

# 基于化学教育视角的传统鎏金工艺反应机理及教学价值研究



何亚萍<sup>1,2,3,\*</sup>, 叶妙杰<sup>1</sup>, 梁佳明<sup>3</sup>, 周梓菡<sup>3</sup>, 武雨晨<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 西安文理学院化学工程学院, 陕西西安 710065

<sup>2</sup> 西安市食品安全检测与风险评估重点实验室, 陕西西安 710065

<sup>3</sup> 西安文理学院历史文化旅游学院, 陕西西安 710065

**摘要:** 传统鎏金工艺承载着深厚的古代技术智慧, 其中包含大量可挖掘的化学知识体系, 是开展传统文化融入化学教学的优质资源。现阶段学界针对鎏金工艺的研究多集中于文物形制考证与工艺流程梳理, 对工艺背后的化学本质探讨较为零散, 缺少热力学与动力学层面的系统性分析, 同时相关教学转化研究不够成熟, 难以直接服务于化学教学的跨学科教学实践。针对以上问题, 本文以传统汞齐鎏金技艺为研究主体, 系统开展工艺化学机理与教学应用价值研究, 为化学情境化、跨学科教学拓展素材资源。研究综合运用文献整理、化学原理剖析与理论推演等方法, 结合无机金属反应基本规律, 对鎏金工序中的金汞合金生成、高温脱汞与金层固结等关键环节进行逐层拆解。通过热力学理论分析金汞结合反应的自发进行条件, 依托动力学规律探讨温度、工艺时长等关键参数对反应进程与镀层成型质量的影响规律, 进一步阐明传统匠人工艺调控方式的科学依据, 解释鎏金镀层结构致密、稳定性强、耐腐蚀性能优良的内在化学机理。研究结果表明, 鎏金工艺所涉及的金属物性、合金形成规律与反应条件控制等内容, 均与化学核心教学内容高度契合, 能够将抽象的化学理论依托传统工艺具象化呈现, 有效降低学生的理解难度。本研究完善了传统鎏金工艺的化学理论阐释体系, 构建了文物工艺与化学课堂融合的可行路径, 为化学跨学科教学创新、传统文化科普落地提供有效的理论依据与实践参考。

**关键词:** 鎏金工艺; 化学教育; 跨学科教学; 传统文化融合

DOI: [10.57237/j.cse.2026.02.001](https://doi.org/10.57237/j.cse.2026.02.001)

## The Investigation of Reaction Mechanism and Teaching Value of Traditional Gilding Technology from the Perspective of Chemistry Education

He Yaping<sup>1,2,3,\*</sup>, Ye Miaojie<sup>1</sup>, Liang Jiaming<sup>3</sup>, Zhou Zihan<sup>3</sup>, Wu Yuchen<sup>3</sup>

基金项目: 陕西省哲学社会科学研究专项一般项目 (2026YB0289); 西安市教师教育改革与教师发展研究项目 (25JS06); 陕西省“十四五”教育科学规划课题 (SGH22Y1392, SGH25Y1628); 陕西省教育厅科研计划项目 (23JP146, 23JP147); 西安市社科规划项目 (25JY135, 25JY144); 西安文理学院三年行动计划项目 (21XJZZ0001-11); 2022 年“西安文理学院西安市社科院”战略合作项目 (22ZL10, 22ZL11); 西安文理学院博士启动基金 (06005017); 西安文理学院教育改革项目 (JY2025021).

\*通信作者: 何亚萍, [hejin04c@126.com](mailto:hejin04c@126.com)

收稿日期: 2026-04-21; 接受日期: 2026-06-13; 在线出版日期: 2026-07-07

<http://www.chemscieng.com>

<sup>1</sup>School of Chemical Engineering, Xi'an University, Xi'an 710065, China

<sup>2</sup>Xi'an Key Laboratory of Food Safety Testing and Risk Assessment, Xi'an 710065, China

<sup>3</sup>School of Historical Culture and Tourism, Xi'an University, Xi'an 710065, China

