客车车身油漆色差原因及控制

胡 玲，陈 向，黄茂韶，傅赟果，黄斐荣
（比亚迪汽车工业有限公司，广东 深圳 518118）

摘 要：针对客车涂装中车身油漆的色差问题，从油漆成分、涂装工艺、施工环境等方面分析油漆色差产生的原因，并提出控制措施。

关键词：客车车身；油漆；色差；控制
中图分类号：U466 **文献标志码**：A **文章编号**：1006-3331(2024)01-0059-04

Reason and Control of Color Difference on Bus Body Paint Appearance

HU Ling, CHEN Xiang, HUANG Maoshao, FU Yunguo, HUANG Feirong
(BYD Automobile Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract: Aiming at the color difference of body paint in bus painting, this paper analyzes the reason for the color difference in paint appearance from the aspects of paint composition, painting process, and construction environment, and proposes the control measures.

Key words: bus body; paint; color difference; control

随着客车消费市场的发展和消费者审美水平的提高，人们对客车的外观品质要求也越来越高。目前，客车多采用定制化生产模式，由于涂装作业自动化水平较低，且客车车身结构复杂，材料种类较多，油漆色差问题一直是客车涂装生产中的难题[1]。造成色差的原因较为复杂，涉及涂装作业的整个过程，这给客车油漆色差控制带来了挑战。本文从技术层面较深入地分析客车车身油漆色差产生的原因，并提出相应的控制措施。

1 客车车身油漆色差原因

油漆色差评价是为了判断涂装的油漆颜色匹配是否可以被接受，有目视评价和仪器测试评价两种方式，以目视评价为主，仪器评价为辅。

客车车身油漆色差产生的原因较为复杂，无法简单地用具体的特征或过程来进行描述。但可以基于颜色的三个属性（即色调、明度和彩度）[2]，在油漆成分、喷涂表面、喷涂技术、喷涂环境、烘干技术等方面进行分析。

1.1 油漆成分

油漆的颜料对光有吸收特性，这是油漆具有遮盖力的原因，也是油漆颜色表征的基础。油漆的遮盖力受油漆涂层中的颜料粒子浓度和排布方式的影响[3]。当油漆膜厚不均匀时，会因油漆涂层中的颜料粒子分布不均匀而导致色差。不同批次油漆颜料种类不一样时，会因存在颜料同色异谱特性而导致色差[4]。此外，油漆分散介质的挥发性对油漆黏度影响很大，黏度的变化会影响颜料粒子在油漆涂层中的分布，从而导致油漆色差问题。如果油漆在批次检测时存在色差，一般很难在实车上通过施工工艺优化得到改善[5]。

油漆中可能包含的其他成分（如铝粉或珠光粉）对光具有复杂的作用过程（包括反射和透射），而且这些过程也受到这些成分的浓度和排布方式的影响，

收稿日期：2023-10-11。

第一作者：胡 玲（1982—），女，工程师；主要从事汽车油漆外观质量提升的研究工作。E-mail：13632997247@163.com。
通讯作者：黄斐荣（1989—），男，博士；助理工程师；主要从事汽车油漆外观质量提升的研究工作。E-mail：hfeirn101006@163.com。

并最终反映在色差上。例如,铝粉金属漆除了有颜料的吸收作用外,还存在片状铝粉的镜面反射,铝粉自身的形态和排布方式会导致不同的光学效果,所以金属漆的色差还反映在明度上。珠光漆中的珠光粉为半透明材料,对光兼有漫反射、透射和镜面反射,它这种复杂的光作用过程对油漆的彩度影响较大,经常产生与彩度紧密相关的色差问题[6]。

在面漆调配过程中,调漆细节的变动可能导致色差问题。因为油漆颜色受本色浆、颜基比、防沉剂等影响较大,如果在调配时分散性差,着色颜料在涂料中分散不均匀会导致色差问题。另外,在存储过程中,存储温度的波动或者存贮时间过长,也会导致油漆成分发生变化而带来色差问题[7]。

