

团体标准
《激光选区熔化2xxx铝合金粉末成分与力学性能
评判规范》
编制说明

2022年9月

《激光选区熔化2xxx铝合金粉末成分与力学性能评判规范》 编制说明

一、标准制定的必要性

铝合金具有密度低，比强度高，塑性好，优良的导电性、导热性和抗腐蚀性等特点，是实现结构轻量化的首选材料，广泛应用于航空航天、交通运输等领域。随着“双碳”政策对轻量化需求的进一步提升，高强铝合金复杂零部件在航天航空、汽车等领域应用更加广泛，但传统的铝合金加工存在铸态强度较低、制造周期长、复杂结构难以成形和材料浪费等问题，无法满足航空航天对铝合金构件制造技术高效、快速的要求，缺乏生产复杂精密结构的灵活性以及随设计变化的快速响应能力^[1]。增材制造技术（Additive Manufacturing, AM）是一种材料逐层堆积的新型成形方法，由零件三维数据驱动，将零件切片分层，自下而上通过将复杂的三维成形转变为简单的二维加工，极大地降低了复杂构件的成形难度，有望解决传统方法难以完成的兼顾复杂形状和整体制造的高性能金属构件成形技术难题。与传统制造技术相比，增材制造技术具有柔性高、无模具、周期短、不受零件结构和材料限制等一系列优点。激光选区熔化（Selective Laser Melting: SLM）成形技术作为最有前途的增材制造技术之一，为制造高性能复杂结构铝合金零件带来了巨大的机会。

目前国内外铝合金及其复合材料增材制造研究主要从传统牌号出发，基于平衡凝固过程设计的传统合金成分难以满足激光增材制造的冶金动力学特点，往往面临高裂纹敏感性、低韧低疲劳、各向异性等共性问题。因此，需要设计面向激光增材制造的新型铝合金成分，充分挖掘增材制造极端非平衡凝固特性的潜在优势与价值。然而，如何准确评价增材制造铝合金的力学性能，进而为优化增材制造铝合金成分和力学性能提供科学依据，已成为增材制造铝合金应用用户最为关心的问题，目前还暂无相关的标准。

二、标准编制原则及依据

1、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》要求进行编写。

2、参照相关法律、法规和规定，在编制过程中着重考虑了科学性、适用性和可操作性。

三、项目背景及工作情况

（一）任务来源

根据《中国国际科技促进会标准化工作委员会团体标准管理办法》的有关规定，经中国国际科技促进会标准化工作委员会及相关专家技术审核，批准《激光选区熔化2xxx铝合金粉末成分与力学性能评判规范》团体标准制定计划，计划编号为：T/CI 110-2022。本标准由华中科技大学提出，中国国际科技促进会归口。

根据计划要求，本标准完成时限为12个月。

（二）标准起草单位

本标准的主要起草单位是华中科技大学，负责标准文档起草及相关文件的编制等。北京卫星制造厂有限公司，北京电子工程总体研究所，江苏威拉里新材料科技有限公司，中南大学，广东省科学院新材料研究所，山东大学，中车研究院有限公司参与起草，负责标准中重要技术点的研究和建议，并参与标准内容的讨论。

（三）标准研制过程及相关工作计划

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2xxx铝合金粉末成分与激光选区熔化制备零件力学性能相关的材料。同时，多次与激光选区熔化成形2xxx铝合金材料的相关研发人员进行调研、交流，广泛征求标准制定方面的意见和建议。

2、标准起草过程

团体标准立项通知公示后，标准编制小组首先组织了标注制定工作会议，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2022年9月完成了标准初稿及编制说明的撰写工作。

3、征求意见情况

2022年9月中旬，标准编制小组先后通过现场会议、电话、微信等多种形式征集行业专家相关意见和建议。针对征集的意见，标准编制小组召开了研讨会，将收集到的意见进行汇总处理分析，在充分吸纳合理意见的基础上，先后修改和完成标准内容，于2022年9月底根据在各单位反馈意见基础上，形成了标准征求意见稿并由中国国际科技促进会审核提交全国标准信息平台公示。

四、标准制定的基本原则

标准编制过程中，遵循了以下基本原则：

- 1) 标准需要具有行业特点，指标及其对应的分析方法要积极参照采用国家标准和行业标准。
- 2) 标准能够体现出产品的具有关键共性的技术要素。
- 3) 标准能够为产品的开发、改进指出明确的方向。
- 4) 标准需要具有科学性、先进性和可操作性。
- 5) 要能够结合行业实际情况和产品特点。
- 6) 与相关标准法规协调一致。
- 7) 促进行业健康发展与技术进步。

