《增材制造 金属粉末床熔融成形件 表面结构的测量与表征方法》 编制说明

（征求意见稿）

一、工作简况

1. 项目来源

《增材制造 金属粉末床熔融成形件 表面结构的测量与表征方法》是国家标准化管理委员会下达的 2023 年第二批国家标准制定计划项目，项目编号为 20230560-T-604。项目由中国机械工业联合会提出，全国增材制造标准化技术委员会（SAC/TC 562）和全国产品几何技术规范标准化技术委员会（SAC/TC 240）联合归口并由全国增材制造标准化技术委员会测试方法分技术委员会（SAC/TC 562/SC1）执行，下达计划要求完成时间为 2025 年 2 月前。

2. 主要工作过程

（1）起草阶段：

2023 年 12 月 22 日，全国增材制造标准化技术委员会测试方法分技术委员会（以下简称“分委会”）组织召开了标准起草工作启动会，来自无锡市检验检测认证研究院（以下简称“无锡检研院”）、中国兵器工业集团第五十二研究所、上海工程技术大学、湖北省计量测试院、南京航空航天大学、中机生产力促进中心、华质卓越生产力促进（北京）有限公司、铜陵学院、中国航发商用航空发动机有限责任公司、中国船级社上海规范与技术中心、苏州中瑞智创三维科技股份有限公司、西安增材制造国家研究院有限公司等 25 家单位的 32 名代表参加了此次会议。会上，分委会秘书处向与会专家和代表介绍了标准的立项背景和过程，并结合前期各

单位申请加入标准起草组情况，介绍了标准起草单位的暂定方案。随后标准牵头单位无锡检研院相关人员就标准的范围、框架、术语定义等内容与与会专家进行了交流和讨论，同时，结合前期征集标准起草工作组情况，介绍了标准起草组的组成，提出了任务分工与相关工作建议。

（2）第一次讨论会

2024 年 1 月 11 日，分委会在江苏徐州组织召开了工作组第一次讨论会。来自无锡检研院、青岛学院、中国兵器工业集团第五十二研究所、上海工程技术大学、湖北省计量测试院、南京航空航天大学、中机生产力促进中心有限公司、中国船级社上海规范与技术中心、华质卓越生产力促进（北京）有限公司、铜陵学院、中国航发商用航空发动机有限责任公司、苏州中瑞智创三维科技股份有限公司、西安增材制造国家研究院有限公司等增材制造相关高校、企事业单位愈 30 位专家和代表参加了本次讨论会。会议围绕标准草案修改稿及其附录内容，尤其是标准的框架结构及标准中应明确的内容进行了深入讨论，同时，会议上，各参编单位再次对标准验证相关事项进行了协商。

（3）第二次讨论会

会后，标准各参编单位根据会议要求及时开展试验验证，并发送至标准牵头单位，标准牵头单位基于各参编单位验证数据编制了编制说明初稿。于 2024 年 4 月 25 日在江苏无锡组织召开了此项标准的第二次讨论会。讨论会上，来自无锡市检验检测认证研究院、上海市智能制造研发与转化功能型平台中英智能测量与质量工程中心、聆光测量技术（深圳）有限公司、上海工程技术大学、湖北省计量测试技术研究院、中国航发北京航空材料研究院、西安增材制造国家研究院有限公司、苏州中瑞智创三维

科技股份有限公司、西门子（中国）有限公司、中国航发商用航空发动机有限责任公司、中国船级社、铜陵学院、南京工业大学、成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司、南京师范大学、生态环境部南京环境科学研究所等 16 家单位的近 20 位专家参加了此次讨论会，讨论会上，专家就标准草案框架、内容及数据验证等相关内容进行了讨论。

（4）征求意见阶段

（5）征求意见讨论会

（6）审定会

（7）审查阶段

（8）报批阶段

3. 主要参编单位和工作组成员及其所做的工作等

本标准负责起草单位为无锡市检验检测认证研究院，主要参编单位有ＸＸＸ、ＸＸＸ等。

4. 牵头单位简介

本标准负责起草单位为无锡市检验检测认证研究院，是国家增材制造产品质量检验检测中心（江苏）（以下简称 CAMT）的母体单位。CAMT 是全国首个增材制造综合性技术服务平台，按照 ISO/IEC 17025 和卓越绩效准则建立了完善的质量保证体系，为增材制造领域相关企业提供全产业链检测认证一站式技术服务。CAMT 实验室 11000 平方米，拥有工业 CT、激光扫描仪、疲劳试验机、电感耦合等离子体发射光谱仪、美国安捷伦气/液相色谱仪、微波消解仪、德国 ZEISS 金相分析系统及扫描电子显微镜 SEM、德国奥尔托电波暗室及 EMC 和 EMI 测试系统、德国 SPECTRO 直读光谱仪、系列环境试验箱、系列试验机等各类中高端仪器

