

客车车身漆膜表面特征的演化及其对油漆外观的影响

宋海泉, 朱广, 刘丹, 黄斐荣, 傅赞果, 陈艳艳

(比亚迪汽车工业有限公司, 广东深圳 518118)

摘要:研究了不同基材漆膜的表面特征演化规律,以及面漆粗糙度对油漆外观性能的影响。结果表明,漆膜的粗糙度内在演化呈低阶特征,仅与喷涂表面粗糙度有关;面漆粗糙度影响其光泽、鲜映性和橘皮,对色差无显著影响。

关键词:客车车身;漆膜;表面特征;油漆外观

中图分类号:U466

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)06-0058-05

Evolution of Surface Characteristics of Paint Coatings on Bus Body and Its Influence on Paint Appearance

SONG Haiquan, ZHU Guang, LIU Dan, HUANG Feirong, FU Yunguo, CHEN Yanyan

(BYD Automobile Industry Co., Ltd., Shenzhen 518118, China)

Abstract: This paper researches the evolutions of the surface characteristics of paint coatings on different substrates, along with influences of finish roughness on the paint appearance performance. The results show that the intrinsic evolution of coating roughness is low order, and the roughness of paint is only related to the roughness of the sprayed surface, the finish roughness has a direct influence on the gloss, DOI and orange peel, and no remarkable influence on chromatism.

Key words: bus body; paint coating; surface characteristics; paint appearance

目前,客车制造自动化水平较低,导致白车身尺寸精度和表面质量较差。客车涂装需要经过多个喷漆工序才能获得较理想的喷漆表面。由于客车车身材质较多,且不同材质的表面粗糙度不同,采用相同打磨工艺打磨后会产生不一样的打磨效果,导致打磨后的目标表面的粗糙度差异较大,这种差异会直接表现为底漆粗糙度不一致。底漆粗糙度的差异和传递效应最终导致油漆外观质量问题^[1-2]。

本文通过实验分析打磨工艺对底漆粗糙度的影响规律,底漆、中涂漆和面漆粗糙度的演化规律,以及面漆粗糙度与油漆外观参数的内在关系,为提升客车车身油漆外观效果提供理论依据。

1 实验准备

1.1 实验原料

选取真空袋压玻璃钢、双环戊二烯(DCPD)、片状模塑料(SMC)、普碳钢、镀锌钢、铝合金六种实验板材,切割成尺寸为250 mm×200 mm(长×宽)的样件。底漆采用水性环氧漆,中涂漆采用水性聚氨酯漆,面漆采用水性双组分素色漆。

1.2 实验方法

六种材质的样件采用气磨机加装320#砂纸横竖两道压边式打磨表面,打磨力度(约0.6 MPa)和时间(约30 s)均保持基本一致。将打磨好的样件固定在水平台上,送入喷漆房喷涂底漆(水性环氧漆),底漆

收稿日期:2024-05-17。

第一作者:宋海泉(1982—),男,助理工程师;主要从事客车焊装、涂装、总装整车工艺开发研究工作。E-mail:411438012@163.com。

通信作者:黄斐荣(1989—),男,博士;工程师;主要从事汽车油漆外观质量提升的研究工作。E-mail:hfeim101006@163.com。

膜厚为 25~35 μm 。底漆喷涂后,在室温条件下闪干 30 min 左右,然后送入烘房烘干。烘烤温度为 60~70 $^{\circ}\text{C}$,烘烤时间约 1.5 h。

对喷涂底漆后未打磨和分别采用 180#、240#、320#、600#砂纸打磨的样件喷涂中涂漆(水性聚氨酯漆),中涂漆膜厚为 40~60 μm 。然后,对喷涂中涂漆的样件用 400#砂纸打磨表面后喷涂面漆(水性双组分素色漆),面漆膜厚为 35~45 μm 。中涂漆和面漆均在与底漆相同的条件下进行闪干和烘干。文中将底漆未打磨的样件命名为 0#,将采用 180#、240#、320#、600#砂纸打磨的样件分别命名为 1#、2#、3#和 4#。

