

引用格式: 吴珊, 周阳, 史志武, 等. 增材制造专用材料标准现状与体系研究[J]. 中国材料进展, 2024, 43(9): 859–864.

WU S, ZHOU Y, SHI Z W, *et al.* Current Research Status and Standard System of Materials for Additive Manufacturing[J]. Materials China, 2024, 43(9): 859–864.

增材制造专用材料标准现状与体系研究

吴珊¹, 周阳², 史志武³, 李文韬², 王俊²

(1. 厦门市标准化研究院, 福建 厦门 361000)

(2. 上海交通大学 上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室, 上海 200240)

(3. 中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘要: 近年来随着增材制造技术相关产业的快速发展以及应用范围的不断扩大, 增材制造面临的标准化问题日益突出。增材制造专用材料作为增材制造技术发展的重要物质基础和根本保证, 开展相应的标准化工作并构建增材制造专用材料标准体系具有重要的指导意义。首先, 充分分析国内外增材制造专用材料的发展概况、标准化工作现状, 研究构建了由产品实现流程、产品分类和全产业链维度构成的三维增材制造专用材料标准体系框架, 该框架覆盖了所有增材制造专用材料设计、生产、流通及服务过程的标准。然后, 根据标准体系框架梳理现行标准的分布情况, 并结合行业实际, 从原材料标准、生产工艺和设备标准、测试方法与质量标准、监管与服务标准、特定应用标准等方面给出了增材制造专用材料标准体系的制修订建议, 为增材制造专用材料标准化工作的开展奠定基础。

关键词: 增材制造; 专用材料; 标准体系; 三维框架; 标准制修订建议

中图分类号: TH16; F203 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2024)09-0859-06

Current Research Status and Standard System of Materials for Additive Manufacturing

WU Shan¹, ZHOU Yang², SHI Zhiwu³, LI Wentao², WANG Jun²

(1. Xiamen Institute of Standardization, Xiamen 361000, China)

(2. Shanghai Key Laboratory of Advanced High-Temperature Materials and Precision Forming, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

(3. AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: In recent years, with the rapid development of additive manufacturing industries and the continuous expansion of applications, the standardization problems are becoming increasingly prominent. As an important material basis and fundamental guarantee for the development of additive manufacturing technology, it is of great guiding significance to carry out the corresponding standardization work and construct the standard system of materials for additive manufacturing. First of all, this paper fully analyzes the development and standardization status of specific materials for additive manufacturing at home and abroad, studies and constructs a three-dimensional standard system framework for additive manufacturing materials composed of product realization process, product classification and the whole industrial chain dimension, covering all the standards for the design, production, circulation and service process of additive manufacturing materials. Then, according to the standard system framework, the distribution of the current standards is reviewed, and combined with the actual industrial

conditions, suggestions for the revision of standard system are given from the aspects of raw material standards, production process and equipment standards, testing methods and quality standards, supervision and service standards, and specific application standards, which lay a foundation for the development of additive manufacturing materials standardization work.

Key words: additive manufacturing; specific materials; standard system; three-dimensional framework; development and revision suggestion of standards

收稿日期: 2022-12-14 修回日期: 2023-05-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB3501004); 福建省市场监督管理局科技计划项目(FJMS2019049); 上海市青年科技启明星计划项目(20QB1406100)

第一作者: 吴珊, 女, 1989年生, 工程师

通讯作者: 周阳, 男, 1988年生, 副研究员, 博士生导师,

Email: yzhou76@sjtu.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202212016

1 前言

增材制造 (additive manufacturing) 技术^[1], 又名“3D 打印”(3D printing), 近年来发展迅速, 据美国增材制造技术权威研究机构 Wohlers Associates 发布的《Wohlers Report 2022》产业报告显示, 2021 年全球增材制造市场规模达到 152.44 亿美元, 相比 2020 年增长 19.5%, 过去 4 年(2018~2021 年)的平均增长率为 20.4%。未来, 增材制造产业仍将保持高速发展^[2]。

