

---

# 《增材制造 激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金技术规范》团体标准编制说明

## ( 征集意见稿 )

### 一、工作简况

#### 1 任务来源

本团体标准《增材制造 激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金技术规范》是来源自 2020 年国防科工局 XX 工程“XXXX 增材制造”项目。根据中国机械制造工艺协会《关于印发 2022 年度第二批团体标准立项的通知》(中国工艺协会[2022] 第 12 号)文件要求,由中国机械制造工艺协会标准化委员会提出并归口,负责起草单位:西安增材制造国家研究院有限公司、西安交通大学、北京动力机械研究所、西安铂力特增材技术股份有限公司、重庆大学、华中科技大学、中国航发北京航空材料研究院、中国航发动力股份有限公司、武汉锐科光纤激光技术股份有限公司、西安航天发动机有限公司等。

#### 2 主要工作过程

##### (一) 预研阶段

2021 年 5 月,西安增材制造国家研究院有限公司按照中国机械制造工艺协会团体标准相关要求,联合西安交通大学、北京动力机械研究所、西安铂力特增材技术股份有限公司、华中科技大学、中国航发北京航空材料研究院、中国航发动力股份有限公司等单位,成立了“增材制造 激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金技术规范”团体标准制定起草工作组,开展标准预研工作。

2021 年 6 月~2022 年 4 月期间,工作组对国内外相关标准情况初步分析,在西安增材制造国家研究院有限公司、京动力机械研究所、

---

西安铂力特增材技术股份有限公司、中国航发北京航空材料研究院、中国航发动力股份有限公司、安航天发动机有限公司、无锡市产品质量监督检验院、等典型企业和研究机构进行调研和需求分析，完成标准草稿的编制。

## （二）起草（草案、调研）阶段

2022年4月26日计划下达后，根据中国机械制造工艺协会《关于印发2022年度第二批团体标准立项的通知》（中国工艺协会[2022]第12号）文件要求，2022年5月8日，以视频会议形式组织召开了《增材制造 激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金技术规范》团体标准第一次讨论会，西安增材制造国家研究院有限公司、西安交通大学、北京动力机械研究所、西安铂力特增材技术股份有限公司、华中科技大学、中国航发北京航空材料研究院、中国航发动力股份有限公司、武汉锐科光纤激光技术股份有限公司、西安航天发动机有限公司12家单位的18名专家出席了会议。会上，标准起草单位汇报了标准的编制过程和主要内容，各位与会专家就标准的技术内容进行了认真地研讨，形成了讨论意见和建议。起草工作组根据试验数据和第一次讨论会的专家意见和建议，对标准内容进行了调整和认真的修改完善。

2022年6月-12月，分析现有激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金的标准、技术等资料，以激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金发展现状为基础，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，结合专家意见，初步形成《增材制造 激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金技术规范》的标准内容框架。

2023年1月-5月，以前期资料整理工作为基础，以 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》为编写规则，针对激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金技术，划分为十个部分：原材料、工艺文件准备、增材制造工艺、后处理工艺、外观质量、尺寸、化学成分、力学性能、金相组织、无损检测，分别研究确定技术要求，从而确定《团体标准 增材制造 激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金技术规范》标准草案。

2023年3月29日，4月25日与5月13日，工作组分别召开三次标准草案视频研讨会，对标准草案内容进行讨论并完善。工作组根据专家意见及调研的不断深入，对标准草稿进行了持续修改。2023年5月22日，工作组通过视频会议方式召开标准讨论会，对标准草案、标准研究报告、标准验证方案进行了讨论和任务分工，会后，工作组对标准内容进行了修改和完善。2023年6月1日，在西安组织召开了专题会，会议对标准研制过程中遇到的问题和困难进行了交流，会后形成标准征集意见稿。

### （三）征求意见阶段

### （四）审查阶段：

## 3 主要参与起草单位和起草人及分工

本标准由西安增材制造国家研究院有限公司、西安交通大学、北京动力机械研究所、西安铂力特增材技术股份有限公司、重庆大学、华中科技大学、中国航发北京航空材料研究院、中国航发动力股份有限公司、武汉锐科光纤激光技术股份有限公司、西安航天发动机有限公司等共同起草。

主要成员：陈祯、白洁、侯颖、马瑞、谢国印、李惠、杨东辉、魏青松、赵海生、施建宏、杨欢庆

所作的工作：陈祯担任起草工作组召集人，全面协调标准起草工

---

作。陈祯，白洁，侯颖，马瑞，谢国印，李惠、杨东辉，负责标准资料的收集和标准草案书写工作，马瑞、魏青松、赵海生、施建宏、杨欢庆负责标准的总体校核和指导编写工作，陈祯、侯颖、李惠、负责收集、分析国内外相关技术文献和资料，结合实际应用经验，对标准内容进行归纳和总结。

本标准牵头单位西安增材制造国家研究院有限公司，西安增材制造国家研究院有限公司是国家增材制造创新中心的依托单位和承载主体。由西安交通大学、北京航空航天大学、西北工业大学、清华大学和华中科技大学 5 所大学及增材制造装备、材料、软件、生产及研发的 13 家重点企业等共同组建。国家增材制造创新中心作为工信部首批布局的国家制造业创新中心，以国家战略目标和制造业创新发展为导向，瞄准重大设备、重要材料、关键工艺、核心软件、核心元器件等前沿共性关键技术，创新技术，转化技术，孵化技术，通过多学科交叉创新和“政产学研金用”协同创新，打造完整创新链、产业链，带动整个制造业的转型升级，服务中国制造强国战略。作为我国高端制造业领域首批筹建的国家级创新中心，积极致力推进产业创新能力建设，推进以增材制造创新技术加快形成发展制造业的新动力，为推动中国制造由大变强提供战略支撑。汇聚了国内外高端人才及国家重点实验室等科研资源，重点建设研发中试平台、公共测试平台、共性技术服务平台、双创成果转化基地、人才培养基地，形成集技术开发中试、公共测试、制造服务产业孵化、投融资和人才培养于一体的具有支撑行业发展的创新中心。形成面向用户提供工艺技术解决方案、中试验证、检验检测等一站式服务能力。

## **二、标准编制原则及主要内容**

### **1. 标准编制原则**

---

本标准按照 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》的规定起草。在编写标准时，遵循面向市场、服务产业、自主研发、适时推出、不断完善的原则，力求与产品研发、工艺试验、技术进步、产业发展、应用推广相结合，统筹推进。同时，努力使标准技术内容更加科学、实用，文字表达更加简洁、清楚，充分体现标准的经济合理性和市场适应性。

## **2. 标准主要内容**

本标准规定了增材制造激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金的要求、试验方法、检验规则和包装、标志、运输、贮存、质量证明书及合同（或订货单）等内容。

本标准适用于以激光粉末床熔融制造的 GH3230 和 GH3536 高温合金致密材料验收。

### **2.1 关于第一章“范围”**

规定了标准文件适用的范围以及标准文件的主要内容。

### **2.2 关于第二章“规范性引用文件”**

列举了标准文件引用的规范性引用文件。

### **2.3 关于第三章“术语和定义”**

本标准使用的术语和定义主要引用自 GB/T 35351 和 GB/T 3500，并界定了在标准文件中使用的术语和定义。

### **2.4 关于第四章“技术要求”**

规定了激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金时的原材料为 GH3230 和 GH3536 金属粉末，并且金属粉末的供应商应提供质量证明书，所采用的原材料应不含夹杂物，实验过后的粉末应该用筛网去除粉末中的杂物。工艺文件准备应该包括：零件的原材料要求、设备确认、数字文件可追溯性的保障措施、启动成形过程所有的步骤、

