DOI: 10.3969/j.issn.1000-6826.2025.01.1601

# 当蜘蛛网“爬”上铜器：一种仿生纹理工艺研究

## Process of Creating Simulated Spider Web Patterned Relief Texture on the Surface of Copper Products

供稿|钱海伦，王坚，黄征，张道权，朱军岷 / QIAN Hailun, WANG Jian, HUANG Zheng, ZHANG Daoquan, ZHU Junmin

**内容导读**

你是否想过，坚硬的铜器表面也能呈现出如蜘蛛网般自然、细腻的纹理？本研究开发出一种新颖的金属表面处理工艺，通过在水面绘制出网状纹理，再将其转印至铜器表面，结合化学蚀刻等技术，最终形成层次丰富、形态逼真的蜘蛛网凹凸肌理。该方法不仅操作简便、可重复性强，还极大提升了铜器的艺术表现力和观赏性，为传统金属工艺注入了新的自然美学灵感。

从古至今，金属表面肌理的处理工艺一直是人类文明进步的缩影。从古代的手工捶打、锉削、錾刻、抛光到现代的蚀刻技术，无不彰显着人类对金属特性认知的不断深入和审美水平的持续提升。我国从青铜时代开始，金属技艺便已达到很高的水平[1]。随着时代的发展，金属表面蚀刻等现代工艺的应用在提高效率、降低成本的同时，也实现了复杂图案和精细纹理的制作。化学蚀刻技术快速发展，光敏防蚀技术逐渐完善，感光工艺广泛普及，促使化学蚀刻加工更加精细[2]；此外，激光光刻技术、纳米压印等技术相继出现[3]。目前，金属蚀刻主要包含化学蚀刻、电解蚀刻、激光蚀刻、超声波蚀刻等类型[4]。金属表面处理工艺技术的进步推动金属艺术表现力的提升，尤其在铜版画领域，多样化和艺术化的肌理已成为其独特魅力的重要来源[5-7]。

传统金属肌理蚀刻工艺的最大特点是图案的预设计和可重复性，其典型代表为菲林制版工艺。该工艺先将预先设计的图案转移至菲林胶片上，再通过曝光、显影等步骤将图案转移至金属表面，能够实现高度一致的图案复制，广泛应用于金属装饰面板、铜版画等工业生产领域。然而，这种工艺虽然高效，但过于机械和模板化，缺乏艺术表现力。为突破此局限，仿蜘蛛网纹的肌理工艺应运而生。该工艺在传统化学蚀刻技术的基础上进行改良，利用自然形成的网状纹理，避免肌理图案的程式化和高度一致性，更适合表现铜制品独特的金属质感和艺术感。此工艺在稳定性的基础上增加了肌理图案的变化性，为金属表面肌理的创新与发展注入新的活力。

作者单位：杭州朱炳仁铜艺股份有限公司，浙江　杭州　311100

## 实验材料与工艺流程

实验所用基材为 H62 以上黄铜或紫铜试片，尺寸为 200 mm×300 mm，厚度为 1.0 或 1.2 mm。工艺流程如下：药剂配制→样品前处理→水面上涂料涂层制作→网纹饰肌理图案成型→网纹饰肌理图案转移→后处理，如图 1 所示。

