

油漆外观提升方法的探究与实践

崔普伟¹, 李文鹏², 陈道飞¹, 倪海华¹, 张龙², 王超², 曹召军²

(1.振宜汽车有限公司, 安徽 安庆 246000; 2.零跑科技股份有限公司, 浙江 金华 321000)

摘要: 在汽车消费市场不断升级的背景下, 消费者对汽车油漆外观的感官质量提出了更高、更精细的要求。提升油漆外观目视效果成为车企提升产品竞争力的关键一环, 其中, 颜色选择的精准适配、金属颜料的合理运用、荧光效果带来的独特视觉体验以及特殊效果涂层的创新开发等因素, 对最终呈现效果影响深远。本文从油漆外观目视的光学原理切入, 深度剖析各类影响因素, 并结合实际案例, 系统探究提升油漆外观的具体方法, 为行业从业人员提供专业、可借鉴的经验参考。

关键词: 粗糙度; 橘皮结构谱图; 扇幅搭接; 膜厚均匀性

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)08-0056-04

Exploration and Practice of Improving the Appearance of Paint

CUI Pu-wei¹, LI Wen-peng², CHEN Dao-fei¹, NI Hai-hua¹, ZHANG Long², WANG Chao², CAO Zhao-jun²

(1.Zhenyi Automobile Co., Ltd., Anqing 246000, Anhui, China;

2.Leapmotor Technology Co., Ltd., Jinhua 321000, Zhejiang, China)

Abstract: Against the backdrop of the continuous upgrading of the automotive consumption market, consumers have put forward higher and more refined requirements for the sensory quality of car paint appearance. Improving the visual effect of paint appearance has become a key link for car manufacturers to enhance the competitiveness of their products. Among them, factors such as the precise matching of color selection, the rational application of metallic pigments, the unique visual experience brought by fluorescence effects, and the innovative development of special effect coatings have a profound impact on the final presentation effect. This article will start from the optical principles of visual inspection of paint appearance, deeply analyze various influencing factors, and combine practical cases to systematically explore specific methods for improving the appearance of paint, providing professional and referenceable experience for industry practitioners.

Key words: roughness; orange peel structure spectrum; fan overlap; film thickness uniformity

0 引言

在汽车行业竞争日益激烈的当下, 高质感的汽车油漆外观质量已成为各主机厂竞相追逐的核心课题。高质感油漆外观不仅能提升产品的视觉吸引力, 还能增强品牌的市场竞争力。要制造出具备高光泽、高鲜艳性、平整强反射特质的高质感油漆外观, 需深入剖析影

响其质量的目视原理, 构建科学合理的测量评价方法, 并精准把握各类影响因素。这要求我们从材料、工艺、设备 3 个关键维度入手, 逐项提出严格要求, 并开展针对性地攻关解决。材料方面, 要严格筛选优质涂料与添加剂; 工艺方面, 要精细调控喷涂参数与流程; 设备方面, 确保先进且稳定的喷涂与固化设备运行。本文将围绕这 3 个维度展开详细分析研究, 探寻切实可行的解决方案, 助力主机厂达成高质感油漆外观的制造目标。

1 油漆外观原理

1.1 目视原理

油漆外观目视原理研究, 给人们的目视效果不仅

收稿日期: 2024-04-09

作者简介: 崔普伟(1979—), 男, 本科, 工程师, 主要从事汽车涂装工艺、涂装新颜色及材料开发、涂装同步工程等相关工作。

E-mail: cuipuwei2022@qq.com。

要聚焦在物体的表面上,更要聚焦在光源反射的影像上,通过对油漆外观的研究,聚焦在物体表面主要是长波和短波。长波主要是 W_c 、 W_d 、 W_e 3 个波段,决定漆膜的整体平整度和丰满感,是“第一眼”印象的主要因素。短波主要是 W_b 、 W_c ,影响近距离观察时漆膜的细腻程度,聚焦在光源反射的影像主要是雾影、鲜艳性和光泽。DOI 主要是 du 、 W_a 、 W_b ,关联着漆膜的镜面效果和高级感,在自然光下目视效果体现不出物体表面的波纹,而目视感官的效果体现在光源反射的影像。因此,提升油漆外观就需要提升目视效果,优化与目视感官效果强相关的波纹及特性。