---

设备操作员要求、记录设备成形过程的数据文件、零件的处理步骤、后处理工艺包括后处理的工艺顺序和每个工序的要求、热处理要求、供需双方确定的零件检验要求。规定了后处理工艺包括表面处理、热处理、固溶处理和热等静压等。规定外观质量不应存在外观质量缺损、掉块、裂纹等缺陷，经供需双方协商确定后允许采用表面处理方法改善表面质量。尺寸应符合供需双方签订的技术图样，允许通过机加工达到技术图样要求。还规定了增材制造工艺、化学成分、力学性能、金相组织、无损检测这些方面的一般要求及检验与评估方法。

### **2.5 关于第五章“试验方法”**

规定了激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金时检验项目应由供需双方协商决定，以及需要选区的试验方法的选取。

### **2.6 关于第六章“检验规则”**

规定了产品应由供方进行检验，需方应对收到的产品按本标准及合同（或订货单）的规定进行检验。产品验收时应成批提交验收，产品检验项目及取样应符合规定。对于检验之后结果的判定方面，当化学成分、金相组织检验结果不合格时，允许另取双倍试样（不包括原受检样）对不合格项进行一次重复检验，若重复检验仍不合格，则判该批产品不合格；力学性能、无损检验、尺寸、外观质量检验不合格时，判该件不合格。

### **2.7 关于第七章“包装、标志、运输、贮存及质量证明书”**

零件的包装应按照供方的常规或惯例进行包装，并且需要遵从保证零件贮存、运输和使用安全的原则，在包装上应做供方质量部门印记；产品牌号、名称；供应状态；产品净重；产品批号等相应标志。并且每批的产品都需要有质量保证书。当产品运输时，必须保证有遮盖物遮挡并防止雨淋受潮、严禁剧烈碰撞和机械挤压。在运输到位后，

---

必须将产品贮存在干燥、阴凉、无腐蚀性物质侵蚀的室内，严禁与氧化剂、酸类、碱类一起存放。

## **2.8 关于第八章“合同（或订货单）内容”**

规定了激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金合同或者订货单需要包含：产品名称；产品牌号；产品数量；产品性能要求；技术图样；产品模型 STL 文件尺寸单位；取样方法；后处理工艺要求；热处理要求；本标准编号等。

## **3. 解决主要问题**

本标准涉及激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金，尤其涉及到激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金的技术要求、实验方法、检测规则。激光选区熔化技术采用高功率密度激光束对金属粉末逐点、逐线、逐层熔化，从而获得高性能、接近全致密的金属零件，特别适合内腔复杂、内流道、薄壁等传统加工技术难以实现的复杂薄壁精密构件的制造。在航空航天、武器制造等领域都具有十分广阔的研究前景。

尽管激光选区熔化技术成形 GH3230 和 GH3536 高温合金具有诸多的优点，但是针对该方向涉及到的原材料、工艺、质量评估标准等许多方面都还没有统一的标准。因此本标准的编制解决了激光粉末床熔融 GH3230 合金时缺少统一标准的问题，为促进增材制造行业的技术进步与高质量发展做出巨大贡献。

## **三、试验验证情况**

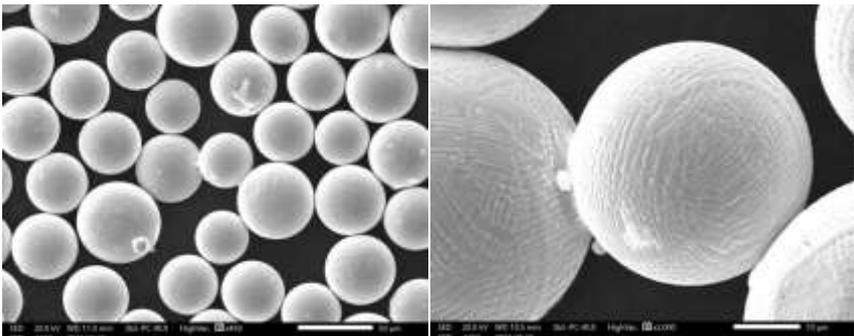
本标准通过试验验证的方式，实现对标准主要技术内容的验证。

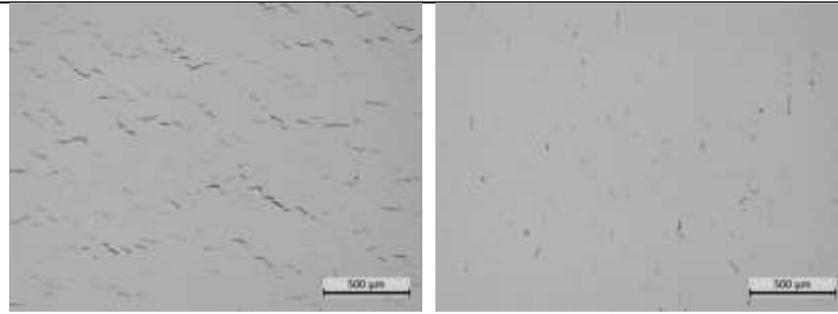
### **（一）GH3230 合金试验验证平台验证**

采用德国徕卡 DM2700M、INSTRON 5982 万能材料试验机（100 KN）、HM-210D 维氏显微硬度、JSM-IT500 型扫描电子显微镜（SEM）

等实验设备，分别针对经过工艺处理前后的裂纹、硬度及拉伸性能进行比较来进行验证：

### 验证用例 1：

验证用例：																																					
标准条款	增材制造激光粉末床熔融 GH3230 合金需要一定的后处理包括热等静压、热处理。																																				
实验材料	<p>试验所采用的的粉体原材料为西安欧中材料科技有限公司生产的 GH3230 气体雾化粉末，粉末的化学组成如表 1 所示。采用扫描电镜对粉末形貌进行观察，如图 1 所示，粉末球形度好，基本无异形粉、卫星粉，粉末表面光滑，放大后可见粉末颗粒的组织为胞状晶。采用 EDS 对粉末进行检测，结果显示粉末主要成分为 Ni、Cr 元素。根据 GB/T 1482-2010《金属粉末流动性的测定 标准漏斗法(霍尔流速计)》测定金属粉末的流动性为，11.2 s/50g，根据 GB/T 1479.1-2011《金属粉末送装密度的测定 第 1 部分：漏斗法》测定该金属粉末的松装密度为 5.28 g/cm<sup>3</sup>，粉末粒度 D10、D50 和 D90 分别为 24.59μm、37.04μm 和 50.58μm。该合金粉末的流动性及粉末粒径粉末满足 SLM 成形金属粉末的基本要求。</p> <p style="text-align: center;">表 1 GH3230 粉末的化学组成 (wt%)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>元素</th> <th>C</th> <th>Cr</th> <th>W</th> <th>Mo</th> <th>Mn</th> <th>Al</th> <th>La</th> <th>Si</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>含量</td> <td>0.10</td> <td>22.0</td> <td>13.54</td> <td>2.11</td> <td>0.49</td> <td>0.32</td> <td>0.032</td> <td>0.51</td> </tr> <tr> <th>元素</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>Ti</th> <th>Cu</th> <th>Fe</th> <th>B</th> <th>Ni</th> <td></td> </tr> <tr> <td>含量</td> <td>0.003</td> <td>&lt;0.001</td> <td>&lt;0.01</td> <td>&lt;0.001</td> <td>0.05</td> <td>&lt;0.005</td> <td>Bal</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	元素	C	Cr	W	Mo	Mn	Al	La	Si	含量	0.10	22.0	13.54	2.11	0.49	0.32	0.032	0.51	元素	P	S	Ti	Cu	Fe	B	Ni		含量	0.003	<0.001	<0.01	<0.001	0.05	<0.005	Bal	
	元素	C	Cr	W	Mo	Mn	Al	La	Si																												
	含量	0.10	22.0	13.54	2.11	0.49	0.32	0.032	0.51																												
	元素	P	S	Ti	Cu	Fe	B	Ni																													
含量	0.003	<0.001	<0.01	<0.001	0.05	<0.005	Bal																														
																																					
