



中华人民共和国国家标准

GB/T XXXXX—XXXX

3D 打印电路用固化银浆

Curable silver paste for 3D-printed circuits

文稿版次选择

(本稿完成日期：20260805)

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

国家市场监督管理总局

国家标准化管理委员会

发 布

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。

本文件针对3D打印导电银浆的材料、打印工艺和固化后性能建立专用试验体系，便于不同设备和基材条件下的质量评价。

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专利的责任。

本文件由中国有色金属工业协会提出。

本文件由全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）归口。

本文件起草单位：西北大学、贵研电子科技有限公司、芯体素（杭州）科技发展有限公司、北京科技大学、京东方科技集团股份有限公司、西安宏星电子浆料有限责任公司、北京京东方创元科技有限公司、西安瑞特三维科技有限公司、中国有研科技集团有限公司、西北有色金属研究院、西安振博蓝桥科技有限公司、陕西科技大学、深圳芯源新材料有限公司、桐柏泓鑫新材料有限公司、宁夏中色新材料有限公司、北京中科纳通电子技术有限公司、西安凯立新材料股份有限公司、中国地质大学、西安瑞特三维科技有限公司。

本文件主要起草人：[根据实际情况填写]。

3D 打印电路用固化银浆

1 范围

本文件规定了3D打印电路用固化银浆（以下简称“银浆”）的产品分类、技术要求、试验方法、检验规则以及标志、包装、运输、贮存、随行文件和订货单内容。

本文件适用于采用直写沉积（含微笔直写、压电阀喷射）、喷墨打印等增材制造技术，在柔性基材（如PI、PET）或刚性基材（如玻璃、 Al_2O_3 陶瓷、 Si_3N_4 、FR-4）上形成电路图形或三维互连导电结构，并通过热、光等方式固化的导电浆料。

采用电流体喷墨（Electrohydrodynamic Inkjet, EHD）、气溶胶喷印（Aerosol Jet, AJ）或激光转印（Laser-Induced Forward Transfer, LIFT）等其他3D打印技术的导电银浆可参照执行；选择性激光烧结属于后端烧结工艺，不作为本文件的打印技术分类。

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 2423.3—2016 环境试验 第2部分：试验方法 试验Cab：恒定湿热试验

GB/T 8170—2008 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB/T 17472—2022 微电子技术用贵金属浆料规范

GB/T 17473—2025 电子浆料性能试验方法 导体浆料测试

GB/T 9286—2021 色漆和清漆 划格试验

GB/T 5210—2022 色漆和清漆 拉开法附着力试验

SJ/T 11512—2015 集成电路用电子浆料性能试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1 3D 打印电路用固化银浆 Curable silver paste for 3D-printed circuits

由导电粉体、有机载体和功能添加剂等组成，适用于直写沉积（Direct-Write Deposition，DW；包括微笔直写 MicroPen DIW、压电阀喷射等）、喷墨打印（Inkjet Printing）等增材制造工艺，用于在各类基材上直接打印形成电路图形或三维互连导电结构的浆状材料。

