

《连续送丝搅拌摩擦增材制造工艺与性能评价规范》

(征求意见稿)

编制说明

一、工作简况

(一) 任务来源

本项目根据中国欧洲经济技术合作协会 2026 年团体标准制定计划，项目名称为《连续送丝搅拌摩擦增材制造工艺与性能评价规范》项目计划号 T/CEATEC-2026-162 的任务而进行制订。

(二) 起草单位及主要起草人

本文件起草单位：哈尔滨工业大学、航天工程装备(苏州)有限公司、北京新风航天装备有限公司、北京赛福斯特技术有限公司、广东横琴澳质研科技发展有限公司、哈尔滨焊增科技有限公司、沈阳航空航天大学。

本文件主要起草人：孟祥晨、高苏剑、张亚婷、赵华夏、乔乾、李宣默、姬书得。

(三) 标准制定目的和意义

从产业角度分析，制定《连续送丝搅拌摩擦增材制造工艺与性能评价规范》团体标准的目的和意义主要体现在以下几个方面：

1. 目的

制定本文件的核心目的是填补我国连续送丝搅拌摩擦增材制造工艺控制与性能评价领域的标准空白。连续送丝搅拌摩擦增材制造通过连续送入金属丝材，利用旋转工具与材料之间的摩擦产热和塑性变形实现材料逐层沉积成形，具有固相成形、热输入较低、组织致密、材料利用率高等特点，在铝合金、镁合金等金属构件近净成形与修复制造领域具有较好的应用前景。然而，目前针对该工艺尚缺乏统一的技术规范，不同单位在原材料与丝材要求、送丝参数、工具转速、行进速度、下压力、层间搭接、成形路

径及过程控制等方面存在差异，对成形件尺寸精度、表面质量、内部缺陷、微观组织及力学性能的评价方法和判定依据也不统一，制约了工艺稳定性、产品一致性及工程化应用。

本文件旨在统一连续送丝搅拌摩擦增材制造的原材料要求、设备与工装要求、工艺参数及过程控制要求，规范成形质量、尺寸精度、内部缺陷、组织性能和力学性能等评价项目及试验方法，为工艺设计、生产制造、质量检验和性能评价提供统一技术依据，提高连续送丝搅拌摩擦增材制造过程的稳定性、成形件质量一致性和评价结果的可比性，推动该技术的标准化、工程化和规模化应用。

2. 意义

本文件的发布实施将有效提升连续送丝搅拌摩擦增材制造过程的稳定性、成形质量和性能评价的一致性。通过规范原材料与丝材质量、设备及工装条件、送丝速度、工具转速、行进速度、下压力、层间搭接及成形路径等关键工艺参数，可降低未结合、孔隙、材料堆积不均及层间缺陷等质量风险，提高增材构件的尺寸精度、组织均匀性和力学性能稳定性。同时，通过统一外观质量、尺寸偏差、内部缺陷、微观组织及力学性能等评价方法，有利于提高不同设备、不同工艺条件和不同制造单位之间评价结果的可比性。

从产业发展角度看，本文件将完善连续送丝搅拌摩擦增材制造领域的工艺与质量评价标准体系，为相关装备研发、工艺优化、生产制造、质量检验和工程验收提供统一依据。标准的实施有助于推动连续送丝、搅拌摩擦沉积、过程监测及智能控制等关键技术协同发展，促进铝合金、镁合金等轻质金属大型复杂构件及修复件向高质量、高效率 and 低成本制造方向发展，并为航空航天、轨道交通、船舶、汽车及高端装备制造等领域的工程化应用提供技术支撑，推动该技术的产业化和规模化发展。

（四）主要工作过程

1. 前期准备工作

项目立项前，标准编制小组查阅、研读相关国内外文献，广泛搜集相关的材料。同时，标准编制小组安排相关人员，多次与相关行业人员进行调研、交流，广泛征求标准制定方面的意见和建议。

2026 年 8 月 4 日本团体标准由中国欧洲经济技术合作协会正式立项，立项名称为：《连续送丝搅拌摩擦增材制造工艺与性能评价规范》。

2. 标准起草过程

2026 年 8 月，团体标准立项通知公示后，标准编制小组首先组织了标准制定工作会议，各编写人员根据工作计划分工和编写要求开展了相关工作。在标准起草期间，编制小组主编单位及参编单位组织了数次内部研讨会和专家咨询会，经过多次修改，于 2026 年 8 月下旬完成了标准初稿及编制说明的撰写工作。

二、标准编制原则和依据

（一）编制原则

标准起草小组在编制标准过程中，以国家、行业现有的标准为制订基础，结合我国目前的行业现状，按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定及相关要求编制。

（二）标准主要内容与确定依据

1. 标准主要内容

1.1 范围

本文件规定了连续送丝搅拌摩擦增材制造的技术要求、性能评价、质量检验和检验规则。

本文件适用于金属构件的连续送丝搅拌摩擦增材制造与检验。

1.2 规范性引用文件

GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第 1 部分：室温试验方法

GB/T 229 金属材料 夏比摆锤冲击试验方法

GB/T 1173 铸造铝合金

GB/T 2651 金属材料焊缝破坏性试验 横向拉伸试验

GB/T 2653 焊接接头弯曲试验方法

GB/T 2654 焊接接头硬度试验方法

GB/T 2828.1 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限(AQL)检索的逐批检验抽样计划