<p>图 1 GH3230 粉末形貌</p> <p>裂纹分析：SLM 成形 GH3230 合金抛光态横纵截面裂纹分布如图 2 所示，试样表面存在大量的微裂纹，裂纹长度在 10~100 μm 之间，后续观察显微组织可以看出裂纹主要源于晶界，这是由于该区域该区域晶粒生长方向不一致，凝固收缩作用对未凝固的金属液产生不同的拉应力，致使液膜撕裂产生凝固热裂纹。同时，晶界是元素偏析最严重的区域，大量的 Cr、W、Mo 元素容易富集产生脆性相，在后续快速冷却过程中，由于收缩作用产生的拉应力，极易应力集中产生裂纹。</p>																																					



(a) 横截面 (b)纵截面

图 2 GH3230 沉积态裂纹

显微硬度分析:表 2 是 GH3230 沉积态样品硬度, 由表可以看出 GH3230 SLM 打印沉积态平均硬度为 301.77 HV, 具有较高的硬度。GH3230 合金是一种以 W、Mo 元素作为固溶强化和以碳化物作为第二相强化的镍基高温合金。该固溶强化镍基合金源于 Ni-Cr-Mo-W 合金体系, 合金中主要添加的合金元素为 Cr、Mo、W、C、B 等, 以此来改善材料的性能, 其中 W 与 C 形成碳化钨有很高的硬度和耐磨性, 在工具钢中加 W 可显著提高红硬性和热强性。并且合金中含有 22%Cr, Cr 元素能显著提高材料的硬度和耐磨性。

表 2 GH3230 沉积态样品硬度 (HV)

	P1	P2	P3	平均值
沉积态	309.7	311.1	284.5	301.77

GH3230 合金组织和力学性能

拉伸性能分析:参照 GB/T228.1-2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》进行拉伸性能测试, 结果如表 3 所示。采用激光选区熔化制备 GH3230 拉伸棒平均抗拉强度和屈服强度分别为 934.04 MPa 和 702.81 MPa, 平均拉伸应变为 21.31%。观察断口(图 2)可以发现较明显的裂纹, 这证实了光镜中观察的裂纹, 后续裂纹仍是需要解决的重要难题。横向试棒强度优于纵向, 但其塑性较纵向试棒稍差。SLM 选区激光熔化横向试棒内部垂直于拉伸方向的晶粒和晶界数目相比纵向较多, 在拉应力的作用下, 晶界可以分散位错塞积应力, 多处晶界同时形成微裂纹, 分散了拉应力, 所以断口比较平整, 强度略高于纵向试棒。根据断裂力学理论, 碳化物的形态与尺寸决定了其阻碍裂纹扩展的能力, 该批次试棒晶界处的碳化物以链状分布为主, 碳化物先于基体开裂, 且易于沿晶界扩展贯通, 形成二次裂纹, 因此塑性较纵向试棒稍差。

表 3 成形沉积态 GH3230 拉伸性能

No.	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	拉伸应变 (%)
GH3230-1	929.62	685.32	201058.19	21.88
GH3230-2	932.32	703.38	198025.31	21.87

GH3230-3	940.17	719.73	340718.82	20.19
均值	934.04	702.81	246600.77	21.31

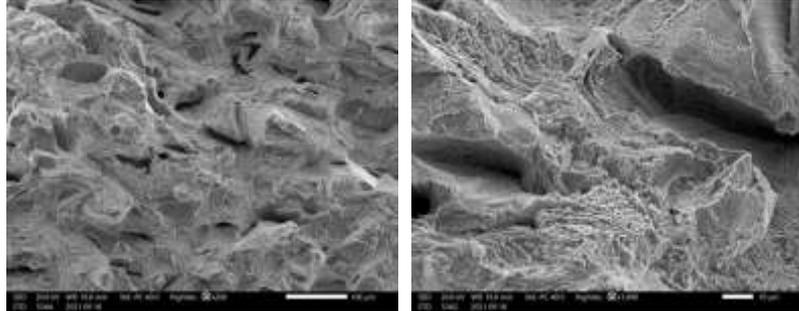


图3 GH3230 室温横向拉伸棒拉伸断口

参照 GB/T228.2-2015《金属材料 拉伸试验 第2部分：高温试验方法》制成标准拉伸试样（图4），并进行拉伸性能测试，结果如表4（附件G）所示。

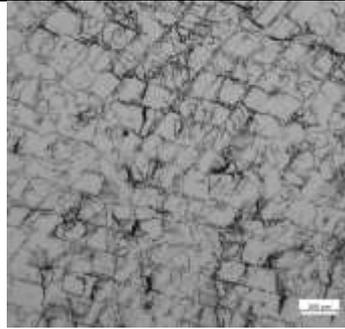


图4 GH3230 拉伸样品

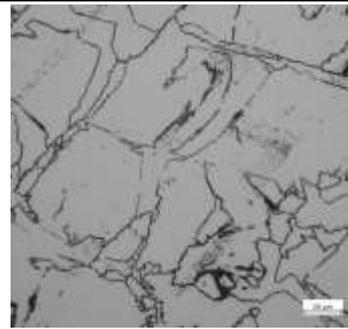
表4 SLM 成形 GH3230 拉伸棒 900℃力学性能

No.	抗拉强度 (MPa)	屈服强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)	拉伸应变 (%)
GH3230-900 ℃-V	265.54	207.14	179585.97	24.72
GH3230-900 ℃-H	269.04	211.46	107114.12	14.78

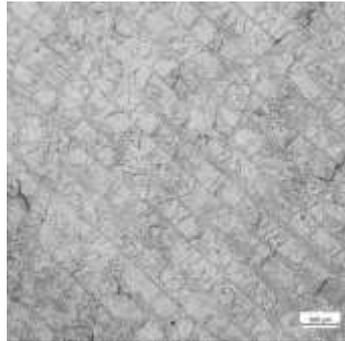
显微组织分析：图5是GH3230横截面沉积态和经不同固溶温度热处理后的显微组织。从图中可以看出经固溶处理后，晶粒内部和晶界处析出了大量的粒状物。图5扫描图片可以更清楚的观察到粒状析出物的分布，这些粒状物分别为初生粒状碳化物M6C和少量晶界粒状碳化物M23C6。当固溶温度为1100℃~1250℃时，合金固溶态组织为γ基体+初生粒状碳化物M6C+少量晶界粒状碳化物M23C6。固溶温度为1300℃时，样品内部具有完全的等轴晶组织，并且晶粒尺寸明显增大，见图5(k)。