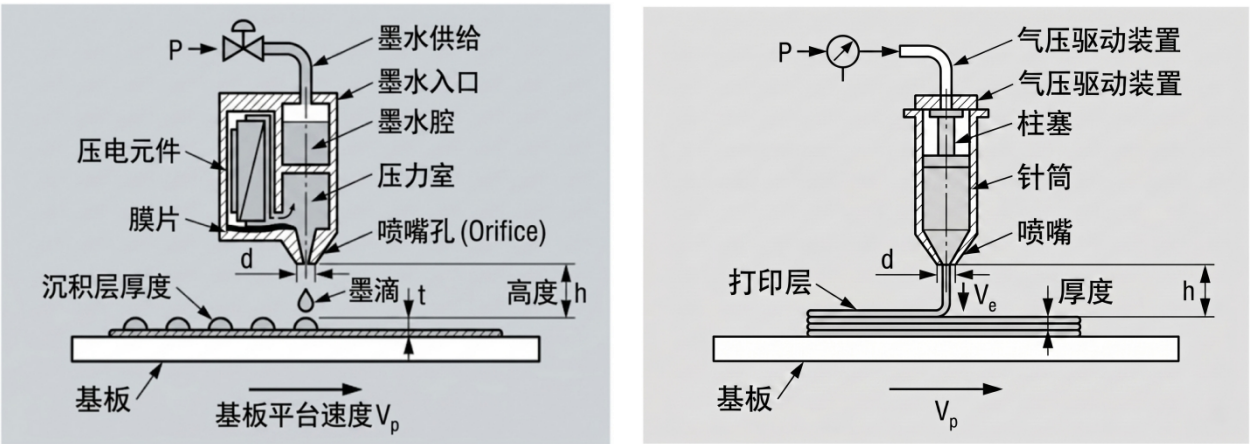


图1 打印平台

3.2 气泡率 Bubble-Induced Defect Rate

在规定的设备和工艺参数下连续打印时，经确认由浆料中气泡引起缺陷的打印线路数与打印线路总数的比率。

3.3 打印适应性 Printability

浆料与特定3D打印设备、工艺参数相匹配，能够稳定、连续地打印出符合设计要求的精细图形的能力。通常包括可打印性、成型精度、堵头概率等评价维度。

3.4 体积电阻率 Volume Resistivity

均匀导体的电阻与其横截面积的乘积和导体长度的比值。

3.5 触变指数 Thixotropic Index

浆料在低剪切速率下的黏度与在高剪切速率下的黏度之比值，表征浆料的触变性，影响其打印过程中的挤出性和成型保持性。

3.6 打印线路结合强度 Bonding Strength of Printed Lines

打印线路与指定基材之间，或多层打印结构中相邻打印层之间抵抗分离的能力。

3.7 固化 Curing

通过加热、光照或其他能量输入，使浆料形成具有稳定形状和功能性能的固体线路的过程。

3.8 直写打印 Direct Ink Writing (DIW)