五、标准主要内容

本标准规定了激光选区熔化2xxx铝合金粉末成分与力学性能评判要求，正文部分共分八章，内容包括标准的适用范围、规范性引用文件、术语和定义、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输、贮存和质量证明书、测试报告。此外，还包含附录A、附录B。

六、主要试验（或验证）情况分析

本标准中所规范的激光选区熔化2xxx铝合金粉末成分与力学性能评判体系技术已在部分合作单位及相关领域推进并逐步试点与应用。

（一）Al-Cu-Mg-Ti合金的成分设计与组织性能

该研究利用本评判规范的激光选区熔化 2xxx 铝合金粉末成分与力学性能评判体系技术进行了 Al-Cu-Mg-Ti 合金的成分设计与组织性能研究，填充并完善了材料成分设计理论体系，并结合实验结果进行验证可行性，进一步探索扩充新的成分设计空间，为激光选区熔化 2xxx 铝合金粉末成分与力学性能评判规范提供有力支持。

针对激光选区熔化 2xxx 铝合金具有极高的裂纹敏感性，难以通过工艺优化有效抑制裂纹萌生，采用材料改性方法重新设计面向激光选区熔化的专用铝合金成分是解决这一问题的重要手段。激光选区熔化本质上是一种微铸造过程，大量报道证明在铝合金传统铸造方法中，采用 Ti 元素微合金化的方法可以有效细化晶粒。因此，借鉴铝合金传统铸造的经验，可研究 Ti 元素改性对激光选区熔化成形 Al-Cu-Mg 合金抗热裂性能的影响规律，提出新的铝合金设计方法。

基于希尔凝固模型，通过相组成、裂纹敏感因子与晶粒生长抑制因子等热力学计算，结合激光吸收率、组织模拟及显微组织表征结果，如图1所示。基于热力学数据库，计算并建立模型预测出图1 (a)、(d)与(e)，发现会形成 Al_3Ti 相，其不仅是细化晶粒的非均匀形核质点，在柱状晶向等轴晶转变过程中也存在关键作用，这对热裂纹的抑制作用具有显著的效果。图1 (b-c) 利用合金热裂纹敏感性与晶粒生长抑制因子确定添加Ti含量对合金晶粒细化、等轴晶转变影响规律，考虑到Al-Cu-Mg合金晶粒细化与力学性能之间的平衡，确定最佳添加Ti含量为1.5 wt.%。

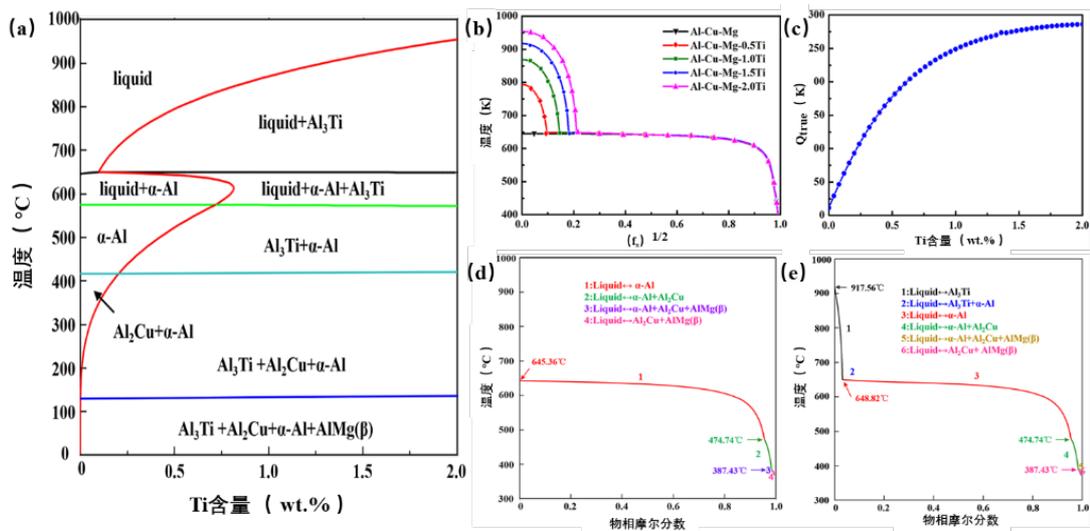


图1 Al-Cu-Mg-Ti合金：(a) Al-Cu-Mg-xTi四元合金相图沿Ti元素的垂直截面图；(b) 不同Ti含量的Al-Cu-Mg合金的 $T-(f_s)^{1/2}$ 曲线，其中 f_s 表示固相分数；(c) 生长抑制因子 Q 随Ti含量的变化；(d) 模拟的Al-Cu-Mg合金物相析出顺序；(e) 模拟的Al-Cu-Mg-Ti合金物相析出顺序