设备100余台(套),仪器设备资产原值7000多万元。具备增材制造材料、器件、装备及打印制品的性能、质量、可靠性等检测研究能力。CAMT是国际标准化组织增材制造技术委员会测试方法工作组（ISO/TC261/WG3）委员单位，工信部“工业（增材制造）产品质量控制和技术评价实验室”，全国增材制造标准化技术委员会（SAC/TC562）委员单位，全国特种加工机床标准化技术委员会（SAC/TC56）委员单位，中国增材制造产业联盟理事单位，国家级博士后科研工作站，江苏省增材制造专业委员会副理事长单位，江苏省三维打印产业技术创新战略联盟成员，主持及参与增材制造各类科研课题研究和相关标准的制修订工作。

二、标准编制原则和主要内容

1. 标准编制原则

本标准的编写主要遵循了以下原则：

——在结构和编写规则上遵循GB/T 1.1-2020的相关要求；

——注意标准内容的技术完整，结构合理、条理清晰、内容全面；

——按照标准条文清楚、准确、相互协调的要求，内容尽可能简明易懂，避免标准使用者误解；

——注重普适性、实用性和可操作性。

2. 标准主要内容

2.1 术语定义

——表面结构：尺度限定轮廓或表面上的几何不规则，该定义来源于ISO 12920.2-2020,但因ISO 12920.2仅针对轮廓法，因本标准包含了轮廓法和区域法，因此，在定义中增加了“尺度限定表面上”。

——成形态：除需要移除成形平台、去除支撑移和/或去除原材料外，

零部件在成形后和后处理工作前的一种状态，该定义来源于 GB/T 35351-2017,2.7.2。

——顶部表面、底部表面和侧表面。本部分内容应结合 GB／T 41507-2022 中所定义的 X 轴、Y 轴和 Z 轴；顶部表面和底部表面为 “与粉末床熔融工艺成形制件与 X-Y 平面平行的表面 ”，而侧表面主要是不与 X-Y 平行的表面，侧表面又可分为向上的侧表面和向下的侧表面。

2.2 表面结构的表征

——表征方法

作为一种现阶段应用最广泛且有广阔应用前景的增材制造技术，金属粉末床熔融技术一直是业内高度关注的技术，因此，随着该技术成熟度的不断提高，应用单位越来越关注该技术打印产品的质量，表面结构作为成形件表面质量的重要评估指标已受到增材制造应用单位的高度重视。

随着表征技术的不断发展，表面结构表征方法也经历着从二维轮廓到三维区域、从随机表面到结构表面表征，从简单几何形状到复杂自由曲面形状的转变。相比轮廓法表征，区域表面结构测量参数具有更全面的功能意义、更好的重复性以及更有效的视觉表达，但轮廓表征方法是最早应用于表面结构表征，各利益相关方对轮廓法的各表征参数意义有深刻的理解。因此，本标准包括轮廓法和区域法两种表征方法。

1）轮廓法

针对轮廓法表征而言，国内可依据的标准为 GB/T 3505-2009，该标准为等同采用 ISO 4287:1997,但 ISO 4287 已更新为 ISO 12920-2:2020，与 ISO 4287 相比，该标准最大的变化为滤波顺序发生变化，且经过验证工作组的验证，不同滤波顺序对表征参数结果有影响，因此，本标准引用