采用微笔或细喷嘴连续挤出浆料并按预定路径沉积成形的直写沉积方法。

3.9 喷墨打印 Inkjet Printing

按需将离散液滴从喷头喷出并沉积到基材上形成图形的非接触式打印方法。

3.10 非平面电路 Non-Planar Circuit

导电路路沿具有曲率、台阶或其他高度变化的三维表面形成的电路。

3.11 双八五老化 85 °C/85 % RH Ageing

在温度85 °C、相对湿度85 %的恒定湿热条件下，对试样进行规定时间的老化试验。

3.12 打印线宽精度 Line Width Accuracy

打印线路实际线宽与设计线宽之间的符合程度，通常以线宽偏差或最小可打印线宽表示。

3.13 剪切流变特性 Shear Rheological Behavior

浆料黏度随剪切速率变化的特性，用于评价供料、喷射或挤出过程中的流动稳定性。

4 产品分类与牌号

4.1 分类原则

浆料按以下方式进行分类：

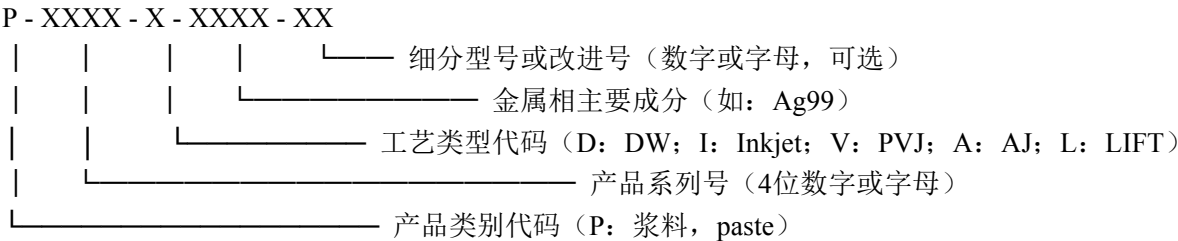
4.1.1 按主要打印工艺：直写沉积浆料；喷墨打印浆料。

4.1.2 按适用基材类型：柔性基材用；刚性基材用；通用型。

4.1.3 按固化方式：热固化；光固化（包括紫外光、可见光、近红外光或激光固化）；复合固化。

4.1.4 按基材材质：树脂基材、玻璃基材、陶瓷基材、硅片基材及其他基材。硅片基材应同时记录晶相（单晶或多晶）、厚度和体积电阻率。

4.2 牌号表示方法



示例1：P-1001-D-Ag99-01表示直写沉积用、银含量≥99 %的互连导电浆料，系列号为1001，细分型号为01。

示例2：P-2001-I-Ag70-UV表示喷墨打印用、银含量≥70 %的紫外光固化互连导电浆料，系列号为2001。

5 技术要求

5.1 外观质量

浆料应为色泽均匀、状态稳定的流体，无结皮、无凝胶、无外来夹杂物。在（23±2）℃下目视观察，应无可见的相分离或沉淀结块。

5.2 浆料的物理化学性能应符合表 1 规定。

表 1 3D 打印电路用固化银浆物理化学性能要求

序号	性能项目	单位	指标要求	试验方法
1	银含量	%	≥50.0（直写打印） ≥20.0（喷墨打印）	GB/T 17473—2025 第 11 章
2	细度	μm	≤15.0（直写打印） ≤5.0（喷墨打印）	GB/T 17473—2025 第 8 章
3	黏度（25℃）	mPa·s	直写打印：100～50000（1 s ⁻¹ ） 喷墨打印：100～50000（1 s ⁻¹ ）；	GB/T 17473—2025 第 9 章
4	气泡率	‰	≤0.1（直写打印） ≤1.0（喷墨打印）	附录 C
5	触变指数（TI）	—	1.5～15.0（直写打印） 1.0～1.30（喷墨打印）	GB/T 17473—2025 第 9 章（9.3.3）
6	打印分辨率	mm	≤0.05（喷墨打印） ≤0.30（直写打印）	GB/T 17473—2025 第 13 章
7	附着力等级（对指定基材）	—	≥4B	GB/T 17473—2025 第 15 章

8	层间结合强度	N	≥4.0（多层打印结构）	附录 A
9	体积电阻率	μΩ·cm	≤25.0（热烧结，≥150℃）	附录 B
10	环境可靠性（85℃/85%RH，500 h）	—	体积电阻率变化率≤±20% 附着力保持率≥80%	GB/T 2423.3—2016、附录 D

注 1：以上指标为通用要求，针对特定应用场景的浆料，其性能指标可由供需双方协商确定。

注 2：黏度测试的剪切速率应根据浆料类型选择代表性值。

注 3：剪切流变特性应结合具体打印技术、打印头或喷嘴孔径、基材温度和供料方式评价；表 1 中的黏度和触变指数范围为通用建议值，最终指标应经打印工艺验证。

6 试验方法

6.1 试验环境条件

除非另有规定，所有试验应在下列标准大气条件下进行：

- a) 温度：23℃±2℃；
- b) 相对湿度：50%±10%；
- c) 大气压力：86 kPa~106 kPa。

试验前，浆料及试样应按相应试验方法达到温度平衡；无特别规定时，状态调节不少于2 h，仲裁试验不少于24 h。

打印试验应记录打印技术、打印头或喷嘴孔径、喷头与基材间距、基材温度、气压或驱动波形、打印速度及层高等参数。压电喷墨喷头间距宜为0.5 mm~3 mm；微笔直写喷头间距宜参照喷嘴内径d，推荐约为d/2。

6.2 外观质量

取适量浆料置于洁净的玻璃板上，用刮刀薄薄展开，在自然光或等效光源下目视检查。

6.3 固体含量

固体含量按照GB/T 17473—2025第11章的规定进行测定。对于紫外光固化或低温固化浆料，应按产品规定的固化条件处理至恒重。

6.4 细度

细度按照GB/T 17473—2025第8章的规定进行测定。

6.5 黏度

黏度按照GB/T 17473—2025第9章的规定，在25℃下测定指定剪切速率下的黏度。优先采用旋转流变仪；来料检验可采用经相关性确认的旋转黏度计，并应报告仪器型号、转子、转速或剪切速率和测试时间。

6.6 气泡率

气泡率按照附录C的规定进行测定。

6.7 触变指数

触变指数按照GB/T 17473—2025第9章（9.3.3）的规定进行计算。

6.8 体积电阻率

体积电阻率按照附录B的规定进行测定。

6.9 打印线路结合强度

打印线路与指定基材的结合强度按GB/T 9286—2021划格法测定；必要时按GB/T 5210—2022拉开法测定。打印线路层间结合强度按照附录A的规定进行测定。

6.10 打印线宽精度（最小线宽）

打印线宽精度（最小线宽）按照GB/T 17473—2025第13章的规定进行测定。

6.11 环境可靠性

环境可靠性按照 GB/T 2423.3—2016 和附录 D 的规定进行双八五老化试验。

6.12 其他项目

本文件未规定的其他电子浆料性能项目，可按SJ/T 11512—2015或由供需双方商定的方法进行试验。

7 检验规则

7.1 检查和验收

7.1.1 浆料应由供方质量检验部门进行检验，保证产品质量符合本文件及订货单的规定，并填写随行文件。

7.1.2 需方应对收到的产品按本文件的规定进行检验。如检验结果与本文件规定不符，应在收到产品之日起一个月内（或按合同约定）向供方提出，由供需双方协商解决。如需仲裁，应在需方保留的样品中或双方共同取样。