增材制造专用材料, 顾名思义, 是指专门适用于增材制造工艺制备的打印材料, 是增材制造技术发展的重要物质基础和根本保证。早期的增材制造材料的开发始于 20 世纪 80 年代, 名古屋市工业研究所的 Kodama^[3]发明的光硬化树脂被用于打印制作三维塑料模型。据《Wohlers Report 2022》产业报告显示, 2021 年全球增材制造专用材料产业规模达到 25.98 亿美元, 较 2020 年增长 23.4%, 占总产值的 17%^[2]。其中, 以工程塑料为代表的聚合物材料由于其良好的热塑性及流动性以及快速固化等优点成为最成熟的打印材料, 金属增材制造材料也在工业制造、航空航天以及国防领域得到广泛应用。

我国增材制造专用材料目前仍处于产业发展的初始阶段, 在基础理论研究、原材料生产、材料加工装备开发等方面均有待进一步加强; 同时, 我国增材制造专用

材料缺少相应的技术标准与评价体系, 标准的缺失将直接影响增材制造产品的质量及整个产业的发展^[4]。因此, 研究构建增材制造专用材料标准体系具有重要的指导意义。综上所述, 本文充分分析国内外增材制造专用材料的发展概况、标准化工作现状, 研究构建增材制造专用材料标准体系框架, 并给出增材制造专用材料标准体系的制修订建议, 以期为推动我国增材制造专用材料产业的高质量发展提供标准化技术支撑。

2 增材制造专用材料标准发展现状

2.1 增材制造专用材料概述

增材制造专用材料作为增材制造技术的物质基础, 其性能很大程度上决定了增材制造产品的综合性能。早期增材制造由于材料种类的限制, 大多使用高分子材料, 但其力学及理化特性通常难以满足实际的应用需求。随着新材料的出现与新装备技术的发展, 增材制造用材料逐渐向力学性能更佳、加工性能更好、功能更加多样化方向发展。从 1984 年立体光固化成型技术的产业化发展至今, 用于增材制造的专用材料种类已经十分丰富^[4, 5]。通常增材制造专用材料按照形态不同可分为固态粉末、固态块材、固态丝材与液态材料; 按照材料类别不同可分为金属材料、高分子材料、无机非金属材料以及复合材料等^[6], 不同材料类别对应的具体材料及应用领域总结如表 1 所示。

表 1 增材制造专用材料分类及应用领域^[4, 7-9]

Table 1 Classifications and applications of materials for additive manufacturing^[4, 7-9]

Types	Specific material	Material application field
Metallic material	Iron base alloy, titanium base alloy, nickel base alloy, cobalt chromium alloy, aluminum alloy, copper alloy, precious metals, etc.	Aerospace, automotive, biomedical, electronics industries
Polymer material	Photosensitive resin, acrylonitrile-butadiene-styrene plastic (ABS), polylactic acid (PLA), nylon (PA), polycarbonate (PC), polystyrene (PS), polycaprolactone (PCL), polystyrene sulfone (PPSF), thermoplastic polyurethane (TPU), polyether ether ketone (PEEK), hydrogel, etc.	Healthcare, aviation industry, mold making, toys, art design, architectural decoration
Inorganic nonmetallic material	Clay, cement, glass, raw sand, oxide ceramics, carbide/nitride ceramics, etc.	Precision casting, aerospace, biomedicine, construction, defense, electronic information
Composite material	Metal matrix composite material, non-metal matrix composite material	Electronic information, aerospace, healthcare, automotive industry, architectural decoration

2.2 增材制造专用材料标准化现状

2.2.1 国外增材制造专用材料标准化现状

国外增材制造技术已形成较完整的研发、生产、销售、应用全产业链体系, 在标准制定方面也走在前列。目前, 国外增材制造标准制定的机构主要包括美国材料与试验协会 (American Society for Testing and Materials,

ASTM)、国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO)、国际自动机工程师学会 (SAE international, SAE)等^[10, 11]。截至 2021 年 12 月, 上述机构对增材制造专用材料相关标准的制定情况如下: ① ASTM 于 2009 年成立了全球第一个增材制造技术委员会—ASTM F42, 下设 6 个专业技术委员会, 包括 F42.01 测试