标准为 ISO 12920-2:2020，为更清晰表达其表征方法，本标准给出了粉末床熔融金属增材制造成形件采用轮廓表征方法时的流程图，见图 1。

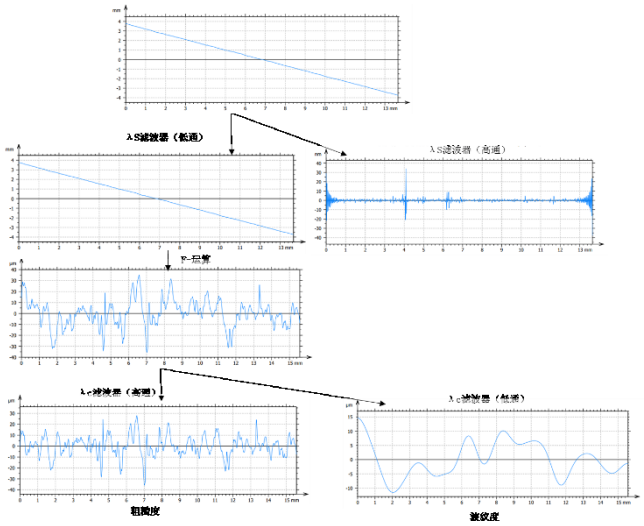


图 1 轮廓法表征流程图

2）区域法

针对区域法表征而言，主要是依据 GB/T 33523.2，同样，为更清晰表达其表征方法，本标准给出了粉末床熔融金属增材制造件采用区域表征方法时的流程图，见图 2。

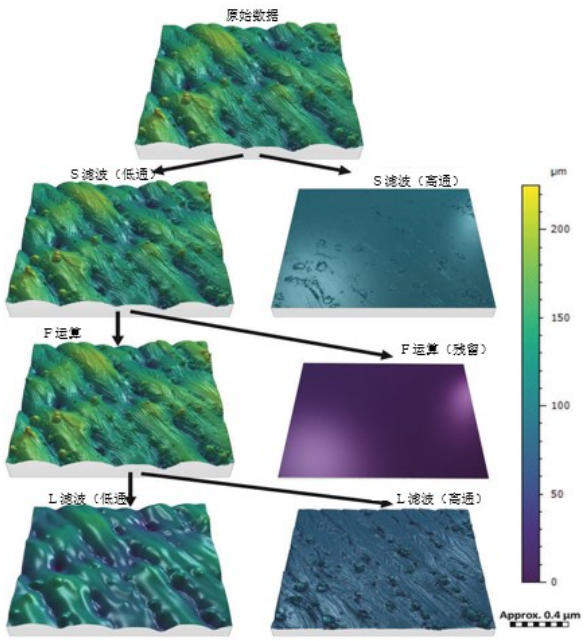


图 2　区域法表征的流程图

除可采用上述轮廓/区域表征参数外，还可基于粉末床熔融金属增材制造成形件不同表面的形貌特征，给出所关心的形貌特征的相关参数，如坑的深度、颗粒物的高度、熔融轨迹的宽度等。

——表征参数

应根据增材制造成形件的具体应用需求，针对轮廓法表征而言，可选择 P 轮廓参数和/或 R 轮廓参数和/或 W 轮廓参数进行表征，具体的表征参数分别见 GB/T 3505；针对区域法表征而言，可在 S-F 及 S-L 尺度限定表面上进行表征，具体表征参数详见 GB/T 33523.2，下表 1 增材制造金属成形件表面结构轮廓法和区域法表征中建议的测量参数。

表 1 增材制造金属成形件表面结构轮廓法和区域法表征中建议的表征参数

轮廓法	区域法
Ra；Rz；Rq、Rsk；Rku；Rpk；Rv	Sa；Sz；Sq、Ssk；Sku；Sp；Sv
注：针对增材制造制件表面结构均匀性较差的问题，建议采用多个参数对表面结构进行充分表征。	

本表中的表征参数主要基于 ISO/ASTM 52902-2020 中给出的相关参数，同时，基于金属粉末床熔融成形件表面形貌特点及 GB/T3505 和 GB/T 33523.2 中各参数的含义，并综合大量资料调研和参编单位验证数据综合而得。

2.3 待检件及待测表面

粉末床熔融技术通过激光/电子束熔融金属粉末，逐层堆积并形成复杂的金属零件，因此，该技术成形的顶部表面，底部表面及侧表面具有不同的结构特征。

（1） 待测面的分类

——顶部表面。上表面形貌含有成形工艺所用工艺参数（扫描速度、激光功率、扫描间距等）相关的结构特征，如熔融轨迹、熔融波纹、飞溅物及其它特征如表面凹等。熔融轨迹是上表面可观察到的最明显结构特征，肉眼可见(通常宽度为几百微米)；熔融波纹是沿熔融轨迹表面形成的较小的形貌结构(一般宽度几微米)；飞溅物是液体和半熔物质从熔池中喷溅出来形成的产物，通常出现在顶部表面，一般以十几微米到一百多微米的球形颗粒形式出现（见图 3）。

