

ICS

CCS

# 团 体 标 准

T/CMES XXXX—202X

## 复杂结构功能陶瓷多喷头材料挤出装备与 工艺规范

Specification for multi-nozzle material extrusion equipment  
and process of complex-structured functional ceramics

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国机械工程学会 发布

中国机械工程学会标准征求意见稿

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内、国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本标准实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

本标准版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制、传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048 电话：010-68799027 传真：010-68799050

网址：www.cmes.org 联系人：袁俊瑞 电子信箱：yuanjr@cmes.org

目次

前言 ..... IV

引言 ..... V

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 多喷头材料挤出增材制造装备 ..... 3

    4.1 I 型装备（研发与小试级设备） ..... 3

    4.2 II 型装备（工业与中试级设备） ..... 3

    4.3 装备组成及功能要求 ..... 3

5 装备技术要求 ..... 4

    5.1 挤出系统与成形一致性 ..... 4

    5.2 运动控制与成形精度 ..... 4

    5.3 智能监控与闭环反馈 ..... 4

6 工艺控制规范 ..... 5

    6.1 工艺流程 ..... 5

    6.2 材料制备 ..... 5

    6.3 数据处理与路径规划 ..... 5

    6.4 制造过程 ..... 5

    6.5 成形控制 ..... 5

    6.6 生坯质量 ..... 5

    6.7 后处理规范 ..... 6

7 成品性能要求 ..... 6

    7.1 装备运行要求 ..... 6

    7.2 制件尺寸偏差与孔隙率 ..... 6

    7.3 力学性能 ..... 6

    7.4 功能性能 ..... 6

8 试验方法 ..... 6

    8.1 喷头数量检查 ..... 6

8.2 成形幅面测定 .....6

8.3 位置精度测定 .....7

8.4 流量波动偏差率测定 .....7

8.5 浆料流变性能测试 .....7

8.6 孔隙率测试 .....7

8.7 力学性能测试 .....7

8.8 外观与结构检测 .....7

8.9 成形线宽测试 .....7

8.10 功能性能测试 .....7

9 检验规则 .....7

9.1 检验分类 .....8

9.2 出厂检验 .....8

9.3 型式检验 .....8

10 标志、包装、运输、贮存和技术文件 .....8

10.1 标志 .....8

10.2 包装 .....8

10.3 运输 .....8

10.4 贮存 .....8

10.5 技术文件 .....9

附 录 A （规范性附录） 多喷头动态挤出流量波动偏差率测定方法 .....10

附 录 B （规范性附录） 成形线宽测试方法 .....12

## 前 言

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。

请注意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这些专利的责任。

本文件由中国机械工程学会增材制造技术分会提出。

本文件由中国机械工程学会归口。

本文件起草单位：西安交通大学、陕西中蓝化工科技新材料有限公司、陕西斐昂思凯科技发展有限公司。

本文件主要起草人：田小永、霍存宝、李涤尘、裴伟迪、闫华清、杨洋、方学伟。

本文件首次制定。

## 引 言

功能陶瓷多喷头材料挤出增材制造技术能高效成形具有复杂三维孔道结构的催化剂载体、过滤膜、吸附构件等功能制件，在化工、环保、能源等领域展现出广阔的应用前景。当前国内该技术领域尚未形成统一技术规范，多喷头挤出一致性、高固相浆料工艺控制及生坯后处理等关键环节缺乏明确技术依据，装备性能与产品质量评价缺少统一标尺，直接制约了技术的产业化推广与质量稳定管控。本标准界定了相关术语与定义，将装备划分为研发小试级、工业中试级两类，明确了挤出系统、运动控制、智能监控三大核心装备技术要求，规定了从浆料制备、路径规划、挤出成形到后处理的全流程工艺控制准则与成品性能评价方法。制定本标准旨在填补行业标准空白，规范装备设计制造与全流程工艺管控，为技术的规模化工业应用提供统一技术依据。