**Abstract:** Traditional gilding craft embodies the ancient technical wisdom and contains abundant systematic chemical knowledge, which can be utilized as a high-quality teaching resource for integrating traditional culture into chemistry education. At present, most studies concerning gilding technology focus on cultural relic research and procedural sorting, while the exploration of its essential chemical principles is relatively scattered. Nevertheless, systematic thermodynamic and kinetic analyses of gilding reactions remain insufficient, and research regarding the educational adaptability of this traditional craft is still lacking. To address these shortcomings, this work investigates the conventional mercury amalgam gilding technique, systematically examining its underlying chemical mechanisms and educational applicability. Combined with literature investigation, chemical principle analysis and theoretical inference, this study explores the key operational steps of traditional gilding based on basic inorganic metal reaction rules, including gold-mercury amalgam formation, high-temperature mercury volatilization and final gold coating consolidation. The thermodynamic characteristics of spontaneous gold-mercury reaction are analyzed, and the effects of temperature and processing duration on reaction process and coating quality are discussed from the perspective of chemical kinetics. This work further validates the scientific basis of traditional operational controls and elucidates the inherent chemical factors responsible for the dense structure, favorable stability and superior corrosion resistance of gilded layers. The research results demonstrate that the core scientific connotations of gilding craft, including metal properties, alloy formation laws and reaction condition regulation, are highly compatible with mainstream chemistry teaching content. The integration of traditional craftsmanship and classroom teaching can visualize abstract chemical theories and effectively lower students' learning barriers. This study optimizes the chemical theoretical interpretation system of traditional gilding technology and establishes a feasible implementation path for integrating cultural relic crafts into chemistry classrooms, providing solid theoretical support and practical references for the innovative development of interdisciplinary chemistry education and the inheritance of traditional technological culture.

**Keywords:** Gilding Craftsmanship; Chemical Education; Interdisciplinary Teaching; Traditional Culture Integration

## 1 引言

汉字不仅是基础信息的载体，更是承载中国古代科学认知与传统工艺智慧的重要文化载体，诸多汉字的形、音、义体系沉淀着朴素且系统的自然科学规律，是推动传统文化与理科教育深度融合的优质教学资源[1]。“鎏”（读音 liú）字堪称形、音、义三位一体的科技文明载体，与中国古代经典的汞齐鎏金技艺高度契合。从文字构形与本义来看，“鎏”字为上下结构，上部从“流”，直观隐喻金属汞常温下质地流动、延展性良好的特殊理化特性；下部从“金”，明确指向鎏金工艺的核心原料黄金，字形结构精准概括了“液态载金、高温固金”的工艺核心。这种字形结构精准呈现“以液固金”的工艺本质，对应着关键化学过程：液态汞与金粉形成金汞合金（汞齐，俗称金泥），加热时汞高挥发性脱离体系，金则通过界面作用牢固附着于器物表面，完成“流动→固化”的物态转化与化学结合[2]。结合《集韵·尤韵》

所载“美金谓之鎏”的字义释义，可进一步佐证鎏金工艺能够制备出质地致密、性能稳定、光泽度优异的黄金镀层[3]。传统鎏金工艺中完整涵盖金汞合金化、高温汞挥发、金层界面固结等一系列无机化学变化，与物质的化学金属性质、合金组成、物质相变及反应条件调控等核心知识点高度匹配，具备良好的课堂教学适配性与科普价值[4]。

鎏金作为中国古代极具代表性的金属表面装饰工艺，创始于战国时期，在汉唐两代发展成熟并广泛普及，长期应用于古代礼器、佛像及日用金属器物的装饰加工，工艺体系完备、传承脉络清晰，充分体现出古人对金属物性、合金成型规律及反应条件调控的实践认知[5]。国内与海外学界研究普遍围绕鎏金工艺开展了多维度探索，逐步形成文物考古、材料科学、教育应用三大研究方向，积累了较为丰厚的研究成果与理论基础。

在文字训诂与文物考古领域,学界已系统考证“鎏”字的字形演变、字义内涵与文化语境,梳理出鎏金工艺的发展源流、操作工序与应用场景,明确了金属汞作为传金介质的核心工艺作用[6]。借助现代微观表征与精密检测技术扫描电镜、能谱分析、X射线荧光光谱等测试手段,直观验证了鎏金过程中金汞合金的生成规律与高温脱汞的反应特征,探明了加热温度、保温时长等关键工艺参数对镀层成型质量的影响机制[7]。通过金属相图解析,佐证了金汞二元合金的成型规律、物态转变特征及汞的高温挥发特性等传统鎏金工艺的科学支撑[8]。

