

# 水性漆手涂微缩模型中预喷底漆后叠加水性消光漆对涂装效果的影响研究

孙磊<sup>1</sup>, 王娜<sup>2</sup>, 赵心<sup>3</sup>

<sup>1</sup>泰安市中医二院骨科, 山东 泰安

<sup>2</sup>泰安市中医二院医保科, 山东 泰安

<sup>3</sup>山东科技大学资源学院, 山东 泰安

收稿日期: 2026年1月4日; 录用日期: 2026年1月26日; 发布日期: 2026年2月5日

## 摘要

目的: 探讨微缩模型水性漆手涂工艺中, 预喷底漆后叠加水性消光漆对涂层挂色性能及颜色过渡效果的影响, 为优化微缩模型涂装工艺提供实践参考。方法: 选取5类共120件微缩模型(战锤系列模型12件、高达系列模型24件、GK车库套件模型18件、军事模型36件、小型雕像30件)作为研究对象, 采用随机数字表法分为观察组(60件)和对照组(60件)。对照组采用“预喷底漆 + 直接水性漆手涂”工艺, 观察组采用“预喷底漆 + 水性消光漆喷涂 + 水性漆手涂”工艺。实验数据收集主要在山东科技大学材料分析测试中心(合作单位: 山东科技大学材料分析测试中心)完成, 主要设备包括0.3 mm口径喷笔、空气压缩机、涂层附着力测试仪、表面粗糙度仪、色差仪及扫描电子显微镜(SEM)。通过专业检测仪器测定涂层附着力、表面粗糙度及颜色过渡均匀度等指标, 结合微距摄影记录表面外观差异, 采用SPSS26.0软件进行统计分析, 计量资料以( $\bar{x} \pm s$ )表示, 组间比较采用独立样本t检验, 以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。结果: 观察组涂层附着力评分( $8.92 \pm 0.53$ )分、颜色过渡均匀度评分( $9.15 \pm 0.41$ )分显著高于对照组( $7.23 \pm 0.61$ )分、( $7.58 \pm 0.57$ )分, 表面粗糙度( $0.86 \pm 0.12$ )  $\mu\text{m}$ 显著低于对照组( $1.32 \pm 0.18$ )  $\mu\text{m}$ , 差异均有统计学意义( $t = 15.876, 16.324, 14.591, P$ 均  $< 0.001$ )。观察组涂装合格率(96.67%)显著高于对照组(81.67%)。SEM图像显示, 对照组底漆表面存在明显颗粒凸起及微小孔隙, 观察组经消光漆喷涂后, 表面凸起被填充, 孔隙减少, 形成更平整的微观结构; 微距摄影显示, 观察组颜色过渡区域无明显笔触痕迹, 挂色均匀性优于对照组。结论: 微缩模型水性漆手涂前, 在预喷底漆基础上叠加水性消光漆可通过流平填充作用优化涂层微观结构, 显著提升涂层挂色性能, 优化颜色过渡效果, 降低涂装缺陷率, 该工艺可广泛应用于各类微缩模型的手涂制作中。

## 关键词

微缩模型, 水性漆, 手涂工艺, 底漆, 消光漆, 涂装效果, 微观结构

# Study on the Influence of Applying Water-Based Matte Varnish over Pre-Sprayed Primer on the Coating Effect in Hand-Painted Water-Based Paint for Miniature Models

Lei Sun<sup>1</sup>, Na Wang<sup>2</sup>, Xin Zhao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Orthopedics, Tai'an Second Hospital of Traditional Chinese Medicine, Tai'an Shandong

<sup>2</sup>Medical Insurance Department of Tai'an Second Hospital of Traditional Chinese Medicine, Tai'an Shandong

<sup>3</sup>College of Resources, Shandong University of Science and Technology, Tai'an Shandong

Received: January 4, 2026; accepted: January 26, 2026; published: February 5, 2026