——侧表面。粉末床熔融金属成形件侧表面主要受相对于成形方向的阶梯特征、层间熔合以及表面与周围粉的相互作用的影响，可分为朝上的侧表面和朝下的侧表面。在低倾斜角度时向上的侧表面可能主要是以来自偏移层的熔融轨迹结构为主；而向下的侧表面通常以粉末颗粒粘附为主，有时也包含残余支撑结构。见图 4。

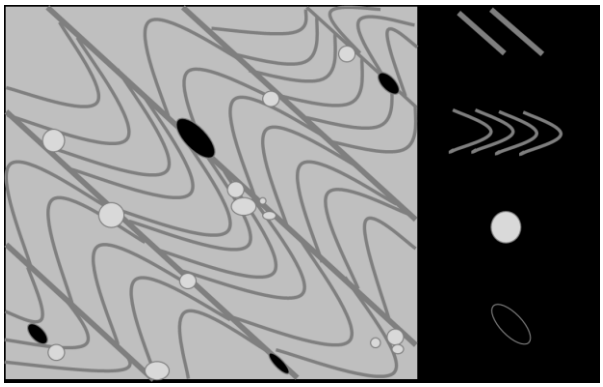


图 3 顶部表面特征示意图

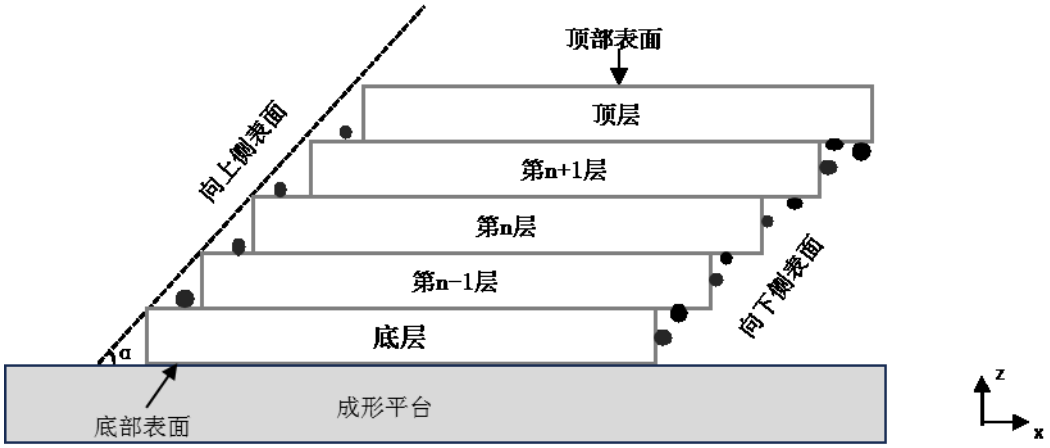


图 4 侧表面特征示意图

——底部表面。底部表面和支撑表面的形貌特征与侧表面相似，下底部表面通常以颗粒粘附为主，并经常受到支撑结构移除和及其过程中任何残留物的严重影响。

本部分内容有利粉末床熔融金属成形件表面结构测量时滤波的选择及测量结果的解释。产品几何技术规范相关标准如 GB/T1031 明确规定表面结构测量和评定时应规避缺陷（如气孔、沟槽、划痕等），但由于金属粉末床熔融技术产生的有些缺陷不可避免，如向下侧表面的颗粒粘附、一些随机分布的孔类缺陷等，这导致了在进行粉末床熔融金属成形件表面结构测量部分缺陷无法避开的问题，因此，在本标准中规定了“所述的金属粉末床熔融金属成形件其他不同表面形貌特征哪些应纳入表面结构测量应由供需双方事先协商，即只有在买卖双方事先同意的情况下，某些形貌特征才能被视为缺陷，如果指定了缺陷，在执行表面结构测量前应确定是否存在缺陷及是否应拒绝或接受这些缺陷，如果不存在指定的缺陷或未指定缺陷，则应包含在表面结构测量中”。