中国机械工程学会标准征求意见稿



# 复杂结构功能陶瓷多喷头材料挤出装备与工艺规范

## 1 范围

本文件规定了基于材料挤出工艺的功能陶瓷多喷头增材制造装备的分类、技术要求、工艺控制规范、试验方法与性能评价、检验规则及标志、包装、运输和贮存要求。

本文件适用于以氧化铝、氧化硅、氟化铝、碳化硅及其复合体系为代表的功能陶瓷材料，包括但不限于催化剂、催化剂载体、过滤材料、吸附材料、传质构件及其他具有催化、过滤、吸附、传热传质调控等功能的陶瓷制件。也适用于其他具有相似流变特征、成形特性和后处理行为的无机非金属材料、膏料或前驱体材料体系。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB/T 1964 多孔陶瓷常温抗压强度试验方法
- GB/T 1966—2024 多孔陶瓷——表观孔隙率和堆积密度的测定
- GB/T 14896.7 特种加工机床 术语 第7部分：增材制造机床
- GB/T 35351 增材制造 术语
- GB/T 44149 精细陶瓷 陶瓷粉体等电点的测定 zeta 电位法
- GB/T 45753 增材制造 功能梯度增材制造工艺规范
- GB/T 45765 精细陶瓷 陶瓷浆料触变性试验方法 旋转黏度计法
- GB/T 45871 增材制造 陶瓷立体光固化用氧化铝浆料
- JB/T 8356 机床包装 技术条件

## 3 术语和定义

GB/T 1964、GB/T 1966-2024、GB/T 14896.7、GB/T 35351、GB/T 44149、GB/T 45753、GB/T 45765、GB/T 45871、JB/T 8356 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