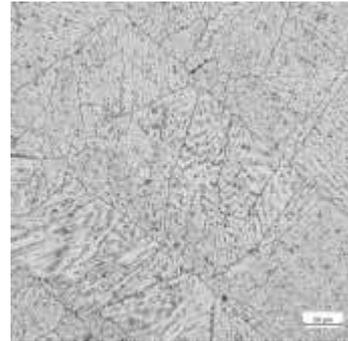
(a) 沉积态-100×



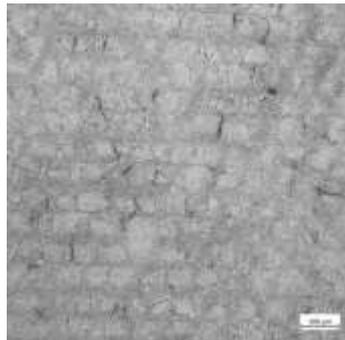
(b) 沉积态-500×



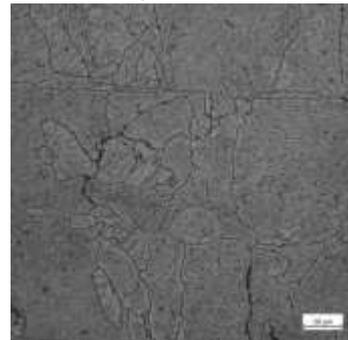
(c) 1100°C-100×



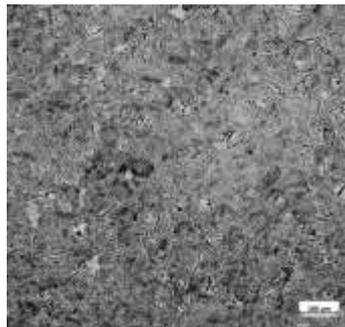
(d) 1100°C-500×



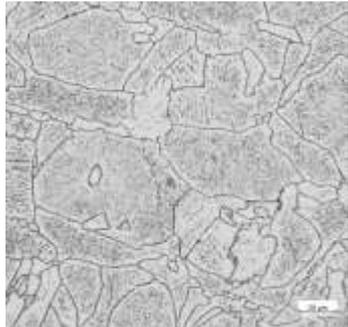
(e) 1150°C-100×



(f) 1150°C-500×



(g) 1200°C-100×



(h) 1200°C-500×

热处理工艺  
后

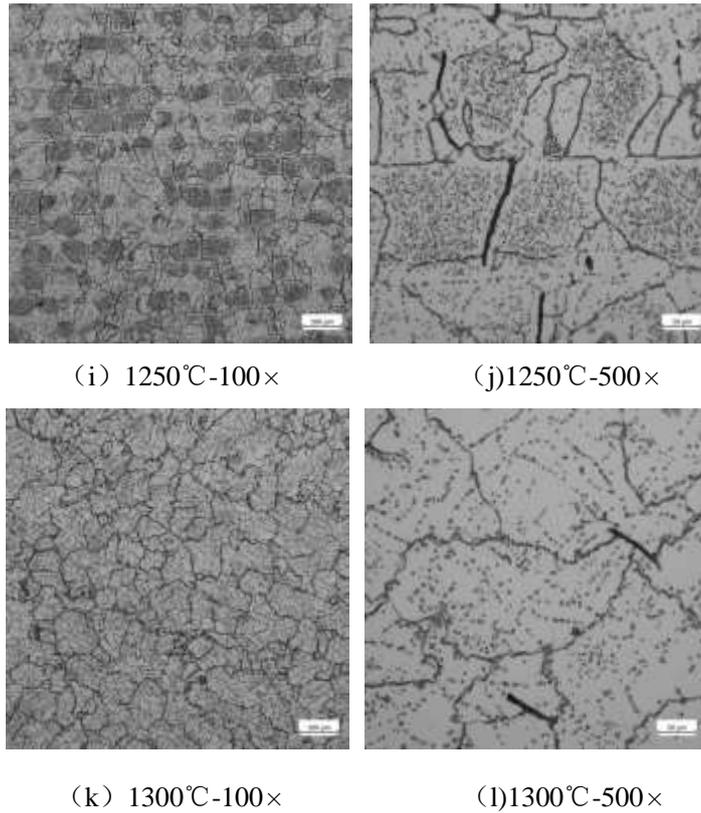


图5 GH3230 沉积态和不同固溶温度热处理态样品显微组织

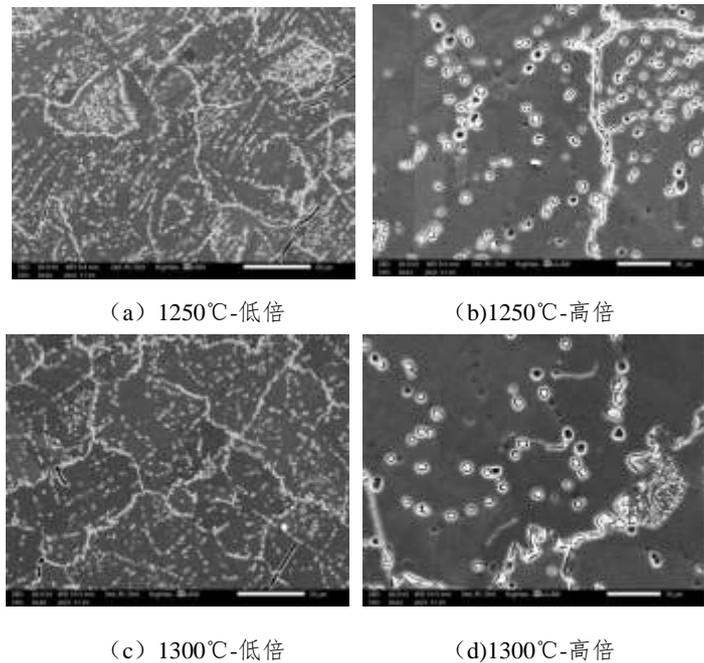


图6 GH3230 经 1250°C 和 1300°C 固溶 1h 后的显微组织

显微硬度分析: 表 6 和图 7 是 GH3230 沉积态和固溶热处理态样品硬度。由表中可以看出在高于 1100 °C, 样品硬度大幅下降, 但在 1200°C 固溶状态下样品硬度有所升高, 当固溶温度超过 1200 °C 时, 硬度又发生大幅下降, 整体来说, 随着固溶温度的升高, GH3230 样品的硬度呈下降趋势。由表 6 图 5 可以看出, 随着固溶温度的升高, GH3230 样的显微组织演变经历了三个阶段。第一阶段在 1050 °C ~ 1150 °C 的温度范围内,

GH3230 板材在 950 °C 发生静态再结晶，由于再结晶的软化，样品硬度大幅下降。第二阶段在 1150 °C~1200 °C，从图 5 (g) 可以看出合金组织具有完全的等轴晶组织，此时晶粒尺寸最小，样品硬度有所提升。第三阶段在高于 1200 °C 处理后，晶粒长大速率明显增大，晶粒尺寸保持着较好的均匀性，同时样品硬度也大幅下降。研究表明在高于 1220 °C 的温度范围内，有一种有别于再结晶行为的软化机制，可能是合金中初生 M<sub>6</sub>C 碳化物的大幅回溶。

表 5 GH3230 沉积态和固溶热处理态样品硬度 (HV)

	沉积态	1100 °C	1150 °C	1200 °C	1250 °C	1300 °C
P1	309.7	299.1	266.2	281.9	212.0	225.8
P2	311.1	291.6	246.0	284.5	220.5	221.3
P3	284.5	294.3	287.7	288.4	227.6	213.2
平均值	301.8	295.00	266.6	284.93	220.03	220.1

