**XXX**

XX

**团 体 标 准**

**X XX XXXX—xxxx**

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ \_

**仿生梯度结构增材制造工艺规范**

Process specification for additive manufacturing of biomimetic gradient structures

（征求意见稿）

**山东省特种设备协会 发布**

**前 言**

为了进一步规范仿生梯度结构增材制造工艺，以规范化操作方法进行仿生梯度结构增材制造，参考有关国际标准和国外先进标准，制订“仿生梯度结构增材制造工艺规范”标准，形成仿生梯度结构增材制造工艺规范的标准化、指导性文件，规范仿生梯度结构增材制造操作流程和方法，以实现仿生梯度结构的高精度和高性能增材制造。

本文件按照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。

本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由山东省特种设备协会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件为首次发布。

**目 次**

[1 范围 3](#_Toc134388589)

[2 规范性引用文件 3](#_Toc134388590)

[3 术语和定义 4](#_Toc134388591)

[4 缩略语 5](#_Toc134388592)

[5 基本规定 5](#_Toc134388593)

[6 仿生梯度结构增材制造模型设计 5](#_Toc134388594)

[6.1 仿生原型数据获取 5](#_Toc134388595)

[6.2 增材制造模型构建 5](#_Toc134388596)

[6.3 增材制造模型优化 6](#_Toc134388597)

[7 仿生梯度结构增材制造工艺规程 6](#_Toc134388598)

[7.1 设备和原材料 6](#_Toc134388599)

[7.2 增材制造工艺过程 6](#_Toc134388600)

[7.3 后处理 7](#_Toc134388601)

[8 质量检测 7](#_Toc134388602)

[8.1 成形精度 7](#_Toc134388603)

[8.2 收缩率 7](#_Toc134388604)

[8.3 孔隙率 7](#_Toc134388605)

[8.4 密度 7](#_Toc134388606)

[8.5 力学性能 7](#_Toc134388607)

[8.6 服役性能 8](#_Toc134388608)

仿生梯度结构增材制造工艺规范

1 范围

本文件规定了仿生梯度结构增材制造的基本原则、模型设计、工艺规程和质量检测等。

本文件适用于采用增材制造技术制备的仿生梯度结构。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 34515-2017增材制造工程技术人员职业标准

GB/T 37698-2019增材制造设计要求、指南和建议

ISO/ASTM 52910-2017增材制造设计指南

GB/T 42441-2023仿生学 仿生材料、结构和构件

GB/T 37402-2019仿生学—仿生结构优化

GB/T 39331-2020增材制造 数据处理通则

GB/T 39329-2020增材制造 测试方法 标准测试件精度检验

GB/T 1804一般公差 未注公差的线性和角度尺寸的公差

GB/T 10610产品几何技术规范(GPS)表面结构 轮廓法 评定表面结构的规则和方法

GB/T 14896.7特种加工机床 术语 第7部分:增材制造机床

GB/T 24734.1技术产品文件 数字化产品定义数据通则 第1部分:术语和定义

GB/T 35351增材制造术语和定义

GB/T 33538增材制造术语-材料

GB/T 34656增材制造金属材料机械性能试验方法

GB/T 34657-2017增材制造金属材料微观结构表征方法

GB/T 34658-2017增材制造金属材料热性能试验方法

ISO/ASTM 52921增材制造术语-热塑性材料

GB/T 34589增材制造术语-医用生物模型制作

GB/T 34664增材制造-聚合物材料微观结构表征方法

GB/T 1033塑料 非泡沫塑料密度的测定

ISO 18459:2015 Biomimetics - Biomimetic structural optimization

ASTM F2792-12(2018) Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies

ISO/ASTM 52900:2015 Standard Specification for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology

ISO/ASTM 52910:2019 Standard Specification for Additive Manufacturing – Polymer Filament Extrusion (Fused Filament Fabrication) – Material Extrusion

ISO/ASTM 52911:2019 Standard Specification for Additive Manufacturing – Polymer Powder Bed Fusion – Material Extrusion