人眼能识别的波纹尺寸,依据观测的距离不同而存在差异,0.4 m 识别 1~3 mm 的波纹,≥3 m 识别 10~30 mm 的波纹,也就是人眼目视外观时在 40 cm 距离看短波,3 m 以上看长波,更近的距离识别的是 0.3~1 mm 的波纹,<0.1 mm 的波纹人眼是无法识别的。

1.2 测量原理

色差仪器检测油漆外观的原理就是用仪器内部的光源替代自然光源(D65),扫描物体表面不同的波纹,实质上是探测器代替人眼来模拟人眼对物体波纹的观察状态,通过数字滤波器进行统计,得出 6 个不同波长的数据,分别为 du (<0.1 mm)、 W_a (0.1~0.3 mm)、 W_b (0.3~1 mm)、 W_c (1~3 mm)、 W_d (3~10 mm)、 W_e (3~10 mm)。

外观数据橘皮结构谱图可以看出:长波 LW 的尺寸为 1.2~12 mm,短波 SW 的尺寸为 0.3~1.2 mm。 SW 主要为 W_b 以及 W_c 2 个波段, LW 主要为 W_c 、 W_d 、 W_e 3 个波段,DOI 主要为 du 、 W_a 、 W_b 3 个波段,所以, LW 、 SW 为综合性的指标。

2 油漆外观评价发展

最开始对油漆外观的评价为完全目视评价,也借助油漆外观等级板作为参考,主观性很强,客观上需要通过检测仪器对物体表面进行检测,以量化数据进行

评价,到 1990 年才运用了这项技术,通过分析物体表面长波 LW 以及短波 SW 数据来对物体表面的平整度进行评级,该检测方法能在一定程度上分析涂膜的外观状态。然而,随着材料以及工艺的不断演化以及从业人员对油漆外观要求的不断提升,只管控 LW 、 SW 这两个综合性的参数并不能满足日常工作的需要。在检测仪器不断升级后,增加 du 、 W_a 、 W_b 、 W_c 、 W_d 、 W_e 6 个波长范围以及 DOI(图像清晰度)的测量,配合外观橘皮结构谱图,以便更高效地对油漆外观进行分析以及评价。结合对油漆外观管控的需要和影响目视的强相关性,行业开始把油漆外观的评价方法进行简化,各个主流车企对油漆车身的评价开始将 W_a ~ W_e 等波段纳入其外观的评价标准中去,建立自己的评价标准方法,如 Nissan 的 NID、福特的 CF 等。Nissan 的 NID 便是将 5 个波段的数据按照一定的比例系数进行换算后得到的一个外观指标($NID < 1.1$)。前面 3 个阶段都是检测和评价物体表面波纹的波长,2013 年,奥迪汽车在 BYK 用户会议上提出了一种新的外观标准方法,即管控主导波长的波纹和其最大振幅再进行加权评价的标准方法。

3 油漆外观影响因素

依据大量现场工艺经验和外观数据橘皮结构谱图的验证,不同波段的影响因素存在差异,一般 du 波段主要受清漆材料浑浊度(清漆的分散效果)影响, W_a 、 W_b 、 W_c 3 个波段主要受底材(粗糙度、平整性)影响, W_c 、 W_d 、 W_e 3 个波段主要受清漆涂层厚度影响。运用油漆外观橘皮结构谱图可准确锁定现场最佳的分层膜厚对外观的影响,可快速锁定现场白车身、电泳涂层的粗糙度对外观的影响。

以珍珠白为分析对象,制作了 du 、 W_a 、 W_b 、 W_c 、 W_d 、 W_e 6 个波段与 LW (长波)和 SW (短波)数值关联趋势图,详见图 1。