鎏金作为传统冶金工艺与文物科技资源,能够有效消解化学概念的抽象性与晦涩性,是落实化学跨学科教学、传承中华优秀传统文化的重要抓手[9]。然而,现有教育类仅宏观肯定了鎏金工艺的育人潜力,尚未结合工艺完整的化学逻辑构建贴合中学学情、可落地推广的课堂教学模式,缺乏体系化、实操性较强的教学资源开发与教学设计研究[10]。现有研究趋于理论层面,存在机理研究不成体系、教学转化落地不足、跨学科融合视角单一等问题,难以充分释放传统鎏金工艺的科学内涵与教育价值,开展针对性、系统性的深化研究具有重要的现实意义与研究必要性。

针对上述问题,本文立足化学机理解析与教学应用拓展双重维度,旨在完善现有研究体系、填补相关研究空白。本研究核心目标为:系统拆解传统汞齐鎏金工

艺各工序对应的核心化学原理,科学验证各反应环节的发生条件与可行性,厘清传统工艺参数调控背后的化学科学逻辑;同时深度挖掘“鎏”字文化与鎏金工艺蕴含的化学育人资源,探索传统文化与化学课堂深度融合的有效路径,为化学跨学科教学创新发展提供新思路、新参考。

基于此,本文以传统汞齐鎏金工艺为核心研究对象,以“鎏”字文字内涵为切入点,结合文献梳理、化学机理分析与理论推演,系统剖析鎏金工艺中原料汞的独特性质,汞齐合金化的科学原理。依托热力学与动力学理论,验证整套工艺反应的科学性与合理性,解读古代工匠实操经验背后的现代化学本质。在此基础上,结合化学教学需求与课堂教学实际,探究鎏金工艺的教学适配场景与应用优势,深度挖掘其跨学科育人价值,提炼适配一线化学教学的实操路径与应用范式,为传统工艺文化融入化学课堂、推进跨学科化学教育创新提供实践支撑。

## 2 鎏金工艺的技术解析与科学原理

### 2.1 鎏金工艺流程解析

一般的鎏金工艺包含六个步骤,具体如图1所示。

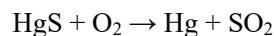


图1 鎏金工艺的具体步骤图

#### 2.1.1 步骤一：原料准备

鎏金的关键原料是纯度>95%的黄金,主要利用密

度差异淘洗或“灰吹法”得到;另外一个重要的原料是汞(水银),通过丹砂(硫化汞)加热分解获得:



该过程需在密闭容器中进行，避免汞蒸气中毒，通过冷水冷凝收集液态汞。将两原料按照一定的比例混合（通常金占 10%~30%，汞占 70%~90%）在陶罐中加热至 40~60℃，搅拌至金完全溶解于汞中，形成银白色的膏状金汞齐（又称“金泥”）。通过调控金与汞的比例，可以调控鎏金的厚度，具体见表 1。

表 1 鎏金工艺的金汞齐不同金汞比例与熔点对应表[8]

| 金（Au）占比 | 汞（Hg）占比 | 金汞齐熔点范围 | 常温状态  | 鎏金工艺应用场景                          |
|---------|---------|---------|-------|-----------------------------------|
| 10%     | 90%     | 40~45℃  | 膏状偏液态 | 薄鎏金层制备，适用于纹饰细腻、需均匀薄涂的器物           |
| 15%     | 85%     | 45~50℃  | 粘稠膏状  | 常规鎏金工艺首选比例，兼顾涂覆流畅性与金层致密性          |
| 20%     | 80%     | 50~55℃  | 厚重膏状  | 中厚金层需求，可单次涂覆成型，减少重复涂抹次数           |
| 25%     | 75%     | 55~60℃  | 半固态膏状 | 厚鎏金层制备，需分两次涂覆，适用于对金层厚度要求高的贵重器物    |
| 30%     | 70%     | 60~65℃  | 固态偏膏状 | 特厚金层定制，涂覆后需轻微加热辅助延展，适用于皇家器物、祭祀礼器等 |

