汽车内外饰设计用涂装材料及其工艺研究进展

王增[1a,1b]，徐镇[1a]，黄凌玉[2]

（1.南昌大学 a.机电工程学院 b.艺术与设计学院，南昌 330031；
2.南昌航空大学 艺术与设计学院，南昌 330063）

摘 要： 汽车保有量的快速增长使得消费者对汽车内外饰设计的质量要求不断提高。汽车内外饰设计用涂装材料及其工艺作为影响内外饰设计的重要因素，已经成为当前涂装领域的研究热点。为了更有效把握汽车内外饰涂装材料及工艺的发展规律和方向，满足未来汽车内外饰设计的应用要求，综述了近年汽车内外饰设计用涂装材料及其工艺的国内外研究进展。在涂装材料方面，梳理了汽车内外饰中常用的涂装材料类型、性能、应用特点与不足。重点分析了以聚氨酯、丙烯酸和氟碳为代表的内饰涂装涂料，着重研究了外部底漆、中涂漆和面漆等外饰涂料。在工艺方面，探讨了汽车内外饰涂装各工艺的技术要求及现状，展望了新工艺的研究动态与前景。随着环保政策的日趋严格及环保意识的不断增强，汽车内外饰设计用涂装材料逐渐由溶剂型向改性水性型材料发展，涂装工艺则由高污染和低效率往绿色化和智能化转变。最后，从有助于增强消费者使用体验角度，提出了未来汽车内外饰涂装材料及其工艺改进的主要方向及具体策略。

关键词： 汽车内外饰；涂料；涂装工艺

中图分类号： TQ63 **文献标识码：** A **文章编号：** 1001-3660(2019)06-0338-08

DOI： 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.06.041

Research Progress in Coating Materials and Processes of Automobile Interior and Exterior Design

***WANG Zeng*[1a,1b], *XU Zhen*[1a], *HUANG Ling-yu*[2]**

(1. a. School of Mechanical and Electrical Engineering, b. School of Art and Design, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. School of Art and Design, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

ABSTRACT: The rapid growth of car ownership makes consumers have increasingly higher requirements on the quality of automobile interior and exterior design. As an important factor affecting interior and exterior design, automotive interior and exterior coating material and process have become a research hotspot in the field of coating. In order to grasp the development law and direction of automotive interior and exterior coating materials and processes more effectively and meet the application requirements of automotive interior and exterior design in the future, the work summarized the research progress of coating materials and processes for automotive interior and exterior design in recent years at home and abroad. In terms of coating materials, the types, properties, application characteristics and deficiencies of coating materials commonly used in automotive interior and

收稿日期：2018-11-20；修订日期：2019-01-25

Received：2018-11-20；**Revised**：2019-01-25

基金项目：2018年南昌大学校级创新创业训练计划资助项目（201802381）

Fund：2018 Nanchang University Innovation and Entrepreneurship Training Program Funding Project (201802381)

作者简介：王增（1983—），男，博士研究生，讲师，主要研究方向为设计质量管理。

Biography：WANG Zeng (1983—), Male, Doctoral candidate, Lecturer, Research focus: design quality management.

通讯作者：黄凌玉（1984—），女，硕士，副教授，主要研究方向为工业产品设计。邮箱：27112148@qq.com

Corresponding author：HUANG Ling-yu (1984—), Female, Master, Associate professor, Research focus: industrial product design. E-mail: 27112148@qq.com

exterior were sorted out. The interior coatings represented by polyurethane, acrylic, and fluorocarbon were analyzed, and exterior coatings including exterior primers, intermediate finishes and topcoats were studied. In terms of process, the technical requirements and application status of the main automobile interior and exterior coating processes were discussed, and the research trends and prospects of the new process were forecasted. With the increasingly strict environmental policy and environmental awareness of the continuous enhancement, the coating materials for automotive interior and exterior design were gradually developing from solvent-based to modified water-based materials, while the coating process was changing from high pollution and low efficiency to green and intelligence. Finally, from the perspective of helping to enhance the consumer experience, the main directions and specific strategies for future improvement of automotive interior and exterior materials and processes were proposed.