7.2 组批

浆料应成批提交验收。每批应由同一混合设备、同一批次原材料、连续生产的同一牌号浆料组成。每批重量不得超过 100 kg，或按一个生产班次产量组批。

7.3 检验项目及取样

检验分为出厂检验和型式检验。取样前应将浆料样品充分搅拌均匀。

7.3.1 出厂检验项目：外观质量、固体含量、细度、黏度、气泡率、触变指数、体积电阻率、打印线路与基材结合强度。

7.3.2 型式检验项目：本文件第 5 章规定的全部项目。型式检验在正常生产时每半年进行一次，或

在原材料、工艺有重大改变时进行。

取样方法按表 2 规定。

表 2 检验项目及取样方法

检验类别	检验项目	取样方法	要求章条号	试验方法章条号
出厂检验	外观质量	每瓶检查	5.1	6.2
	固体含量	随机抽取一瓶，搅拌均匀后， 取样约 2g	5.2	6.3
	细度	同上	5.2	6.4
	黏度	同上，取样量依据流变仪要求	5.2	6.5
	气泡率	随机抽取一瓶，按产品规定处理后， 取样量应满足连续打印 10000 条线路的需要	5.2	6.6
	触变指数	同上，取样量依据流变仪要求	5.2	6.7
	体积电阻率	同上，取样量依据打印需求	5.2	6.8
	打印线路与基材 结合强度	同上，取样量依据打印需求	5.2	6.9
型式检验	打印线宽精度 (最小线宽)	同出厂检验取样方法	5.2	6.10
	打印线路层间结 合强度	同出厂检验取样方法	5.2	6.9
	环境可靠性	同出厂检验取样方法	5.2	6.11

7.4 检验结果的判定

7.4.1 外观质量：逐瓶检验，如有不合格，则判该瓶不合格。

7.4.2 物理化学性能：

a) 出厂检验项目中，如有一项不合格，允许从该批产品中加倍取样对不合格项进行复验。若复验结果合格，则判该批产品合格；若复验结果仍不合格，则判该批产品不合格。

b) 型式检验项目中，如有任一项目不合格，则判该次型式检验不合格。供方应查明原因，采取措施后重新进行型式检验。

8 标志、包装、运输、贮存

8.1 标志

8.1.1 产品标志：每个浆料包装瓶上应贴有牢固的标签，标明：

- a) 供方名称、商标及地址；
- b) 产品名称、执行标准编号；
- c) 产品牌号、批号；
- d) 净重、毛重；
- e) 生产日期、保质期；
- f) 推荐的贮存条件（如：2℃～8℃，冷藏、密封、避光，不应冷冻）；
- g) 安全警示说明（如：避免吸入、皮肤接触等）。

8.1.2 包装箱标志：外包装箱上应标明：

- a) 产品名称及牌号；
- b) 供方名称；
- c) 批号及数量；
- d) 包装日期；
- e) "小心轻放"、"防潮"、"防热"、"向上"等图示或文字。

8.2 包装

8.2.1 浆料应使用不与内容物发生反应的密闭容器（如塑料针筒、玻璃瓶、金属软管）包装，并确保密封良好，防止溶剂挥发和污染物进入。

8.2.2 内包装容器应固定于具有缓冲作用的包装材料内，再置于外包装箱中。

8.3 运输

8.3.1 运输过程中应防止日晒、雨淋、重压和剧烈碰撞。

8.3.2 严禁与易燃、易爆、易腐蚀物品混装运输。

8.4 贮存

8.4.1 银浆应在 2℃～8℃、清洁、干燥、避光的条件下冷藏、密封贮存，远离热源和火种。冷冻保存（通常指≤-18℃）不适用于本产品，不应冷冻。使用前应保持包装密封，待浆料温度恢复至 23℃±2℃后再开封，以避免冷凝水进入。

8.4.2 在规定的贮存条件下，自生产之日起，浆料的保质期一般为 6 个月。超过保质期后，使用前应重新检验，合格后方可使用。

9 随行文件

- a) 每批浆料应附有产品合格证，内容包括：
- b) 供方名称；
- c) 产品名称和牌号；
- d) 批号；
- e) 净重；

- f) 各项检验结果和检验部门印章;
- g) 本文件编号;
- h) 生产日期;
- i) 检验员签章。

10 订货单内容

需方可根据自身需要，在订购本文件所列浆料的订货单内，列出以下内容：

- a) 产品名称;
- b) 产品牌号;
- c) 产品主要技术指标要求（可引用本文件或另行约定）;
- d) 产品重量及包装规格;
- e) 本文件编号;
- f) 特殊的包装、运输要求;
- g) 其他双方商定的技术或服务要求。

