

广东省材料研究学会团体标准

《增材制造 镁合金再制造技术规范》（征求意见稿）

编制说明

1 工作简况

1.1 任务来源

根据《广东省材料研究学会团体标准管理办法（试行）》和《关于〈增材制造 镁合金再制造技术规范〉〈外科植入物 全髋关节假体 增材制造钛合金股骨柄假体〉团体标准的立项公告》有关计划安排，团体标准《增材制造 镁合金再制造技术规范》由广东省材料研究学会归口管理，由广东省科学院新材料研究所、天航装备技术有限公司、唐山威豪镁粉有限公司、北京市春立正达医疗器械股份有限公司、天津理工大学、福建医科大学附属第一医院、成都国营锦江机器厂、北京工商大学、北京科技大学负责等单位联合起草。按计划要求，本标准应在 2023 年度完成。

1.2 标准概况

镁合金作为目前可应用的最轻质金属结构材料，具有高比强度和比刚度、易于回收再利用等优点，有助于实现工业领域的轻量化和节能减排。同时，镁为密排六方结构，具有较高的线膨胀系数和热导率，相比于其他材料，镁合金对热过程敏感，可加工性较差，难以制造形状复杂的零件，因此镁合金铸锻件废品率较高。随着航空航天和汽车制造等领域对低成本、结构复杂镁合金构件的需求日益上升，传统制造方式显然已经无法满足生产需求。

增材制造技术是一种将材料由下而上，逐层递增的制造技术，又称快速成形技术。该技术借助计算机辅助可实现零件的直接制造，与传统制造技术相比，增材制造技术具有材料利用率高、性能优良等诸多优点，并且可成形结构复杂的零件，有效减少制造成本，摆脱了铸造技术的模具限制。因此增材制造技术更适合制造结构复杂的高性能镁合金零件。随着工业领域轻量化的需求不断增加，镁合金在航空航天、汽车制造业等各个领域得到了广泛应用，镁合金零件修复需求随之增加。开展镁合金增材制造修复技术标准工作具有迫切的需求。

镁合金增材制造技术按照焊接热源可以分为激光选区熔化（Selective Laser Melting, SLM）、送粉式激光增材制造、电弧增材制造（Wire+Arc Additive Manufacturing, WAAM）等。

在 SLM 工艺中，由于所用镁粉材料热积聚快，表面积大，彼此间不能充分散热，在与氧接触的情况下极易发生燃烧和爆炸，需要严格遵守镁合金粉末在保存和使用过程中的规范性操作，安全隐患尤为突出；WAAM 工艺中，由于采用镁合金焊丝作为原材料，制造过程不易发生燃烧和爆炸，安全性高。

在镁合金增材制造过程中，常见的冶金缺陷有气孔，热裂纹，未熔化孔隙等。对于镁合金 SLM 成形

工艺，镁合金 SLM 成形样品中气孔归因于在高激光功率和低扫描速度下产生的匙孔效应，形成较深的熔池，随着熔池向前移动和熔池凝固，蒸气来不及析出，形成气孔。镁的沸点和熔点之间只有 440 °C，导致 SLM 过程中镁合金的剧烈蒸发，出现粉体飞溅，元素烧损等问题。镁对氧的高亲和力是镁合金 SLM 的另一个主要问题，镁合金的氧化可能会阻碍层间结合并导致球化。除了引入污染外，如果氧化层被激光束破坏，它会沿着镁合金试样的晶界积聚，导致微裂纹的产生。目前减少镁合金 SLM 成形构件中的缺陷最主要的方式是调整工艺参数，其中激光功率和扫描速度是决定 SLM 制备的镁合金成形质量的重要因素，合适的工艺参数可以有效减少球化、元素烧损、气孔等缺陷。在镁合金 WAAM 工艺中，氢在镁合金中的溶解度随温度的降低而减小，由于镁的低密度和 WAAM 过程的快速冷却，气体在凝固过程中无法快速向上移动并从熔池中逸出而形成气孔。

镁合金的使用范围与服役环境正在日渐扩大，镁合金的缺点也逐渐暴露出来，目前最制约镁合金广泛使用的原因之一是其耐蚀性较低，在潮湿环境下无法长期服役。SLM 过程中较高的冷却速度，有利于合金组织细化，有助于提高材料耐腐蚀性能。

