容限准则的同时,通过引入系统动力学仿真分析或台架试验或线路实测再获得反映结构完整动力学响应的时域载荷谱,进一步提升了各级评估准则的评价精度及适用范围,创新性地提出了结构完整性的时域阶梯疲劳评估(Time - domain Stepwise Fatigue Assessment, TSFA)方法。与原始方案相比,应用该方法确定的增材铝合金悬浮架设计方案达到了更好的轻量化和高耐久设计效果,且磁浮列车在平面曲线线路适应能力和运行平稳性方面均有改善。



(a) 横向止挡安装梁拓扑优化

(b) 牵引梁集成化设计

图3 基于增材制造技术的高速磁浮列车铝合金悬浮架设计方案<sup>[21]</sup>

轨道交通装备作为一个大宗商品,也是我国高端装备“走出去”的代表。但轨道交通装备总体容量不大,不像汽车可以具备数百至数千万的规模产量。在维保领域,大量备件的物流、备件库的维护、故障部件的维修等是制约其发展的重要因素,增材制造网络可以促进数字化库存的建立并实现按需制造,是解决这一问题的重要途径。此外,轨道交通装备还具有多品种、小批量、高度定制化等特点,因此,增材制造在促进高度定制化样车的快速制造、加快样车试验进程、缩短交付周期等方面也具有一定技术潜力。轨道交通装备的轻量化、智能化、绿色化发

展离不开新材料、新技术、新工艺的应用,而增材制造技术融合了新材料开发、结构优化设计、轻量化设计、数字化制造等众多优势,能够很好地迎合轨道交通装备制造的发展需求和趋势,展现出巨大的应用潜力。

### 3 结束语

虽然目前增材制造技术本身处于快速发展和迭代更新时期,但其技术成熟度和标准化进程仍不足以支撑其全面推广与应用,例如增材制造仍存在形性主动控制难度大、力学性能准确预测难度大等问

题,其制造成本和效率问题也须考虑。但是机遇和挑战往往是共存的,要实现轨道交通装备轻量化、智能化、绿色化发展,先进制造技术的应用是必由之路,国内外各装备制造业结合增材制造技术的优势特征和各自应用需求,均开展了应用型探索研究,验证了增材制造技术在轨道交通装备设计、开发和制造过程中的优势。因此,我国轨道交通装备应进一步加深对增材制造技术的了解,深度开展跨领域、跨行业合作,充分挖掘增材制造技术在轨道交通领域的发展和潜力,为实现我国轨道交通高端装备智能制造产业的突破式发展,保持我国轨道交通装备制造在全球市场中的核心竞争力提供技术保障。