KEY WORDS: automotive interior and exterior; coating; coating process

汽车涂装材料往往集中了涂料行业的最新技术和前沿应用，被视为衡量一个国家涂料水平的重要指标。改革开放以来，我国的汽车涂料水平逐渐与世界接轨，汽车涂料市场日趋繁荣，但距离国际先进水平仍然有较大差距[1-2]。我国已是世界上汽车产销量最大、竞争最为激烈的市场，汽车涂料及其工艺直接决定消费者对汽车的审美和使用体验。为满足消费者日益多元化和个性化的要求，各汽车厂商纷纷加大了对汽车内外饰设计用涂装材料及工艺的研究。本文通过对该领域研究现状及趋势的梳理和分析，把握了汽车内外饰涂装材料及工艺的自身特点和内在规律，总结了当前存在的问题及原因，并结合近年来涌现出的涂装新材料和新工艺，阐述了未来满足汽车内外饰涂装设计应用要求的发展方向。

1　汽车内外饰设计用涂装材料

由于汽车内外饰涂装基材的不同，使得内外饰涂装材料的类型和特征存在较大差异，因此本文从内饰和外饰两方面展开涂装材料的介绍。

1.1　汽车内饰设计用涂装材料

现代汽车内饰用基材的材料类型丰富，包括塑料、金属、皮革、木材等。各种基材的材料属性和适用范围都存在差异，对内饰设计用涂装材料的选择也大不相同，需要结合基材特点来灵活选择。以适用范围最广的塑料为例，该材料质轻且易加工，有较好的外观装饰效果和理化性能，受到广大汽车设计人员的青睐。其中 ABS 塑料常用于制造仪表板及其元件、转向柱外套、扶手等，聚氯乙烯塑料多用于制造侧板、顶篷、地毯和窗框等，聚丙烯塑料被用于制造门内板、空调出口、扬声器等。但塑料本身存在一些固有缺陷，如耐候性差。因此，要考虑通过喷涂恰当的涂装材料来实现对塑料的保护，避免其直接受到外部腐蚀，并保证喷涂后的塑料具有良好的光泽度和触感等视触觉效果。所以，汽车内饰涂装材料不但要有一般涂料的耐腐蚀能力，还要拥有漂亮的外观和柔顺的手感来提高汽车产品的使用体验。下面介绍一些常见的内饰设计用涂料。

1.1.1　聚氨酯涂料

聚氨酯全称为聚氨基甲酸酯，分为双组分聚氨酯涂料和单组分聚氨酯涂料。其中单组分聚氨酯涂料的性能没有双组分聚氨酯涂料全面，难以适应汽车行业的高要求，而双组分聚氨酯涂料具有机械性能优良、固体含量较高、涂膜美观、装饰性能好等特性，这些综合因素使得双组分聚氨酯涂料在汽车内饰涂料市场占据主要位置。如今大部分使用的双组分聚氨酯涂料都为溶剂型，但溶剂型聚酯氨对环境的污染过大，这使得更为环保的水性聚氨酯涂料日益受到青睐。双组分水性聚氨酯涂料不但具有一般聚氨酯涂料的特性，还具有良好的柔韧性和耐擦洗性[3]，其耐溶剂性能也已经达到溶剂型柔感涂料的水平[4]，更能实现从橡胶到丝绒的丰富表面触感。因此，该涂料成为汽车内饰设计涂装材料的首选。朱林宗[5]对原本水性聚氨酯涂料配方进行改进，制得具有良好光泽、丰满度、触感和鲜映性的水性聚氨酯涂料。该涂料用于 ABS 塑料内饰件上，可使汽车内饰具有更加优良的外观和触感。

1.1.2　丙烯酸涂料

丙烯酸涂料是在传统的丙烯酸树脂基础上，加入氯磺化聚乙烯橡胶、耐候颜填料和耐候添加剂等，经先进工艺制备而成的单组分自干性耐候防腐涂料，具有耐候性能好、防腐性能优、装饰性能强和便于施工等特点，非常适用于汽车内饰涂装。由于其基本性能优良，以丙烯酸为基体的各种改进水性涂料研究取得了较多进展。例如万雪期等[6]制作的水性含氟丙烯酸涂料涂膜，优化了丙烯酸的耐沾污性能。成绵江[7]研制的石墨烯水性丙烯酸涂料，改善了水性丙烯酸的防腐蚀能力。陈鑫[8]研发的纳米氧化锌改性水性丙烯酸涂料拥有优异的抗紫外线和抗菌能力，且该材料涂层的拉伸强度、耐候性、硬度和耐磨擦性都有所增强。胡梦[9]改进的水性丙烯酸具有施工方便、价格低廉、光泽度和硬度高、防腐性能优异的特点。M. L. Nobel