3 术语和定义

3.1增材制造：additive manufacturing

增材制造，以数字模型文件为基础，使用计算机辅助设计逐层构建对象，通过材料堆积的方式制造零件或实物的工艺。

3.2增材制造设备：additive manufacturing machine

增材制造系统中用以完成零件或实物生产过程中一个成形周期的必要组成部分,包括硬件、设备控制软件和设置软件。

3.3材料挤出：material extrusion

将材料通过喷嘴或孔口挤出的增材制造工艺。典型的材料挤出工艺如粉末挤出打印Powder Extrusion printing(PEP)、熔融沉积成形(Fused Deposition Modeling，FDM)等。

3.4增材制造材料：additive manufacturing material

在材料挤出工艺中，线材或膏体通过喷嘴挤出，以逐层叠加的方式制造零件或实物。挤出材料可使用胶合物、聚合物、陶瓷、金属、有机硅等各种材料。

3.5仿生原型：bionic prototype

增材制造过程中，被模仿制造的生物体对象。传统意义上的技术材料往往是均质的，具有各向同性的属性。技术材料的性能几乎决定于化学成分，而仿生原型是生物体，具有复杂的结构和成分组成，性能则取决于变化的结构和复合材料属性。

3.6仿生梯度结构：bionic gradient structure

受生物特性的启发或者模拟生物的特性而开发的具有生物体特征的结构。

3.7梯度过渡：gradient transition

化学、物理或性能的持续变化，具有方向性。

3.8缺陷：defect

增材制造模型中的孔洞、裂纹、尖锐物等缺陷。

3.9粗糙度：roughness

仿生梯度结构表面具有的较小间距和微小峰谷的不平度。

3.10成型精度：molding precision

仿生梯度结构的尺寸测量值与理论值之间的差值。

3.11收缩率：shrinking percentage

增材制造零件与后处理零件尺寸之差的百分比。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

CT 计算机断层扫描 (computed tomography)

MRI 磁共振成像 (magnetic resonance imaging)

IGES 初始化图形交换格式 (the initial graphics exchange specification)

MJP 多喷头打印成型 (multi-Jet printing)

STL 三角面片格式 (stereo lithographic)

STEP 产品模型交换格式 (standard for the exchange of product model data)

XAFS 同步辐射X射线吸收谱 (X-ray absorption fine structure)

5 基本规定

5.1 应遵循GB/T 37698-2019的要求，确保仿生梯度结构增材制造工艺的规范性。

5.2 应规定满足本标准实施要求的人员职责和权限，应按照GB/T 34515-2017的适用条款安排人员，人员包括但不限于技术、生产和质量管理部门的负责人和操作人员、增材制造设备操作和维护人员、工程师、设备制造商等。

6 仿生梯度结构增材制造模型设计

6.1 仿生原型数据获取

仿生原型大多为合成物质，性能纷繁多样，因此有必要进行具有针对性的分析。将生物系统的性能总结为8类：(1)材料、(2)加工、(3)自再生性、(4)传感特性、(5)流体动力学、(6)节能/节源、(7)对环境的适应性、(8)行为/生态保护，依据ISO18457-2016对仿生原型进行成分、结构、性能的测量和表征，获取仿生原型数字化数据。

6.2 增材制造模型构建

6.2.1 将获取的仿生原型数字化数据导入三维逆向软件先拟合生成STL格式，转化为可编辑和计算分析的几何参数格式，可保存为STEP、IGES格式的仿生原型模型文件。

6.2.2 将仿生原型模型文件导入三维建模软件中进行噪点消除和缺陷修复，并进行结构的优化设计。

6.2.3 三维设计建模软件应具备2D和3D视图，可以随时查看定制件的设计建模情况，应能够进行线、面、体的增加、删除和编辑处理，具备长度和角度等定量测评功能，便于模型的设计和修改，获得增材制造模型数据。

6.2.4 增材制造模型建模完成后，宜保存或导出为STEP、IGES等有限元模拟软件识别的格式，以便于后续的有限元模拟优化分析。

6.3 增材制造模型优化

6.3.1 将获取的增材制造模型导入有限元模拟软件中，建立具有材料、结构和性能属性的仿生原型结构的有限元模型。

6.3.2 可参考GB/T 37402-2019进行增材制造模型的仿生梯度结构优化设计。针对不同仿生梯度结构的服役条件及性能需求，优化仿生梯度结构打印模型的材料、结构和性能，构建具有材料梯度和结构梯度的增材制造模型。