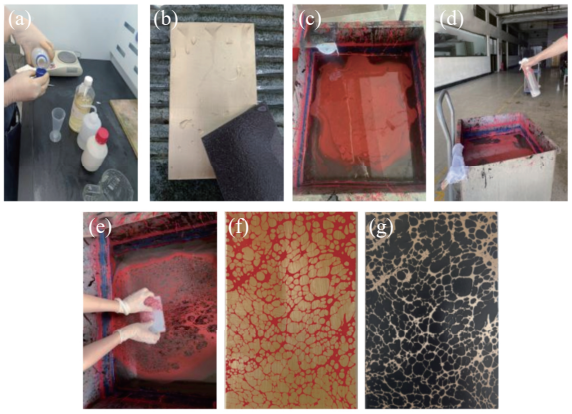



**图 1　铜表面网纹饰图案肌理制作流程：(a) 药剂配制；(b) 样品表面清洁；(c) 水面上涂料涂层制作；(d) 网纹饰图案成型；(e) 网纹饰图案转移；(f) 网纹饰肌理成型；(g) 烘干、修饰、蚀刻等后处理**

## 结果与讨论

### 样品表面前处理

对铜样品表面进行前处理加工是不可或缺的环节，若不消除或妥善处理铜制品表面的毛刺、砂眼、气泡、焊疤、划痕及氧化皮等各类宏观缺陷，会造成肌理图案转印效果差、涂层与基材结合力不足、肌理图案成型不佳等问题。一般前处理包括打磨、喷砂、除油、酸洗等手段。对铜制品表面采用 200~300 目细砂进行喷砂处理，压力以 0.3~0.6 MPa 为宜，能够有效清除表面氧化层和其他杂质，提升工件表面活性，确保肌理图案成型良好。酸洗时，使用由 98%（质量分数）硫酸 100~120 mL、36%（质量分数）盐酸 30~50 mL、尿素 6~9 g、OP-10 乳化剂 0.8~1.2 mL、余量为水组成的 1 L 混合溶液，在常温下浸泡 3~5 min 后用清水冲洗干净。最后，用塑料百洁布对铜制品表面进行人工打磨，进一步清洁表面，并获得合适的表面粗糙度，为后续样品处理提供有利的条件和保障[8–10]。

### 成型工艺

网纹饰图案的成型工艺是决定铜制品表面仿蜘蛛网纹凹凸肌理形成效果的关键环节，主要涉及表面保护涂层配方、网纹饰肌理成型药剂配方、水面上网纹饰图案的形成以及网纹饰图案转移工艺的确定。为了确保实验结果的一致性，实验前所有金属基材均采用相同的前处理工艺，确保金属表面状态均匀一致，并尽量维持实验环境稳定。

#### 工艺配方

表面保护涂层配方和网纹饰肌理成型药剂配方分别见表 1 和表 2。

**表 1　表面保护涂层配方**

| 原料名称 | 体积分数/% |
|---|---|
| 丙烯酸树脂（江苏三木化工股份有限公司，BS9301，固含量60%） | 55~60 |
| 甲醚化氨基树脂（江苏三木化工股份有限公司，固含量60%） | 12~15 |
| EFKA2526消泡剂 | 0.3~0.5 |
| EFKA3777或TEGO Glide450流平剂 | 0.5~0.8 |
| 油性色浆 | 0.2~0.5 |
| 混合溶剂（二甲苯/乙酸乙酯/异丙醇体积比2∶1∶1） | 余量 |

**表 2　网纹饰肌理成型药剂配方**

| 原料名称 | 体积分数/% |
|---|---|
| 201号二甲基硅油 | 70~75 |
| 液体石蜡（黏度50 mPa·s） | 20~25 |
| 环己烷（黏度调节剂） | 余量 |

在表面保护涂层配方中，以丙烯酸树脂为主体，结合甲醚化氨基树脂和混合溶剂，同时以 EFKA2526 消泡剂、EFKA3777 或 TEGO Glide450 流平剂为辅助。以丙烯酸树脂为主要材料的原因是它具有出色的化学稳定性，对水、盐酸、碱和有机酸等化学物质均有较好的耐受性，这些优异的性能使其成为理想的保护涂层材料。甲醚化氨基树脂属于烘烤型固化剂，在配方中使用既可防止网纹饰图案肌理形成过程中出现涂层非预期固化现象，又有助于后续烘烤过程中网纹饰肌理图案的固化成型。消泡剂和流平剂的使用，是为了减少涂料反应过程中产生的气泡，提高涂料在水面上的流动性和流平性，这对于药剂涂层在水面上均匀分布至关重要。此外，保护涂料的黏度对其在水面上形成为均匀合适的膜层影

响显著：黏度过大，涂层难以在水面上顺利均匀展开；黏度过小，形成的膜层可能过薄或难以保持均匀，这 2 种情况均不利于后续网纹饰肌理图案的形成。使用混合溶剂可调整保护涂料的黏度，以满足不同的实验需求；加入油性色浆，便于区分涂层在水面上的颜色，形成鲜明对比，便于观察涂层或肌理图案效果及后续操作。