近年来镁合金增材制造技术引起了人们的广泛关注，但镁合金增材制造的研究仍处于初步阶段，随着相应问题进一步研究和突破，镁合金增材制造技术将会得到更广泛的发展和应用。

本标准紧跟镁合金增材制造技术的研究与应用，规定了应用增材制造技术对零件进行镁合金修复的工艺设计、工艺过程、质量检测、检验、标识、劳动安全。符合“十四五”推动高质量发展的国家标准体系建设规划中提及的“8.制造业数字化转型标准。开展增材制造标准领航行动，研制专用材料、工艺和设备、测试方法等标准，规范和引领产业发展”。该标准的制定对推动镁合金增材制造技术的进一步应用发展有必要性与重要意义。

1.3 承担单位情况

广东省科学院新材料研究所承担现代材料表面工程技术国家工程实验室、国家钛及稀有金属粉末冶金工程技术研究中心等创新平台的建设，承担新材料研究开发及工程化验证。

研究所主要围绕广东省战略新兴产业、重点传统产业和高端装备制造业及国家重大工程对产品开发及装备性能不断提升的需求，面向航空航天、海洋工程、先进装备制造、新能源汽车、机械、电力、矿山、轨道交通、医疗器械等领域，开展热（冷）喷涂技术、铝镁轻金属材料、真空镀膜技术、金属基复合材料、激光增材制造技术、高性能粉末冶金和表面分析检测技术的研究与应用。先后承担了近 700 项国家 973、863、国家支撑、国际合作等项目，开发出多种高性能涂层产品、金属材料粉末及构件，并实现工程化应用。迄今，累计取得各类科研成果 104 项。

研究所重视标准化工作，牵头（参与）制修订标准 120 余项，其中，国家标准 24 项，行业标准 12 项，团体标准 14 项，企业标准 70 余项。按照 ISO9001: 2015，GJB9001C-2017 要求，建立质量管理体系，为标准化的实施提供的制度保证。

1.4 参编单位及主要起草人工作情况

标准起草过程中各参编单位分工如表 1 所示。

表 1 参编单位及分工

序号	参编单位	分工
1		
2		
3		

标准主要起草人以及分工见表 2。

表 2 标准主要起草人及分工

序号	姓名	单位	分工
1			主持标准项目，性能验证，标准起草及协调工作
2			
3			

1.5 主要工作过程

1.5.1 起草阶段

根据《关于〈增材制造 镁合金再制造技术规范〉〈外科植入物 全髋关节假体 增材制造钛合金股骨柄 假体〉团体标准的立项公告》有关计划安排，团体标准《增材制造 镁合金再制造技术规范》由广东省材料研究学会归口管理，由广东省科学院新材料研究所负责起草。主编单位立即成立了标准编制工作组，对目标任务进行分解，明确成员的任务要求，制定工作计划和进度安排。项目运行以来，项目组积极收集增材制造 镁合金再制造的制造、检验数据，调研国内增材制造 镁合金再制造科研单位、制造商、应用单位的基本情况，开展与标准制定工作。

1.5.2 征求意见阶段

2023 年 3 月 xx 日，由广东省材料研究学会发函，共向 xxx 等 xx 余位专家发函，征求意见。各专家对本标准（征求意见稿）进行了认真审阅，提出了修改意见及建议。

2023 年 4 月 XX 日至 2023 年 5 月 XX 日，广东省材料研究学会将征求意见资料在学会官网上挂网，向社会公开征求意见。同时，广东省材料研究学会通过工作群、邮件向相关单位征求意见，并将征求意见资料在全国团体标准信息平台 <http://www.ttbz.org.cn/> 网站上挂网。征求意见的单位包括主要生产、经销、使用、科研、检验等单位及高等院校，征求意见单位广泛且具有代表性，征求意见时间大于 1 个月。

2023 年 X 月，编制组单位对收集到的意见进行整理，共收到了 X 条意见，形成了《标准征求意见稿意见汇总处理表》。标准制定工作组对征求意见稿进行修改，形成了标准审查稿。

1.5.3 审查阶段

2023 年 5 月 X 日~X 月 X 日，由广东省材料研究学会主持，在 X 组织召开本标准审查会。来自 X 等 X 家单位的 X 位专家代表参加了会议。会议对广东省科学院新材料研究所负责起草的团体标准《xxx》（送审稿）进行了认真细致的审定并提出修改意见。标准编制组采纳了审定会的意见，对标准送审稿进行了修改完善。