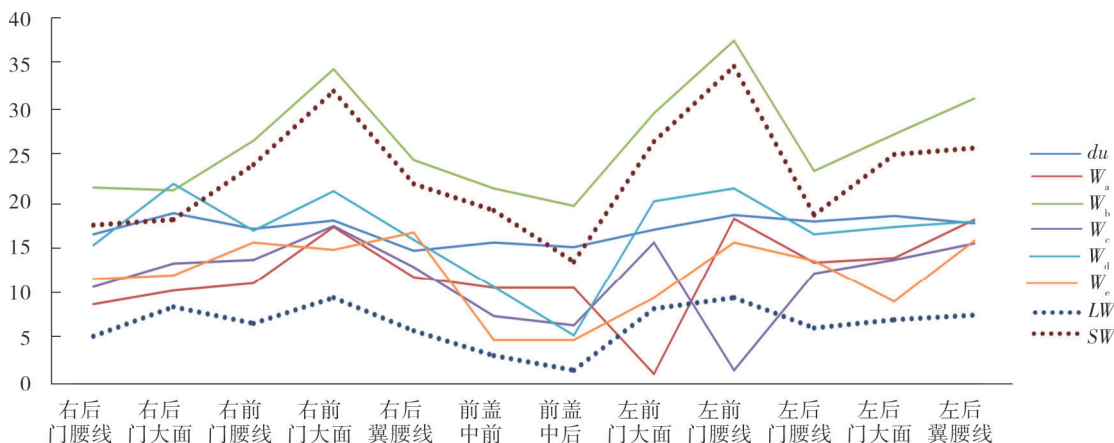


图 1 不同波段与长短波关联趋势

从图 1 可以清晰地发现, W_b 与 SW 的关联趋势高度吻合, W_d 与 LW 数据关联趋势高度吻合, 也佐证了外观橘皮结构谱图的准确性。

4 油漆外观提升实践

4.1 材料升级

不同配方涂料的流平特性不尽相同, 涂料本身的雾化效果和流平性决定了最终固化后的微观粗糙度, 那么选择流平性和抗流挂性平衡好的涂料, 对最终油漆外观提升的影响显而易见。引进新的涂料品牌或涂料配方, 能较快地解决和提升油漆外观。通过将油漆外观目视橘皮、通透性不佳的 4 种色漆进行油漆品牌的升级切换, 油漆外观长波降低 1 个单位, 短波降低 3 个单位, 外观数据状态和目视效果得到较大提升, 详见表 1~2。

表 1 原油漆品牌外观

颜色	平面 LW	平面 SW	立面 LW	立面 SW	综合 DOI
绿色	3.44	16.79	7.51	17.70	87.77
黄色	3.53	13.61	7.68	15.66	93.77
黑色	3.12	14.15	6.54	17.03	94.22
银色	3.11	13.93	9.89	17.37	86.08

表 2 升级油漆品牌外观

颜色	平面 LW	平面 SW	立面 LW	立面 SW	综合 DOI
绿色	2.77	11.42	6.92	14.86	88.65
黄色	2.48	12.43	6.50	14.78	92.84
黑色	2.57	10.42	5.88	11.54	94.15
银色	2.65	11.03	6.27	14.41	86.29

为了避免同一颜色不同批次涂料的流平性差异, 我们建立了升级后涂料的数据库, 记录每个批次的施工参数微量, 包括环境温湿度的控制, 通过数据驱动持续优化。

4.2 底材改进

一般白车身板材粗糙度 $Ra \leq 1.2 \mu\text{m}$ 时, 采取传统磷化电泳工艺, 满足后道面漆工艺, 达到较好的油漆外观水平。薄膜磷化电泳工艺需要白车身板材粗糙度达到 $\leq 1.0 \mu\text{m}$, 才能满足后道面漆工艺, 达到较好的油漆外观水平。因此油漆外观的改进提升就要对板材和电泳漆膜的质量进行不断改进, 底层的漆膜越均匀越细腻, 对橘皮的优化控制会更好。

那么, 如何解决电泳涂层膜厚不均匀、粗糙度和流平性差等底涂漆膜外观质量问题为后道工序油漆外观质量提供非常好的底材基础就尤为重要了。通过对硅烷膜致密性调整和电泳成膜速率调整, 电泳粗糙度降