2.1.2 步骤二：基体预处理

鎏金工艺的第二步就是对待鎏金器物进行清洁与粗糙化处理。用细砂纸、磨石或金刚砂反复打磨，去除表面的氧化层、锈迹和毛刺，使基体表面光滑但略带细微粗糙以增强金汞齐的附着力。为了更好的使金汞齐更好的附着，需要用碱性的草木灰、皂角水或酸性的食用醋清洗器物表面脱脂去污[11]。炭火上微烤预热可进一步去除残留水分，保持表面温度更好地附着金汞齐。该步骤的核心作用是消除表面杂质对合金化过程的阻碍，增加金汞接触点位。

2.1.3 步骤三：涂覆金汞齐

涂覆金汞齐（又称“抹金”）是鎏金工艺的核心环节，操作时需要特制毛笔、竹片或“涂金棍”蘸取金汞齐，沿器物表面均匀涂抹。对于纹饰复杂的部位，需用细针或小毛刷将金汞齐填入细微角落，确保全覆盖无遗漏。若要求金层厚度达到 5 微米以上，需待第一层金汞齐略干后，重复涂抹 1-2 次，每次涂抹后用竹刀或工具轻轻推压刮平，保证金层致密、厚度均匀。局部鎏可以通过涂蜡保护非鎏金区域。

2.1.4 步骤四：烘烤鎏金

“烤黄”是促成金层稳定附着的核心工序，其原理源于金与汞的物理特性差异。汞的沸点约为 356.6℃，实操时需将已涂覆金汞齐的器物放置在炭火或窑炉等热源环境中，烘烤温度通常控制在 200~300℃，部分对金层致密性有更高要求的工艺可将温度调整至 300~500℃。这一温度区间能避免汞快速沸腾，使其以蒸气形式缓慢脱离金汞齐体系，而残留的金原子会与器物胎体表面发生分子层面的相互渗透，最终逐渐凝

结固着，形成色泽暗黄且结构致密的金层，至此完成烘烤鎏金的核心流程[12]。温度调控直接影响原子扩散速率，是金层附着牢固度的关键影响因素。

2.1.5 步骤五：压光与修整

压光与修整是鎏金工艺的收尾关键工序，核心作用在于强化金层附着稳定性与优化表面质感。烘烤固着后的金层需借助玛瑙压子进行反复磨压处理，操作时可先蘸皂角水横竖交错轧压，清除金层表面微小缝隙，再通过干轧进一步致密金层结构。这一过程能让汞挥发后残留的松散金粒充分贴合，不仅提升金层与器物基体的结合牢度，还能消除表面粗糙感。用粗布等软质材料擦拭金层，去除压光过程中残留的皂角水痕迹与金粉杂质，使金层由暗黄色逐渐转为鲜明光亮的色泽，最终呈现平整致密、金光熠熠的装饰效果。多次鎏金的器物需在每遍烘烤后重复压光与修整工序，以叠加金层厚度并保证整体质感均匀一致。

2.1.6 步骤六：纳米级界面处理

为了提升金层与基体的结合力使鎏金成品的持久度，在前期烘烤基础上，需将器物置于中温区间（可精确调控至 250℃ 左右）进行持续保温处理，这一过程能驱动金层中的金原子与铜基体表面的铜原子发生相互渗透与扩散反应，形成“界面扩散”。现代检测技术已证实该界面作用的微观机制[13]：通过扫描电子显微镜（SEM）观察可见，金层与铜基体交界处形成了厚度处于纳米级别的合金过渡层，而离子刻蚀 X 射线光电子能谱进一步检测表明，该界面层存在金铜元素的梯度分布，铜元素从基体向金层内部迁移，金元素则向基体表层渗透，形成类似固溶体结构。纳米级界面处理是强化鎏金层与基体结合稳定性的关键环节。纳米级合金

界面层能有效消除金与铜的物理界面差异，大幅提升两者的结合力，避免后期使用中出现金层起翘、剥落等问题，是传统鎏金工艺中保障成品耐久性的核心技术环节。

## 2.2 鎏金背后的科学原理

鎏金技术依赖于在常温下呈液态的特殊金属——汞。汞在鎏金工艺中并非简单的辅助材料，而是扮演着不可替代的合金媒介角色。

### 2.2.1 鎏金的主角儿：金属汞

汞位于元素周期表第 IIB 族，化学符号为 Hg，原子序数 80，属于过渡金属元素。核外电子排布为  $[\text{Xe}]4f^{14}5d^{10}6s^2$ ，最外层的 6s 轨道处于 2 电子“全充满”状态，这种构型能量极低，电子稳定性极高。