等[10]制备的水性纳米复合材料具有良好的环保性能和固化膜刚度。以上研究聚焦于水性丙烯酸涂料的改进，而旨在提高环保性和涂装性的非水性丙烯酸涂料也受到了研究者的重视，如韩小可[11]制做的高固含量羟基丙烯酸涂料，提高了非水性丙烯酸的环保性能和涂装性能。

上述改进丙烯酸涂料的各项性能均可很好地适用于汽车内饰件的主要基材及其工艺要求，对增强汽车内饰设计的装饰性和亲和力颇有助益。

1.1.3 氟碳涂料

氟碳涂料是指以氟碳树脂为主要成膜物质的涂料，由于氟碳树脂中 C—F 键的键能大，使得其具有良好的耐候性、耐热性、耐低温性、耐化学药品性和低摩擦性，因此在汽车内外饰涂装领域具有非常广泛的应用。杨景花[12]制备了纳米二氧化钛改性氟碳涂料，该材料的漆膜稳定性良好，具有很强的光催化和自清洁能力，其涂层附着、耐洗刷、抗老化和耐盐雾等性能都明显得到提升，并可自行分解从内饰件上挥发的有机物。潘云飞等[13]制做的新型高固体份常温固化 FPVE 氟碳涂料具有优异的防腐能力和鲜映性，适用于常接触和需要较好外观视觉效果且受光充足的内饰基材的表面喷涂。

改进氟碳涂料的水性氟碳漆的产品目前还不成熟，其保光性和硬度比溶剂型氟碳涂料差很多。但环保是大势所趋，且水性氟碳涂料具有超强的耐候性和耐腐蚀性，可被用作长效免维护的外用涂料，上述特性使其成为当前水性涂料改进研究的热点之一。其中吕钊等[14]制作的水性氟碳面漆状态稳定，耐候性能良好并可常温固化，对合金材质的内饰件涂装有显著效果。高洁[15]制备的水性碳纳米复合溶剂型氟碳涂料具有良好的耐腐蚀、稳定和耐冲击性能，适用于合金和塑料内饰件的表面涂装。

1.2 汽车外饰设计用涂装材料

汽车外饰的涂装直接影响消费者对整车外观的视觉评价，是汽车外饰设计的重要考量因素。汽车外饰涂料不同于内饰涂料之处在于，它喷涂附着的基材形状单一且面积较大，没有内饰材料形状的琐细与繁杂性，一般会根据喷涂工艺的施工工序阶段采用针对性的不同喷涂材料。因此，以下汽车外饰设计用涂装材料按施工工序来予以介绍，包括汽车底漆、汽车中涂漆、汽车面漆三部分内容。

1.2.1 汽车外部底漆

汽车底漆作为汽车外部基材表面喷涂的第一道漆，可形成保护基材的第一层漆膜。在性能要求上，除了需要与底材间具备足够的附着力，与中涂漆或面漆间具备良好的兼容性及粘合力，还需拥有优良的成膜性、防锈性、防腐性、耐盐雾品性和环保性。研究者们已经在这些性能方面进行了卓有成效的探索，实现了对底漆的材料改良。谭振等[16]研制的环保型汽车用水性环氧树脂底漆有良好的成膜性能和环保性能。张红素[17]制备的新型丙烯酸汽车底漆自动沉积涂料具有良好的环保、耐盐雾和防锈性能。周荣华等[18]制成的一次性直接喷涂汽车用聚丙烯塑料底漆具有耐腐性和耐盐雾性能。王庆军[19]等研发的高固体份环氧底漆具有环保和耐盐雾性能。张理等[20]制作的水性双组分环氧底漆具有高防腐和防盐雾性能。

1.2.2 汽车外部中涂漆

汽车中涂漆也称二道浆，是用于汽车底漆和面漆之间的涂料。在性能要求上，中涂漆需与上下涂层有良好的附着力和结合力，同时机械性能要好，以实现在特殊情况下保护面漆，还应具有优良的填平性和打磨性，以便打磨后能得到平整光滑的表面。目前中涂漆多为溶剂型[21]，由于存在不环保的固有劣势，使得当前有关中涂漆的研究更多集中在水性中涂漆的研发上。如郑齐等[22]制备的水性饱和聚酯树脂中涂漆具有优异的填平性和打磨性。黄松[23]用多元醇和多元酸，通过熔融缩聚合成的饱和聚酯树脂中涂漆具有很好的综合性能。沈球旺等[24]以饱和聚酯树脂 A 和苯代三聚氰胺甲醛树脂为主要成膜物制备的中涂漆与底、面漆涂层的兼容性及综合机械性能良好。这些新研制的水性中涂漆不但更环保，且性能更优化，还能提高整体外饰涂装的视觉效果，可为增强汽车外观效果提供保证。