1.3 测试指标及方法

样件不同阶段的表面粗糙度(Ra)采用粗糙度仪测试;光泽度采用多角度光泽仪测试;橘皮长/短波值和鲜映性(DOI)采用橘皮仪测试。样件的颜色特征值(L、a和b)采用单角度色差仪测试,并以所喷涂水性双组分素色漆的标准色板的颜色特征值作为标准值来计算色差(ΔE)。上述所有指标,都是每个样件随机选取5个区域测试获得一组数据,通过计算其均值来表征。

2 结果与讨论

2.1 粗糙度演化规律

2.1.1 基材粗糙度变化

六种基材的原始粗糙度由大到小依次为:真空袋压玻璃钢(2.0 μm)>镀锌钢(1.1 μm)>普碳钢(0.8 μm)>SMC(0.5 μm)>铝合金(0.3 μm)>DCPD(0.2 μm)。采用 320#砂纸打磨后,粗糙度大小顺序变为真空袋压玻璃钢(0.761 μm)>SMC(0.696 μm)>铝合金(0.514 μm)>DCPD(0.512 μm)>镀锌钢(0.459 μm)>普碳钢(0.340 μm)。对比发现,镀锌钢、普碳钢和真空袋压玻璃钢基材打磨后粗糙度减小,而铝合金、SMC和DCPD基材打磨后粗糙度增大,说明不同基材具有不同的打磨性。

2.1.2 底漆粗糙度变化

图1为不同基材底漆样件打磨前后的粗糙度变化图。可以看出,六种基材底漆未打磨样件(0#)粗糙度范围为 0.2~0.5 μm ,粗糙度大小顺序依次为真空袋压玻璃钢(0.464 μm)>镀锌钢(0.366 μm)>

SMC(0.354 μm)>DCPD(0.307 μm)>普碳钢(0.323 μm)>铝合金(0.235 μm)。对比发现,底漆表面粗糙度与基材打磨后的表面粗糙度并无对应关系,当基材打磨后的粗糙度小于某个值(本文为 0.7 μm)后,基材粗糙度特征不会传递到底漆。

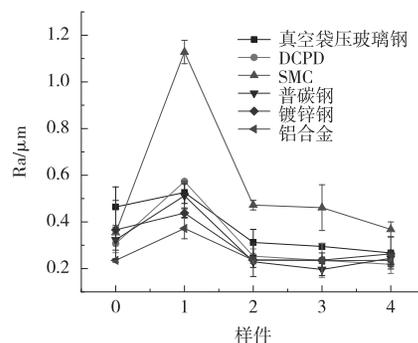


图1 不同基材底漆打磨前后表面粗糙度

如图1所示,底漆用 180#砂纸打磨后,其表面粗糙度不减反增,然后随着砂纸目数(240#~600#)的增加而减小。因为底漆质地较软,用较粗的砂纸(如 180#)打磨时,磨粒易在表面产生犁沟,导致粗糙度增加^[3]。同时,根据切削磨削理论,随着砂纸目数的增加,磨粒变细,单位面积的磨粒数增多,砂纸的磨削能力降低,所以表面粗糙度降低。

底漆打磨是为了消除其表面缺陷(如颗粒、流挂、橘皮等漆膜弊病),同时给中涂漆提供良好的附着条件,但是打磨不能导致底漆出现严重的机械损伤(如露底),所以需采用较细的砂纸打磨。从图1可以看出,采用 180#砂纸打磨,会增加底漆的粗糙度;但采用 240#或更高目数的砂纸打磨,底漆粗糙度不会显著增加,所以底漆打磨宜采用 240#或更高目数的砂纸。