### 参考文献:

- [1] 周婕. 轨道交通装备发展趋势与新技术应用探讨[J]. 高科技与产业化, 2022, 28(3): 34-37.
- [2] 卢秉恒. 增材制造技术——现状与未来[J]. 中国机械工程, 2020, 31(1): 19-23.
- [3] Liu G, Zhang X F, Chen X L, et al. Additive manufacturing of structural materials [J]. Materials Science & Engineering R: Reports, 2021, 145: 100596.
- [4] Deutsche Bahn. Discover 3D printing as a digital manufacturing technology [EB/OL]. (2020-01-01) [2022-09-10]. <https://www.db-fzi.com/fahrzeugstandhaltung-en/Individual-Solutions/3D-druck-7314184#>.
- [5] 3D Printing Media Network. Large rail parts produced in half the time, with 30% cost reduction [EB/OL]. (2020-10-14) [2022-09-10]. <https://www.3dprintingmedia.network/large-rail-secondary-roll-stop-produced-in-half-the-time/>.
- [6] 马明明, 谭迈之, 孙德祥, 等. 激光选区熔化成形高压接地开关传动件工艺与性能研究[J]. 电力机车与城轨车辆, 2018, 41(1): 76-80.
- [7] 杨冰, 廖贞, 吴圣川, 等. 增材制造技术发展和在先进轨道交通装备中的应用展望[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(1): 132-153.
- [8] 祝弘滨, 刘昱. 金属3D打印技术在轨道交通装备领域的应用研究现状[J]. 现代城市轨道交通, 2019(10): 77-81.
- [9] 曹金, 祝弘滨, 鲍飞, 等. 3D打印在轨道交通领域的研究现状及展望[J]. 机车车辆工艺, 2018(3): 10-11.
- [10] Altair. Using topology optimization with solidthinking inspire for improved casted rail components [EB/OL]. (2020-01-01) [2022-09-10]. <https://www.altair.com/customer-story/Altair-simulation-driven-design-approach>.
- [11] Sertoglu K. Alstom slashes spare part lead times by 95% using strataysys 3D printing technology [EB/OL]. (2021-06-28) [2022-09-10]. <https://3dprintingindustry.com/news/alstom-slashes-spare-part-lead-times-by-95-using-strataysys-3d-printing-technology-192040/>.
- [12] Boissonneault T. First 3D printed safety-relevant part approved in the railway sector [EB/OL]. (2019-12-05) [2022-09-10]. <https://www.3dprintingmedia.network/first-3d-printed-safety-part-approved-railway/>.
- [13] Davies S. Additive is a lighthouse: siemens mobility on the growing importance of 3D printing in the rail sector [EB/OL]. (2020-12-22) [2022-09-10]. <https://www.tctmagazine.com/api/content/e624a4e0-4380-11eb-a73f-1244d5f7c7c6/>.
- [14] Brown J. Angel trains and DB ESG deploy first 3D-printed parts on UK passenger trains [EB/OL]. (2020-07-20) [2022-09-10]. <https://www.strataysys.com/en/resources/case-studies/angel-trains/>.
- [15] AMFG. Application spotlight: 3D printing in the rail industry [EB/OL]. (2019-10-15) [2022-09-10]. <https://amfg.ai/2019/10/15/application-spotlight-3d-printing-in-the-rail-industry/>.
- [16] Madeleine P. Applications for 3D printing at the heart of the railway industry [EB/OL]. (2022-03-11) [2022-09-10]. <https://www.3dnatives.com/en/applications-for-3d-printing-at-the-heart-of-the-railway-industry-110320224/>.
- [17] Stjernudde A. Working together to advance additive manufacturing in rail [EB/OL]. (2020-05-13) [2022-09-10]. <https://www.globalrailwayreview.com/article/98279/working-together-additive-manufacturing-rail/>.
- [18] Spiess F. Additive manufacturing at ÖBB: Innovation in railway maintenance [EB/OL]. (2020-05-15) [2022-09-10]. <https://www.globalrailwayreview.com/article/98180/additive-manufacturing-obb-railway-maintenance/>.
- [19] Union Pacific. From napkin to prototype: 3-D printing revolutionizes railroading [EB/OL]. (2017-07-06) [2022-09-10]. [http://www.up.com/up/aboutup/community/inside\\_track/3d-printing-at-union-pacific-06-07-2017](http://www.up.com/up/aboutup/community/inside_track/3d-printing-at-union-pacific-06-07-2017).
- [20] TWI Ltd. Refurbishment of railway axles (relase project) [EB/OL]. (2017-07-01) [2022-09-10]. <https://www.twi-global.com/media-and-events/insights/refurbishment-of-railway-axles-through-laser-applied-surface-engineering-relase>.
- [21] 郭峰. 高速磁浮列车增材铝合金悬浮架结构设计及完整性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [22] 肖棚, 高杰维, 刘里根, 等. 激光熔覆修复 EA4T 车轴钢显微组织和强度评价[J]. 材料导报, 2022, 36(7): 109-115.
- [23] Roy T, Paradowska A, Abrahams R, et al. Residual stress in laser clad heavy-haul rails investigated by neutron diffraction [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 278: 116511.
- [24] Soodi M. Investigation of laser deposited wear resistant coatings on railway axle steels [D]. Melbourne: RMIT University, 2013.