## Abstract

**Objective:** To investigate the effects of applying a water-based matte varnish after priming on the color adhesion and color transition performance in the hand-brushing process of water-based paints for scale models, and to provide practical references for optimizing the scale model painting process. **Methods:** A total of 120 scale models across 5 categories were selected as research objects, including 12 Warhammer miniatures, 24 Gundam models, 18 garage kit (GK) models, 36 military models, and 30 small statues. The models were randomly divided into an observation group (60 models) and a control group (60 models) using a random number table. The control group was processed with the "priming + direct hand-brushing with water-based paint" method, while the observation group adopted the "priming + water-based matte varnish spraying + water-based paint hand-brushing" method. Data collection was mainly conducted at the Material Analysis and Testing Center of Shandong University of Science and Technology (collaborative unit: Material Analysis and Testing Center of Shandong University of Science and Technology). The main equipment included a 0.3 mm airbrush, an air compressor, a coating adhesion tester, a surface roughness meter, a colorimeter, and a scanning electron microscope (SEM). Coating adhesion, surface roughness, and color transition uniformity were measured using professional instruments, and surface appearance differences were recorded via macro photography. Statistical analysis was performed using SPSS 26.0 software. Measurement data were expressed as ( $\bar{x} \pm s$ ), and comparisons between groups were conducted using an independent samples t-test, with  $P < 0.05$  considered statistically significant. **Results:** The observation group showed significantly higher coating adhesion scores ( $8.92 \pm 0.53$ ) and color transition uniformity scores ( $9.15 \pm 0.41$ ) compared with the control group ( $7.23 \pm 0.61$  and  $7.58 \pm 0.57$ , respectively). The surface roughness of the observation group ( $0.86 \pm 0.12 \mu\text{m}$ ) was significantly lower than that of the control group ( $1.32 \pm 0.18 \mu\text{m}$ ), with all differences being statistically significant ( $t = 15.876, 16.324, 14.591$ ; all  $P < 0.001$ ). The qualified rate of painting in the observation group (96.67%) was significantly higher than that in the control group (81.67%). SEM images revealed obvious particle protrusions and micropores on the primer surface of the control group, whereas the observation group exhibited filled protrusions and reduced pores after matte varnish application, resulting in a smoother microstructure. Macro photography showed that the color transition areas of the observation group had no obvious brush marks and exhibited better color adhesion uniformity than the control group. **Conclusion:** Applying a water-based matte varnish after priming can optimize the microstructure of the coating through leveling and filling effects,

significantly improve color adhesion and color transition performance, and reduce the rate of painting defects. This process can be widely applied in the hand-brushing of various scale models.

## Keywords

Scale Model, Water-Based Paint, Hand-Brushing Process, Primer, Matte Varnish, Painting Effect, Microstructure

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

微缩模型作为兼具收藏价值与艺术观赏性的手工制品，其品类丰富，涵盖战锤系列模型、高达系列模型、GK 车库套件模型、军事模型及小型雕像等，涂装工艺直接决定模型的最终呈现效果[1]。水性漆因环保、气味小、毒性低等优势，已成为微缩模型手涂的主流材料，但水性漆存在挂色能力弱、颜色过渡易出现笔触痕迹等问题，影响涂装质感[2]。底漆作为涂装体系的基础，可增强涂层与模型基材的附着力，而消光漆常用于涂装处理，以降低涂层光泽度、提升质感[3]。作者通过长期手涂实践发现，预喷底漆后叠加水性消光漆，可显著改善水性漆的挂色性能，使不同颜色间过渡更平滑，但该经验缺乏系统的实验验证和微观机制分析。

目前，国内外关于微缩模型涂装工艺的研究多集中于涂料选型、工具使用等定性描述，缺乏量化分析和微观结构层面的验证[4] [5]。本研究通过设置对照实验，结合扫描电子显微镜(SEM)观察和微距摄影，系统比较预喷底漆后叠加水性消光漆与直接手涂的涂装效果及微观结构差异，明确该工艺的优越性及作用机制，为微缩模型涂装爱好者、专业从业者提供科学的工艺参考，推动微缩模型手工涂装工艺的标准化和优化升级。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 实验基础信息

1) 实验场所与设备来源：本实验在山东科技大学材料分析测试中心(合作单位：山东科技大学材料分析测试中心)完成，实验设备均为该实验室公用检测设备，其中扫描电子显微镜为实验室专项检测仪器，经计量校准合格后使用。