1.2 喷涂表面

油漆涂层的色差与喷涂表面有很大关系。如果喷涂表面的光滑性差,会导致漆膜厚度不均匀,从而产生色差。在客车涂装过程中,面漆直接喷在中涂层表面,因此中涂层的表面光滑性对油漆外观非常重要,这要求中涂层的打磨要非常细致。由于原子灰具有吸水性,若在底漆涂刮较多原子灰,可能会吸收中涂层中水分,使其发生皱缩,导致中涂层不平整或者产生微小缺陷。这种表面特性的变化最终使面漆膜厚不均匀而导致色差。

此外,不同材料的表面对光的反射特性不同,当漆膜厚度不足以消除底材影响时,就会带来色差问题。相比于金属漆和珠光漆,单色漆的遮盖力较差,面漆膜厚上的微小变化都可能导致较大的色差。对于白色和黄色的浅色漆,在常规施工条件下,漆膜厚度并不能达到黑白格意义上的完全遮盖,这种情况下有部分光穿透面漆而被中涂层吸收和再反射回面漆层,所以感官颜色往往是面漆层和部分中涂层吸收光谱的叠加。因此通过增加膜厚提高遮盖力来消除色差的方法往往是行不通的,因为增加膜厚会使色相增加从而导致其他色差问题。

1.3 喷涂技术

不同喷涂技术会影响油漆在喷涂表面的均匀分布,喷涂不均匀导致涂层厚度过厚或过薄就会产生色差。客车车身常使用空气喷枪喷涂油漆,油漆的雾化程度和颗粒大小取决于压缩空气的流量、流速和油漆喷出量。油漆雾化不好会导致膜厚变化、金属粉和珠光粉排布方式的变化,从而导致色差。在人工喷涂的情况下,因操作人员的走枪速度、枪与被喷涂面距离和角度的变化,使得色差控制更为困难。即使油漆材料相同,但喷涂设备不同,喷出的漆膜颜色也可能不同。

1.4 喷涂环境

涂装车间的洁净度对车身油漆品质有很大影响,主要表现为空气中的微粒(粒径小于 10 μm)聚集掉落在漆面上,产生油漆外观弊病而导致色差。环境温度也会使油漆的黏度发生变化,从而影响油漆的流平,使表面轮廓特性发生变化导致色差。环境湿度对油漆闪干、流平、固化过程影响较大,对漆膜色差的影响更大,会产生与亮度有关的色差问题。

1.5 烘干技术

烘干温度波动常导致油漆色差问题。当烘干室内温度梯度过大时,容易造成局部过度烘干或部分未达到烘干要求的情况。

烘干温度过高,涂层容易发黄,即常说的“黄变”现象。油漆黄变主要与构成涂层聚合物链的热氧化降解有关。油漆中的油类树脂(如含芳香环的环氧树脂、TDI 型聚氨酯、酚醛树脂等)的不饱和链在加热过程中很容易受到氧气的攻击,双键氧化后生成过氧化物或环状化合物产生发色基团导致黄变[8]。

烘干温度过低可能会导致漆膜中树脂交联固化反应不完全而导致失色。另外,根据炉温曲线,即使在烘房温度恒定的情况下,车体送入烘房后,也需要一段时间才能达到所需温度,如果生产中烘烤时间被压缩将导致漆膜交联固化不完全,也会导致色差问题[1]。

2 客车车身油漆色差控制方法

2.1 油漆原料购置和存储管控

涂装车间需对每批次的油漆原材料进行入库检测,对油漆的黏度、遮盖力、膜厚等主要性能进行检验,合格后方可入库。油漆在储存过程中,必须维持各种色浆的色相、黏度、固含量和着色力等各项技术指标稳定,这需要严格控制存贮的环境温湿度。此外,需要加强标准色板的制作和管理。标准色板制作

应与涂装车间的喷涂工艺一致，客户提供的色卡和色板需要在避光、干燥的条件下保存，且在使用过程中要避免被污染和损坏[9]。

2.2　喷涂过程管控

对涂装过程要实行严格的管控，主要从喷涂设备、喷涂参数、人员调配等方面考虑。在喷涂过程中，可用高速自动静电喷杯、喷枪及自动空气喷枪等机器人喷涂方式来替代人工喷涂。同时，对喷涂参数进行全面监控，包括喷漆量、喷幅、枪距、喷涂角、喷涂气压、循环压力等。一般当色漆膜厚达到遮盖厚度时，其总色差值将不再发生较大的波动，所以在油漆喷涂过程中，一定要保证色漆膜厚达到遮盖力要求[5]。