附录 A（规范性）

3D 打印电路用固化银浆打印线路层间结合强度的测定

A.1 适用性

本附录适用于测定 3D 打印电路用固化银浆多层打印结构的层间结合强度。

A.2 方法原理

采用 Z 型试样拉伸法测定层间结合强度，记录层间分离时的破坏力，并观察和记录失效模式。

A.3 仪器设备

A.3.1 万能材料试验机

a) 量程：0 N～100 N；

b) 力值精度：±0.5 %或±0.1 N，取较大值；

c) 位移分辨率：0.01 mm；

d) 速度控制范围：0.1 mm/min～500 mm/min，精度±1 %。

A.3.2 3D 打印设备

直写沉积系统：最小挤出头孔径 ≥ 15 μm，运动定位精度 ±5 μm，压力控制精度 ±1 kPa。

喷墨打印系统：墨滴体积 1 pL ～ 30 pL，重复定位精度 ±2 μm。

A.3.3 试样固定装置：应能可靠固定 Z 型试样，且不应引入附加弯曲或滑移。

A.3.4 光学显微镜：放大倍数 50 倍～1000 倍，带图像分析系统。

A.4 试验步骤

A.4.1 环境条件

试验环境温度为 23 ℃ ± 2 ℃，相对湿度为 50 % ± 10 %，试样应在该环境下状态调节不少于 24 h。

A.4.2 试样制备

层间结合强度试样：打印 Z 型结构，第二层以悬臂梁形式打印在第一层上。

A.4.3 层间结合强度测定

将 Z 型试样固定在拉力试验机上。

以恒定速度（10 mm/min）加载直至层间分离。

记录最大载荷（N）。

A.4.4 失效模式记录

立即取下试样，在显微镜下观察破坏面，判定失效模式。

A.5 试验数据处理

A.5.1 平均破坏力计算

打印线路层间结合强度以平均破坏力表示，按式（A.1）计算：

$$\bar{F} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n} \quad (\text{A.1})$$

式中：

$\bar{F}$ ——平均破坏力，单位为牛顿（N）；

F_i ——第 i 次有效试验的破坏力，单位为牛顿（N）；

n——有效试验次数。

计算结果按 GB/T 8170 的规定修约至小数点后两位。

A.5.2 结果表示

层间结合强度以平均破坏力表示，单位为牛顿（N）。

A.5.3 失效模式判定

统计各类失效模式的数量与百分比，包括：

A 类（层间界面破坏）

B 类（混合破坏）

C 类（内聚破坏）

D 类（层间剥离）

A.6 试验报告

试验报告应至少包含以下信息：

- a) 本文件编号；
- b) 浆料的完整信息：名称、牌号、型号、批号、生产厂家；
- c) 基材的详细信息：类型、材质、厚度、表面处理状态；
- d) 3D 打印工艺参数：设备型号、打印技术、打印速度、层高、固化条件；
- e) 测试环境条件：温度、湿度；
- f) 测试结果：层间结合强度和失效模式统计；
- g) 典型破坏面的显微镜照片；
- h) 异常现象、试验日期及测试人员和审核人员签名。

附录 B（规范性）

3D 打印电路用固化银浆非平面电路固化后体积电阻率的测定

B.1 适用性

本附录适用于测定 3D 打印电路用固化银浆在具有连续曲率的非平面基材上形成导电路径并固化后的体积电阻率。

B.2 方法原理

在具有标准半圆柱凸台的绝缘非平面基材上，打印一条横跨凸台且截面均匀的连续导电路径。采用四端法测量两电压端之间的电阻，以消除测量引线 and 接触电阻的影响；同时测量该区间内导电路径沿基材表面的实际路径长度、平均宽度和平均厚度，按式（B.1）计算体积电阻率。

B.3 试验条件

B.3.1 环境条件

试验环境温度为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 $50\%\pm 10\%$ 。试样和测量仪器应在该环境下达到温度平衡。