（2）待测面的准备

待测面表面的任何处理均有可能对待测面的表面结构测量结果造成

影响，因此，本部分内容旨在阐明各个过程是什么及影响是什么。待测面的准备主要涉及到成形平台和支撑移除、颗粒移除和清洗、存储和运输及精加工等内容。

2.4 测量设备

金属粉末床熔融金属成形件的表面特征空间频率尺度范围、材料本性及结构特点均将影响到仪器设备的选择，适用于粉末床熔融增材制造金属成形件表面结构测量的设备有接触(触针)式仪器、非接触（变焦）式仪器、非接触（共聚焦）式仪器、非接触（相干扫描干涉）式仪器及 X 射线计算机层析成像设备，各个设备的测量范围和主要影响因素见表 3。本标准中测量设备的选择主要是基于 GB/T 22523.6 中所列举的设备，同时通过大量的资料调研，再结合金属粉末床熔融增材制造成形件不同表面形貌特征和该技术的优势综合而定。在这些设备中，接触(触针)式仪器主要应用于轮廓参数的表征，而非接触（变焦）式仪器、非接触（共聚焦）式仪器、非接触（相干扫描干涉）式仪器属于光学方法非接触测量方法，主要应用于区域参数表征时的测量，以上几种测量方法设备及其相应在方法在 GB/T 33523 系列标准中均进行了介绍，商业化的数据处理软件均包含了相关的标准，因此，数据处理相对简单。对于 X 射线计算机层析成像设备而言，主要是基于以下两个方面，将其作为金属粉末床熔融金属成形件表面结构表征的手段：1）金属粉末床熔融金属成形件是增材制造技术中最适宜进行复杂结构打印的技术，然而，传统的接触式及光学方法均无法企及成形件的内表面或具有一定景深的表面，因此，这些表面的表面结构将无法测量，但因这些表面的表面结构对成形件的功能也具有至关重要的作用，如内表面特征空间频率尺度范围会影响到液体的流体性、具

有一定景深的表面空间频率尺度范围会影响到其配合性及边界摩擦磨损等性能；2）X 射线计算机层析成像法是最适宜于复杂结构件的测试，该方法主要基于 X 射线对于金属成形件进行扫描、再通过软件对扫描数据进行重建及表面定义，最后基于三维表面形貌分析软件如 MountainsMap 对该数据进行分析。

表 2 不同测量设备的适用范围和主要影响因素

序号	测量设备	适用范围	主要影响因素
1	接触(触针)式仪器	适用于规则表面	待测面弹性变化
2	非接触（变焦）式仪器	适用于光线可达的规则及不规则表面	待测面光学特性、结构特点及表面特征的空间频率范围等
3	非接触(共聚焦)式仪器	适用于光线可达的规则及不规则表面	
4	非接触(相干扫描干涉)式仪器	适用于光线可达的规则及不规则表面	
5	X射线计算机层析成像法	适用于具有复杂结构、悬垂结构、空隙、高坡角的表面或内表面	体素分辨率

各测量设备在使用前应检查是否在校准期限内，否则应按制造商的设备说明书或相应的标准进行校准。

2.5 测量

——测量位置和次数。测量位置通常应在设计规范中明确或由供需双方协商，表面规范见 GB/T 131 和 GB/T 33523.1；宜在每个确定的表面选择参数预期值最大的区域内进行不少于三个位置的测量，且每次测量应在预期值最大的位置进行。

——测量轨迹。该部分内容主要针对的是采用接触（触针）轮廓仪设备测量轮廓或区域参数（较少使用）。应使测量轨迹垂直于选择测得表面结构幅度参数最大值的测量方向：且应尽可能避免测量轨迹与供需双方协商的缺陷相交。对于基于特征的表征，应使测量轨迹尽可能包含被测特征的最高点、最低点、最大宽度等特征点。

—— 测量顶部表面时，测量轨迹应垂直于熔融轨迹方向；

—— 测量侧表面时，测量轨迹应垂直于构建层成形方向；

—— 测量主要制造工艺方向不明确的表面，可选择任意方向进行多次测量，并取各次测量结果的平均值作为最终的测量结果。

——斜率特征。表面结构测量时，陡峭表面的测量常常有限制，如触针法受到探头针尖角度的限制，光学方法测量时，陡峭表面的测量与物镜的数值孔径有关。工业计算机层析成像法则不受斜率特征的影响。