受内层弱屏蔽 4f 电子与 6s 轨道强钻穿效应共同影响，汞原子有效核电荷大幅升高，6s 电子束缚作用显著增强、电离能更高，失电子难度大于同族锌  $[\text{Ar}]3d^{10}4s^2$ 、镉  $[\text{Kr}]4d^{10}5s^2$ 。汞原子半径 150 pm，略大于镉 (148.9 pm)；但其一级、二级电离能均明显更高：第一电离能  $\text{Hg} (1007.10 \text{ kJ/mol}) > \text{Zn} (906.4 \text{ kJ/mol}) > \text{Cd} (867.8 \text{ kJ/mol})$ ，第二电离能  $\text{Hg} (1810 \text{ kJ/mol}) > \text{Zn} (1733.30 \text{ kJ/mol}) > \text{Cd} (1631.40 \text{ kJ/mol})$ ，定量印证 6s 电子受核强力束缚，单汞原子化学稳定性更强。

金属键是金属阳离子与离域自由电子间的静电作用，其强弱直接决定金属理化性质。价电子越易脱离原子，晶格中自由电子浓度越高，金属键越强，对应金属熔沸点更高、硬度更大、导电导热性能更优异，同时金属更易失去电子，化学还原性更强。根据相对论量子力学计算，汞的 6s 轨道经历了显著收缩，其相对论性与非相对论性结合能之比达到 1.257。6s 轨道的收缩使其能量降低，电子更难被激发或电离。同时，收缩后的 6s 轨道具有更强的方向性和局域性，难以与相邻原子形成有效的轨道重叠，从而削弱了金属键的形成[14]。仅有少量 6s 电子能离域参与形成金属键，金属键作用力微弱。汞的结合能仅 0.67 eV，远低于同主族锌 (1.35 eV) 与镉 (1.16 eV)；升华能仅 62 kJ/mol，约为锌 (131 kJ/mol) 的 47%、镉 (112 kJ/mol) 的 55%。汞的低升华能表明其原子间结合极弱，无法在常温下维持固态晶格，故以液态存在，且原子可自由流动，呈现低粘度、高流动性特征。这一独特性质使汞在鎏金中扮演着从

“溶剂”到“桥梁”的双重角色：可与金、银等金属形成均匀金汞齐；金汞齐涂覆基体后，加热使汞挥发，金层便能牢固附着于基体，实现鎏金效果。

### 2.2.2 金属汞齐：鎏金的科学原理

由于优异的流动性，汞原子一旦接触固态金属原子，会向其晶界、晶格空位向内渗透，完成两相固-液接触传质，从而形成了汞齐。汞的 6s 轨道与金的 6s 轨道重叠及晶格重构，电子在 Au-Hg 双金属晶格间共同离域，形成混合金属键。从宏观角度看，当固态金与液态汞接触时，汞会迅速“浸润”金的表面，使其失去原有的金属光泽，呈现出银灰色或灰白色，质地也会从坚硬的固态转变为具有一定流动性的可塑膏状。李秀辉等[11]纳米透射电子显微镜表征证实，不同金汞配比会改变扩散层厚度与物相结构；高汞配比扩散层更厚，膏状流动性更好，适配古代鎏金涂刷工艺。甚至在汞含量足够高时变为液态。微观层面上，汞原子向金的晶格内部扩散，同时金的表面原子脱离晶格并溶解到液态汞中，构成双向物质迁移过程。金汞齐的形成经历扩散-溶解-相变三阶段[12]。

第一阶段：扩散——汞原子晶格间隙定向嵌入，核心为汞原子在固相金属表面吸附并发生间隙扩散。汞原子扩散活化能仅为 20~50 kJ/mol，远低于普通金属的自扩散活化能。汞受 4f 轨道弱屏蔽效应与 6s 轨道相对论收缩、惰性电子对效应共同作用，金属键强度大幅衰减，原子迁移阻力极低。同时，汞原子半径 (0.15 nm) 与金、铜等面心立方金属的八面体晶格间隙尺寸 (约 0.14 nm) 高度适配，可顺利嵌入晶格间隙，引发轻微晶格畸变与膨胀，构建初始金汞复合界面结构。