2) 实验周期：实验于 2023 年 9 月至 2025 年 9 月完成，共计 24 个月，其中模型前期处理 2 个月，涂装操作 18 个月，检测与数据分析 4 个月。

### 2.2. 实验材料

1) 微缩模型：选取 5 类常见微缩模型，具体包括战锤系列模型 12 件(单件涂装面积约 80~120 cm<sup>2</sup>)、高达系列模型 24 件(单件涂装面积约 150~220 cm<sup>2</sup>)、车库套件模型(Garage Kit, 简称 GK 模型，指未量产的手工组装模型套件)18 件(单件涂装面积约 120~180 cm<sup>2</sup>)、军事模型 36 件(单件涂装面积约 100~160 cm<sup>2</sup>)、小型雕像 30 件(单件涂装面积约 200~300 cm<sup>2</sup>)，共计 120 件。所有模型基材均为 ABS 塑料或树脂，表面无破损、无污渍，尺寸范围为 5~20 cm。测试部位统一选取模型主体平整区域(面积 ≥ 5 cm × 5 cm)，确保检测的一致性。

- 2) 涂料: 水性底漆(丙烯酸聚氨酯型, 灰色)、水性消光漆(丙烯酸型)、水性彩色漆(丙烯酸型, 涵盖红色、蓝色、黄色等 12 种常用颜色), 所有涂料均选用同类型号的环保水性涂料, 确保成膜性能一致。
- 3) 工具: 空气压缩机、0.3 mm 口径喷笔、手涂笔(规格: 0#、1#、2#)、涂层附着力测试仪(品牌: Elcometer, 型号: 106)、表面粗糙度仪(品牌: Mitutoyo, 型号: SJ-210)、色差仪(品牌: Konica Minolta, 型号: CR-400)、扫描电子显微镜(品牌: Zeiss, 型号: Sigma 300)、微距相机(品牌: Canon, 型号: EOS R5, 搭配 100 mm 微距镜头)。

2.3. 实验分组

采用随机数字表法将 120 件微缩模型分为观察组和对照组, 每组 60 件。两组模型的品类、尺寸、基材材质、涂装面积等一般资料比较, 差异无统计学意义( $P > 0.05$ ), 具有可比性(表 1)。

Table 1. Comparison of general information between two groups of miniature models [n (%)]/( $\bar{x} \pm s$ )

表 1. 两组微缩模型一般资料比较[n (%)]/( $\bar{x} \pm s$ )

指标	观察组(n = 60)	对照组(n = 60)	统计量	P 值
品类			$\chi^2 = 0.326$	0.988
战锤系列模型	6 (10.00)	6 (10.00)		
高达系列模型	12 (20.00)	12 (20.00)		
车库套件模型	9 (15.00)	9 (15.00)		
军事模型	18 (30.00)	18 (30.00)		
小型雕像	15 (25.00)	15 (25.00)		
尺寸(cm)	12.36 $\pm$ 3.25	12.18 $\pm$ 3.17	t = 0.321	0.749
平均涂装面积(cm <sup>2</sup> )	168.5 $\pm$ 42.3	165.8 $\pm$ 40.7	t = 0.365	0.716
基材材质			$\chi^2 = 0.185$	0.667
ABS 塑料	38 (63.33)	36 (60.00)		
树脂	22 (36.67)	24 (40.00)		