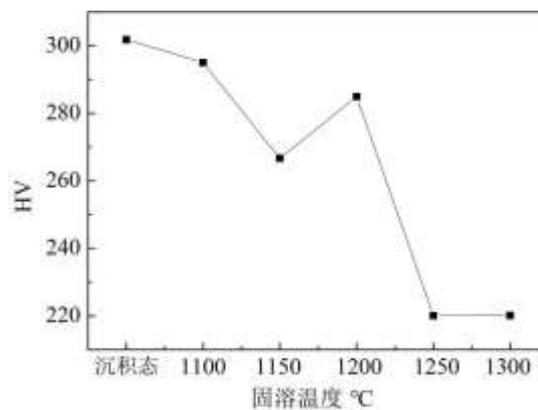


图 7 GH3230 沉积态和固溶热处理态样品硬度

拉伸性能分析: 表 6 和图 7 是 GH3230 沉积态和固溶热处理态样品拉伸性能。可以看出随着固溶温度的升高，合金的抗拉强度、屈服强度逐渐降低，延伸率逐渐升高。综上分析 GH3230 激光选区熔化样品在 1150 °C 固溶后可以达到消除变形、软化基体的目的，因此 SLM 打印 GH3230 的退火温度可选择在 1150 °C 以上。从控制晶粒尺寸来看，GH3230 的固溶温度在 1150~1200°C 温度范围内，可以获得相对较小的稳定晶粒。

表 6 GH3230 沉积态和固溶热处理态样品拉伸性能

	平均抗拉强度 (MPa)	平均屈服强度 (MPa)	平均拉伸应变 (%)
沉积态	934.04	702.81	21.31
1100 °C	976.66	575.00	23.95
1150 °C	967.17	555.36	24.34
1200 °C	928.05	520.30	24.95
1250 °C	860.05	377.75	38.72
1300 °C	835.49	356.40	43.27

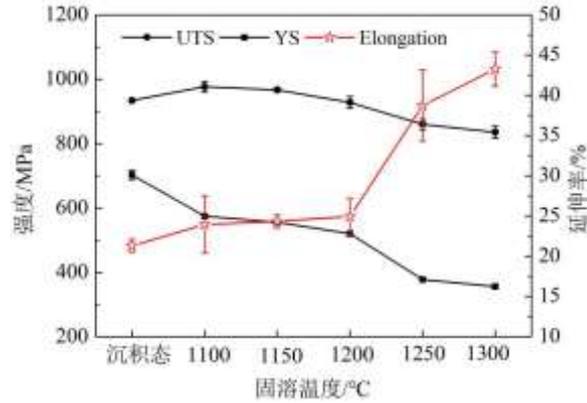


图 8 GH3230 沉积态和固溶热处理态样品拉伸性

裂纹分析：将经过 HIP 工艺参数为 1175°C /160MPa/1h 处理的试样和 SLM 成形 GH3230 合金沉积态试样，进行镶嵌、抛磨后观察其抛光态形貌。图 9 为 HIP 工艺前后，试样的抛光态形貌对比，沉积态试样抛光态形貌含有较多 SLM 成形残余热应力导致的微裂纹，尤其是横截面。试样经 HIP 工艺处理后，横向试样和纵向试样内部的微裂纹以及气孔闭合，表明 HIP 工艺对试样的内部裂纹和空隙的修复作用良好。

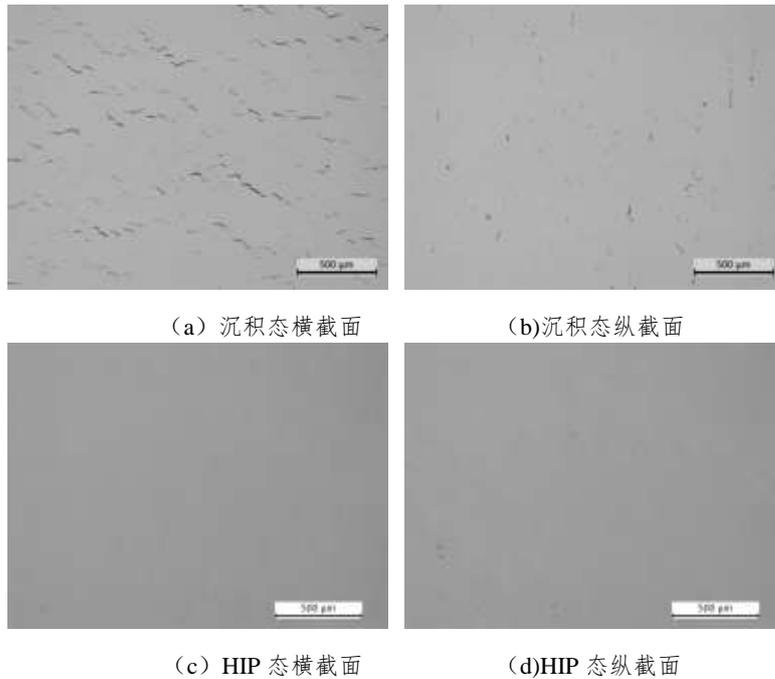
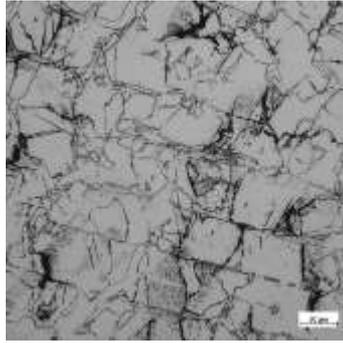
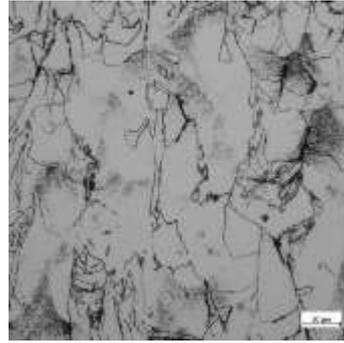


图 9 HIP 前后，SLM 成形 GH3230 合金试样的抛光态形貌对比

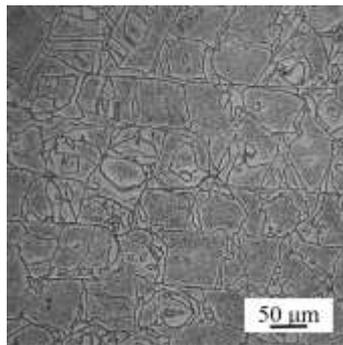
显微组织分析：使用比例为 HCl:HNO<sub>3</sub>=3:1 的王水化学试剂对抛光态的样品进行腐蚀，得到 HIP 工艺处理前后试样的显微组织形貌。如图 10 所示，SLM 成形 GH3230 合金沉积态试样的组织形貌，横截面为条状熔池，体现了激光交叉扫描和金属粉末层状叠加的成形方式；纵截面为沿沉积方向呈外延生长的微小柱状晶晶粒。试样经 HIP 工艺处理后，横截面仍然保持着条状熔池特征，纵截面柱状晶消失，经再结晶及长大过程，形成了大小不一的奥氏体晶粒。经 HIP 工艺后，晶粒内部和晶界处析出了大量的粒状物，这些粒状物分别为初生粒状碳化物 M<sub>6</sub>C 和少量晶界粒状碳化物 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>（如图 11）。