6.3.3 为满足增材制造工艺需要，优化设计的增材制造模型结构和成分应具有梯度过渡特征，具体分为结构梯度模型和成分梯度模型。

7 仿生梯度结构增材制造工艺规程

7.1 设备和原材料

7.1.1 设备

增材制造设备应满足GB∕T 41508-2022要求，应具有至少三个喷头用于材料挤出，进行材料梯度构建。增材制造设备能够实现三轴联动，喷头温控-20-300 °C、三轴重复定位精度±5 μm、出丝直径范围25-800μm。

7.1.2 原材料：

原材料为：粉末（金属、陶瓷、高分子）、粉末混合物、液态粘结剂、交联剂。

7.2 增材制造工艺过程

7.2.1增材制造模型的文件格式应适用于所用的增材制造设备。开始制造前，将增材制造模型导入增材制造设备的控制软件中，进行增材制造模型的切片处理、材料分配和路径规划。

7.2.2根据增材制造模型材料和结构的梯度特征，通过多喷头装载不同材料构建材料梯度，路径规划实现结构梯度。根据增材制造模型特征，在控制软件中设置增材制造过程中的相关参数，主要包括：成形温度、挤出路径、挤出速度、挤出喷头直径、分层厚度、成型室温度、成形平台温度、挤出喷头或成形平台移动速度。

7.2.3 每次成形前应对挤出喷头、成形平台进行清洁和维护，加载材料，并将设备调试到待打印状态。

7.2.4 增材制造工艺过程可参考GB/T 39328-2020要求进行，推荐使用设备出厂自带的工艺参数，或使用通过试验得出的工艺参数，操作时应遵守设备操作规定，安排安全员进行保护及监督。

7.3 后处理

后处理很大程度取决于工艺和材料，如果使用支撑结构，支撑结构应移除，可通过去毛刺、手工打磨等机械方式去除多余的材料。如果进行陶瓷材料挤出，通常将零件真空干燥后进行热处理，热处理温度及制度依据材料属性而定。如果进行高分子材料熔融挤出，通常将零件去除支撑即可，无需进行后续处理过程。如果进行金属材料挤出，通常将零件真空干燥后进行热处理，热处理温度及制度依据材料属性而定，最后，最终成形零件可能需要进行机械加工、研磨、喷涂或其他操作。因此后处理的具体方式取决于工艺和材料，因此后处理方法根据具体情况和要求确定。

8 质量检测

8.1 成形精度

可参考GB/T 35022-2018、GB/T 39328-2020 和GB/T 37463-2019 对增材制造仿生梯度结构的关键部位进行测量，尺寸精度与误差需符合增材制造工艺的规范要求。可通过扫描电子显微镜、激光共聚焦显微镜、粗糙度测试仪、光学显微镜等从二维表面的角度评价，通过Micro-CT、MRI、XAFS等从三维立体的角度评价。

8.2 收缩率

成型收缩率直接影响仿生梯度结构增材制造工艺过程的成形能力，可参考GB/T 17037.4进行成型收缩率的测定。

8.3 孔隙率

如需进行孔隙率测试，可参考YY/T 1616的规定进行试验，获得孔隙率。

8.4 密度

如需进行密度测试，可参考GB/T 1033.1-2008 的规定进行试验，获得密度均值。

8.5 力学性能

力学性能试验很大程度取决于材料属性，针对不同的材料属性，可能需要采用不同的力学性能测试方法。若需进行力学性能测试，可参考GB/T 39254-2020、GB/T9341、GB/T1041、GB/T 11546.1、ASTMD7774、ASTM D6068、GB/T 25262-2010的规定进行试验，或建立并规定相关检测方法，建立并规定相关力学性能指标。

8.6 服役性能

仿生构建的特点是模仿生物体的材料、结构特征，从而获得生物体的某些特殊性能。仿生梯度结构根据仿生原型的不同，而具有不同的性能特征，应用于不同的领域。例如力学、光学、医学、流体动力学、表面张力、自组织性、自洁性、流体阻力及摩擦控制等，因此其服役性能取决于研究者需求的仿生性能进行评价方式的选择，需根据具体的情况和要求确定。