方法、F42.04 设计、F42.05 材料与工艺、F42.06 环境、健康与安全、F42.07 应用领域、F42.91 术语;目前已发布增材制造专用材料相关标准共 16 项(其中与 ISO 联合发布 14 项),如 ASTM F3049-14(2021)“Standard Guide for Characterizing Properties of Metal Powders Used for Additive Manufacturing Processes”、ISO/ASTM 52903-1-2020 “Additive Manufacturing-Material Extrusion-Based Additive Manufacturing of Plastic Materials-Part 1: Feedstock Materials”等,涵盖了钛合金、高温合金、铝合金、高分子聚合物等增材制造专用材料。② ISO 于 2011 年成立了增材制造标准化技术委员会——TC 261,下设 ISO/TC 261/WG 2 过程、系统和材料工作组,目前已独立发布专用材料相关标准 3 项,如 ISO 17296-2: 2015“Additive Manufacturing-General Principles-Part 2: Overview of Process Categories and Feedstock”等。③ SAE 成立了航空航天材料增材制造(AMS-AM)技术委员会,目前 AMS 系列标准中专用材料相关标准共计 14 项,如 SAE AMS7001-2018“Nickel Alloy, Corrosion and Heat-Resistant, Powder for Additive Manufacturing, 62Ni-21.5Cr-9.0Mo-3.65Nb”、SAE AMS 7002 REV A-2022“Process Requirements for Production of Metal Powder Feedstock for Use in Additive Manufacturing of Aerospace Parts”等,主要涉及钛合金、铝合金、镍基合金等材料^[12, 13],陶瓷、树脂基材料相关标准仍较少涉及,此外仍有多项专用材料标准正在制定中。

以 AMS 系列标准中的高温合金增材制造专用材料为例,如 AMS7001(Nickel Alloy, Corrosion and Heat-Resistant, Powder for Additive Manufacturing, 62Ni-21.5Cr-9.0Mo-3.65Nb, 增材制造用耐蚀和耐热镍合金粉末技术标准)、AMS7002(Process Requirements for Production of Metal Powder Feedstock for Use in Additive Manufacturing of Aerospace Parts, 航空航天部件增材制造用金属粉末的生产工艺规范)等,前者规定了增材制造用镍基合金粉末的具体牌号或合金成分、原料金属粉末要求、成形过程及力学性能要求等关键技术参数,同时明确其适用的增材制造工艺类别及增材制造毛坯部件的后处理工艺;后者规定了用于航空航天零件增材制造的金属粉末原料的生产工艺要求(制备方法包括粉末床融合或定向能量沉积工艺),包括但不限于铁、镍、钴、铝、铜和钛基合金以及纯金属粉末,并且从粉末生产、处理、分类、筛选、包装储存到抽样、测试等均做了相应要求。

2.2.2 国内增材制造专用材料标准化现状

近年来,随着党中央、国务院及地方政府对标准化工作的高度重视,我国发布实施了多项增材制造相关的标准化政策规划,如《增材制造标准领航行动计划

(2020—2022 年)》(以下简称《行动计划》)中明确指出加快构建和完善我国增材制造标准体系,做好基础共性、关键技术和行业应用等方面标准的顶层设计^[14],明确提出了在国家层面开展增材制造标准化研究工作;另外,还特别针对制约当前产业发展的关键技术如增材制造专用材料等展开“领航”型标准布局。

2014 年,我国成为 ISO/TC 261 增材制造技术委员会的 P 成员国。2016 年 4 月,全国增材制造标准化技术委员会(SAC/TC562)在北京成立,承接 ISO/TC 261 的标准化相关工作。自此,我国增材制造标准化工作进入了全新的发展阶段。

在增材制造专用材料方面,全国增材制造标准化技术委员会于 2018 年 9 月成立了专用材料工作组(SAC/TC 562/WG 1),负责增材制造专用材料相关国家标准的制修订工作。表 2 统计了国内主要增材制造及增材制造专用材料相关标准的制定情况(截至 2022 年 11 月)。

表 2 国内主要增材制造及增材制造专用材料相关标准制定情况统计
Table 2 Statistics of major domestic standards for additive manufacturing and specific materials

Type	Quantity of additive manufacturing standard	Quantity of materials standard for additive manufacturing
National standard	115	91
Industry and local standard	15	8
Association standard	97	29