GB/T 3075 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法

GB/T 3190 变形铝及铝合金化学成分

GB/T 3323.1 焊缝无损检测 射线检测 第1部分：X和伽玛射线的胶片技术

GB/T 7314 金属材料 室温压缩试验方法

GB/T 7704 无损检测 X射线应力测定方法

GB/T 10125 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验

GB/T 13298 金属显微组织检验方法

GB/T 24179 金属材料 残余应力测定 压痕应变法

GB/T 39247 增材制造 金属制件热处理工艺规范

GB/T 43615 增材制造 定向能量沉积金属成形件超声检测方法

ISO 9001 质量管理体系 要求 (Quality management systems – Requirements)

1.3 术语和定义

规定了连续送丝搅拌摩擦增材制造、增材工具、螺杆、螺棱、搅拌针、套筒、轴肩、送丝系统、层间停留时间/策略、层间温度、主轴扭矩、三向力、沉积路径、相邻沉积道重叠量、层间路径偏移、Z轴抬升量、位移控制模式、轴向力控制模式、S线缺陷、夹杂、隧道共21个核心术语。

1.4 技术要求

规定了连续送丝搅拌摩擦增材制造设备、材料准备、工艺参数、过程监控及后处理等方面的技术要求。

1.5 性能评价

规定了连续送丝搅拌摩擦增材制造构件的外观、尺寸、缺陷、力学性能、残余应力及腐蚀性能等评价要求与方法。

1.6 质量检验

规定了连续送丝搅拌摩擦增材制造全过程的质量管理、原材料入厂检验、过程质量控制及后处理质量检验要求。

1.7 检验规则

规定了产品外观质量、几何特性、力学性能、无损检测、不合格品控制、质量证明文件以及型式检验和出厂检验等要求。

2. 确定标准主要内容的依据

标准各项技术指标依据连续送丝搅拌摩擦增材制造技术的研究成果、工程实践经验、现有增材制造及搅拌摩擦加工相关标准和实际应用需求确定。设备要求主要基于连续送丝、塑性材料输运和固相沉积过程中对设备刚度、运动精度、轴向载荷及过程稳定性的实际需求；旋转速度、行进速度、送丝速度、轴向力、主轴扭矩、增材层厚度及层间温度等关键工艺参数，综合考虑铝合金等典型材料的塑性流动特性、摩擦产热规律、工具结构及已有试验研究和工程应用数据确定，并允许通过工艺评定针对不同材料和构件进行优化。过程监控中的力、扭矩、温度及工艺参数实时采集要求，依据连续稳定沉积、异常识别和全过程质量追溯需求确定。外观、尺寸、内部缺陷及组织评价要求重点针对孔洞、隧道、夹杂、S线及层间弱结合等典型缺陷设置；拉伸、硬度、弯曲、疲劳、压缩、冲击、残余应力及腐蚀性能等评价方法，与现行金属材料、焊接接头及增材制造相关国家标准相衔接。原材料、后处理、质量检验及检验规则等要求，则结合金属增材制造产品全过程质量控制和工程验收需求确定，以保证不同设备、材料和制造单位之间工艺控制及性能评价结果具有一致性和可比性。

三、主要试验[或验证]情况分析、技术经济论证、预期经济效果

编制组在标准起草过程中，联合连续送丝搅拌摩擦增材制造装备研发、材料加工及应用单位，对标准草案中的关键工艺参数和性能评价方法进行了试验验证。选取典型铝合金丝材及基底材料，采用不同规格的连续送丝搅拌摩擦增材制造设备开展工艺试验，重点验证旋转速度、行进速度、送丝速度、轴向力、主轴扭矩、增材层厚度和层间温度等参数对沉积稳定性、成形质量和组织性能的影响。试验内容包括连续送丝稳

定性试验、沉积成形试验、工艺参数实时监测试验、外观及尺寸检测、超声和射线无损检测、宏观及微观组织分析，以及拉伸、硬度、弯曲等力学性能试验，并对孔洞、隧道、夹杂、S线和层间弱结合等典型缺陷进行了分析评价。

试验结果表明，在合理工艺窗口内，连续送丝过程和材料沉积状态较为稳定，构件外观质量、内部缺陷及力学性能能够满足预期要求；标准规定的主要工艺参数范围和性能评价方法具有较好的可操作性，能够用于指导工艺设计、过程控制和质量检验。试验同时表明，送丝不稳定、热输入不匹配、轴向力不足或层间温度控制不合理时，易出现孔洞、隧道、材料堆积不均及层间结合不良等问题，通过规范关键工艺参数及过程监测要求，可有效降低上述缺陷发生风险。

从技术经济角度看，本标准统一了连续送丝搅拌摩擦增材制造的材料要求、关键工艺参数、过程监控、后处理及性能评价方法，可减少不同企业在工艺开发、试验验证和产品验收过程中的重复投入，降低供需双方因评价方法和验收依据不一致产生的成本。标准实施后，将有助于推动相关装备、增材工具、送丝系统及过程监测技术协同发展，促进连续送丝搅拌摩擦增材制造向高稳定性、高一致性和规模化工程应用方向发展。同时，统一的性能评价和检验方法可为产品质量验收、第三方检测及工艺能力评价提供依据，降低用户选型和工程应用风险，具有较好的经济效益和产业推广价值。

四、与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

本标准的制定过程、技术要求的选定、试验方法的确定等符合现行法律、法规和强制性国家标准的规定。

五、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

六、废止现行有关标准的建议

本标准不涉及对现行标准的废止。

七、知识产权情况说明

本文件不涉及必要专利等知识产权情况。

八、标准作为强制性或推荐性标准的建议

建议该标准作为推荐性团体标准。

九、贯彻标准的要求和措施建议，包括（组织措施、技术措施、过渡办法）

本标准首次制定，没有特殊要求。

十、其他应予说明的事项

无。

《连续送丝搅拌摩擦增材制造工艺与性能评价规范》团体标准编制组

2026 年 9 月