B.3.2 标准非平面基材

a) 基材应为绝缘材料，其耐温性应满足浆料的固化条件；同一组比较试验应使用材料、表面处理和几何尺寸相同的基材；

b) 基材中部应设置一个轴线与打印线路垂直的半圆柱凸台，凸台截面半径 r 为 $(5.00\pm 0.05)\text{ mm}$ ，凸台长度不少于 15 mm ；

c) 凸台两侧应各保留不少于 20 mm 的平直表面；基材测量区表面粗糙度 R_a 应不大于 $1.0\text{ }\mu\text{m}$ 。

B.3.3 试样数量

每组试验应制备不少于 6 件有效试样。

B.4 仪器设备

B.4.1 四端直流低电阻测量仪：测量误差不大于 $\pm 0.5\%$ ，分辨力应满足试样电阻值的测量要求。

B.4.2 四端测量夹具：电流端和电压端应能分别与图 B.1 所示电极稳定接触，且不应使试样发生弯曲或损伤。

B.4.3 三维光学轮廓仪：垂直分辨力不大于 $1\text{ }\mu\text{m}$ ，水平分辨力不大于 $5\text{ }\mu\text{m}$ ，应能获取导电路径的三维轮廓和沿曲面的路径长度。

B.4.4 光学显微镜：应能检查导电路径的连续性、边缘完整性及裂纹、缺口和分层等缺陷。

B.4.5 固化设备：温度、光强或其他工艺参数应满足浆料规定的固化条件，并应具备相应的温度或光强监控和定时功能。

B.5 试样制备

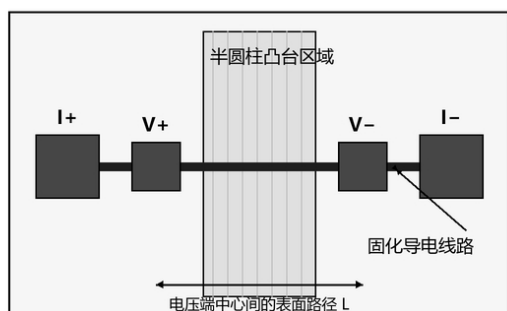
B.5.1 基材预处理

按产品规定的方法清洁基材；无规定时，用无水乙醇擦拭基材表面，去除油污和粉尘，干燥后备用。

B.5.2 测试图案

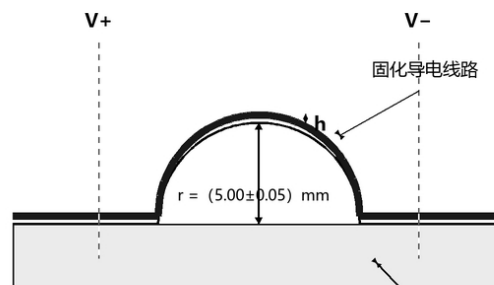
测试图案应采用图 B.1 所示的四端式直线结构。

a) 俯视图



外侧电流端 I+/I-; 内侧电压端 V+/V-
设计线宽 $b = (1.00 \pm 0.05) \text{ mm}$

b) 沿线路中心剖面图



$L = l_1 + \pi r + l_2$ (名义值); 以三维轮廓实测值为准
电压端中心至曲面切点的平直段 $l_1 = l_2 = (10.0 \pm 0.1) \text{ mm}$

图 B.1 四端法非平面体积电阻率测试图案

- 导电路径应沿基材表面连续横跨半圆柱凸台，设计线宽 b 为 $(1.00 \pm 0.05) \text{ mm}$;
- 两电压端应对称布置在凸台两侧的平直区，电压端中心至相邻曲面切点的水平距离 l_1 和 l_2 均为 $(10.0 \pm 0.1) \text{ mm}$;
- 两电压端中心间沿基材表面的名义路径长度为 $L = l_1 + \pi r + l_2$ ，实际计算应使用三维光学轮廓仪的实测值;
- 两电流端应设置在电压端外侧，电流端与相邻电压端中心距离不少于 10 mm ; 电流端和电压端的有效接触区域应不小于 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。

B.5.3 打印与固化

- 按产品规定对浆料进行回温、搅拌和装料，不应为改善打印性能而额外稀释浆料;
- 使用与浆料相适配的 3D 打印设备，按图 B.1 连续打印导电路路和四个电极; 线路横跨凸台时不应中断或重复起笔;
- 按产品规定的条件固化试样。用于产品间比较时，固化条件应保持一致;
- 固化后，试样应在 $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $50 \% \pm 10 \%$ 的环境下状态调节不少于 2 h 。

B.6 测量

B.6.1 外观检查

用光学显微镜检查电压端之间的导电路路。如存在断线、贯穿性裂纹、明显分层或露出基材的缺口，该试样无效，应重新制备。

B.6.2 电阻测量

- 将四端测量夹具的两个电流端分别接到试样的 I+ 和 I- 电极，两个电压端分别接到 V+ 和 V- 电极的中心位置;
- 选择适当的测量电流，使测量过程中试样的温升不大于 $1 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 分别在正、反两个电流方向下各测量 3 次，取 6 次读数的算术平均值作为该试样的电阻 R 。