在网纹饰肌理成型药剂配方中，以 201 号二甲基硅油为基底，以黏度 50 mPa·s 的液体石蜡和环己烷作为辅助材料来调节黏度。选用 201 号二甲基硅油作为基底是由于其具有不溶于水的特性和优异的化学稳定性，表面张力较小，仅为 15.9~21.5 mN/m，而且防水性和憎水性良好，能在各种物体表面形成防水膜。辅助材料液体石蜡和环己烷均不溶于水，与二甲基硅油互溶，主要用于调节药剂的黏度和流动性，以适应不同操作条件和基材特性。

黏度是衡量液体流动阻力的物理量，与网纹饰肌理成型药剂的扩散渗透能力紧密相关，进而显著影响肌理图案的形状、清晰度和均匀性。在黏度实验组中，使用黏度计测量药剂黏度，将药剂黏度分别调整为 150、300、450、600 和 750 mPa·s，固定喷涂距离为 35 cm，反应时间为 6 s。实验结果表明，在 150 mPa·s 的低黏度条件下，药剂扩散速度快，流动性较好，但形成的蜘蛛网纹饰肌理过于松散，图案线条过细，不利于蚀刻后保持细节完整。在 300 mPa·s 的较低黏度条件下，药剂的流动性仍偏快，部分蜘蛛网连接处断裂，较低黏度的蜘蛛网纹饰肌理稍显紧密。在 450 mPa·s 的中等黏度条件下，药剂在水面上的流动性达到较好的平衡，此时网纹饰肌理的形状、清晰度和均匀性较为理想，能够较好地模拟蜘蛛网的自然纹理。在 600 mPa·s 的较高黏度条件下，药剂流动性降低，扩散速度减慢，虽有利于保持图案细节，但铺散效果不均匀，影响蜘蛛网纹饰肌理的整体美观性。在 750 mPa·s 的高黏度条件下，药剂流动性低，导致网纹饰肌理结构过于紧凑，蜘蛛网的自然肌理模拟效果不理想。

通过上述实验发现，药剂黏度会影响其在水面上的流动性和扩散能力，在合适黏度下，蜘蛛网纹饰肌理图案逼真、线条清晰；黏度偏高时，药剂渗透扩散较慢，导致肌理图案出现局部团聚，纹理连贯性差，影响图案整体美观；黏度偏低时，药剂渗透扩散过快，肌理难以稳定成型，网饰纹肌理图案结构松散。不同药剂黏度对铜表面网纹饰图案呈现形态的影响见图 2。