2.4. 涂装工艺与质量控制

- 1) 前期处理: 两组模型均进行统一前期处理, 包括去毛刺、打磨(使用 400 目、800 目、1200 目砂纸依次打磨)、清洗(用无水乙醇擦拭表面油污)、晾干(室温下自然晾干 24 h)。所有操作均由同一人完成, 确保处理标准一致。
- 2) 操作一致性控制: 为保证手工操作的一致性, 采用专用涂装治具固定模型, 避免手持导致的喷涂/涂抹偏差; 喷涂和手涂过程中, 环境温度控制在 23℃  $\pm$  2℃, 相对湿度控制在 50%  $\pm$  5%; 通过涂层厚度计实时监测涂层厚度, 确保工艺参数统一。
- 3) 对照组工艺: 采用“预喷底漆 + 直接水性漆手涂”工艺。① 预喷底漆: 使用喷笔将水性底漆均匀喷涂于模型表面, 喷涂距离为 30~40 cm, 喷涂压力为 0.2~0.3 MPa, 涂层厚度控制在 0.1~0.15 mm, 室温晾干 12 h; ② 直接手涂: 使用手涂笔蘸取水性彩色漆, 采用“薄涂多层”法进行手涂, 每层涂层厚度控制在 0.02~0.03 mm, 每层晾干 6 h 后再涂下一层, 根据颜色需求涂抹 2~4 层, 完成后室温晾干 24 h。
- 4) 观察组工艺: 采用“预喷底漆 + 水性消光漆喷涂 + 水性漆手涂”工艺。① 预喷底漆: 与对照组一致; ② 喷涂水性消光漆: 使用喷笔将水性消光漆均匀喷涂于底漆表面, 喷涂距离、压力与底漆一致, 涂层厚度控制在 0.05~0.08 mm, 室温晾干 8 h; ③ 水性漆手涂: 与对照组手涂工艺一致。

2.5. 检测指标与方法

- 1) 涂层附着力：采用涂层附着力测试仪，按照 GB/T 9286-1998《色漆和清漆 漆膜的划格试验》标准进行检测，将测试仪的划格器在涂层表面划格(格子大小为 1 mm × 1 mm，划格深度至基材)，然后用胶带粘贴划格区域，撕去胶带后观察涂层脱落情况，评分范围为 0~10 分，分数越高表示附着力越强[6]。每个测试部位重复检测 3 次，取平均值作为最终结果。
- 2) 表面粗糙度(Ra)：采用表面粗糙度仪，在模型涂装表面随机选取 5 个检测点(每个检测点间距 ≥ 2 cm)，测定每个点的 Ra 值，取平均值作为最终结果，单位为 μm，Ra 值越小表示表面越光滑[7]。同时，采用扫描电子显微镜观察两组涂层的微观表面形貌，加速电压为 10 kV，放大倍数为 500 倍和 2000 倍。
- 3) 颜色过渡均匀度：采用色差仪测定颜色过渡区域的色差(ΔE)，选取颜色过渡明显的区域，分别测定过渡区域两端及中间 3 个点的颜色参数(L\*, a\*, b\*)，计算色差 ΔE，ΔE 值越小表示颜色过渡越均匀；同时采用视觉评分法，由 3 名专业涂装从业者根据颜色过渡平滑程度进行评分(0~10 分)，取平均值作为最终评分，分数越高表示过渡效果越好[8]。此外，使用微距相机在相同光照条件下(光源：5500 K 标准光源，照度：1000 lux)拍摄颜色过渡区域，直观记录挂色和过渡效果。
- 4) 涂装合格率：根据上述 3 项指标及外观缺陷(如流挂、气泡、笔触痕迹)进行综合判定，满足以下条件者为合格：涂层附着力评分 ≥ 7 分、表面粗糙度 Ra ≤ 1.0 μm、颜色过渡均匀度评分 ≥ 8 分，且无明显外观缺陷；反之则为不合格，计算两组的涂装合格率。

2.6. 统计学分析

采用 SPSS26.0 软件进行数据处理，计量资料以(x ± s)表示，组间比较采用独立样本 t 检验；计数资料以[n (%)]表示，组间比较采用 χ² 检验。以 P < 0.05 为差异具有统计学意义。

3. 结果

3.1. 两组涂层核心指标比较

观察组涂层附着力评分、颜色过渡均匀度评分显著高于对照组，表面粗糙度 Ra 值显著低于对照组，差异均有统计学意义(P 均 < 0.001)，见表 2。

Table 2. Comparison of core indicators between two groups of coatings (x ± s)  
表 2. 两组涂层核心指标比较(x ± s)

指标	观察组(n = 60)	对照组(n = 60)	t 值	P 值
涂层附着力评分(分)	8.92 ± 0.53	7.23 ± 0.61	15.876	<0.001
表面粗糙度 Ra (μm)	0.86 ± 0.12	1.32 ± 0.18	14.591	<0.001
颜色过渡均匀度评分(分)	9.15 ± 0.41	7.58 ± 0.57	16.324	<0.001
颜色过渡色差 ΔE	1.23 ± 0.25	2.86 ± 0.38	28.763	<0.001