同时研究激光选区熔化工艺参数对成形件冶金缺陷、致密化行为及组织性能等影响规律，优化激光选区熔化工艺，如图2所示。图2 (a-b) 为Al-Cu-Mg合金开裂区域的显微组织，裂纹存在于粗大的柱状晶组织中，并沿柱状晶簇的晶间区域扩展。而图2 (c-d) 中，SLM成形的Al-Cu-Mg-Ti合金除少量的微小孔洞外，未观察到微裂纹的存在。裂纹的抑制机制主要为Ti改性后与Al发生原位反应生成 Al_3Ti 纳米粒子作为异质形核剂，促进晶粒组织由粗大的柱状晶转变为细小等轴晶。

本评判规范应用于Al-Cu-Mg-Ti合金的成分设计与组织性能研究中，揭示了铝轻质合金从非平衡激光快速凝固到固态相变的全过程显微组织演化规律，明确合金元素对激光选区熔化显微组织和力学性能的影响。

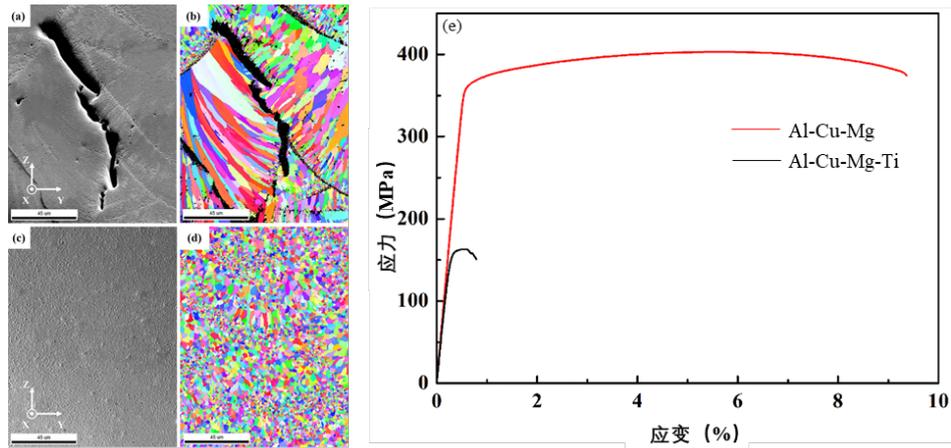


图2 激光选区熔化成形Al-Cu-Mg合金显微组织与力学性能分析：(a-b) Al-Cu-Mg合金裂纹区域的SEM及IPF图；(c-d) 布满等轴晶无裂纹的Al-Cu-Mg-Ti合金的SEM及IPF图；(e) Al-Cu-Mg和Al-Cu-Mg-Ti合金应力-应变曲线

(二) TiB₂/Al-Cu-Mg-Ti复合材料的成分设计与组织性能

激光选区熔化成形Al-Cu-Mg合金时面临严峻的开裂难题，材料成分设计是解决这一技术难题的手段，另一种有效方法是陶瓷颗粒改性对铝合金。利用本指南规范的激光选区熔化2xxx铝合金粉末成分与力学性能评判标准，研究不同TiB₂陶瓷含量对激光选区熔化成形铝基复合材料显微组织及力学性能的影响规律，在应用中健全并完善标准。