第二阶段：溶解——置换固溶体形成与电子补偿机制，核心为固溶体的形成与电子调控作用。汞原子持续渗入金属晶格并达到固溶阈值后，主金属晶格发生松弛畸变，逐步形成以汞为溶剂、金原子为溶质的置换型固溶体。汞的 6s 轨道经过约 20% 相对论收缩后，电子云呈紧致规整，与 Au 的 6s 轨道重叠，可有效降低轨道排斥作用。汞与金互溶时，金的离域价电子可向汞的 5d、6p 空轨道迁移，通过电子补偿效应降低固溶反应势垒，保证金汞固溶体在常温下快速、稳定生成。

第三阶段：相变——有序金属间化合物固相重构。当金、汞组分比例达到临界配比时，无序固溶体发生固相相变，原子排布发生有序化重构，生成  $\text{AuHg}$ 、 $\text{Au}_2\text{Hg}$ 、

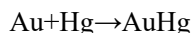
$\text{Ag}_3\text{Hg}$  等稳定的金属间化合物。体系从无序固溶体转变为金属间化合物相。通过 X 射线衍射检测四方晶系  $\text{Au}_3\text{Hg}$  [12], 可观察到  $2\theta \sim 38.5^\circ$  对应 (111) 晶面的特征衍射峰, 晶格常数  $a=0.608\text{ nm}$ ,  $c=0.473\text{ nm}$ , 标志着金汞汞齐结构完全成型、体系趋于热力学稳定。标志着金汞汞齐结构完全成型、体系趋于热力学稳定。

### 3 鎏金工艺的化学可行性分析

利用汞独特的物理化学性质, 可在远低于黄金熔点下, 将黄金均匀、牢固地附着于铜、银等金属基材表面的难题。

#### 3.1 鎏金的热力学可行性分析

金汞齐的自发成型是鎏金工艺的核心基础, 该过程可通过热力学吉布斯自由能公式判定:  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ , 其中  $\Delta G$  为吉布斯自由能,  $\Delta H$  为焓变,  $\Delta S$  为熵变,  $T$  为热力学温度。常见稳定金汞齐组成有  $\text{AuHg}$ 、 $\text{Au}_2\text{Hg}$ 、 $\text{Au}_3\text{Hg}$  等, 其反应方程式如下:



根据热力学基本定义, 稳定单质的标准摩尔生成焓为零。金与汞相互结合形成金属键的过程伴随能量释放, 属于放热反应, 体系标准摩尔反应焓变  $\Delta_r H_m < 0$ ; 因此  $\Delta_r H_m < 0$ , 通常为负值。固态金溶解扩散于液态汞的过程, 打破了原有规整晶格结构, 原子无序度显著提升, 体系熵变  $\Delta S > 0$ 。估算可知, 在常温常压下形成金汞齐的反应  $\Delta G < 0$ , 是一个自发过程。

#### 3.2 鎏金的动力学可行性分析

在热力学自发前提下, 金基体表面状态直接决定汞齐化初始反应速率[15]。纯金性质稳定, 无致密氧化膜, 可与汞直接发生汞齐化反应; 而表面油污、杂质及钝化层会阻隔两相接触, 显著抑制汞齐化进程。鎏金的第二步骤要求对基体进行打磨和清洁预处理。通常选择皂角水作为天然清洁剂, 一方面清洗器物表面的油污和杂质, 另外皂角水的润滑性有助于后续压光工序操作, 使鎏金层更加致密光亮。金器表面的各晶面因原子排布密度、表面能及化学活性差异, 呈现显著的反应各向异性, 其表面能大小规律为  $\text{Au}(110) >$

$\text{Au}(100) > \text{Au}(111)$ 。高表面能晶面原子稳定性更低, 界面反应活性更强, 更易与汞发生键合反应。通过打磨提升表面粗糙度和比表面积亦可显著提升汞齐化初始速率。