在国家标准方面,与增材制造相关的共计 115 项,其中已发布的国家标准 88 项、国家标准计划 27 项;其中与增材制造专用材料相关标准有 91 项,涉及专用材料的产品要求、工艺规范及性能测试、包装运输等。在行业标准及地方标准方面,与增材制造相关的行业标准及地方标准分别为 7 项和 8 项,其中与专用材料相关的行业标准及地方标准分别为 5 项和 3 项,其中行业标准中的 5 项专用材料标准有 3 项与医药行业相关。在团体标准方面,与增材制造密切相关的团体标准共 97 项,分别由广东省增材制造协会、中国机械制造工艺协会、中国生物医学工程学会、上海市增材制造协会、广州市质量检验协会等社会团体组织发布,其中与材料相关的标准占 29 项。

2.2.3 小结

根据上述增材制造专用材料的相关标准统计情况分析可知,国外在增材制造专用材料标准制定方面走在前列,其标准化工作起步较早,其中 ASTM 标准体系最为完善,从术语、设计、原材料、工艺、性能检测等方面

发布了共 16 个专用材料相关标准, ISO、SAE 紧随其后, 分别发布了 17 项(与 ASTM 联合发布 14 项)和 14 项相关标准。其它相关组织, 如 NASA、DIN 等, 也发布了增材制造专用材料相关标准, 但都较为零散且数量较少。

国内也积极成立了全国增材制造标准化技术委员会, 下设了专用材料工作组, 为国内增材制造专用材料标准的制定提供了组织保障。近几年, 为与国际接轨, 国内在专用材料基础术语方面参考了国外标准, 并先后发布了多项增材制造专用材料标准, 如增材制造用难熔合金及其合金粉(钼、铌、钨、钽)、铜及铜合金粉、钛合金以及镍粉等。部分增材制造专用材料标准是国内自主制订的, 部分是在参考国外增材制造专用材料标准的基础上进行优化的。

(1) 以 GB/T 41335-2022《增材制造用镍粉》为例, 该标准规定了 F-N4 与 F-N6 2 种牌号镍粉的化学成分、粉末粒度分类、密度、流动性和外观质量等技术要求; 与前述 AMS7001 等国际标准相比, AMS 系列标准规定了不同牌号镍基合金所用增材制造粉体材料的技术要求, 同时根据粉体中氧含量的高低进行了档次划分(由低到高分 A、B、C 3 类), 但是粒径分布范围较窄(5~125 μm), 以激光熔融增材制造用粉体为主; 而 GB/T 41335-2022 中规定的镍粉粒径范围则较宽(15~250 μm), 可同时适用于激光熔融、电子束熔化以及激光定向能量沉积等多种工艺。

(2) 以 GB/T 41337-2022《粉末床熔融增材制造镍基合金》、T/CMES 35006-2021《增材制造 激光粉末床熔融

IN718 合金技术要求》为例, 该标准参考了 ASTM F3055-14a(2021)与 ASTM F3056-14(2021), 但对具体技术指标的要求有所调整, 如 GB/T 41337-2022 中对于增材制造镍基合金产品的后续热处理以及热等静压工艺未做明确说明, 但是对产品的表面质量和内部质量缺陷等提出了具体要求, 同时该标准也对产品的高温力学性能提出了指导性建议(由供需双方协商确定); T/CMES 35006-2021 中对于 IN718 合金产品的室温力学性能要求比 ASTM F3055-14a(2021)规定的指标(如抗拉强度、0.2% 屈服强度和断后伸长率等)更加严格。

综上所述, 我国增材制造标准化相关工作起步相对较晚, 技术标准参考借鉴国外标准的同时也在不断优化, 同时在具体细分领域走出了自己的路子, 近几年发展势头迅猛。目前在包括基础术语、原材料、生产设备、质量检验及产品服务等方面均有相关标准发布, 但标准分布较散, 系统性和整体性有待改善, 需研究构建增材制造专用材料标准体系, 通过体系规划来指导具体标准的制定工作。

3 增材制造专用材料标准体系构建

3.1 理论依据

根据印度著名标准化理论与实践家魏尔曼提出的标准体系三维结构思想^[15], 结合增材制造专用材料产业的具体特点及标准体系的构建原则, 增材制造专用材料标准体系框架可设计为一个由产品实现流程(X 轴)、产品分类(Y 轴)、和全产业链维度(Z 轴)构成的三维空间结构, 见图 1。