——测量尺寸。轮廓法表征时测量尺寸指的是评定长度，评定长度通常为采样长度的 n 倍。区域法表征时测量尺寸指的是评定区域，通常等于采样区域尺寸，当有视场拼接时，测量尺寸为采样区域的加和尺寸。测量尺寸可以通过与 L-滤波器截止波长或表面特征的关系来选择，通常与这两个因素都有关：1）测量尺寸应大于 λc 或 L 滤波器截止波长；2）注：测量尺寸应至少是测量对象颗粒大小、熔池宽度或层厚等特征尺寸的三倍。

——测量参数。目前，表面结构测量不同实验室间存在较大差异，差异原因主要是各单位仅给出了表征结果，但测量过程中各参数是如何设置无从知晓。本标准将各测量设备所涉及的主要参数列出，并要求在测试报告中报告，增强各试验室间数据的比对性。

——异常值去除和未测量点填充。测量过程中，应尽量减少异常值和未测量点，一旦产生，可采用不同的统计算法对所获数据进行处理，但应避免失真处理。

2.6 数据处理

应基于轮廓法和区域法的表征流程对获取获得的实际表面进行处理

以获得表面结构参数值及相关的高度图。

接触(触针)式仪器、非接触（变焦）式仪器、非接触（共聚焦）式仪器、非接触(相干扫描干涉)式仪器应基于设备自带的软件进行数据处理；工业计算机层析成像法的数据处理应基于其自带的软件对原始扫描数据进行重建，并采用合适的方法如局部迭代法、ISO50 法等进行表面定义，然后提取表面点云数据并以合适的点云密度将数据输出并在三维表面形貌分析仪软件如MountainsMap 中,再依据相关的标准进行表面结构表征。

——滤波器。数据处理过程中最核心的事项为滤波器的选择。不论是采用轮廓法表征还是采用区域法表征，滤波器主要涉及到高通滤波和低通滤波。低通滤波主要是去除高频噪声成分,而高通滤波主要是进行粗糙度和波纹度的区分。

——F 运算。F 运算旨在消除形状对表面结构测量的影响。

2.7 试验报告

报告应包含但不限于以下信息：

——待检件信息，如材质、结构及成形方位等；

——待测表面及其位置（图示）；

——测量设备校准及配置信息；

——测量参数；

——用于识别和消除(或减弱)测量异常的技术；

——是否存在重测或复测；

——表征过程所涉及到的重要参数及其数值如滤波器截止值、F 运算方法等；

——表征结果，含表征参数值及高度图；

——测试环境，包括温湿度和环境；

——检测人员、审核人员、批准人员签字及日期。

指的是注意是由于轮廓法和区域法所使用滤波方法的差异，不能直接将二者之间的数值进行直接比较。轮廓滤波器只在纹理垂直的驱动方向上滤波，而区域滤波器在 X 和 Y 两个方向上同时滤波，这两个方向与表面纹理可能相关，也可能无关。