### 3.3 金属汞齐形成的其他影响因素

除基体表面状态外, 水溶液添加剂是调控汞齐化进程、优化反应效率的关键外部因素[16]。传统鎏金工艺常采用氯化钠与明矾复配溶液辅助涂覆金汞齐施工, 既可改善其表面铺展能力, 又可借助微弱酸性环境轻微活化基体界面, 提升鎏金层与基底的结合稳定性。微观层面上, 氯离子  $\text{Cl}^-$  和溴离子  $\text{Br}^-$  能与金形成  $[\text{AuCl}_4]^-$  和  $[\text{AuBr}_4]^-$  等稳定配合物, 有效降低金的电极电势, 加速金向汞相的溶解扩散。同时, 盐类解离产生的离子会对金表面进行化学侵蚀, 破坏其规整的晶格结构, 为汞原子的渗透与金原子的溶解创造有利条件, 改善金汞齐的流变特性与界面附着性能。

## 4 鎏金工艺中蕴含的教学价值

### 4.1 鎏金工艺为纽带的知识整合

鎏金工艺中蕴含着丰富的化学知识和原理, 为抽象化学知识概念, 提供了生动化、具象化平台。

#### 4.1.1 金属键知识的转化

汞常温下为液态, 还可溶解黄金形成金汞齐, 该现象直观体现不同金属键的强度差异性。将微观结构决定性质中即有化学性质又有物理性质具象化。学生借助“金粉可溶于汞”的宏观实验现象, 能具象拆解“金属键是金属阳离子与自由电子间的静电相互作用”这一抽象理论, 规避枯燥、难懂的定量数据推导, 实现宏观现象与微观作用力的关联认知。

#### 4.1.2 物质性质解读的方法论

微观结构决定宏观性质, 性质决定材料的用途。通过对汞是唯一常温液态金属的化学本质的深入解析, 让学生更好的理解原子的结构、原子与原子之间的相互作用, 以及合金形成过程中物理和化学性质的转化和转变。可通过设计探究问题, 将复杂的相对论效应转化为“结构决定性质”的核心化学观念。。

### 4.1.3 化学反应的基本原理探究

热力学和动力学层面对鎏金工艺的化学可行性分析, 为深入理解化学反应的基本原理提供范本。金的表面状态(清洁度、粗糙化、晶面能)是汞齐化初始速率的关键, 是对化学反应的碰撞理论形象化体现。将微观反应的本质从抽象概念转化为可观察、可验证的工艺现象, 降低学习门槛。将化学反应机理具象化, 建立起宏观操作(打磨)→微观变化(接触点位增多)→速率变化的完整认知逻辑链。

## 4.2 构建科学思维与文化认同的桥梁

文物实证-化学原理-工艺智慧的三维核心信息, 鎏金工艺可成为“科学思维培养”与“文化认同培育”的协同载体, 让素养落地有具体依据、可操作。

### 4.2.1 以鎏金器分析为抓手培育证据推理能力

将鎏金文物融入课堂, 以文物成分数据、微观界面表征、工艺流程推演为探究主线, 可构建“文物实证—原理探析—思维建构—文化赋能”的一体化教学路径。既能依托真实文物证据, 培养学生宏观辨识、微观探析与证据推理的科学思维, 又能引导学生从科学视角阐释传统工艺原理, 明晰古代技艺的科学性, 实现科学思维培育与文化认同建构的有机融合。

### 4.2.2 深挖鎏金工艺实现科学认知与文化认同的进阶赋能

系统拆解鎏金工艺流程细节及其蕴含的化学原理, 能够破除学生“传统工艺仅为经验积累”的片面认知, 使学生认识到古代传统技艺是对物质性质与反应条件的精准把控与科学运用, 在深化化学认知的同时, 循序渐进培育学生的文化认同与文化自信。通过上述古代鎏金工艺的操作细节及其背后的化学原理揭示, 可让学生看到传统工艺并非经验主义, 而是对化学性质、反应条件的精准把控, 在理解科学原理的同时增强文化自信。