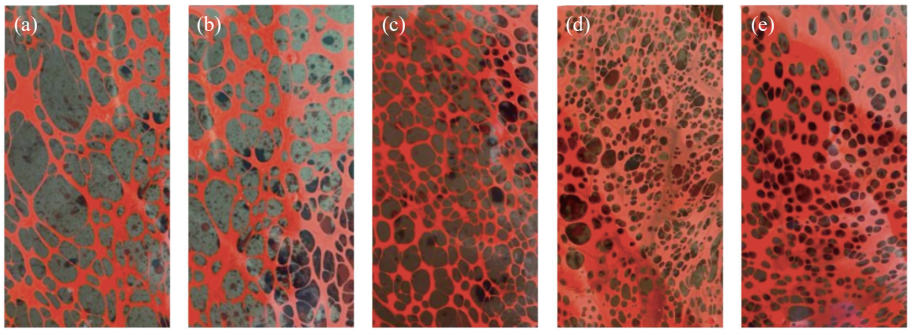



**图 2　不同药剂黏度对铜表面网纹饰图案呈现形态的影响：(a) 150 mPa·s；(b) 300 mPa·s；(c) 450 mPa·s；(d) 600 mPa·s；(e) 750 mPa·s**

## 水面上网纹饰图案的成型工艺

在网纹饰肌理成型工艺中，水面上网纹饰图案的成型是关键环节。该工艺主要利用保护涂料和网纹饰肌理成型药剂不同的表面张力，通过两者在水面上的相互作用形成网纹饰图案肌理，因此这 2 种药剂的喷涂工艺参数（包括喷头形式、喷涂压力及与水面的喷涂距离）对最终网纹饰肌理图案的形态具有显著影响。实验发现，改变喷涂工艺参数会使网纹肌理图案的网纹分布密度、尺寸和形态发生变化。合适的喷涂工艺能够形成比较理想和均匀的网纹饰肌理图案，而调整喷涂距离可以改变图案的局部形态。在喷涂距离实验组中，将可调节支架固定在水池边，调整喷头与水面距离，分别设置药剂喷涂距离为 10、20、50、70、90 cm，固定药剂黏度为 450 mPa·s，反应时间为 6 s。在 10~20 cm 的短距离喷涂下，药剂雾化时间不足且喷洒过于集中，药

剂雾化情况较差，导致药剂局部堆积，不均匀地冲击水面，冲击力过大使得蜘蛛网肌理形成不均，孔洞大小不一，还会破坏保护涂层的完整性，无法形成理想的网纹饰图案，转印的图案也不清晰、不均匀。在 20~50 cm 的中等距离喷涂下，药剂雾化较为均匀细腻，并与水面均匀接触，可形成比较理想和均一的蜘蛛网纹饰图案，图案的清晰度和均匀性良好。在 50~90 cm 的长距离喷涂下，药剂雾化过于分散，雾化颗粒在空气中飞行距离过长导致其过于细小，在水面上的分布过于稀疏，且因冲击力不足，无法与保护涂层充分反应，导致图案的清晰度和均匀性较差，难以形成完整可用的网纹饰肌理图案。此外，长距离喷洒还会导致药剂受空气中气流干扰增强，出现反应时部分缺失或堆积的现象。

不同成型药剂雾化情况对铜表面网纹饰图案的影响如图 3 所示。

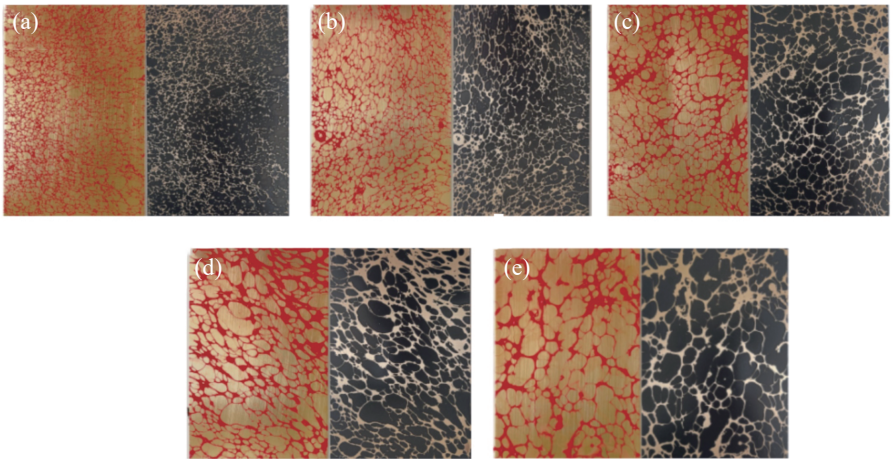



**图 3　不同成型药剂雾化情况对铜表面网纹饰图案的影响：(a) 雾化颗粒极细；(b) 雾化颗粒较细；(c) 雾化颗粒适中；(d) 雾化颗粒较粗；(e) 雾化颗粒粗**

实验表明，在水面上形成一定厚度且均匀的表面保护涂层是后续制作良好网纹饰肌理图案的基础。采用一字式而非圆形喷头，并将涂料喷涂压力保持在低于常规 0.3~0.7 MPa（即控制在 0.1~0.2 MPa），喷头距离水面 20~50 cm，连续喷涂 2 次，即可在水槽水面形成铺满整个表面且均匀的涂料涂层。

网纹饰肌理成型药剂喷涂工艺参数的确定对网纹饰肌理图案有着至关重要的影响。实验表明，采用圆形喷头更利于均匀喷洒，喷洒气压控制在 0.2~0.3 MPa，一方面利于药剂均匀雾化，另一方面有助于药剂在水面与涂层充分反应；喷头距离涂料膜层上方 20~50 cm，均匀喷洒 1~2 遍。此外，喷头的喷嘴大小因与喷出药剂的雾化程度相关，对网纹饰肌理图案的形成也有重要作用。