铝具有极高的激光反射率和热导率（237 W/(mK)），成形时热量累积少，这也是铝合金SLM难成型的主要原因之一。而TiB₂具有较高的激光吸收能力，TiB₂的引入可以显著提高铝合金基体的能量利用率。TiB₂的添加可以提高复合粉末的激光吸收率，在激光选区熔化过程中优先在熔池中析出且与铝液具有优异的润湿性能和化学稳定性，可以有效促进初晶铝的细化和等轴晶转换，是理想的晶粒细化剂，因此本文选用TiB₂陶瓷颗粒改性铝合金。随着TiB₂陶瓷颗粒含量的增加，激光吸收率与晶粒细化能力也逐渐提升，但考虑到陶瓷含量的增加通常会导致材料塑性和致密度降低，因此TiB₂陶瓷颗粒含量设计为1 wt.%、2 wt.%和3 wt.%。基于希尔凝固模型，通过相组成、裂纹敏感因子与晶粒生长抑制因子等热力学计算，如图3所示，得出相组成与组织模拟等图。激光选区熔化成形样品及其T6热处理后显微组织及力学性能如图4所示，1-3 wt.% TiB₂/Al-Cu-Mg-Ti复合材料平均晶粒尺寸分别为0.98 μm，0.80 μm和0.70 μm，晶粒非常细小，晶体取向也十分均匀。热处理后晶粒大小约为1 μm，Al晶粒呈等轴形态，并随机取向，与沉积态相比未发生显著生长，这主要是由于热处理过程中晶界处纳米TiB₂的钉扎作用阻碍晶粒的生长。

采用本评判规范，针对激光选区熔化非均匀、非平衡组织和高残余应力的典型特征，研究后续热处理工艺对沉积态组织及力学性能的影响规律，提出Al-Cu-Mg合金的强韧化方

法，形成适于激光选区熔化沉积态轻质合金的热处理制度。

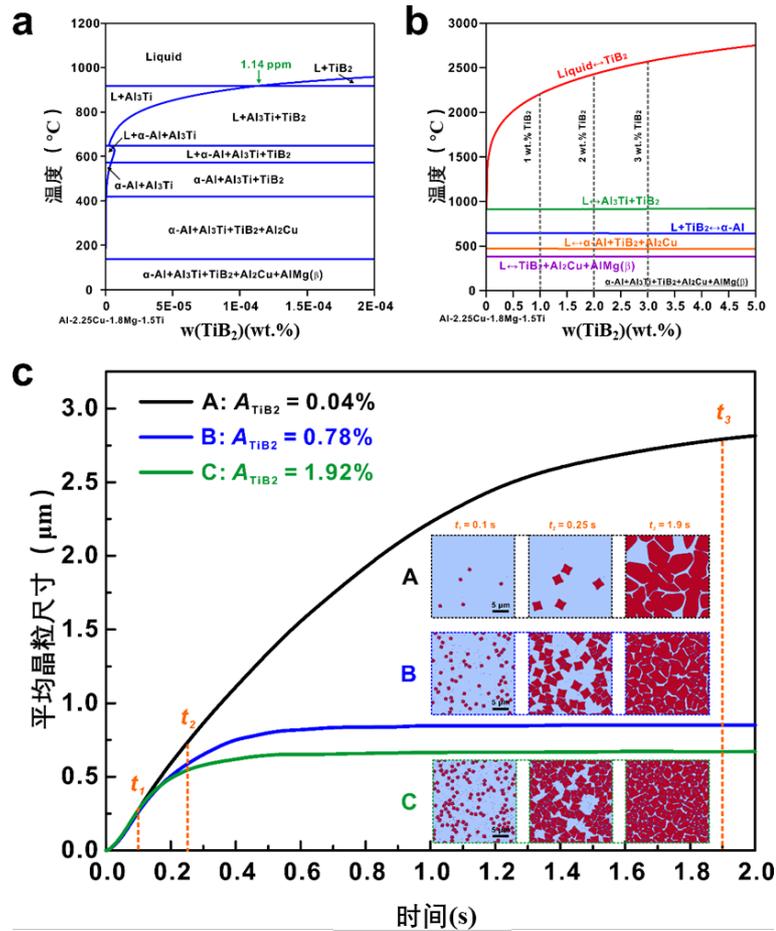


图3 AlCuMgTi-xTiB₂复合材料的相图计算和相场模拟结果：(a) AlCuMgTi-xTiB₂ (wt.%)合金垂直截面；(b) AlCuMgTi-xTiB₂ (wt.%)合金凝固图；(c) 通过相场模拟得到的AlCuMgTi-TiB₂复合材料在不同TiB₂颗粒面积分数的凝固过程中-Al平均晶粒尺寸