## 5 小结

传统鎏金工艺中蕴含系统的金属转化化学规律与传统技术智慧, 是中华优秀传统文化融入中学化

学教学的优质本土资源。本研究逐一梳理鎏金各道核心工序, 分析每一步操作背后微观层面的化学反应原理, 搭建起鎏金整套化学作用机制的理论分析框架, 并全面梳理鎏金工艺中蕴含的教学价值。鎏金既有可供学生开展实验探究的科学价值, 又能承担传统文化浸润育人功能, 是开展化学跨学科融合教学的良好素材。

## 参考文献

- [1] 赵雯. 汉字训诂视角下古代冶金科技素材的化学教学转化研究 [J]. 化学教育 (中英文), 2024, 45(02): 78-84. <https://doi.org/10.13884/j.1003-3807hxjy.2023050205>
- [2] 张莉, 陈晨. 古代金属文物修复中的化学探究性学习设计与实践 [J]. 中学化学教学参考, 2022, 41(18): 3437. <https://doi.org/10.13978/j.cnki.issn1002-2201.2022.18.015>
- [3] 陈彭年. 集韵 [M]. 北京: 中华书局, 2018.
- [4] 张治国, 杨益民, 王昌燧. 汉唐鎏金青铜器镀层界面结构与反应机制研究 [J]. 分析化学, 2019, 47(09): 1397-1404. <https://doi.org/10.19756/j.issn.0253-3820.191147>
- [5] 刘艳, 杨军昌, 谭盼盼. “错金银”新论 [J]. 文物保护与考古科学, 2019, 31 (4): 75-86. <https://doi.org/10.16729/j.cnki.1005-1538.2019.04.0075>
- [6] 纪娟, 马琳燕, 柏柯, 王展, 杨军昌, 谭盼盼. 贵州东汉巴郡守丞鎏金铜印的扫描电镜分析 [J]. 电子显微学报, 2019, 38 (4): 345-350. <https://doi.org/10.3724/SP.J.1123.2019.000345>
- [7] 李久盛, 刘洪波. 金属汞高温挥发动力学及贵金属-汞合金界面扩散行为 [J]. 金属学报, 2021, 57(05): 621-630. <https://doi.org/10.11900/0412.1961.2021.00058>
- [8] Mei J, Wang L, Rehren T, Zhao K, Zhang Z Y. Gold-mercury amalgamation gilding in ancient China: technology, materials and conservation [J]. Journal of Archaeological Science, 2017, 83: 112-122. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2017.05.006>
- [9] 王磊, 魏锐. 中华优秀传统文化融入化学课程的路径与教学范式 [J]. 课程·教材·教法, 2022, 42(08): 112-118. <https://doi.org/10.19877/j.cnki.kcjejf.2022.08.015>
- [10] Chi S, Li Y. Integrating ancient Chinese metal crafts into chemistry education to enhance cultural identity and conceptual understanding [J]. Journal of Chemical Education, 2023, 100(07): 2867-2875. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.3c00312>
- [11] 李秀辉, 燕绍九, 洪起虎, 陈翔, 王楠. 鎏金工艺界面扩散层的纳米表征 [J]. 材料科学学报, 2020, 36 (4): 499-504. <https://doi.org/10.11901/1005-3093.2020.0076>

- [12] Margreiter R, Valou I M, Radtke M, Schreiner M, Kainer K U. Investigations on fire-gilding [J]. *Archaeometry*, 2022, 64(6): 1465-1478. <https://doi.org/10.1111/arc.12797>
- [13] Ma R., Li ZM, Tang M., Zhang Y., Ma QL. Microstructural characteristics and formation of the gilded artifacts excavated from Han Tomb situated in Qufu, Shandong, China [J]. *npj Heritage Science*, 2025, 10(1): 43-58. <https://doi.org/10.1038/s43522-025-00392-7>
- [14] Pyykkö P. Relativistic effects in structural chemistry [J]. *Chemical Reviews*, 1988, 88(3): 563-594. <https://doi.org/10.1021/cr00085a002>
- [15] Ge F, Xue JF, Wang ZH, Xiong B, He Y. Real-time observation of dynamic heterogeneity of gold nanorods on plasma membrane with darkfield microscopy [J]. *Science China Chemistry*, 2019, 62: 1072-1081. <https://doi.org/10.1007/s11426-019-9456-9>
- [16] Zhang Y, Liu J. Kinetics of gold-mercury amalgamation reaction: Effect of surface contamination [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 835: 155321. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.155321>