2 种药剂相互作用的反应时间会显著影响网纹饰肌理图案的形成。反应时间主要影响药剂的扩散程度和网孔尺寸，通常反应时间越长，药剂扩散越多，肌理图案网孔越大，图案越松散。在反应时间实验组中，使用秒表计时，分别控制反应时间为 2、4、6、10、12 s，固定药剂黏度为 450 mPa·s，喷涂距离为 35 cm。实验结果如图 4 所示。2 s 短时间反应下，药剂扩散不充分，肌理图案网孔较小，图案过于密集，虽然细节清晰但缺乏层次感，均匀性不佳；4~10 s 为最佳反应时间，药剂扩散适度，网纹饰肌理网孔大小适中，层次感良好，图案清晰均匀；而 10 s 以上的长时间反应下，药剂扩散过度，肌理图案网孔偏大，图案过于松散，部分细节缺失，图案均匀性也受到一定影响。可见 2 种药剂的接触时间越长，药剂反应越充分，肌理图案网孔越大，具体需要根据工件尺寸和肌理图案的最终效果需求来控制反应时间。

### 网纹饰图案的转移工艺

在网纹饰图案的转移环节中，浸入角度和浸入速度是 2 个至关重要的技术参数。首先，应确保金属基材表面清洁，无油脂和污垢，以免影响图案的转移效果。将清洁后的金属基材在水槽上方以

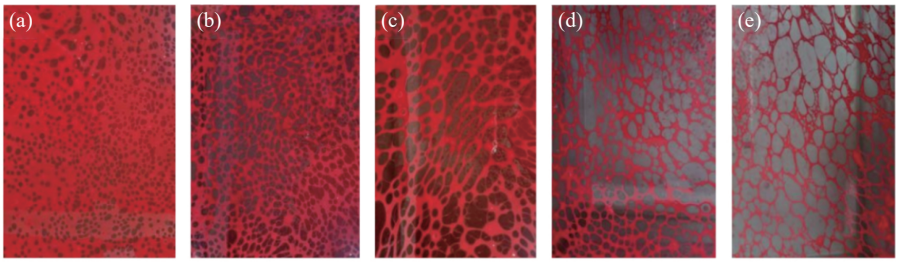



图 4　不同药剂反应时间对铜表面网纹饰图案的影响: (a) 2 s; (b) 4 s; (c) 6 s; (d) 10 s; (e) 12 s

30°~60°缓慢浸入布满网纹饰图案的水面，该接触角度对图案的转移效果影响显著，角度过大或过小均可能导致图案变形或转移不完整。实验完成后，在水槽立面上标注角度参考线，便于操作人员调整和确认金属基材的浸入角度处于最佳范围。

其次，控制金属基材浸入水面的速度也十分关键。浸入速度过快或过慢均会导致图案变形或损坏，合适的速度有助于肌理图案完整转移。当浸入速度过慢时，水波纹的推动力会导致转印网纹肌理线条重叠堆积；速度过快则会拉伸网纹肌理线条使其变形，肌理图案无法保持连续性和完整性。经实验优化，将浸入速度调整为 1 cm/s 较为合适（如图 5 所示），采用可以调速的机械装置代替人工操作，以确保浸入速度的稳定性和实验结果的准确性，避免人为误差。与浸入过程类似，从水面取出金属基材时也应以合适的速度进行操作，以减少对肌理图案的损伤。同时，应确保金属基材表面完全被水面覆盖，以便网纹饰图案均匀完整地转移并附着在基材表面。