2.1.3 中涂漆粗糙度变化

图2为不同基材中涂漆打磨前后粗糙度变化情况。从图2(a)可知,所有样件中涂漆未打磨时的粗糙度比底漆打磨后的粗糙度小,粗糙度范围为 0.15~0.35 μm 。中涂漆表面粗糙度的变化规律与其底漆的变化规律相似,底漆表面粗糙度特征会传递到中涂漆。由于粗糙度特征在漆膜中是逐级传递,所以在第一次传递过程中比较明显。不过,当底漆粗糙度低于 0.5 μm 后,其表面粗糙度特征传递现象将在中涂漆中消失,这种变化规律与底漆粗糙度的变化相似。

从图2(b)可知,不同基材的中涂漆采用 400#砂

纸打磨后,粗糙度比未打磨时大,粗糙度范围为 $0.37 \sim 0.58 \mu\text{m}$ 。根据先前研究,若中涂漆不打磨而直接喷涂面漆,由于中涂漆表面的一些缺陷(如橘皮、颗粒、流挂)未消除,会影响面漆的流平,最终导致面漆粗糙度较大,从而影响油漆的外观性能。另外,中涂漆打磨也不宜采用较细砂纸(如 1000#砂纸),因为砂纸太细不能起到打磨漆膜弊病的目的,同时较细的砂纸打磨效率也较低,所以目前工厂中涂漆打磨基本都采用 400#砂纸。虽然中涂漆打磨会增加表面粗糙度,但中涂漆打磨后的粗糙度处在较低水平($<0.6 \mu\text{m}$),不会传递到面漆而影响油漆外观。

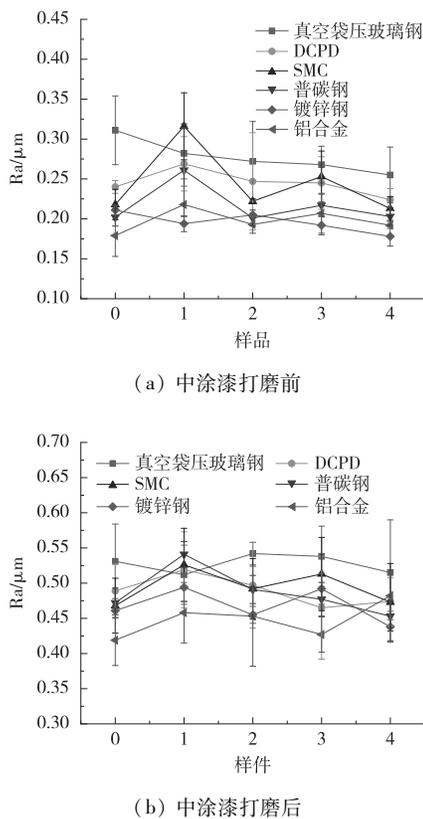


图2 不同基材中涂漆打磨前后表面粗糙度

2.1.4 面漆粗糙度变化

图3为喷涂面漆的粗糙度变化情况,所有样件面漆粗糙度在 $0.05 \sim 0.12 \mu\text{m}$ 范围内,较未打磨底漆粗糙度降低1个数量级,较未打磨中涂漆粗糙度降低80%。六种基材样件的面漆粗糙度都保持在一定范围内,表明面漆粗糙度几乎不受底漆和中涂漆打磨的影响,在 $100 \sim 140 \mu\text{m}$ 的膜厚范围内,底漆表面粗糙度的演化在中涂漆、面漆中逐渐趋于一致。同时发现,真空袋压玻璃钢基材样件中涂漆的粗糙度特征传