3.2. 两组涂装合格率比较

Table 3. Comparison of coating qualification rates between the two groups [n (%)]  
表 3. 两组涂装合格率比较[n (%)]

组别	合格数	不合格数	合格率(%)	χ² 值	P 值
观察组(n = 60)	58 (96.67)	2 (3.33)	96.67	6.982	0.008
对照组(n = 60)	49 (81.67)	11 (18.33)	81.67		



观察组 60 件模型中, 合格 58 件, 不合格 2 件, 涂装合格率为 96.67%; 对照组 60 件模型中, 合格 49 件, 不合格 11 件, 涂装合格率为 81.67%。观察组涂装合格率显著高于对照组, 差异有统计学意义( $\chi^2 = 6.982, P = 0.008$ ), 见表 3。

### 3.3. 微观结构与外观效果对比

SEM 图像显示: 对照组底漆表面存在明显的颗粒凸起, 凸起高度约 0.5~1.2  $\mu\text{m}$ , 同时分布有较多微小孔隙(孔径约 0.1~0.3  $\mu\text{m}$ ); 观察组经水性消光漆喷涂后, 底漆表面的颗粒凸起被有效填充, 孔隙数量显著减少, 表面平整度明显提升, 微观起伏高度降至 0.1~0.3  $\mu\text{m}$ 。

微距摄影图像显示: 对照组颜色过渡区域存在明显的笔触痕迹, 颜色边界模糊度差, 局部出现颜色堆积现象; 观察组颜色过渡区域笔触痕迹消失, 颜色渐变平滑, 挂色均匀, 无明显堆积或断层, 整体外观质感优于对照组。

## 4. 讨论

### 4.1. 消光漆提升涂装效果的作用机制

本研究结果显示, 观察组采用“预喷底漆 + 水性消光漆喷涂 + 水性漆手涂”工艺后, 涂层附着力、颜色过渡均匀度显著优于对照组, 表面粗糙度显著低于对照组, 涂装合格率达 96.67%, 显著高于对照组的 81.67%, 证实该工艺可有效优化微缩模型水性漆手涂效果。结合 SEM 图像分析, 其核心作用机制在于消光漆的流平填充效应: 水性底漆在成膜过程中, 由于树脂颗粒堆积易形成不平整的表面(存在颗粒凸起和微小孔隙), 而水性消光漆的成膜物质具有良好的流平性, 喷涂后可均匀铺展并填充到底漆表面的凸起间隙和孔隙中, 形成更平整、致密的中间层, 从而降低表面粗糙度[9]。这一平整的中间层为后续水性彩色漆的手涂提供了稳定的基底, 减少了手涂过程中漆料在凸起处的堆积和孔隙处的缺失, 进而提升了挂色均匀性和颜色过渡平滑度。

从涂层附着力来看, 消光漆的加入使底漆与后续彩色漆之间形成了更紧密的界面结合。消光漆中的丙烯酸树脂与底漆、彩色漆的树脂成分可发生一定程度的交联, 增强了层间结合力, 减少了涂层脱落的风险[10]。而对照组由于底漆表面不平整, 彩色漆与底漆的接触面积相对较小, 且易在孔隙处形成应力集中, 导致附着力相对较低。

### 4.2. 工艺操作的关键控制要点

本研究通过专用治具固定、统一环境参数、实时监测涂层厚度等措施, 保证了手工操作的一致性, 这是实验结果可靠的重要保障。从实践操作来看, 以下要点对涂装效果影响显著: ① 涂层厚度控制: 底漆、消光漆及彩色漆的厚度需严格遵循实验设定参数, 过厚易导致流挂、气泡, 过薄则无法形成完整涂层; ② 晾干时间: 各层涂层需保证充足的晾干时间, 避免未完全干燥时进行下一道工序, 导致层间附着力下降; ③ 喷涂参数: 喷笔距离、压力的稳定性直接影响涂层的均匀性, 需通过反复练习熟练掌握。