通过优化控制工艺参数，可实现操作工艺的可重复性和稳定性。此外，在操作过程中，可通过增加旋转、晃动等特定操作赋予肌理图案特殊的艺术效果。例如，在金属基材浸入水面和网纹饰图案转印过程中，对其进行适当旋转，可通过调整浸入速度或角度，采用连续或间接的旋转方式，使肌理图案呈现螺旋拉伸的形态，增加拉伸动感，令图案更加生动活泼；在转印过程中，可通过垂直、水平或多方向晃动金属基材来提高图案的自然流动感，也可通过控制晃动的幅度和频率实现网纹饰肌理的变化，使图案呈现波浪状，还可叠加多种手法实现蜘蛛网纹饰图案多重肌理层次的艺术叠加效果。

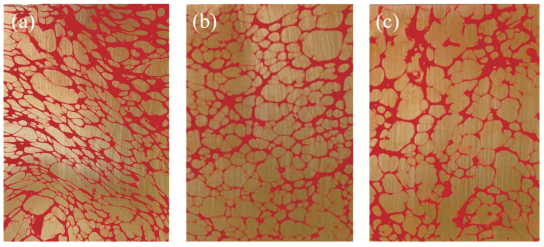



图 5　铜基材不同浸入速度对铜表面网纹饰图案的影响: (a) 0.5 cm/s; (b) 1 cm/s; (c) 5 cm/s

综上所述，基于一系列实验研究及数据结果的综合对比，确立了关键工艺参数和控制方法，以确保操作工艺的可重复性和稳定性。在测量药剂黏度时使用黏度计，确保黏度控制在 450~600 mPa·s 的最佳范围；在喷涂药剂时，将可调节支架固定在水池边，调整喷头与水面距离至 20~50 cm 的最佳喷涂距离；在控制反应时间时，使用秒表计时，确保药剂反应时间在 4~10 s；在控制浸入角度时，标注参考线，确保金属基材的浸入角在 30°~60°；在控制浸入速度时，采用可调速机械装置代替人工操作，确保浸入速度稳定在 1 cm/s。通过对上述工艺参数的优化控制及标准化操作，可在金属基材表面稳定制备自然逼真的仿蜘蛛网纹凹凸肌理。

上述工艺参数的确定还需根据金属工件尺寸进行适当调整。对于面积较大、肌理图案也较大的工件，需要适当延长反应时间或加大喷涂距离，从而增加网饰纹肌理网纹孔的尺寸，以适应工件大小；反之，则需适当缩短反应时间或减小喷涂距离。

## 后处理

后处理工艺是确保网纹饰图案质量的重要环节，主要包括烘干、修饰和蚀刻 3 个步骤。首先，将转移有网饰纹肌理图案的金属基材置于 90 ℃ 烘箱中烘烤 30 min 左右，此温度有助于图案均匀干燥和固化，以获得具有良好附着力的肌理图案。烘干完成后，将样品从烘箱中取出，使其在室温下自然冷

却。其次，检查工件样品表面肌理图案，对于不满意之处进行适当修整，如修剪和补充图案线条等。修整后，需将样品再次放入烘箱进行二次烘烤固化，确保修整部分的肌理图案充分干燥固化。

蚀刻工艺对肌理图案的深度和精细度起着关键作用。实验表明，较短的蚀刻时间可以较为逼真地还原图案的肌理形态，但凹凸肌理感较弱；较长的蚀刻时间虽然能够增强图案肌理的深度和立体凹凸感，但可能导致部分肌理图案细节缺失。通常情况下，蚀刻时间为 15~30 min，蚀刻温度为 40~50 ℃，蚀刻方式为喷淋或浸泡，蚀刻深度为 200~450 μm，这是较为理想的蚀刻工艺，既能保持较好的图案肌理形态，又能保证其立体凹凸感。最后，还需对样品表面进行着色和喷涂保护涂层等处理。表 3 为铜材料的蚀刻参考配方。

**表 3　铜材料 1 L 蚀刻液参考配方**

| 氯化铜/g | 36%（质量分数）盐酸/mL | 30%（质量分数）双氧水/mL | 纯水/mL |
|---|---|---|---|
| 40~60 | 80~120 | 240~260 | 余量 |