递到面漆比较明显,这是因为真空袋压玻璃钢基材样件中涂漆的粗糙度较大,在面漆膜厚范围内,粗糙度特征无法通过喷涂而消失。

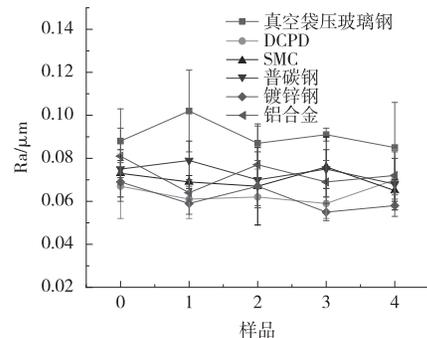


图3 不同基材面漆表面粗糙度变化

为了清楚地呈现完整涂装生产过程中,从基材到面漆粗糙度的演化规律,以基材→320#砂纸打磨→喷涂底漆→240#砂纸打磨→喷涂中涂漆→400#砂纸打磨→喷涂面漆的工艺为例,绘制了基材、底漆、中涂漆、面漆的粗糙度变化图,如图4所示。可以看出,从基材到面漆,粗糙度逐级减小,从不同基材(未打磨)的 $0.2 \sim 2.0 \mu\text{m}$ 减小到面漆的 $0.05 \sim 0.10 \mu\text{m}$;同时粗糙度范围也逐渐缩小,从基材的 $1.8 \mu\text{m}$ 减小到面漆的 $0.05 \mu\text{m}$ 。即不同基材在打磨和喷涂油漆后漆膜的粗糙度逐级缩小,最后到面漆粗糙度缩小到最小范围。

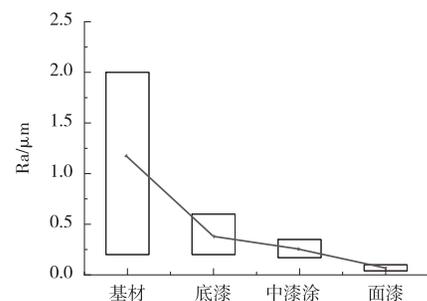


图4 基材到面漆表面粗糙度演化

这种规律指出,为了控制油漆粗糙度特征,在相同的涂装体系下,在满足油漆附着力等性能条件下,应尽量使基材粗糙度最小。因此,在生产过程中,特别是对于车身材质种类较多的车型,需保证不同基材的粗糙度在较窄范围内,并且在每一道漆膜涂装前处理过程中应采用合适的打磨工艺。此外,在多层涂漆情况下,外层漆膜的粗糙度随着涂漆层数的增多而减小。这种演化规律进一步表明,可以通过适当增加漆

膜厚度的方式来减小面漆的粗糙度,以期获得理想的涂漆外观效果。

2.2 面漆粗糙度与油漆外观效果的关系

1) 面漆粗糙度与光泽度的关系。图 5 为面漆在 20°测量角下的光泽度。从图中可以看出,所有样件的光泽度在 80%~87% 范围内随机波动,可认为该批样件的面漆粗糙度对其光泽度没有影响。光泽度反映了油漆表面微观物理轮廓的粗糙特征,表面越粗糙,光线越容易被漫反射,油漆的光泽度越低。但当面漆粗糙度低到一定值后,镜面反射光占主导,粗糙度对面漆的光泽度影响就可以忽略,即油漆的光泽度具有点效应特征^[4]。在本实验中,面漆粗糙度低于 0.12 μm,面漆表面物理粗糙特征对光泽度无直接影响。因此,通过本文研究,可认为面漆粗糙度低于 0.12 μm 对其光泽度无影响,也就是可将面漆光泽度的粗糙度阈值粗略估计为 0.12 μm。

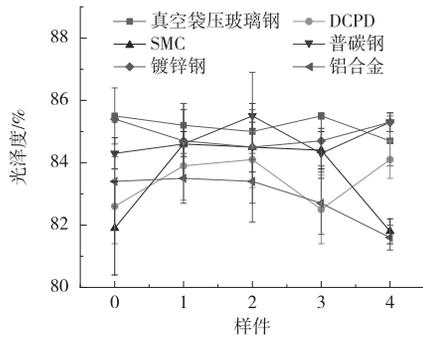
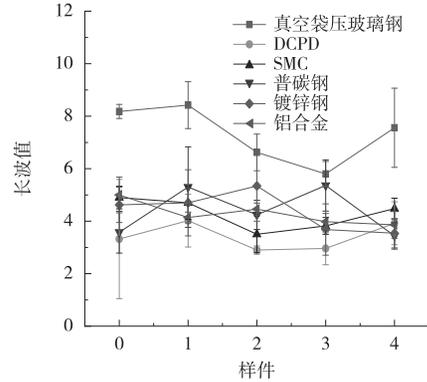