低至 $0.27 \mu\text{m}$ 左右(见表 3), 为后道面漆工艺提供较好的底材, 特别是 B1B2 面漆紧凑工艺, 外观短波数值降低至 15 左右(见表 4)。

表 3 粗糙度数据对比

项目	点位/ μm									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
调整前	0.33	0.32	0.28	0.27	0.26	0.37	0.28	0.28	0.29	0.37
调整后	0.28	0.28	0.25	0.25	0.25	0.30	0.28	0.23	0.26	0.34

表 4 外观短波数据对比

项目	点位									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
调整前	12.1	18.3	17.2	21.2	18.9	17.2	16.6	19.3	18.3	19.2
调整后	10.2	16.5	14.4	17.0	17.0	13.5	12.4	16.2	16.1	16.6

调整硅烷膜致密性的方法有: 1) 降低脱脂游离碱度, 减少对镀锌板材的腐蚀, 避免印痕、花斑出现; 2) 降低硅烷活化点, 减轻膜重, 提升铜离子含量, 促进硅烷成膜; 3) 提高前处理电泳喷淋冲洗能力, 降低表面粗糙度和颗粒。

调整电泳成膜速率的方法有: 1) 调整各段电泳电压及时间, 控制膜厚; 2) 调整软启动时间, 控制漆膜均匀性; 3) 调整溶剂含量, 促进流平, 降低漆膜粗糙度。

4.3 膜厚均匀性提升

油漆车身各区域各涂层膜厚均匀性差, 膜厚均匀性标准差 $> 8 \mu\text{m}$, 会导致油漆外观数据波动大和目视感官质量不高, 通过分层膜厚的优化和机器人仿形轨迹调整, B1、B2 涂层膜厚极差膜厚管控在 $3 \mu\text{m}$, 清漆涂层极差膜厚管控在 $5 \mu\text{m}$, 总膜厚均匀性标准差 $< 5 \mu\text{m}$, 见表 5。

表 5 分层膜厚数据对比

项目	膜厚/ μm						
	中涂	银色	黑色	绿色	棕色	白色	清漆
优化前	14	18	15	15	17	16	55
优化后	11	15	13	13	14	14	64

对整车喷涂机器人仿形轨迹进行 10 个区域划分, 实施各区域单独喷涂, 对机器人采用 199 种不重复刷子表设定, 为每段喷涂轨迹线调试单独的工艺参数组。对车身 19 个重点区域设置喷涂点, 以保障有效的喷涂重叠率。

4.4 参数精细化

汽车行业对油漆车身外观质量的划分一般都分 A

区、B区,特别是A区为人们直接目视的区域。为提升A区外观目视效果,依据车身造型曲线,要对机器人喷涂仿形姿态和角度进行精细化调整,喷枪始终垂直于喷涂面,确保走枪路径平行,同一造型面走枪速度均匀,避免扇幅变形和重叠区域不均匀而导致的膜厚波动。

喷涂扇幅是指涂料从喷枪出来后形成的雾化图案的宽度,而扇幅搭接率则指相邻喷涂轨迹之间的重叠程度,通常为50%~70%。理想的扇幅搭接是保证涂层膜厚均匀性的重要条件。搭接不足会导致条状膜厚偏低(凹陷),搭接过多会导致条状膜厚偏高(凸起),这些膜厚周期性的起伏是影响长波的来源。通过机器人喷涂参数的DOE试验设计验证,不断进行测试(喷涂试板、测量膜厚和外观等),校准机器人雾化转速、扇形空气流量,电压等。

调整油漆车身A面喷涂扇幅,扇幅搭接提升1/6,调整边角等特殊区域喷涂扇幅和电压,扇幅搭接减少1/5,同时,对复杂的造型喷涂轨迹进行动态调整并降低喷枪速度,既提升了机器人喷涂效果和材料利用率,也解决了边角等特殊区域的肥边、针孔和流挂等油漆缺陷问题。同时,需要优化各机器人各区域的喷涂顺序,解决喷涂过程的漆雾干扰问题,优化闪干效果,提升油漆外观的通透性和流平性。