浅色单色漆遮盖力普遍偏低，容易受底色影响，导致色相相差较大，这种情况可喷涂浅白色打底漆来解决[10]。对于金属漆和珠光漆，采用多次薄喷的方式来消除金属或珠光粒子的定向排布并保证它们在膜层中均匀分布。喷涂环境也需要每班次点检一次，主要包括调漆间和喷房的温湿度，在低温低湿和高温高湿季节时，油漆中需要加入不同品种的稀释剂，并根据现场条件随时进行调整。

2.3　烘干过程管控

面漆烘烤房的烘干曲线同样需要每班次测量一次，确定其在烘干工艺设定的窗口内，防止烘干过程中温度波动。一般大型烘干室温差在 10 ℃以下，小型烘干室温差则不应大于 5 ℃。除了监控烘烤室温度，还应严格控制烘烤时间，避免烘烤欠佳或过量的情况发生。

2.4　色差趋势综合管控

色差检测数据庞大，而且现有检测方式的数据源相互独立，无法综合分析颜色色相变化趋势，导致对即将出现的色差问题无法有效预警和迅速做出反应。在这种情况下，需要从源头、过程、终端对油漆色差进行综合管控[11]，建立油漆色差趋势综合管控机制，通过供应商、工厂、品质三方色差数据分享联动，实时动态监控色差数据，快速获取数据分析结果，有效预防和管控油漆色差问题。

另外，油漆色差评价结果会因测试仪器和评价方法的变化而发生改变。目前的色差评价方法主要是人眼目视和仪器测试。其中，目视受人主观因素影响，在评价结果上较难达成一致。仪器测试是基于 CIELab 色差法（图 1）[4]，该方法以空间总色差（ΔE）为基本评价参数，在处理颜色参数时仅考虑了理想条件下的空间数值变化，并未考虑颜色空间表达的方向和梯度差异及环境因素的影响，所以色差评价在一定程度上存在局限性。表 1 为国内几家客车企业采取的车身油漆色差评价方法。

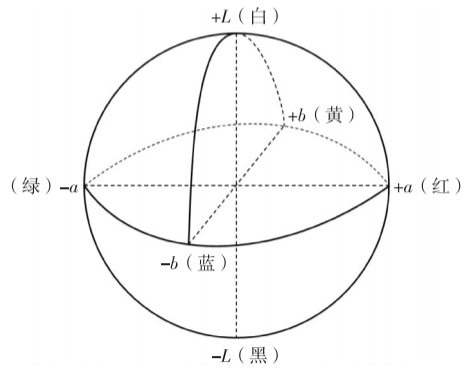

图 1　Lab 色空间图

表 1　国内客车企业油漆色差评定方法

客车企业	目视评价标准	仪器评价标准
A	无明显色差	闪光漆：红、蓝色系，$\Delta E \leqslant 1.5$；其他颜色，$\Delta E \geqslant 0.8$ 素色漆：红、蓝色系，$\Delta E \leqslant 1.0$；其他颜色，$\Delta E \geqslant 0.6$
B	无明显色差	闪光漆：25 ℃条件下，$\Delta E \leqslant 4.0$；45 ℃条件下，$\Delta E \leqslant 3.0$；75 ℃条件下，$\Delta E \leqslant 2.5$ 素色漆：灰、白、绿色系，$\Delta E \leqslant 1.0$；红、蓝色系 $\Delta E \leqslant 1.5$
C	无明显色差	闪光漆：$\Delta E \leqslant 3.0$ 素色漆：$\Delta E \leqslant 1.0$

注：$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2+(\Delta a)^2+(\Delta b)^2}$，其中 ΔL 为正表示颜色偏浅，为负则偏深；Δa 为正表示颜色偏红，为负则偏绿；Δb 为正表示颜色偏黄，为负则偏蓝。

为了准确、客观地对油漆颜色进行评价，需要基于某种逻辑表达的人机协同的评价体系。同时，为了解决色差检测指标单一问题，探索与色差有间接联系的辅助指标（如遮盖力），并进一步细化色系，加设明度、色调、彩度的视觉容差条件，建立多指标、多维度、立体的数字化评价体系是必要的。

3 结束语

本文针对客车涂装过程中出现的油漆色差问题，从工艺和技术层面，深入分析和讨论了色差产生的原因，并基于色差控制的最新研究成果和涂装技术的进展，提出了优化措施，为分析和解决客车车身油漆色差问题提供了理论支持和借鉴，并为进一步提升客车油漆外观品质，提升客车的装饰性提供了创新思路和方案。

参考文献：

[1] 许文彬，刘肖杰，李书明. 客车实色面漆色差影响因素的分析与预防[J]. 涂层与防护，2020，41(7)：44-48.