功能陶瓷 functional ceramics

具有催化、吸附、过滤、介电、导热、传质或其他特定功能的陶瓷材料或陶瓷制件。

### 3.2

多喷头材料挤出增材制造装备 multi-nozzle material extrusion additive manufacturing equipment

采用四个及以上喷头，通过浆料、膏料或前驱体材料挤出方式逐层堆积成形功能陶瓷制件的增

材制造装备。

3.3

阵列式多喷头 array-type multi-nozzle

多个喷头按固定阵列布置，并以协同方式执行打印任务的多喷头系统。

3.4

独立控制式多喷头 independently controlled multi-nozzle

各喷头的启停、挤出参数、运动补偿和工作状态可单独设定和控制的多喷头系统。

3.5

喷头间一致性误差 consistency error among nozzles

在相同工艺条件下，不同喷头单位时间挤出量、成形线宽或打印轨迹之间的偏差。

3.6

流量波动偏差率 fluctuation deviation of flow rate

在规定测试条件下，多喷头连续挤出同一种测试浆料时，各喷头单位时间挤出量相对于多喷头平均单位时间挤出量的最大相对偏差。

3.7

设计线宽 designed line width

根据喷嘴直径、层高、打印速度、挤出参数和切片路径设定的单道打印线条宽度。

3.8

成形线宽相对偏差 relative deviation of formed line width

实际打印线宽与设计线宽之间的差值相对于设计线宽的百分比。

3.9

功能陶瓷生坯 green body of functional ceramics

经多喷头材料挤出成形后、尚未完成干燥、脱脂、转化或烧结处理的陶瓷坯体。

3.10

高固相陶瓷浆料 high solid-loading ceramic paste

分散有高体积分数陶瓷粉体，具备特定屈服应力和剪切变稀流变特性，适用于材料挤出成形的非牛顿流体。

3.11

原位化学转化 in-situ chemical transformation

功能陶瓷生坯在特定的热处理或化学气氛环境中，由前驱体直接转化为目标陶瓷相或功能相的过程。

#### 4 多喷头材料挤出增材制造装备

##### 4.1 I型装备（研发与小试级设备）

独立控制或阵列式喷头数量不应少于4个，有效成形空间X轴方向尺寸不小于200 mm、Y轴方向尺寸不小于200 mm、Z轴方向尺寸不小于100 mm。

##### 4.2 II型装备（工业与中试级设备）

独立控制或阵列式喷头数量不应少于8个，有效成形空间X轴方向尺寸不小于600 mm、Y轴方向尺寸不小于600 mm、Z轴方向尺寸不小于150 mm。

##### 4.3 装备组成及功能要求

功能陶瓷多喷头材料挤出装备组成如图1所示，其系统配置应满足下列要求：

- a) 供料系统：能提供连续稳定的浆料输送，并具备压力或流量调节功能，保证挤出过程不出现断料或明显波动；
- b) 挤出喷头系统：各喷头应能单独设定挤出参数并独立启停，且喷头间切换或同步工作时定位偏差不大于0.30 mm；
- c) 运动系统：实现X、Y、Z三轴联动，在最高设计速度下重复定位精度达到 $\pm 0.1$  mm，运行无明显爬行或振动；
- d) 成形平台：具备水平调节功能，并可根据工艺需要提供加热或温控环境，以保证生坯基底平整及附着稳定；
- e) 温控系统：对喷头区、供料区和成形室进行温度监控，对于需控温挤出的材料，控温误差宜不大于2℃；
- f) 控制系统：具备参数设定、多喷头路径规划与协同调度、报警提示及数据存储导出功能；
- g) 机器视觉或在线监测系统：具备实时观测挤出状态和生坯沉积质量的能力，当检测到断丝、堆料或位置偏移时应具备报警或暂停补偿功能；
- h) 数据采集与存储系统：记录打印过程中的关键参数，并支持后续追溯；
- i) 安全防护系统：包含急停按钮、过载保护及必要的防护罩或光栅，确保操作安全。

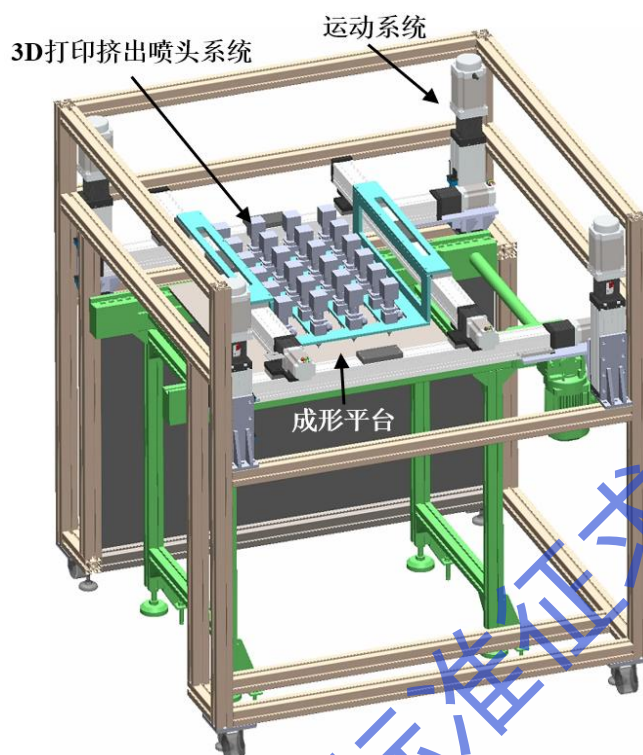


图 1 功能陶瓷多喷头材料挤出装备示意图

## 5 装备技术要求

### 5.1 挤出系统与成形一致性

功能陶瓷多喷头材料挤出系统与成形一致性应满足下列要求。

a) 装备应配备精密的供料与挤压驱动机构，满足高固相陶瓷浆料连续、稳定挤出的需求，挤出过程应连续稳定，不应出现影响成形质量的间歇性断料、明显过挤出或欠挤出。

b) 在额定挤出压力和设定打印速度下，多喷头连续挤出同一浆料时，各喷头间的相对流量波动偏差率应不大于 5.0%（测试与计算方法见附录 A）。对于不同材料体系或不同密度浆料的多材料打印，不宜直接采用质量流量进行横向比较，应以设计线宽、成形线宽相对偏差（测试与计算方法见附录 c），界面质量和成形连续性作为主要评价依据。

c) 在相同浆料体系、相同喷嘴直径、相同层高、相同打印速度和相同挤出参数条件下，打印线条应连续、均匀，不应出现明显断线、堆料、蛇形摆动或局部收缩缺陷。除供需双方另有约定外，各喷头实际打印线宽相对于设计线宽的相对偏差应不大于 15.0%。