5 油漆外观发展趋势

油漆外观评价方法的结果与目视感官外观不能完全对应,这就要深入研究油漆外观评价方法,油漆外观评价的标尺要多样化,评价因素要全面,如闪烁效果、高光漆面、亚光质感等。

首先,漆膜丰满度对油漆外观感官质量的影响至关重要。漆膜厚度和均匀性是提升油漆外观感官质量的基础,体现在油漆外观目视的丰满度上,给人以视觉冲击,现在有主机厂已开始采取4C3B工艺,以提升漆膜丰满度。

其次,特殊效果颜色对油漆外观感官质量的影响也是不容忽视的。通过在涂层中加入特殊光学微粒,实现了阳光下变色的惊艳效果。这种技术利用纳米级多层干涉结构,精确控制不同波长光的反射效果,实现动态变化的色彩表现。还有在涂料中加入特殊的金属(粉)薄片等,实现金属光泽的色调,提升了目视效果。那么,不同颜色适合什么样的金属粉,适合什么样的造型才能体现出目视外观的质感,也是油漆外观发展的趋势。

6 结语

在汽车制造领域,高质感油漆外观是提升产品竞争力与品牌形象的关键要素。结合对油漆外观目视原

理和外观数据测量原理的深入研究,我们发现漆膜的目视外观效果受诸多因素影响,其中橘皮现象、橘皮结构谱图以及膜厚均匀性是最为主要的因素。橘皮的存在会破坏漆面的平整度和光滑感,使光线反射变得杂乱无章,进而降低漆膜的整体美观度;而橘皮结构谱图则反映了橘皮的分布特征和严重程度,为评估和改善漆膜质量提供了重要依据;膜厚均匀性直接影响着漆膜的物理性能和光学性能,不均匀的膜厚会导致颜色差异、光泽度不一致等问题。

通过油漆外观提升的实践运用,我们深刻认识到在正常喷涂参数范围内各涂层油漆材料在汽车外观设计起着举足轻重的作用。不同材料具有不同的特性,合理选择和搭配能够显著改善漆膜的外观效果。同时,加强对底材流匀性的改进至关重要,良好的底材流匀性可以为油漆提供均匀的附着基础,减少橘皮等缺陷的产生。此外,对机器人喷涂仿形进行精细化调整,能够确保油漆均匀、准确地喷涂在车身表面,进一步提高膜厚均匀性。

综上所述,通过深入研究目视与测量原理,明确关键影响因素,并采取改进底材流匀性、精细化调整机器人喷涂仿形等具体方法,我们能够有效优化涂料目视外观表现,降低涂装技术对漆膜外观的负面影响,从而打造出更具质感和吸引力的汽车油漆外观。

参考文献:

- [1] 许理琰,王雷勇,李博文,等.轿车漆膜目视外观提升研究[J].涂料工业,2016(9):73-79.
- [2] 冉浩,高伟峰.一种评价汽车漆膜外观的方法[J].电镀与涂饰,2016(14):738-742.
- [3] 何章翔.油漆车身橘皮控制研究[J].现代涂料与涂装,2011(4):41-43.
- [4] 高磊,完颜成功,韩华全,等.CCMS油漆品质外观提升[J].现代涂料与涂装,2024(1):51-53.
- [5] 李亚林.喷涂机器人在汽车车身涂装的应用与质量控制研究[D].长沙:湖南大学,2012.
- [6] 宋海泉,朱广,郭瑞,等.客车车身油漆外观光泽影响因素及提升措施[J].客车技术与研究,2024(2):55-58.
- [7] 王明,完颜成功,强俊,等.油漆外观能力提升创新成果探讨[J].现代涂料与涂装,2024(8):60-62.
- [8] 完颜成功,高磊,乔一行,等.浅谈新车型商品化过程涂装质量问题规避[J].现代涂料与涂装,2023(5):28-30. ◆