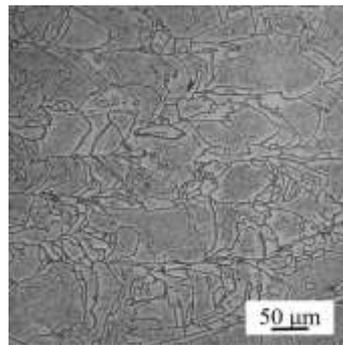
(a) 沉积态横截面



(b) 沉积态纵截面

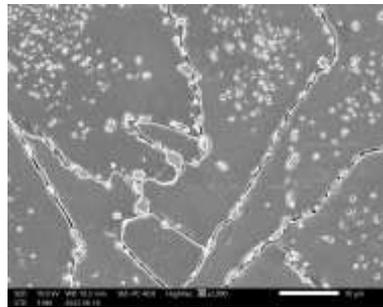


(c) HIP 态横截面

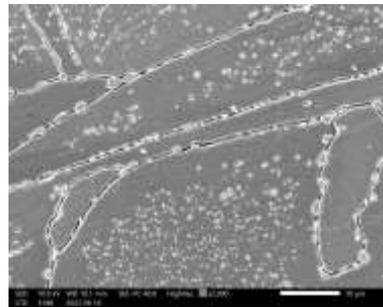


(d) HIP 态纵截面

图 10 HIP 前后, SLM 成形 GH3230 合金试样的组织形貌对比



(a) HIP 态横截面



(b) HIP 态纵截面

图 11 SLM 成形 GH3230 合金经 HIP 工艺处理后的析出物组织形貌

拉伸性能分析：表 7 为 SLM 成形 GH3230 沉积态和 HIP 态拉伸性能对比。由沉积态和 HIP 工艺试样常温拉伸性能的对比得知，HIP 工艺之后，纵向试样的屈服强度降低 188MPa，抗拉强度基本不变，拉伸应变提高近 92%。HIP 工艺之后，横向试样常温拉伸性能改变为，屈服强度降低近 279MPa，抗拉强度提高 25MPa，拉伸应变提高 152%。HIP 工艺处理后屈服强度大幅降低的主要原因为晶粒长大粗化以及晶界的析出物导致材料屈服强度降低，而抗拉强度没有得到弱化的主要原因和沉积态样品裂纹相关，经 HIP 工艺后，裂纹得到大部分修复，从而提升了材料的抗拉强度和塑性。

表 7 GH3230 沉积态和热等静压样品拉伸性能

样品状态	样品名称	抗拉强度	屈服强度	弹性模量	拉伸应变
沉积态	GH3230-V-1	916.66	678.26	212640.09	18.37
	GH3230-V-2	894.79	685.63	228851.41	14.49
	GH3230-V-3	944.17	677.67	201414.02	24.23
	平均值	918.54	680.52	214302.11	19.03
	GH3230-H-1	944.56	753.37	236317.3	13.9
	GH3230-H-2	961.81	764.81	214542.3	16.01
	GH3230-H-3	946.47	749.85	215366.27	16
	平均值	950.95	756.01	222075.3	15.30
	GH3230-V-1	925.25	485.06	211360.82	40.73
	GH3230-V-2	925.61	495.77	216200.18	40.97
热等静压态	GH3230-V-3	909.82	496.24	212416.29	29.5
	平均值	920.23	492.36	213325.76	37.07
	GH3230-H-1	972.38	464.38	221235.36	38.63
	GH3230-H-2	977.27	471.12	223341.47	38.75
	GH3230-H-3	979.17	494.34	219815.25	36.76
	平均值	976.27	476.61	221464.03	38.05

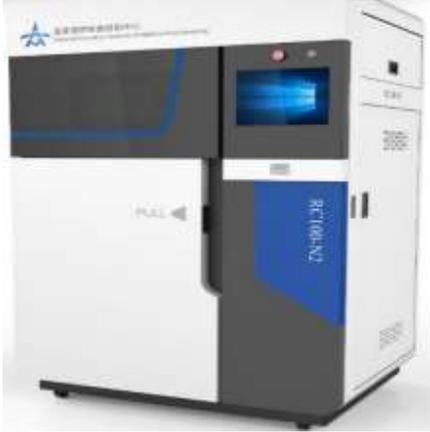
热等静压工  
艺后

结论

按照标准对 GH3230 进行后处理后，裂纹得到了修复、拉伸性能得到提高、通过调整工艺的参数可以控制硬度，改善了 GH3230 性能。所以通过验证，标准达到可操作性、适应性要求。

## (二) GH3536 合金试验验证平台验证

### 1. 验证场景 1: 激光粉末床熔融制造 GH3536 合金统一标准的验证

场景设计	对照标准条款要求, 采用 RC100-N2 设备成形 GH3536 合金零件, 验证标准条款的有效性和适用性。
支撑环境	 <p style="text-align: center;">图 1 试验验证所用 L-PBF 设备</p>
验证方法	依照标准条款要求, 用 RC100-N2 设备成形 GH3536 合金样件, 测试样件的各项性能指标, 验证样件是否具有一个相对较好的性能指标。
标准条款	<p style="text-align: center;">4. 技术要求</p> <p style="text-align: center;">4.1 原材料</p> <p>4.1.1 本标准中原材料为 GH3536 金属粉末, 金属粉末的主要性能指标包括: 化学成分、粒度及粒度分布、流动性、氧含量、球形率、松装密度、空心粉率等。粉末供应商应提供粉末的质量证明书, 质量证明书应包括但不限于粉末牌号、批号以及物理和化学性能等指标。</p> <p>4.1.2 原材料应不含夹杂物, 以确保加工后的零件化学成分满足表 3 的规定。</p> <p>4.1.3 除非零件供应商和用户另有规定, 允许原材料粉末合批, 只要粉末化学成分满足表 3 的要求。</p> <p>4.1.4 使用过的粉末用筛网过筛去除粉末中的黏附粉块或污染物, 筛网应符合 GB/T6003.1 的规定。</p> <p>4.1.5 使用过的粉末的主要性能指标经检测合格时可重复或混合使用, 应注明重复使用次数和混合比例。</p> <p>4.1.6 粉末进货检验和使用过的粉末原材料的过程检验按照 GB/T 35022 进行测试或按照供需双方确定的方法进行。</p> <p>4.1.7 任何包含使用过的粉末的粉末批或粉末合批都应视为使用过的粉末。</p> <p style="text-align: center;">4.2 后处理工艺</p> <p>4.2.1 表面处理</p>

成形后的零件经供需双方协商确定后可进行表面处理，以达到约定的尺寸、表面粗糙度等指标。常见的表面处理方法有喷砂、打磨、抛光、磨粒流、精磨、机械加工、电化学腐蚀等。

#### 4.2.2 热处理

4.2.2.1 根据零件供需双方的协议可对零件进行固溶处理。

4.2.2.2 表 1 列出了推荐的激光粉末床熔融 GH3536 零件的热处理制度。零件热处理的升温及保温参照 GB/T 39247 的规定执行。

表 1 激光粉末床熔融 GH3536 零件推荐热处理制度

合金牌号	热处理状态	热处理温度	保温时间	冷却方式
GH3536	固溶	1150℃~1200℃	2h~4h	空冷

#### 4.2.2.3 热等静压

推荐的热等静压制度见表 2，可由供需双方协商确定。

表 2 激光粉末床熔融 GH3536 零件推荐热等静压制度

合金牌号	热等静压温度	保温时间	热等静压力	传压介质	冷却方式
GH3536	1120℃~1200℃	3h~5h	≥100MPa	惰性气氛	惰性气氛冷却至425℃

#### 4.7 化学成分

零件的化学成分应符合表3的要求。

表 3 零件的化学成分要求

牌号	化学成分（质量分数）/%							
	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Ni
GH3536	0.05~0.15	20.50~23.00	0.50~2.50	0.20~1.00	8.00~10.00	≤0.50	≤0.15	
	Fe	B	Cu	Si	Mn	P	S	
	不大于							
	17.00~20.00	≤0.010	≤0.500	1.00	1.00	0.025	0.015	