1.5.4 报批阶段

标准编制组对标准文本和编制说明进行修改完善，形成标准报批稿报送至广东省材料研究学会审批、发布。

委员投票情况：202X 年 X 月 X 日至 2023 年 X 月 X 日，由广东省材料研究学会组织，进行了专家投票，专家人数共有 X 人，参与投票 X 人，投票同意本标准通过审查 X 人，其中，起草人员 X 人。

2 标准编制原则和确定主要内容的论据

2.1 标准编制原则

- 1) 本标准按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。
- 2) 本标准是增材制造 镁合金再制造的技术规范，便于镁合金再制造的研发与应用，并符合行业的市场应用需求，具有指导作用，并能规范市场。

2.2 确定标准主要内容的论据

采用增材制造技术对镁合金零件进行再制造，本标准从工艺设计、工艺过程、质量检测、安全、检验、标识、包装对其进行规范、指导。

2.2.1 工艺设计

2.2.1.1 再制造性评估

在对损伤零件进行性能测试及工况指标分析的基础上，综合考虑技术、经济、环境、资源等因素，进行再制造评估。评估一般包括再制造零件的失效分析、宏观缺陷分析、剩余寿命评估、环境影响分析、资源利用及成本分析、能效分析等。

供方要进行技术可行性分析，包括原零件的加工工艺、材料、结构、失效情况、宏观缺陷分布情况、性能要求等的分析。一般考虑下面内容，具体要按实际情况。

(a) 若原零件已进行过焊接修复，尽管激光再制造所使用的光斑较小，但是也属于微区焊接的一种，因此，根据 NB/T 47014 标准，要注意对修复过的同一部位的再制造不宜超过 2 次，即采用增材制造技术再进行一次修复。

(b) 如果零件是承力结构件，再制造次数不宜超过 2 次；如果是非强承力面，可以经技术负责人评

估后进行多次再制造；

(c) 若力学性能要求高的情况，可以考虑选择与原基材不同种类但性能与原始零件匹配的的镁合金材料，也可以选择同种材料进行再制造后再进行恢复性能后处理。

(d) 材料选择时，一般，Mg-Al 系的铸造镁合金具有良好的可成形性，工艺可行性更好；对于变形镁合金来说，如 ZK60，ZK61 系合金来说，较易出现热裂纹，导致再制造失败。

(e) 缺陷在表面的，根据是平面部位还是仿形曲面分别选择铺粉式激光增材制造和送粉式激光增材制造，对其特定部位进行修复；而当属于内腔、内沿或者盲孔区域，则可以在保证枪头可达性的前提下，考虑内孔式的激光熔覆方法进行缺陷修复。

2.2.1.2 原材料与工艺选择

原材料选择与零件基体材料成分一致或主要成分一致，或所选原材料主要性能指标满足零件的性能要求。再制造用原材料应获得需方的认同。

镁合金增材再制造工艺可以选择选区激光熔化、送粉式激光增材制造与电弧增材制造，其中选区激光熔化设备受限于其成形尺寸及水平向上增材制造，适用于一定尺寸的零件再制造。送粉式激光增材制造图样受限于成形尺寸限制、电弧增材制造基本不受限于成形尺寸，而且电弧增材制造效率高，一般适用于大型零件的再制造。此外选区激光熔化技术与电弧增材制造由于增材方式的不同，显微组织有区别，各性能也相应有差异，需要按原零件的性能要求，选择适用的增材制造工艺方法。

关于镁合金零件的缺陷可分为铸造缺陷（气孔、夹杂等）、加工过程中的超差、使用过程中吊耳、螺纹孔等部位的破坏、气密性的失效、产生贯穿性缺陷等。以上缺陷在满足零件尺寸、缺陷可去除、再制造部位可达性等的限制下，按零件性能指标要求选择选区激光熔化技术或送粉式激光增材制造或电弧增材制造技术。

在初步确定原材料、工艺后，一般进行试样验证，对整个工艺做系统性工艺评定，试样应能反映零件的性能特点。以此确认镁合金零件再制造的可行性。经过系统性的工艺评定，制定再制造技术文件，包含工艺、检验文件等。