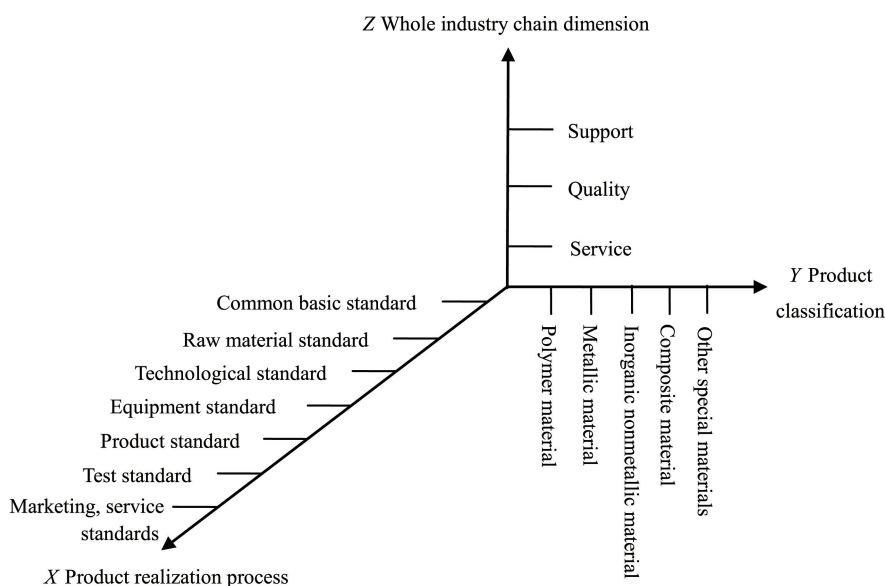


图 1 增材制造专用材料标准体系三维结构图

Fig. 1 Three-dimensional structure of standard system for additive manufacturing materials

X 轴——产品实现流程：将工业品全生命周期流程^[12, 13]涉及的设计、生产、流通及服务过程分为通用基础标准、原材料标准、生产制备工艺标准、设备标准、产品标准、检验标准以及营销、服务标准等。

Y 轴——产品分类：根据增材制造专用材料的不同材料类别，将产品分类定为金属材料、高分子材料、无机非金属材料以及复合材料等增材制造专用材料。

Z 轴——全产业链维度：《行动计划》中强调要加快和完善我国增材制造标准体系，做好基础共性、关键技术和行业应用等方面标准的顶层设计，因此将全产业链维度划分为支撑、质量和服务 3 个维度。

3.2 标准体系框架

根据上述三维结构，增材制造专用材料标准体系的整体框架将增材制造专用材料全产业链分为支撑、质量和服务 3 个维度，如图 2 所示，覆盖所有增材制造专用材料(如高分子材料、金属材料、无机非金属材料、复合材料及其他增材制造专用材料)设计、生产、流通及服务过程的全要素标准，包括但不限于通用基础标准、原材料标准、生产制备工艺标准、设备标准、产品标准、检验标准以及营销、服务标准等。该标准体系层次更加清

晰，更加健全，适用性范围及可持续发展能力较强。

目前搜集到的已发布的增材制造专用材料相关标准共计 160 项，其中国际标准 33 项，国家标准 91 项，行业标准 4 项，地方标准 3 项，团体标准 29 项，按照上述标准体系框架一一梳理分布情况，结果见表 3。

4 增材制造专用材料标准制修订建议

通过梳理现行的增材制造专用材料标准，发现现行的标准多涉及金属材料和高分子材料，集中于支撑标准子体系及质量标准子体系，主要为通用基础标准、设施设备标准、产品质量标准、检验检测标准等类别；从材料分类的角度分析，多种金属及合金材料(包括铝合金、钛合金、镍基高温合金等)相关标准占多数，陶瓷、树脂基等非金属专用材料的相对较少；且相关产品在工艺规范、质量标准、性能检测以及产品服务等方面均有相关标准发布，但缺乏系统性和完整性^[14]。总体来说，近年来国内增材制造专用材料标准在具体细分领域逐渐走出了自己的路子，发展势头迅猛，但在体系框架下仍有较多标准子体系的内容不够充实、甚至还存在空白，需进一步完善和充实。具体制修订建议包括以下 5 个方面。