#### 4.8 力学性能

- 4.8.1 在不同成形方向的室温力学性能应满足表 4 的要求。
- 4.8.2 应根据 ISO/ASTM 52921 提供测试件在成形平台的位置描述和成形方向。
- 4.8.3 用于检测的拉伸试样应按照 GB/T 228.1 的要求制备。
- 4.8.4 用于拉伸试验的测试件可以从块体上加工取样,也可以是近净成形的拉伸试样,成形方向为 X, Y 和 Z 方向或供需双方确认的其他方向。

表 4 室温力学性能

热处理状态	抗拉强度(MPa)		0.2%屈服强度(MPa)		断后伸长率(%)	
	X、Y方向	Z方向	X、Y方向	Z方向	X、Y方向	Z方向
成形态	≥745	≥710	≥580	≥545	≥20	≥30
固溶	≥690	≥690	≥275	≥275	≥30	≥40

注:表 4 中力学性能要求适用于材料不同热处理状态。

验证过程

采用正交实验方法研究不同工艺参数对成形构件的影响,找到最佳工艺参数范围,依照标准条款,用最佳工艺参数成形  $8 \times 8 \times 8 \text{ mm}^3$  的小方块,对成形试样表面经过不同粗细砂纸的打磨及抛光,用阿基米德排水法测致密度;然后测显微硬度,使用数显维氏硬度计在试样抛光面上测量维氏硬度。测试时采用 500 g 载荷,保荷 15 s。每个试样选取 3 个不同位置进行测试,结果取平均值,用扫描电子显微镜-能量色散光谱法测定样品的化学组成。



图 2 试验测试块机致密度测试

小方块依次使用 80 目、400 目、800 目、1500 目、2000 目的金相砂纸磨光,观察到表面划痕均匀一致后在丝绒布上使用  $2.5 \mu\text{m}$  的金刚石喷雾抛光剂进行抛光,抛光完成后使用无水乙醇清洗并选择王水腐蚀试样 10-15 s,然后用无水乙醇洗净表面,进行显微组织观察。

采用最佳工艺参数打印 GH3536 横纵试样,并参照 GB/T228.1-2010《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》和 GB/T 228.2-2015《金属材料

料拉伸试验 第 2 部分：高温试验方法》制成标准拉伸试样，测试室温和高温力学性能。

依照标准条款，将合金在 1075 °C、1125 °C、1175 °C 和 1190 °C 分别进行 1 h 的固溶处理，气淬。随后在 INSTRON 万能力学试验机上对合金试棒进行室温拉伸性能测试。块状试样经抛光后使用王水腐蚀 10-15 s。腐蚀后使用蔡司光学显微镜对试样进行显微组织观察和分析。

依照标准条款对试样进行热等静压，选用 HIP 工艺参数：温度为 1175°C，压力为 160MPa，保温时间为 1h，本工艺采用的加压惰性气体为氩气。

通过试验验证，激光能量密度处于 90-110 J mm<sup>-3</sup> 时，成型试样效果最佳，依照标准条款，在此参数范围下，致密度最高可达到 99%，显微硬度在 255 至 265HV<sub>0.5</sub> 之间，试样的化学成分符合要求。观察显微组织，可以发现组织中缺陷少，有较好的力学性能。

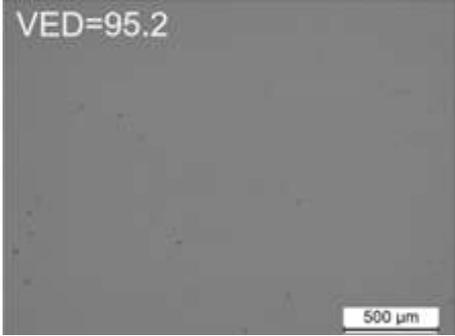


图 3 成型试验显微组织

验证过程  
结论

依照标准条款，SLM 成型试样有较好的抗拉强度以及屈服强度，结果如下表所示，其中横向试样的抗拉强度与屈服强度比纵向试样高出 10% 左右。而在塑性方面，纵向试样的延伸率比横向试样高出超过 50%，说明在塑性方面纵向试样远优于横向试样。

表 5 GH3536 常温拉伸性能

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%
825	675	30.4

表 6 GH3536 打印态高温拉伸性能

温度 /°C	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率/%
800	357.23	350.57	14.05
900	126.74	126.42	13.86

SLM 成形的合金试棒在固溶温度不断升高的过程中显微组织发生明显变化，固溶温度为 1075 °C 时，纵向截面为沿熔化沉积方向生长的柱状晶粒。升至 1125 °C 时，柱状晶晶粒长大。当固溶温度达到 1175°C 时，纵向截面的柱状晶基本消失，趋向于等轴晶粒。

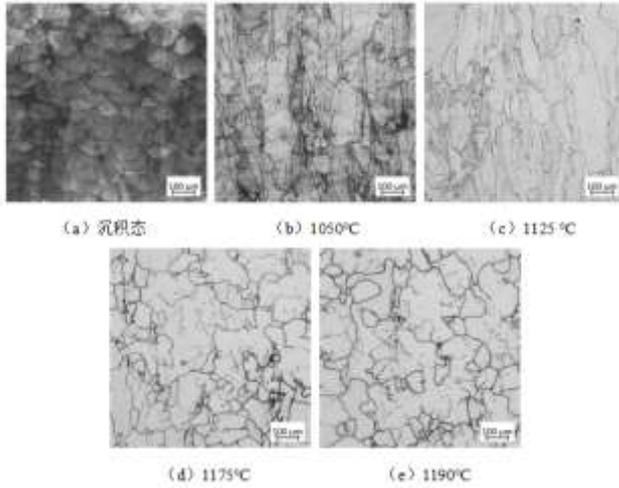


图4 沉积态 GH3536 合金试棒在不同固溶温度下保温 1h 的显微组织

随着固溶温度从 1075 °C 升高到 1190 °C，合金在室温环境下的抗拉强度逐渐降低，室温下固溶温度对横纵向合金试棒的塑性有明显的提升作用。固溶温度为 1175 °C 时，合金的延伸率超过 60%。固溶温度选取 1150-1200 °C 之间时具有较好的力学性能。

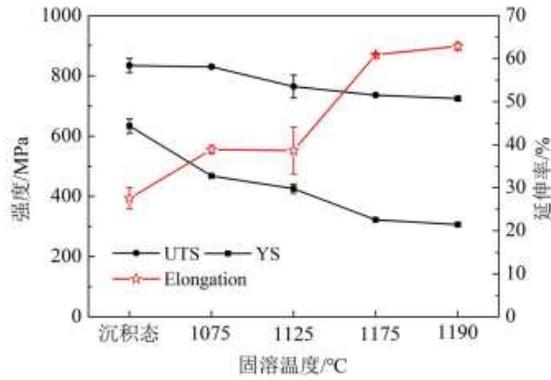


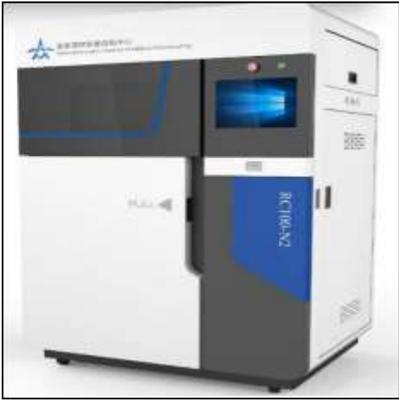
图5 固溶温度对沉积态 GH3536 合金横向试棒力学性能的影响

依照标准条款，经 HIP 工艺处理后，横向试样和纵向试样内部的微裂纹闭合，试样表面无明显缺陷，裂纹得到一定程度的修复，试样塑性提高。

验证最终结论	通过验证，标准条款达到适用性要求，本标准适用于 GH3536 合金的激光粉末床熔融成形。
--------	--

## 2. 验证场景 2：激光粉末床熔融制造 GH3536 合金验收标准的验证

激光粉末床熔融制造 GH3536 合金验收标准的验证	
场景设计	对照标准条款要求，用 RC100-N2 设备成形 GH3536 合金零件，对满足验收标准的零件进行具体应用测试，以此验证标准的有效性和适用性。