B.6.3 几何尺寸测量

- 路径长度 L : 沿导电路路中心线扫描三维轮廓，计算 V+ 和 V- 电极中心之间沿基材表面的实际路径长度，精确至 0.01 mm ;
- 线宽 b 和膜厚 h : 在两电压端之间选取 7 个截面进行测量，其中凸台两侧的平直段各 2 个截面，曲面段在两侧 45° 位置及顶部各取 1 个截面;

c) 膜厚应以导电路表面轮廓与相应位置基材表面轮廓的法向距离表示；分别计算 7 个截面的线宽和膜厚算术平均值；

d) 任一截面的线宽或膜厚与其平均值的偏差绝对值超过 10 % 时，该试样无效，应重新制备。

B.7 试验数据处理

B.7.1 体积电阻率计算

体积电阻率按式 (B.1) 计算：

$$\rho = \frac{Rbh}{L} \quad (\text{B.1})$$

式中：

ρ ——体积电阻率，单位为欧姆毫米 ($\Omega \cdot \text{mm}$)；

R ——两电压端之间的四端法电阻平均值，单位为欧姆 (Ω)；

b ——电压端之间导电路的平均线宽，单位为毫米 (mm)；

h ——电压端之间导电路的平均膜厚，单位为毫米 (mm)；

L ——两电压端中心之间沿基材表面的实际路径长度，单位为毫米 (mm)。

B.7.2 结果表示

分别计算每件有效试样的体积电阻率，取不少于 6 件试样测定结果的算术平均值作为最终结果，并报告标准偏差。数值修约按 GB/T 8170 的规定执行。

B.8 试验报告

试验报告应至少包括以下内容：

- a) 本文件编号；
- b) 浆料名称、牌号、批号和固化条件；
- c) 基材材料、凸台半径和表面处理状态；
- d) 打印设备及打印速度、压力或驱动波形、层高等工艺参数；
- e) 每件试样的 R 、 L 、 b 、 h 和体积电阻率；
- f) 体积电阻率的算术平均值和标准偏差；
- g) 异常现象、试验日期和试验人员。

附 录 C（规范性）

3D 打印电路用固化银浆气泡率的测定

C.1 适用性

本附录适用于通过连续打印线路，测定 3D 打印电路用固化银浆的气泡率。

C.2 方法原理

在规定的打印设备和工艺参数下，连续打印 10 000 条线路，统计经确认由气泡导致缺陷的线路数，计算气泡率。

C.3 仪器设备

- a) 3D 打印设备：应与待测浆料的推荐打印工艺相匹配，并具备连续打印 10 000 条线路的能力。微笔直写试验采用喷嘴内径（ 0.30 ± 0.01 ）mm；喷墨或气溶胶喷印应记录喷孔等效直径。
- b) 基材：采用产品规定或供需双方约定的基材；
- c) 光学显微镜或图像检测系统：应能识别线路中的孔洞、断线、局部缺失等气泡缺陷；必要时配置声学显微镜检测内部孔洞。

C.4 试验条件

试验环境温度为 $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 $50\% \pm 10\%$ 。浆料、基材和打印设备应在该环境下达到温度平衡。

C.5 试验准备

- a) 按产品规定对浆料进行回温、搅拌和装料；除非产品规定，不应进行额外脱泡处理。应记录搅拌或脱泡的转速、时间和方式；无产品规定时，同一组试验应采用一致的设定。
- b) 按设备操作规程完成喷头或挤出头的安装与调试，确认供料系统密封良好；正式试验前以相同参数试打印不少于 100 条线路，确认无持续性堵头后开始计数。
- c) 采用产品推荐的打印速度、压力或驱动波形、层高和线宽等参数。

C.6 试验步骤

- a) 打印 10 000 条相互独立、形状和尺寸相同的直线线路，单条线路长度不少于 10 mm；可在一块或多块基材上完成；
- b) 打印过程应连续进行。如需更换基材，更换期间不应清洗、重新装料或调整供料系统；
- c) 逐条观察打印线路。经光学显微镜或声学显微镜确认由出料中的气泡导致的孔洞、断线、连续性中断或局部缺失，且孔洞等效直径不小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的，计为 1 条气泡缺陷线路。
- d) 同一条线路上出现多处气泡缺陷时，仅计作 1 条气泡缺陷线路。