### 5.2 运动控制与成形精度

多个喷头在同一坐标系下执行协同打印路径时，喷头相对切换与复位、喷头同步打印的定位精度偏差应在 $\pm 0.3\text{ mm}$  以内，以保障三维孔隙结构和材料界面的成形精度；装备的打印速度应与材料体系和成形质量要求相匹配；设备最大运动速度宜满足工艺要求。在最高设计运行速度下，X/Y/Z 轴的重复定位精度应满足供需双方产品说明书的规定。

### 5.3 智能监控与闭环反馈

装备宜集成基于机器视觉的在线监测模块，实时采集挤出状态及生坯沉积质量；当系统检测到断丝、严重堆料或宏观位置偏移时，宜具备报警、暂停或参数补偿功能。

## 6 工艺控制规范

### 6.1 工艺流程

典型工艺流程包括：原材料准备 → 浆料制备 → 除泡与均化 → 装料 → 参数设定 → 多喷头校准 → 路径规划 → 挤出成形 → 干燥 → 脱脂/转化 → 烧结 → 检验。

### 6.2 材料制备

陶瓷浆料的配制应保证各组分（粉体、溶剂、粘结剂、分散剂等）混合均匀。浆料应具备适宜的触变性，挤出前应进行脱泡处理。其固相含量测定方法应按照 GB/T 45871 的规定执行。

### 6.3 数据处理与路径规划

应根据催化剂或载体的流体动力学需求（如多级通道、特定孔隙分布等）进行三维模型设计与切片处理；多喷头路径规划应包含防干涉策略，并根据功能陶瓷后处理（如脱脂、烧结及原位转化）过程中的体积收缩率，在数据模型中预设三维尺寸的补偿裕度。

### 6.4 制造过程

#### 6.4.1 环境控制

成形室应具备温湿度控制或监控功能，以防止多孔功能陶瓷生坯在打印过程中因溶剂挥发速率不当而导致局部开裂或变形。对于需要控温挤出的材料体系，喷头区和供料区温度控制误差宜不超过  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对于常温浆料体系，设备宜具备防沉降、防析液或间歇搅拌功能。

#### 6.4.2 协同打印

多喷头工作时，各挤出单元的启停响应延迟应处于设备规定的公差范围内，以保证多路出丝接缝处的成形质量。打印前应进行喷头间坐标偏差、出料同步性和线宽一致性校准。校准后，喷头间轨迹错位应不大于  $0.30\text{ mm}$ 。

### 6.5 成形控制

打印过程中应监控以下参数：

- a) 挤出压力或推进速度；
- b) 打印速度；
- c) 层高；
- d) 线宽；
- e) 平台状态；
- f) 喷头工作状态；
- g) 视觉识别状态。