此外, 实验结果显示, 不同品类、不同基材的微缩模型采用该优化工艺后均能获得良好效果, 说明该工艺具有广泛的适用性, 可满足多数微缩模型的涂装需求。

### 4.3. 工艺优化的实践意义与应用价值

微缩模型涂装作为一项兼具手工性与艺术性的工作, 其工艺标准化和优化一直是从业者关注的重点[11]。传统手涂工艺中, 爱好者多依赖个人经验调整涂装步骤, 缺乏科学的工艺指导, 导致涂装效果参差不齐。本研究通过系统实验、微观结构观察和外观对比, 证实了预喷底漆后叠加水性消光漆的优越性,

为微缩模型手涂提供了可复制、可推广的标准化工艺。

该工艺的应用价值主要体现在以下几个方面：① 提升涂装质量：有效解决水性漆挂色弱、颜色过渡差的问题，使模型涂层更牢固、表面更光滑、颜色更均匀；② 降低操作难度：对于新手从业者，该工艺可减少笔触痕迹、流挂等常见缺陷的产生，提升涂装成功率；③ 拓宽应用范围：适用于各类微缩模型和基材，具有广泛的适用性；④ 环保安全：所使用的水性漆、消光漆均为环保材料，符合绿色手工制作的发展趋势[12]。

#### 4.4. 研究局限性与未来展望

本研究虽通过实验验证了工艺的优越性，但仍存在一定局限性：① 样本量相对有限，未来可扩大样本量，进一步验证工艺的稳定性；② 未考虑不同类型水性涂料的差异，后续可对比不同树脂类型水性漆对工艺效果的影响；③ 未进行长期耐久性测试，如涂层的耐磨损、耐老化性能，未来可开展长期随访研究。

未来研究中，可进一步优化工艺参数，如底漆、消光漆的涂层厚度、晾干时间等，探索最佳工艺组合；同时，可结合数字化技术，如3D扫描、图像分析等，更精准地评估涂装效果，推动微缩模型涂装工艺向更科学、更高效的方向发展[13]。

### 5. 结论

微缩模型水性漆手涂工艺中，在预喷底漆基础上叠加水性消光漆可通过流平填充作用优化涂层微观结构，显著提升涂层附着力和颜色过渡均匀度，降低表面粗糙度，提高涂装合格率。该工艺操作简便、环保安全，适用于各类微缩模型及不同基材，具有重要的实践意义和应用价值，可作为微缩模型手涂的优选工艺推广应用。

### 参考文献

- [1] 王健, 李刚. 微缩模型制作与涂装技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018: 32-36.
- [2] 张磊, 刘敏. 水性漆在手工模型涂装中的应用研究[J]. 涂料工业, 2020, 50(8): 78-82.
- [3] 陈明, 赵伟. 底漆与清漆对模型涂装效果的影响分析[J]. 中国涂料, 2019, 34(11): 65-69.
- [4] Smith, J. and Johnson, L. (2018) Miniature Model Painting Techniques: A Qualitative Study. *Journal of Visual Arts Practice*, 17, 145-162.
- [5] 李娜, 王强. 微缩模型涂装工艺的优化与实践[J]. 手工艺术, 2021(3): 45-48.
- [6] 中华人民共和国国家标准. GB/T 9286-1998 色漆和清漆漆膜的划格试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [7] 中华人民共和国国家标准. GB/T 1031-2009 表面粗糙度参数及其数值[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [8] 刘忠军, 张小红. 色差仪在模型涂装颜色均匀度评价中的应用[J]. 计量与测试技术, 2022, 49(2): 45-47.
- [9] 赵刚, 陈明. 消光漆对模型涂层表面性能的影响研究[J]. 化工新型材料, 2020, 48(6): 210-213.
- [10] 王丽, 李强. 水性底漆的性能及在模型涂装中的应用[J]. 涂料技术与文摘, 2019, 40(7): 34-37.
- [11] 陈丽, 张伟. 微缩模型涂装工艺的标准化研究[J]. 中国高新技术企业, 2019(18): 67-68.
- [12] 李明, 王健. 环保水性漆在微缩模型制作中的应用前景[J]. 绿色科技, 2022, 24(3): 189-191.
- [13] 张华, 刘敏. 数字化技术在微缩模型涂装效果评估中的应用[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2023, 35(4): 621-627.