C.7 试验数据处理

气泡率按式（C.1）计算：

$$B = \frac{n_b}{N} \times 100\% \quad (\text{C.1})$$

式中：

B——气泡率，%；

n_b ——气泡缺陷线路数；

N——打印线路总数， $N=10\text{ }000$ 。

C.8 结果判定

当气泡缺陷线路数 n_b 不大于 1 时，气泡率 B 不高于 0.01 %（万分之一），判定该项合格。由设备故障、基材更换或其他非气泡因素造成的打印中断，应重新试验。

C.9 试验报告

试验报告应至少包括以下内容：

- a) 本文件编号；
- b) 试样名称、牌号、批号和贮存条件；
- c) 打印设备、供料方式、基材和打印工艺参数；
- d) 打印线路总数、气泡缺陷线路数和气泡率；
- e) 典型气泡缺陷图像；
- f) 试验日期和试验人员。

附录 D（规范性）

3D 打印电路用固化银浆双八五老化试验

D.1 适用性

本附录适用于评价 3D 打印电路用固化银浆打印线路经双八五老化后的环境可靠性。

D.2 方法原理

将固化后的打印线路置于 85℃、85% RH 的恒定湿热环境中老化 500 h，试验过程中不施加电压或电流应力。比较老化前后的外观、体积电阻率和打印线路与基材结合强度的变化。

D.3 仪器设备

- a) 恒定湿热试验箱：应满足 GB/T 2423.3—2016 的要求；
- b) 电阻测量仪及夹具：应满足附录 B 的要求；
- c) 打印线路与基材结合强度试验装置：划格法应满足 GB/T 9286—2021 的要求；采用拉开法时，应满足 GB/T 5210—2022 的要求；
- d) 光学显微镜：应能观察打印线路的裂纹、起泡、剥离和变色等现象。

D.4 试样制备

- a) 按产品规定的基材、打印工艺和固化条件制备试样，试样数量不少于 5 件；
- b) 试样应包含用于体积电阻率和打印线路与基材结合强度测定的图形；
- c) 试样在 23℃±2℃、相对湿度 50%±10% 的环境下状态调节不少于 24 h。

D.5 试验步骤

D.5.1 初始测定

观察并记录试样外观，测定初始体积电阻率 ρ_0 和初始打印线路与基材结合强度 A_0 。

D.5.2 双八五老化

- a) 将试样放入恒定湿热试验箱，试样之间不应相互接触；
- b) 将试验箱设定为温度 85℃±2℃、相对湿度 85%±3%，持续老化 500 h；
- c) 试验期间不对试样施加电压或电流应力；
- d) 试验结束后，将试样取出，在 23℃±2℃、相对湿度 50%±10% 的环境下恢复 2 h。

D.5.3 老化后测定

观察并记录试样外观，测定老化后的体积电阻率 ρ_1 和打印线路与基材结合强度 A_1 。

D.6 试验数据处理

D.6.1 体积电阻率变化率

体积电阻率变化率按式（D.1）计算：

$$\Delta\rho = \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0} \times 100\% \quad (\text{D.1})$$

式中：

$\Delta\rho$ ——体积电阻率变化率，%；

ρ_0 ——老化前的体积电阻率，单位为欧姆毫米（ $\Omega\cdot\text{mm}$ ）；

ρ_1 ——老化后的体积电阻率，单位为欧姆毫米（ $\Omega\cdot\text{mm}$ ）。

D.6.2 打印线路与基材结合强度保持率

打印线路与基材结合强度保持率按式（D.2）计算：

$$R_A = \frac{A_l}{A_0} \times 100 \% \quad (\text{D.2})$$

式中：

R_A ——打印线路与基材结合强度保持率，%；

A_0 ——老化前的打印线路与基材结合强度；

A_l ——老化后的打印线路与基材结合强度。

D.7 结果判定

试样经双八五老化后应同时满足以下要求：

- a) 打印线路无可见裂纹、起泡、剥离或明显变色；
- b) 体积电阻率变化率的绝对值不大于 20 %；
- c) 打印线路与基材结合强度保持率不小于 80 %。

D.8 试验报告

试验报告应至少包括以下内容：

- a) 本文件编号；
- b) 试样名称、牌号、批号、基材及制备工艺；
- c) 试验箱型号、试验温度、相对湿度和持续时间；
- d) 老化前后的外观、体积电阻率和打印线路与基材结合强度数据；
- e) 体积电阻率变化率和打印线路与基材结合强度保持率；
- f) 异常现象、试验日期和试验人员。