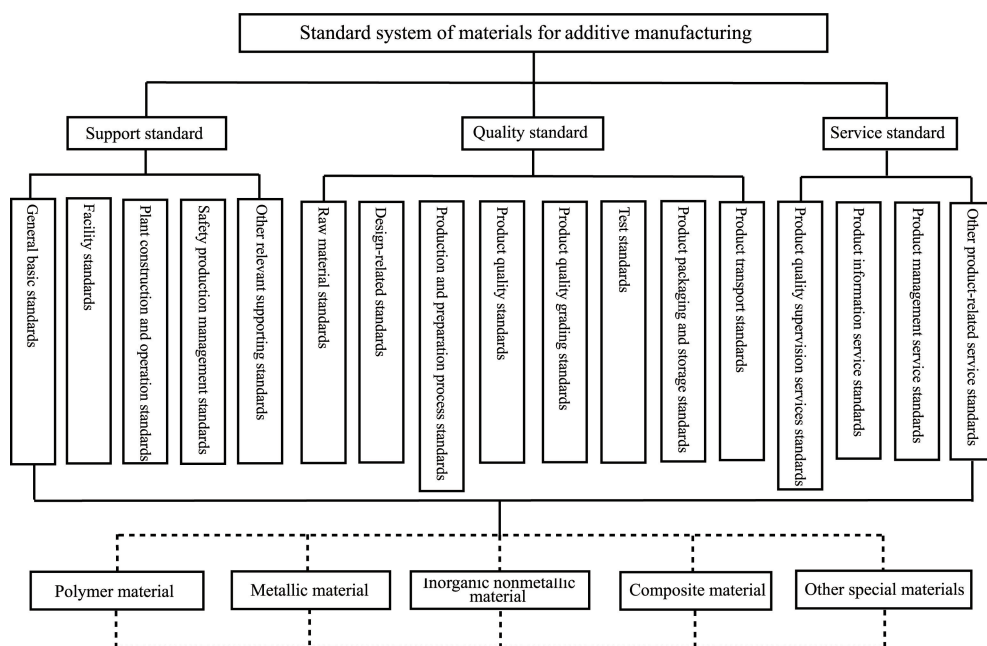


图 2 增材制造专用材料标准体系框架图

Fig. 2 Standard system framework for additive manufacturing materials

表 3 标准分布情况

Table 3 Standard distributions

Standardized object	International standard	National standard	Industry standard	Provincial standard	Association standard
Support standard sub-system	5	8	0	0	7
Quality standard sub-system	26	81	4	3	18
Service standard sub-system	2	2	0	0	4

(1) 原材料标准。拓展增材制造专用陶瓷、树脂基等金属材料相关标准研制, 制定针对增材制造专用牌号的金属材料的标准, 如铁基合金、钛合金、镍基合金、铝合金等金属及其复合材料, 细化技术参数指标及产品一致性要求。

(2) 生产工艺和设备标准。研制增材制造专用粉体新型生产工艺, 如超声雾化法、旋转盘雾化法、双辊及三辊雾化法、多级雾化法、等离子旋转电极法等。制定与增材制造工艺相配套的制件后处理标准, 规范后处理工艺流程, 并开展面向增材制造专用材料生产过程控制、回收、处理、再利用等的标准的研制, 推动企业降低生产成本。

(3) 测试方法与质量标准。增材制造技术对其所用的金属粉末性能要求较高, 如球形度、粒度分布等。因此, 加快制定增材制造专用材料相关性能的检验检测方法标准, 能够在一定程度上提升产品的质量与稳定性。

(4) 监管与服务标准。研制增材制造专用材料的质量监管标准、产品信息化服务标准、营销服务规范、教育与培训标准等其他相关服务标准, 从而将前端专用材料与后端应用服务相关标准结合起来。

(5) 特定应用标准。开展一批面向特色领域应用的增材制造专用材料相关标准, 如针对航空、航天、生物医疗等领域的特殊需求, 开展专用材料成分优化、制备工艺改进以及相关性能评价等的标准研制, 提升产品关键性能指标、提高生产效率。