### 6.6 生坯质量

生坯应层间结合完整，不应出现明显塌陷、断线、缺料、严重翘曲和喷头拉扯缺陷；对大尺寸或高孔隙率构件，宜采用分区干燥、梯度干燥或辅助支撑措施。

## 6.7 后处理规范

### 6.7.1 干燥阶段

生坯干燥应在受控的温湿度程序下进行，避免由于内应力释放过快产生宏观裂纹。

### 6.7.2 脱脂与转化阶段

原位化学转化及烧结过程应根据功能陶瓷材料的热力学特性，制定严谨的温度梯度曲线及气氛控制程序，确保有机物相充分脱除及目标晶相的完整转化。

## 7 成品性能要求

### 7.1 装备运行要求

设备应运行稳定，控制系统应具备参数设定、调用、报警、存储和导出功能；连续工作 8 h 内不应出现影响正常成形的系统性故障。

### 7.2 制件尺寸偏差与孔隙率

经烧结或转化后的整体式功能陶瓷制品，其宏观结构应无明显缺陷。几何孔隙率实测值与设计值的绝对偏差宜不大于 $\pm 5.0\%$ ；开口孔隙率按 GB/T 1966-2024 测定，具体指标由供需双方确定。

### 7.3 力学性能

作为催化剂或载体使用的多孔陶瓷制品，应具备承受工业反应器装填压力的力学强度。除非供需双方另有协议规定，制品的室温抗压强度基础指标应不低于 20.0 MPa。

### 7.4 功能性能

对催化、吸附、过滤或传质制件，可根据应用需求检验以下一项或多项（具体指标由供需双方协商确定）：

- 比表面积；
- 压降；
- 通量；
- 催化转化率；
- 热震稳定性；
- 耐腐蚀性；
- 使用寿命。

## 8 试验方法

### 8.1 喷头数量检查

采用设计图样、设备配置清单和现场核查相结合的方法进行。

### 8.2 成形幅面测定

采用量具测量设备有效成形区域的 X、Y、Z 方向尺寸。



### 8.3 位置精度测定

在空载条件下按设备控制系统设定多个标准点位，采用分辨率不低于 0.01 mm 的量测装置测定实际位置与设定位置之间的偏差。

### 8.4 流量波动偏差率测定

功能陶瓷多喷头材料挤出装备流量波动偏差率测定应满足下列要求。

- a) 流量波动偏差率采用称质量法测定，测试方法按附录 A 执行。
- b) 测试时，应采用同一种测试浆料，在相同喷嘴直径、相同挤出参数和相同测试时间条件下，使各喷头连续挤出规定时间，分别称量各喷头挤出物料质量，并换算为单位时间挤出量，计算流量波动偏差率。
- c) 对于不同材料体系或不同密度浆料，不宜直接采用质量流量进行横向比较，应按 8.9 进行成形线宽测试。

### 8.5 浆料流变性能测试

剪切黏度按照 GB/T 45765 的规定执行测试；zeta 电位按 GB/T 44149 执行；非水体系可采用等效方法测试。

### 8.6 孔隙率测试

孔隙率的测定应按照 GB/T 1966-2024 的规定执行测试（或采用压汞法测定）。

### 8.7 力学性能测试

抗压强度的测试应按照 GB/T 1964 的规定执行测试。对异形制件，可采用等效试样替代测试。

### 8.8 外观与结构检测

外观质量采用目视检查。内部缺陷和孔道尺寸可采用显微镜、工业 CT 或三维扫描方法检测。

### 8.9 成形线宽测试

功能陶瓷多喷头材料挤出成形线宽测试应满足以下要求：

- a) 成形线宽测试应在设备稳定运行状态下进行，测试方法参照附录 B 执行。
- b) 测试前应完成喷头坐标校准、喷嘴清洁和预挤出。测试用浆料、喷嘴直径、层高、打印速度、挤出压力或推进速度等参数应与实际工艺参数一致，并在测试记录中注明。
- c) 各喷头应分别打印长度不小于 50 mm 的单道直线，每个喷头至少打印 3 条测试线。待打印线条稳定成形后，采用光学显微镜、工业相机、游标卡尺或其他分辨率不低于 0.01 mm 的测量装置测量线宽。每条测试线沿长度方向均匀选取不少于 3 个测量点，计算平均打印线宽，并计算成形线宽相对偏差。
- d) 除供需双方另有约定外，成形线宽相对偏差应不大于  $\pm 15.0\%$ 。