图 5 不同基材面漆光泽度

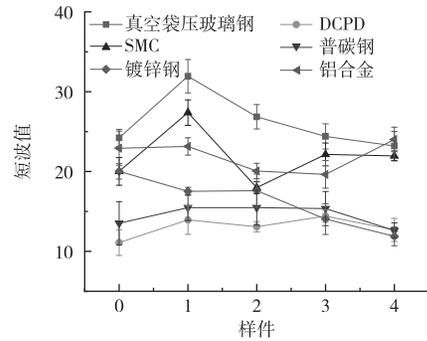
2) 面漆粗糙度与橘皮的关系。所谓“橘皮”是指油漆表面产生凹凸不平波纹造成类似“橘皮”的视觉效果,其与油漆表面粗糙度也有关系。粗糙度越大,表面波纹特征越明显,橘皮现象就越严重。油漆橘皮现象的定量评价一般是用橘皮仪测试油漆表面轮廓的长/短波值来表征。本文所用橘皮测试仪的波长(λ)范围为 0.3~12 mm,并将 0.3 ≤ λ < 1.2 mm 定义为短波,1.2 < λ ≤ 12 mm 定义为长波^[5]。一般来说,长/短波值越小,橘皮指标就越好(即橘皮现象越轻)。

图 6 为样品面漆的橘皮长/短波测试值。可以看出,由于真空袋压玻璃钢样件的面漆粗糙度较大,所以其面漆的橘皮长/短波值也较大。但对比发现,其他材质样件面漆的橘皮长/短波值与粗糙度无直接关系,这表明面漆粗糙度对其橘皮现象的影响存在一个

阈值,即当面漆粗糙度低于橘皮粗糙度阈值后,橘皮现象对面漆粗糙度表现不敏感,面漆的粗糙度变化对橘皮现象的影响不显著。通过分析真空袋压玻璃钢和其他材质面漆粗糙度值,本文将橘皮的面漆粗糙度阈值定为 0.08 μm。



(a) 面漆的橘皮长波值



(b) 面漆的橘皮短波值

图 6 不同基材面漆的橘皮长/短波值变化

3) 面漆粗糙度与鲜映性的关系。图 7 为不同样件面漆的鲜映性 DOI 特征值。可以发现,所有样件面漆的鲜映性 DOI 特征值在较窄的范围(83%~89%)内随机波动,样件面漆粗糙度的差异与其鲜映性并没有明显的对应关系,表明面漆粗糙度对其鲜映性并没有显著影响。尽管鲜映性对油漆表面微观特征更为敏感,但本批试验未观察到其与面漆粗糙度的对应关系。这是因为面漆表面粗糙度低到一定值后,对面漆的鲜映性影响较弱^[6-7]。鲜映性 DOI 特征值反映的是油漆表面反射光随反射光路微小变化的变化率。这种变化率取决于油漆表面对光线的漫反射和散射特性,与粗糙度有直接关系。但当油漆表面粗糙度处于较低值后,油漆对光的漫反射和散射特征趋于一致,此时对油漆的鲜映性几乎没有影响。