另外, 今后在研制相关标准的同时应当充分吸收借鉴国际相关标准的先进内容, 同时结合已开展的增材制造研究及生产实际状况, 加快标准制定工作, 不断提升专用材料标准体系的系统性和规范性; 建立“原材料-生产工艺/设备-产品质量-相关服务”指标协调优化、相互配合的成套技术标准, 强化标准的验证与测试, 实现国家、行业、地方、团体及企业标准之间的统一协调发展。

5 结 语

本文对国内外增材制造专用材料的发展概况、标准化研究现状进行了深入分析, 在现有基础上研究构建了增材制造专用材料标准体系框架, 并对标准体系中的原材料标准、生产工艺和设备标准、测试方法与质量标准、监管和服务标准、特色领域应用标准这 5 个方面提出了具体可行的标准制修订建议。随着增材制造技术的飞速发展, 相关产业不断升级, 未来将会涌现出更多增材制造相关的新材料、新技术、新工艺和新装备, 对专用材料的综合性能也将提出更高的要求。因此应当积极引导科研院所、企业界和下游用户组建增材制造专用材料产业联盟, 保持密切沟通、合作, 及时准确地把握行业发展态势与最新动向, 共同开展增材制造专用材料标准的

制定及修订工作, 形成可持续的增材制造专用材料“产-学-研-用”体系。同时也应鼓励科研院所与企业主持或参与国际增材制造专用材料标准体系构建及具体标准的制定工作, 逐步提升行业话语权, 切实保障并推动我国增材制造产业的高质量健康发展。

参考文献 References

- [1] ZHANG X, LIOU F. Additive Manufacturing[M], Amsterdam: Elsevier, 2021: 1-31.
- [2] Wohlers Associates. 3D Printing and Additive Manufacturing[R]. Washington DC: Wohlers Associates, 2022.
- [3] KODAMA H. Review of Scientific Instruments[J], 1981, 52(11): 1770-1773.
- [4] 温斯涵, 李丹. 新材料产业[J], 2019(2): 2-6.
WEN S H, LI D. Advanced Materials Industry[J], 2019(2): 2-6.
- [5] 王延庆, 沈竞兴, 吴海全. 航空材料学报[J], 2016, 36(4): 89-98.
WANG Y Q, SHEN J X, WU H Q. Journal of Aeronautical Materials[J], 2016, 36(4): 89-98.
- [6] 张文毓. 金属世界[J], 2021(1): 12-19.
ZHANG W Y. Metal World[J], 2021(1): 12-19.
- [7] 张阳春, 张志清. 中国医疗器械信息[J], 2015, 21(8): 1-6.
ZHANG Y C, ZHANG Z Q. China Medical Device Information[J], 2015, 21(8): 1-6.
- [8] 陈志茹, 夏承东, 李龙, 等. 金属世界[J], 2018(5): 15-18.
CHEN Z R, XIA C D, LI L, et al. Metal World[J], 2018(5): 15-18.
- [9] 陈双, 吴甲民, 史玉升. 物理[J], 2018, 47(11): 715-724.
CHEN S, WU J M, SHI Y S. Physics[J], 2018, 47(11): 715-724.
- [10] 栗晓飞. 电加工与模具[J], 2020(5): 56-59.
LI X F. Electromachining & Mould[J], 2020(5): 56-59.
- [11] 肖承翔, 李海斌. 中国标准化[J], 2015(3): 73-75.
XIAO C X, LI H B. China Standardization[J], 2015(3): 73-75.
- [12] 本刊. 机械工业标准化与质量[J], 2018(10): 27-32.
BEN K. Machinery Industry Standardization & Quality[J], 2018(10): 27-32.
- [13] 本刊. 机械工业标准化与质量[J], 2018(11): 30-34.
BEN K. Machinery Industry Standardization & Quality[J], 2018(11): 30-34.
- [14] 丁红瑜, 武姝婷, 袁康, 等. 中国材料进展[J], 2020, 39(12): 955-961.
DING H Y, WU S T, YUAN K, et al. Materials China[J], 2020, 39(12): 955-961.
- [15] 魏尔曼. 标准化是一门新学科[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1980.
VERMAN C. Standardization-A New Discipline[M]. Beijing: Scientific and Technical Documentation Press, 1980.

(编辑 费蒙飞)