三、标准主要试验（或验证）情况

1. 不同滤波顺序

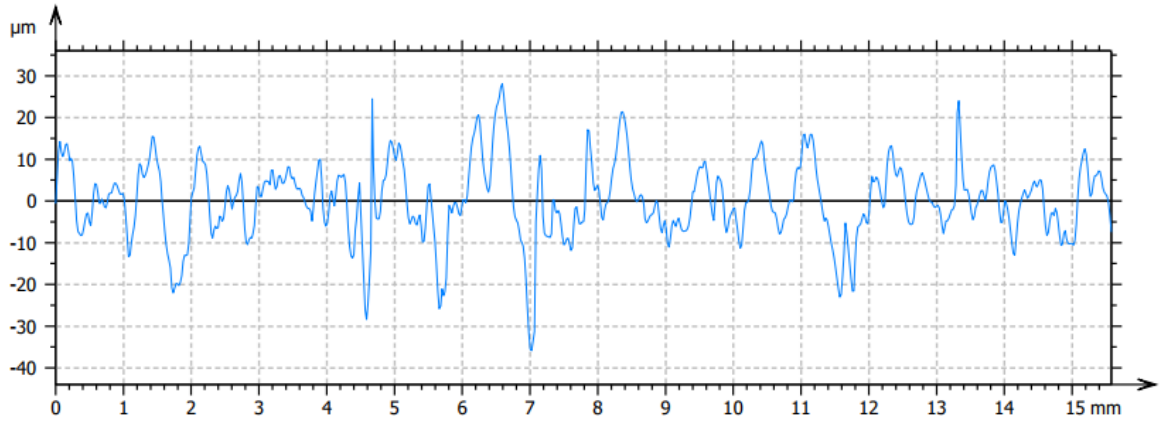


图 5:顺序为 S- F-L 时的图形

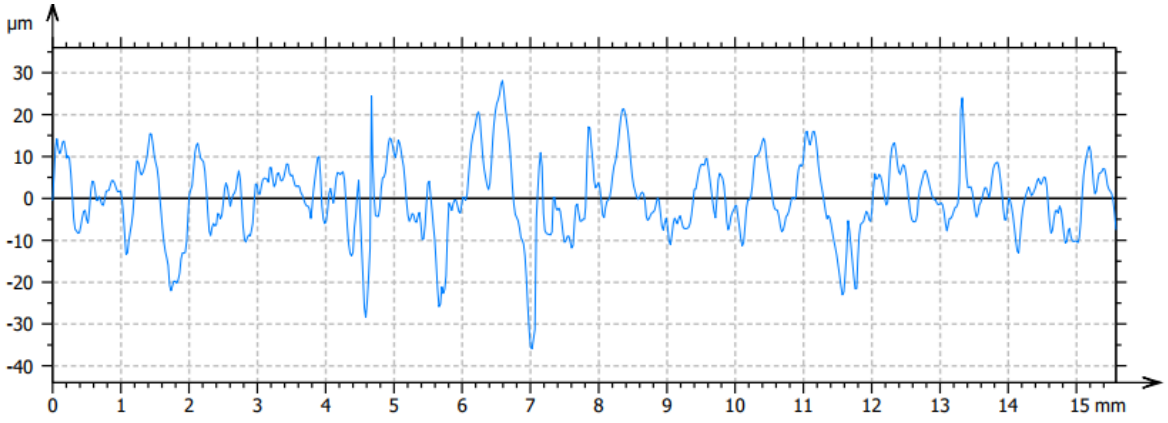


图 6：顺序 F-S-L 时的图形

表 3 不同滤波处理顺序所获参数值

表征参数	滤波顺序	
	S- F-L	F-S-L

*R*q	9.353 μm	9.050 μm
*R*p	21.68 μm	21.69 μm
*R*v	22.26 μm	22.26 μm
*R*z	43.94 μm	43.94 μm
*R*a	7.082 μm	7.078 μm
*R*dq	8.93°	8.574°

可以看到滤波顺序对幅度参数（峰和谷没有影响），主要影响的是的幅度参数中的纵坐标平均值及混合参数等。

2. 不同测量设备

2.1 接触(触针)式仪器

1）不同测量表面

<table>
<tr><td colspan="6">一、试 样</td></tr>
<tr><td>材质及其牌号</td><td>钛合金</td><td>外形尺寸</td><td colspan="3">见试样外观照片</td></tr>
<tr><td>成形热源</td><td>激光</td><td>取向</td><td colspan="3">/</td></tr>
<tr><td>测试面</td><td colspan="5">□顶部表面
□底部表面
□侧表面（√向上侧表面；向下侧表面）</td></tr>
<tr><td>试样前处理</td><td colspan="5">包括但不限于测试前的精加工、颗粒移除方法（清洗）等步骤
无。</td></tr>
<tr><td>外观照片</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td colspan="6">二、测试方法及设备</td></tr>
<tr><td rowspan="4">X 射线</td><td rowspan="4">□接触式</td><td>设备名称</td><td>触针式轮廓仪</td><td>规格型号</td><td>FORMTRACER SV-C3200</td></tr>
<tr><td>量程范围</td><td>X 轴 100mm</td><td>精度等级</td><td>0.0001 μm</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">三、 检测工艺参数及试验过程描述（依据不同方法来确定）</td></tr>
</table>

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：https://d.book118.com/496100045131010142