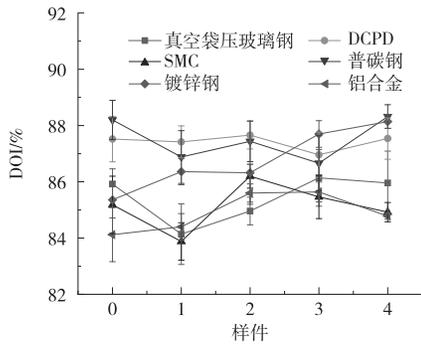


图7 不同基材面漆的DOI值

4) 面漆粗糙度与色差的关系。色差是指物体之间或物体与标准色的颜色差异,是评估颜色一致性和准确性的重要标准。在汽车行业,一般用CIELab法计算色差($\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$),并根据计算结果来评估车身油漆的颜色性能。在本实验中,为评估试验样件最后面漆状态的颜色性能,以样件所喷水性双组份素色漆标准色板的颜色特征值(L 、 a 和 b)作为标准值来计算它们的色差。

表1为不同基材样件面漆的色差测试及计算结果。可以看出,所有基材样件的色差值均小于0.5,低于客车车身素色漆色差允许范围($\Delta E \leq 0.8$)^[8],表明基材种类对面漆色差几乎无影响。同时发现,同种基材(不同处理的)样件面漆色差值的差异也较小(小于0.3),表明底漆打磨对面漆色差的影响不显著。因为当油漆表面光泽特性达到一定程度后,油漆的颜色表达主要通过颜料粒子对光的散射,且仅与颜料粒子在漆膜中的空间分布和排布方式有关^[9-11]。在中涂层表面特性较好的情况下,小面积的喷涂可以保证油漆良好的雾化和流平效果,不会引起颜料粒子的堆积和各向异性排布等问题,所以不会产生明显的色差问题。

表1 不同基材面漆的色差值(ΔE)

样件	真空袋压玻璃钢	DCPD	SMC	普碳钢	镀锌钢	铝合金
0#	0.374	0.366	0.362	0.332	0.365	0.257
1#	0.382	0.394	0.272	0.352	0.385	0.460
2#	0.369	0.454	0.376	0.495	0.397	0.369
3#	0.307	0.309	0.205	0.369	0.388	0.375
4#	0.296	0.299	0.385	0.452	0.396	0.492

3 结束语

客车涂装喷漆过程中,当基材粗糙度低于 $1 \mu\text{m}$,且漆膜厚度在 $100 \sim 140 \mu\text{m}$ 范围内时,漆膜粗糙度的内在演化是低阶的,漆膜表面的粗糙度仅与其喷涂表面的粗糙度有关,与往下层级的表面粗糙度无关。底漆粗糙度受基材粗糙度影响,在不同基材之间有一定差异。底漆宜采用240#以上砂纸打磨,对面漆的粗糙度无显著影响。面漆粗糙度与面漆的光泽、鲜映性和橘皮有明显关系,但与面漆的色差值的关系不明显。光泽和橘皮的粗糙度阈值可分别设置为 $0.12 \mu\text{m}$ 和 $0.08 \mu\text{m}$ 。

参考文献:

- [1] 解萌. 基于色差公式的图像评价方法研究[D]. 北京:北京印刷学院, 2010.
- [2] NELSO K A, SADEGH P, AHMAD S, et al. Evolution of the Automotive Body Coating Process - A Review [J]. Coatings, 2016, 6(2): 1-22.
- [3] 修世超, 李长河, 蔡光起. 磨削加工表面粗糙度理论模型修正方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2005(8): 770-773.
- [4] OSTERHOLD M. Scratch/mar, surface structure and rheology measurements [J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 161(1): 106498.
- [5] 许明辉, 王海燕. 桔皮鲜映性仪用于面漆的外观改善[J]. 客车技术与研究, 2008, 30(6): 32-35.
- [6] 卢琳, 任玉蓉, 温乃盟, 等. 有机涂层钢板鲜映性影响因素的研究[J]. 表面技术, 2010, 39(2): 14-18.
- [7] 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, 46(2): 55-58.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 郑顺兴. 涂料与涂装科学技术基础[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 93-100.
- [11] 胡玲, 陈向, 黄茂韶, 等. 客车车身油漆色差原因及控制[J]. 客车技术与研究, 2024, 46(1): 59-62.