### 8.10 功能性能测试

对催化剂及载体类产品，可按应用场景进行压降、通量、热震和催化性能测试；测试条件应在合同或技术协议中明确。

## 9 检验规则

## 9.1 检验分类

检验分为出厂检验和型式检验。

## 9.2 出厂检验

9.2.1 每台装备出厂前应由制造厂质量检验部门逐台进行检验。出厂检验项目至少应包括：

- a) 装备外观及安全性能检查；
- b) 运动轴重复定位精度测试；
- c) 流量波动偏差率测试（见附录 A）；
- d) 成形线宽测试（见附录 B）。

9.2.2 各项检验合格后方可出厂，并应附有产品合格证。

## 9.3 型式检验

有下列情况之一时，应进行型式检验：

- a) 新产品或老产品转厂生产的试制定型鉴定；
- b) 正式生产后，如结构、材料、控制系统有较大改变，可能影响产品性能时；
- c) 正常生产时，每满两年或停产半年以上恢复生产时；
- d) 出厂检验结果与上次型式检验有较大差异时。

## 10 标志、包装、运输、贮存和技术文件

### 10.1 标志

设备或产品应包含但不限于下列标志：

- a) 名称；
- b) 型号；
- c) 生产单位；
- d) 出厂编号；
- e) 生产日期；
- f) 主要技术参数；
- g) 安全警示标识。

### 10.2 包装

设备包装应符合 JB/T 8356 的规定；易损部件、喷头组件、视觉系统和控制系统应采取防震、防潮、防尘措施。

### 10.3 运输

运输过程中应防止剧烈冲击、雨淋和倒置。含精密光学、视觉或控制部件的设备应使用防震材料（如泡沫、橡胶垫）填充包装空隙；包装箱外部应加盖防雨篷布或使用密封防水包装；运输车辆应平稳行驶，避免急刹车和剧烈颠簸。

### 10.4 贮存

设备应存放于干燥、通风、无腐蚀性气体环境中；材料应按其特性分类密封储存，并防潮、防光照、防沉降。



### 10.5 技术文件

交付时，应提供包括但不限于以下文件：

- a) 产品合格证；
- b) 使用说明书；
- c) 关键零部件清单；
- d) 检验报告；
- e) 维护保养说明；
- f) 软件及参数备份说明；
- g) 安全防护说明。

中国机械工程学学会标准征求意见稿

## 附录 A

## (规范性附录)

## 多喷头动态挤出流量波动偏差率测定方法

## A.1 测试原理

在规定工况下，通过称量多喷头设备连续挤出规定时间内的物料质量，换算为单位时间挤出量，以评价多喷头之间的流量一致性。

## A.2 测试设备与材料

测试设备与材料包括下列内容：

- a) 待测功能陶瓷多喷头挤出成形装备。
- b) 精度不低于 0.01 g 的电子天平。
- c) 盛料容器（如称量纸或玻璃皿）。
- d) 供需双方认可的同一种测试浆料。

## A.3 测试步骤

测试步骤如下：

- a) 开启装备并进行系统初始化，确保供料系统和挤出系统处于稳定状态。
- b) 检查各喷头状态，确认喷嘴无堵塞、无明显残料和异常漏料。
- c) 设定装备在规定工况下运行，包括喷嘴直径、挤出压力或推进速度、打印速度等参数。
- d) 进行预挤出，待各喷头出料稳定后开始测试。
- e) 使多喷头连续挤出 60 s，用电子天平分别收集并称量各喷头在规定时间内的挤出质量。
- f) 每个喷头至少重复测试 3 次，取其算术平均值作为该喷头的实测挤出质量。

## A.4 结果计算

## A.4.1 平均实测挤出质量

第 i 个喷头的平均实测挤出质量按式(A.1) 计算：

$$m_i = \frac{m_{i1} + m_{i2} + \dots + m_{ir}}{r} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中：

- $m_i$  ——第 i 个喷头的平均实测挤出质量，单位为克(g)；  
 $m_{ir}$  ——第 i 个喷头第 r 次测试的挤出质量，单位为克(g)；  
 $r$  ——重复测试次数。