## 铜制品表面仿蜘蛛网纹饰凹凸肌理样品

图 6 为采用本工艺制作的铜制品样品，无论是茶碟还是铜壶表面均呈现较好的仿蜘蛛网纹饰凹凸肌理图案，并有良好的颜色层次；图 7 为网纹饰肌理图案经拉伸或旋转制作的铜制品样品，经过拉伸或旋转制作的网饰纹肌理也具有了拉伸或旋转的效果。无论采用常规工艺还是增加了拉伸或旋转工艺制作的肌理，均展现出较好的网饰纹肌理和良好的艺术性效果。因此，本工艺的良好适用性为金属表面处理提供了较为灵活多样的选择。

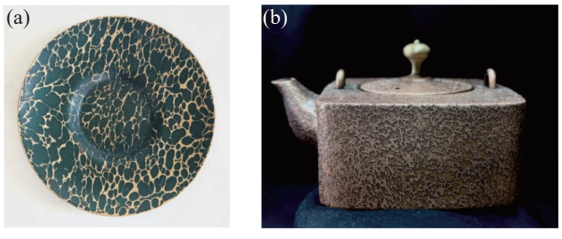



**图 6　铜工艺制品表面仿蜘蛛网纹饰凹凸肌理样品：(a) 黄铜茶碟；(b) 紫铜壶**

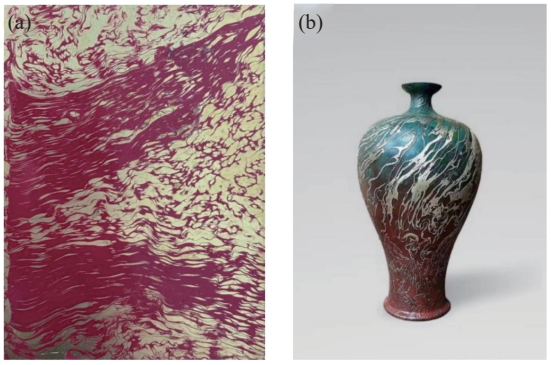



**图 7　网纹饰图案经拉伸或旋转制作的样品：(a) 铜板样品；(b) 黄铜花瓶**

## 结束语

通过一系列实验，对铜制品表面仿蜘蛛网纹凹凸肌理的制备工艺关键参数进行优化和确定。采用该工艺制作的仿蜘蛛网纹饰凹凸肌理线条流畅自然，曲线优美，层次感强；纹饰形态逼真，图案纹理清晰，具有较好的装饰性、实用性和艺术性。同时，网纹饰肌理图案具有一定的调整性、变化性和可设计性，不仅适用于不同形状和尺寸的铜工艺品，还可扩展应用于其他金属制品表面肌理的加工处理。

## 参考文献

[1] 彭志峰. 金属表面肌理成型工艺. 艺术品鉴，2020(9)：198
[2] 杨丁. 金属蚀刻技术. 北京：国防工业出版社，2008
[3] 张永成. 不锈钢湿法蚀刻技术的研究 [ 学位论文 ]. 杭州：浙江工业大学，2015
[4] 李异. 金属表面艺术装饰处理. 北京：化学工业出版社，2008
[5] 闫垒垒. 铜版画肌理语言特点简析. 大众文艺，2015(17)：120
[6] 乔汉夷. 铜版画肌理的艺术语言研究 [ 学位论文 ]. 桂林：广西师范大学，2019
[7] 赵伟男. 铜版画创作中的“水珠技法”的肌理效果应用与实践 [ 学位论文 ]. 沈阳：沈阳师范大学，2018
[8] 张道权，朱嫣红，傅春燕，等. 紫铜工艺品表面氧化棕色工艺的改进. 电镀与精饰，2022，44(10)：65
[9] 张道权，王义刚，朱军岷，等. 铜制品表面仿大理石热着色工艺. 电镀与涂饰，2021，40(5)：377
[10] 张道权，胡万明，朱军岷. 黄铜件表面仿金色热着色工艺. 材料保护，2022，55(6)：98

**作者简介：**钱海伦（1998—），女，浙江省杭州人，研发设计师，2023 年毕业于中国美术学院美术专业。主要研究方向：工艺设计、金属表面处理等。作品多次在国家级和省级展览中展出，获得学术提名奖，并被中国美术馆收藏。通信地址：浙江省杭州市上城区河坊街 207 号江南铜屋；E-mail：429019442@qq.com。