支撑环境	 <p style="text-align: center;">图 6 试验验证所用 L-PBF 设备</p>																
验证方法	<p>依照标准条款要求，用 RC100-N2 成形 GH3536 合金零件，然后依照标准验收条款对成形件进行验收，对验收合格的零件进行使用测试，验证是否能满足使用要求，以此来验证标准的有效性和适用性。</p>																
标准条款	<p>6 检验规则</p> <p>6.1 检查和验收</p> <p>6.1.1 产品应由供方进行检验,保证产品质量符合本标准及合同(或订货单)的规定,并填写质量证明书。</p> <p>6.1.2 需方应对收到的产品按本标准及合同(或订货单)的规定进行检验。如检验合格与本标准及合同(或订货单)的规定不符时,应在收到产品之日起 3 个月内向供方提出,由供需双方协商解决。</p> <p>6.2 组批</p> <p>产品应成批提交验收。每批应由同一牌号、同一工艺、同一规格、同一状态的产品组成。</p> <p>6.3 检验项目及取样</p> <p>6.3.1 产品的检验项目及取样应符合表 7 的规定。</p> <p style="text-align: center;">表 7 检验项目及取样要求</p> <table border="1" data-bbox="451 1563 1353 1998"> <thead> <tr> <th>检验项目</th> <th>取样规定</th> <th>要求的章条号</th> <th>试验方法章条号</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>外观质量</td> <td>逐件检验</td> <td>4.5</td> <td>5.2.14</td> </tr> <tr> <td>尺寸</td> <td>逐件检验</td> <td>4.6</td> <td>5.2.13</td> </tr> <tr> <td>化学成分</td> <td>本体取样或随炉制样,逐批取样</td> <td>4.7</td> <td>5.2.1</td> </tr> </tbody> </table>	检验项目	取样规定	要求的章条号	试验方法章条号	外观质量	逐件检验	4.5	5.2.14	尺寸	逐件检验	4.6	5.2.13	化学成分	本体取样或随炉制样,逐批取样	4.7	5.2.1
检验项目	取样规定	要求的章条号	试验方法章条号														
外观质量	逐件检验	4.5	5.2.14														
尺寸	逐件检验	4.6	5.2.13														
化学成分	本体取样或随炉制样,逐批取样	4.7	5.2.1														

	力学性能	本体取样或随炉制样，逐批取样	4.8	5.2.2~5.2.6
	金相组织	本体取样或随炉制样，检验频次由供需双方商定	4.9	5.2.7
	无损检验	逐批抽检	4.10	5.2.10~5.2.12
<p>6.3.2 供需双方应对力学试样的数量、取样位置、取样时间和试样热处理工艺等进行约定。若供需双方未做约定，则按供方确定的方案进行。</p> <p>6.3.3 随炉样的热处理工艺与零件的热处理方式一致，随炉样的数量和放置位置应以测试结果能够准确代表成形零件性能为依据。</p> <p>6.4 检验结果的判定</p> <p>6.4.1 化学成分、金相组织检验结果不合格时，允许另取双倍试样（不包括原受检样）对不合格项进行一次重复检验。若重复检验仍不合格，则判该批产品不合格。</p> <p>6.4.2 力学性能、无损检验、尺寸、外观质量检验不合格时，判该件不合格。</p>				
验证过程	把验收合格的件投入到实际应用场景中或模拟实际应用场景的场景中，让成形的 GH3536 零件处于工作状态，验证成型件是否能达到正常使用标准			
验证过程结论	符合验收标准的零件能达到正常使用标准			
最终结论	通过验证，标准条款达到适用性要求，本标准适用于以激光粉末床熔融制造的GH3536合金致密材料验收。			

#### 四、标准中涉及专利的情况

本标准不涉及专利问题。

#### 五、预期达到的社会效益、对产业发展的作用等情况

《增材制造 激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金技术规范》团体标准的制定旨在推动增材制造技术在 GH3230 和 GH3536 高温合金领域的应用，为相关产业发展提供规范和引导。这一标准的

---

制定预期将为社会带来多方面的效益，同时对产业发展产生积极作用。这项技术规范的制定将提高 GH3230 和 GH3536 高温合金增材制造的一致性和可重复性。标准规范将明确工艺参数、设备要求、质量控制等关键因素，从而确保不同制造商和实施者在生产过程中能够达到一致的标准，提高了产品质量和性能的可控性。该技术规范有望降低生产成本，提高生产效率。通过规范化生产流程和优化工艺参数，制造商可以更有效地利用资源，减少废品率，从而降低生产成本。这有助于提高企业的竞争力，促进整个行业的可持续发展。技术规范的实施将推动 GH3230 和 GH3536 高温合金在各个领域的广泛应用。由于标准规范的存在，GH3230 和 GH3536 高温合金增材制造技术将更容易被各类制造企业接受和应用，从而推动该合金在航空航天、汽车制造、能源等多个领域的广泛应用，拓展了产业的应用范围。标准的制定有助于加强技术创新和研发能力。在规范的框架下，企业将更有动力投入研发，推动 GH3230 和 GH3536 高温合金增材制造技术的不断创新。这将为产业注入新的活力，推动技术水平的提升，有望培育出更多高水平的研发团队和创新型企业。最后，该技术规范的制定将有助于建立起完善的产业标准体系。随着 GH3230 和 GH3536 高温合金增材制造技术的逐渐普及，相关的产业标准也将得以完善和发展。这有助于推动整个产业的规范化和标准化发展，提升产业整体的管理水平，同时也有助于提高企业的社会责任感和可持续发展水平。《增材制造 激光粉末床熔融 GH3230 和 GH3536 高温合金技术规范》团体标准的制定不仅将带来技术上的创新和产业发展，同时也将为社会带来多重效益，包括提高产品质量、降低生产成本、促进技术创新、推动产业广泛应用以及建立健全的标准体系。这一标准的制定将为 GH3230 和 GH3536 高温合金增材制造技术的推广和应用奠定坚实的基础，推动

---

整个产业朝着更加健康、可持续发展的方向发展。

## **六、与国际、国外对比情况**

无国际、国外同类标准。

## **七、与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性**

本标准与我国的现行法律、法规和强制性国家标准没有冲突。

## **八、重大分歧意见的处理经过和依据**

本标准制定过程中，尚无出现未采纳的重大分歧意见。

## **九、标准性质的建议说明**

本标准为推荐性团体标准。

## **十、贯彻标准的要求和措施建议**

标准发布后通过互联网、发布会等公告标准发布信息，组织开展标准的宣贯，介绍标准的特点、产品要求、试验方法和实施情况等，让用户、企业等深入了解该标准，从而使标准得到更好的贯彻和实施。建议发布后立即实施。

## **十一、废止现行相关标准的建议**

无。

## **十二、其他**

无。

标准编制组

2023年12月15日