2.2.2 工艺过程

零件再制造通常要经过再制造前的检测及预处理、再制造过程、后处理等工序。

再制造前要测量、记录零件的相关尺寸、形位公差。采用无损检测确认零件的损伤位置、深度，用机械方法完全去除，为确保缺陷完全去除，要求：

(a) 确认再制造部位近表层区域的缺陷得到完全清理；

(b) 因存在检测精度影响，一般在现有标定损伤、缺陷的基础上设定额外清除余量，避免可能的裂纹等缺陷的存留；

(c) 受氩弧焊、堆焊等大热影响区的热影响区域应清除掉；

(d) 去除要求应在作业文件中详细规定。

采用选区激光熔化技术，一般将破损、缺陷区域完全切除成一个平面，进行喷砂处理，要求喷砂等级达到 Sa2.5 级或表面粗糙度 $45\mu\text{m}\sim 75\mu\text{m}$ ，再在上面进行嫁接打印。保证平面的一定的粗糙度有利于粉末的铺平。

为保证再制造层与基体的结合，需通过机械或化学方法去除零件待再制造部位的油污、锈蚀、氧化膜及其他杂质。尤其是修理部位的油污确认是否有被去除，如果没有清洗干净的话，在激光修复过程中会导致飞溅严重而发生修复失败。

再制造时，一般要根据工况设计、制作工装夹具，再进行增材。工装材料的选择应考虑结构刚度，保证热应力引起的基材、工装变形在允许范围内。

零件增材后，为满足零件性能、尺寸等要求需要做热处理、表面处理、机加工等后处理，后处理方式要与需方沟通，按客户以及性能要求选择后处理方式。

2.2.3 质量检测

2.2.3.1 所选增材再制造用镁合金原材料，包括但不限于粉末、丝材等，要进行检测确认满足要求。除化学成分外，镁合金粉的氧含量、外观、粒度、松装密度、振实密度、流动性、球形率等应满足要求，镁合金丝材的外形尺寸及其允许偏差、外观质量应满足要求。

2.2.3.2 对再制造层进行性能检测。根据预期要求，选择下列相应检测项目进行检验。一般检测项目有表面质量、致密度、相对密度、内部质量、力学性能、结合强度、腐蚀性能、尺寸、形位公差。

2.2.4 安全

在选区激光熔化工艺中，由于所用镁粉材料热积聚快，表面积大，彼此间不能充分散热，在与氧接触的情况下极易发生燃烧和爆炸，需要严格遵守镁合金粉末在保存和使用过程中的规范性操作，安全隐患尤为突出。所以要考虑镁合金粉易燃易爆的性质，制定相应安全措施。激光选区熔化设备应满足设备安全防护要求及成形腔的防爆泄压装置符合要求。应考虑噪音、光辐射、粉尘、气味、空气循环等对人身的影响，采取相应的安全措施。作业人员应按照GB/T 11651的规定使用劳动保护用品。

2.2.5 检验、标识、包装

零件再制造后应对相关项目进行检测分析，出局质量证明文件。零件应明示再制造标识。标识应符合GB/T 27611的规定。包装应符合GB/T 191和 GB/T 6388标准的规定。

3 标准水平分析

3.1 采用国际标准和国外先进标准的程度

经查，国外无类似标准，因此本标准不采用其他国际或国外标准。

3.2 与国际标准及国外同类标准水平的对比

本标准是国内首次起草的增材制造 镁合金再制造技术规范团体标准，本标准结合当前实际生产水平 and 应用需求，对增材制造 镁合金再制造的工艺设计、工艺过程、质量检测、检验、标识、包装、安全进行了规定，可以满足我国采用增材制造技术对镁合金零件进行再制造需求。

综上所述，本标准的主要技术指标均达国内先进水平。

3.3 与现有标准及制定中的标准协调配套情况

本标准的制订与现有的标准及制订中的标准协调配套，无重复交叉现象。

3.4 涉及国内外专利及处置情况

经过检索，本标准不涉及国内外专利。

4 与有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

本标准与有关的现行法律、法规和强制性国家标准具有一致性，无冲突之处。

5 重大分歧意见的处理经过和依据

无

6 贯彻标准的要求和措施建议

本标准建议发布后 3 个月实施。

7 废止现行有关标准的建议

无。

8 其他应予以说明的事项

无。

9 预期效果

本标准是增材制造 镁合金再制造技术规范，随着镁合金在航空、汽车、国防方面轻量化的应用，采用增材制造技术对有损伤缺陷的镁合金零件进行增材再制造有利于目前的资源的再利用与绿色可持续发展。该标准反映了当前增材制造镁合金的技术和生产水平，具有指导作用，对具体镁合金零件的再制造有技术指导意义。

《增材制造 镁合金再制造技术规范》标准编制组

2023年4月