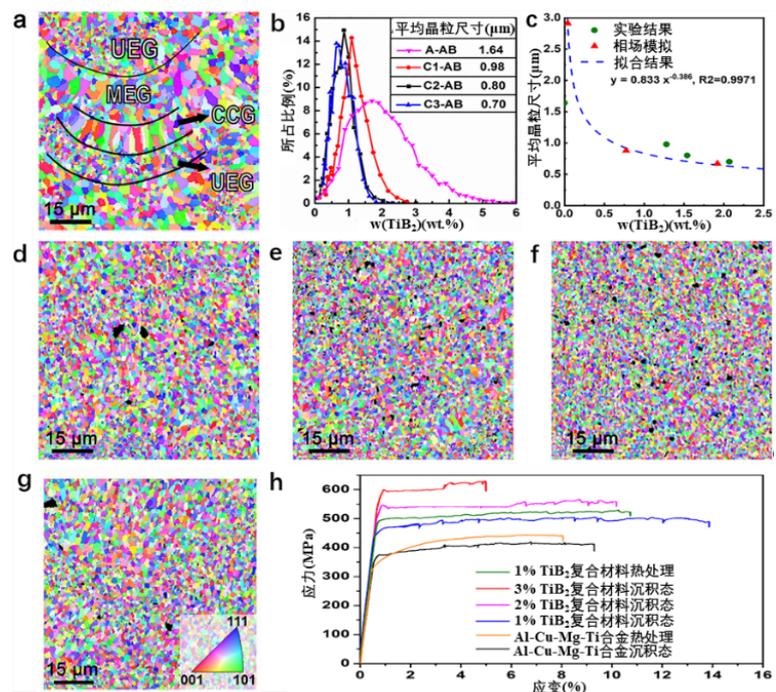


图4 复合材料EBSD显微组织与力学性能：(a) AlCuMgTi合金的IPF图；(b) 粉末粒径分布图；(c) 实验和相场模拟得到的平均晶粒尺寸的比较；(d-f) 1%、2%、3%的TiB₂复合材料IPF图；(g) 1% TiB₂复合材料热处理样IPF图；(h) 对应应力应变图

七、与有关法律法规和强制性标准的关系

遵守和符合相关法律法规和强制性标准要求。规范性引用文件包括：

GB/T 35351—2017 《增材制造 术语》

GB/T 20975.25-2020 《铝及铝合金化学分析方法 第25部分：元素含量的测定 电感耦合等离子体原子发射光谱法》

GB/T 20975.3-2020 《铝及铝合金化学分析方法 第3部分：铜含量的测定》

GB/T 20975.16-2020 《铝及铝合金化学分析方法 第16部分：镁含量的测定》

GB/T 20975.7-2020 《铝及铝合金化学分析方法 第7部分：锰含量的测定》

GB/T 20975.12-2020 《铝及铝合金化学分析方法 第12部分：钛含量的测定》

GB/T 20975.15-2020 《铝及铝合金化学分析方法 第15部分：硼含量的测定》

GB/T 20975.24-2020 《铝及铝合金化学分析方法 第24部分：稀土总含量的测定》

GB/T 20975.19-2020 《铝及铝合金化学分析方法 第19部分：锆含量的测定》

GB/T 20975.4-2020 《铝及铝合金化学分析方法 第4部分：铁含量的测定》

GB/T 20975.14-2020 《铝及铝合金化学分析方法 第14部分：镍含量的测定》

GB/T 19077-2016 《粒度分析 激光衍射法》

GB/T 16913—2008 《粉尘物性试验方法》

GB/T 1479（所有部分） 《金属粉末 松装密度的测定》

GB/T 1479.1—2011 《金属粉末 松装密度的测定 第1部分：漏斗法》

GB/T 5162—2021 《金属粉末 振实密度的测定》

GB/T 1482—2010 《金属粉末 流动性的测定 标准漏斗法（霍尔流速计）》

GB/T 1031—2009 《产品几何技术规范（GPS）表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值》

GB/T 4472—2011 《化工产品密度、相对密度的测定》

GB/T 228.1—2010 《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》

GB/T 232—2010 《金属材料 弯曲试验方法》

GB/T 38769—2020 《金属材料 预裂纹夏比试样冲击加载断裂韧性的测定》

GB/T 2828.1—2012 《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 191—2008 《包装储运图示标志》

八、重大意见分歧的处理依据和结果

本标准起草过程中没有重大分歧意见。

九、后续贯彻措施

建议由增材制造相关行业标准化管理机构组织贯彻本标准的相关活动，利用各种活动（如工作组活动、行业协会的管理和活动、专家培训、标准化技术刊物、网上信息、产品认证等）尽可能向增材制造行业相关单位和机构宣贯该标准。

建议本标准发布之日起半年内实施。

标准编制小组

2022年9月