## A.4.2 单位时间挤出量

第  $i$  个喷头的单位时间挤出量按式(A.2)计算:

$$q_i = \frac{m_i}{t} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

$q_i$ ——第  $i$  个喷头的单位时间挤出量, 单位为克每秒(g/s);

$m_i$ ——第  $i$  个喷头的平均实测挤出质量, 单位为克(g);

$t$  ——测试时间, 单位为秒(s)。

#### A. 4. 3 平均单位时间挤出量

多喷头平均单位时间挤出量按式(A.3)计算:

$$q_{bar} = \frac{q_1 + q_2 + \dots + q_n}{n} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

$q_{bar}$ ——多喷头平均单位时间挤出量, 单位为克每秒(g/s);

$n$  ——参与测试的喷头数量。

#### A. 4. 4 流量波动偏差率

流量波动偏差率按式(A.4)计算:

$$\delta q = \frac{\max |q_i - q_{bar}|}{q_{bar}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

式中:

$\delta q$ ——流量波动偏差率(%);

$q_i$  ——第  $i$  个喷头的单位时间挤出量, 单位为克每秒(g/s);

$q_{bar}$  ——多喷头平均单位时间挤出量, 单位为克每秒(g/s)。

#### A. 5 合格判定

除供需双方另有约定外, 流量波动偏差率 $\delta q$ 应不大于 5.0%。

对于不同材料体系或不同密度浆料的多材料打印, 不宜直接采用质量流量进行横向比较, 应结合成形线宽、界面质量和成形连续性进行评价。

附 录 B  
(规范性附录)  
成形线宽测试方法

B.1 测试原理

在规定工艺条件下，使各喷头分别打印单道直线，通过测量实际打印线宽，评价实际打印线宽与设计线宽之间的偏差。

B.2 测试设备与材料

测试设备与材料包括下列内容：

- a) 待测功能陶瓷多喷头材料挤出增材制造装备。
- b) 供需双方认可的测试浆料。
- c) 平整基板。
- f) 光学显微镜、工业相机、游标卡尺或其他线宽测量装置，分辨率不低于 0.01 mm。

B.3 测试步骤

测试步骤如下：

- a) 测试前完成喷头坐标校准、喷嘴清洁和预挤出。
- b) 设定测试用浆料、喷嘴直径、层高、打印速度、挤出压力或推进速度等工艺参数。
- c) 各喷头分别打印长度不小于 50 mm 的单道直线。
- d) 每个喷头至少打印 3 条测试线。
- e) 待打印线条稳定成形后，采用测量装置测量打印线宽。
- f) 每条测试线沿长度方向均匀选取不少于 5 个测量点，计算平均打印线宽。

B.4 结果计算

B.4.1 平均打印线宽

第  $i$  个喷头的平均打印线宽按式 (B.1) 计算：

$$w_i = \frac{w_{i1} + w_{i2} + \dots + w_{im}}{m} \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

- $w_i$  ——第  $i$  个喷头的平均打印线宽，单位为毫米 (mm)；
- $w_{im}$  ——第  $i$  个喷头第  $m$  个测量点的打印线宽，单位为毫米 (mm)；
- $m$  ——测量点数量。

B.4.2 成形线宽相对偏差

成形线宽相对偏差按式（B.2）计算：

$$\mathit{delta}_{w_i} = \frac{w_i - w_0}{w_0} \times 100\%$$

..... (B.2)

式中：  
 $\mathit{delta}_{w_i}$ ——第 i 个喷头的成形线宽相对偏差（%）；  
 $w_i$ ——第 i 个喷头的平均打印线宽，单位为毫米（mm）；  
 $w_0$ ——设计线宽，单位为毫米（mm）。

B.5 合格判定

除供需双方另有约定外，成形线宽相对偏差应满足： $\mathit{delta}_{w_i} \leq 15\%$

中国机械工程学会标准征求意见稿