[2] ChaeYoungjoo. Color appearance shifts depending on surface roughness，illuminants，and physical colors[J]. Scientific Reports，2022，12(1)：1371.

[3] AKAFUAH K N，POOZESH S，SALAIMEHET A，et al. Evolution of the AutomotiveBody Coating process—A Review [J]. Coatings，2016，6(2)：24.

[4] STOKES M. Colorimetric tolerances of digital images[D]. Rochester：Rochester Institute of Technology，1991.

[5] 王宗田，杨国斌，马芳武，等. 某车型车身面漆色差分析[J]. 现代涂装，2012，15(11)：58-60.

[6] 刘仁龙. 车身油漆色差控制[J]. 上海涂料，2009，47(3)：33-37.

[7] 吕梦娇，申月英. 存储环境温度对油漆色差的影响[J]. 化工管理，2020(27)：162-163.

[8] 刘仁，罗静. 涂料分析与性能测试[M]. 北京：化学工业出版社，2022：148.

[9] 杨雪岩，林晓泽. 汽车涂装标准色板的制作与管理[J]. 汽车工艺与材料，2011(1)：12-15.

[10] 廖大政，高成勇，王纳新，等. 汽车外饰件漆膜色差的影响[J]. 汽车工艺与技术，2014(6)：28-32.

[11] 长春一汽富维东阳汽车塑料零部件有限公司. 一种色差和外观趋势综合管理方法：202310317016.4[P]. 2023-08-15.

(上接第 58 页)

枪导向套、夹持器无飞溅附着，无毛刺和表面残缺；②晃动检查：晃动夹具导向套无松动，焊枪导向套无松动且未偏离画线位置；③游标卡尺测量：用游标卡尺贴紧测量夹具导向套、焊枪导向套、夹具导向孔直径；④记录数据并根据磨损量标准进行报警并更换。

4）异常情况处理。对于超过上述容许直径的导向套，需立即通知班长进行更换，同时记录首台车号并安排首台车送测量室对螺柱进行三坐标测量。

4 结束语

本文以白车身后保螺柱尺寸精度为研究对象，提出了保证白车身手动后保螺柱尺寸精度的基本对策和措施，对手动螺柱焊接过程中精度要求较高的螺柱焊接进行逐步优化，解决了手动螺柱焊接尺寸精度低的难题。

参考文献：

[1] 王敏. 电阻焊在汽车工业中的应用[J]. 电焊机，2003，33(1)：1-6.

[2] 邱富深，王红刚，黄满堂，等. 如何提高汽车车身焊装质量[J]. 客车技术与研究，2008，30(2)：50-52.

[3] 王帅，王文建，陈丽，等. 浅谈重型卡车白车身焊装过程尺寸[J]. 重型汽车，2016(3)：17-18.

[4] 刘青. 汽车车身装焊误差产生的原因分析及控制[J]. 汽车技术，2000(8)：21-23.

[5] 王华，陈关龙，朱平，等. 白车身焊装过程中的小样本采样误差分析[J]. 机械设计，2003，20(7)：48-50.

[6] 刘承. 客车生产制造工艺的研究与应用[J]. 汽车测试报告，2021(20)：35-36.

[7] 黄斐荣，宋海泉，胡玲，等. 客车车身焊装工艺问题及优化[J]. 客车技术与研究，2023，45(5)：59-62.

[8] 马春辉，刘永超，孙泽新，等. 汽车车架焊接工艺和工装设计研究[J]. 产品可靠性报告，2023(1)：36-37.

[9] 张弼伟，许家文. 钢结构高强螺栓松动原因分析及预防措施[J]. 工程建设，2016，48(3)：64-67.