1.2.3 汽车外部面漆

汽车外部面漆是汽车外观成形的最后一步，着重需要具有良好的光滑性、光泽度、透明度、鲜映度和耐候性等性能。为此，众多研究者们对这些性能展开了积极研究。其中吕钊等[25]制备的氟碳面漆具有高耐候性和优异的光泽度。周树军[26]制备的高固含低黏度聚氨酯面漆是使用 E-10（叔碳酸缩水甘油脂）合成的聚酯预聚体改性丙烯酸树脂，在保持了原有特性的基础上，改善了丙烯酸树脂的脆性，提高了汽车面漆的鲜映性和涂膜的力学性能。翟英雷等[27]用丙烯酸树脂和三聚氰胺甲醛树脂制备的面漆性能优良且价格低廉，是追求性价比的理想面漆涂料。由于高装饰性汽车面漆对汽车外部设计效果具有极其重要的影响，高装饰性研究成为当前汽车面漆涂装的主要研究方向。王长庚[28]研究发现，高固体份低黏度技术对提高汽车外观装饰性具有显著作用，用 E-10 改性和合理的工艺条件制得的高固体份汽车面漆具有非凡的鲜映性和光泽度，能很好地满足高档汽车涂装。

2 汽车内外饰涂装工艺现状

汽车内外饰的涂装效果不仅受涂装材料的影响，还与其涂装工艺密切相关。涂装工艺主要由基底材料表面性质和涂料本身决定，由于汽车内外饰的基底及

涂装材料存在较大差异，因此本文从内饰和外饰两方面进行涂装工艺分析。

2.1　汽车内饰涂装工艺

涂料附着在基料表面的能力与基料的本身性质有着较大联系。如今大部分的汽车内饰件以塑料为基料，而塑料存在不易附着、湿润性低和易受热变形等缺陷，因此，其涂装工艺第一步是塑料表面的前处理，然后才是底漆和面漆涂装。

2.1.1　塑料件表面前处理

塑料表面前处理的方法有溶剂处理法、化学处理法、等离子表面处理法和电晕处理法等[2]。其中溶剂处理法适用于形状复杂的聚烯烃塑料材料，经溶剂处理的聚烯烃表面粗糙度和润湿性有所改善，有助于形成具有独特表面纹理的内饰件以优化外观视觉效果[29]。化学处理法适用于聚乙烯、聚苯乙烯和 ABS 树脂，赵秋容等[30]通过在 ABS 塑料上进行化学处理，使 ABS 塑料的粗糙度和润湿性都有较大改善。等离子表面处理法适用于聚乙烯复合塑料，刘杨等[31]利用低温等离子技术对聚乙烯复合塑料进行表面处理，使塑料表面粘合质量得到改善，涂料更易于粘附。电晕处理法适用于塑料薄膜的表面处理，黄亚男[32]使用电晕处理聚丙烯塑料，改善了塑料薄膜的润湿性，并提高了表面粗糙度，除了让涂料更易于粘附在塑料表面，还有助于设计出具有粗糙手感的内饰件。

内饰塑料件的表面前处理工艺与汽车内饰设计有着密切的联系，经该工艺处理后，消费者在接触内饰件时的手部触感体验和操作舒适度将更好，汽车内饰也会形成良好的外观效果。

2.1.2　底、面漆涂装

内饰件基材经前处理后，一般需在待喷涂部位喷上合适厚度的底漆，以保护表面不受污染，并增强面漆在内饰件表面的粘合力。面漆喷涂工艺则要求在底漆表面喷涂 1—3 层面漆，以使汽车内饰件具有理想的色彩、质感和平整光滑的表面外观。需要注意的是，某些特殊塑料基底材料不需要进行底漆喷涂，例如以 ABS 塑料为基材的汽车内饰件在用溶剂将表面进行清洗后，可直接喷涂面漆。

目前，汽车内饰件底漆的涂装方法包括电泳涂装、喷涂、刷涂、浸涂等，由于电泳涂装更具有环保性，当前汽车内饰件的底漆喷涂使用较多的为电泳涂装[33]，其具有涂装效率高、涂膜质量好的特点。面漆涂装主要有手工空气喷涂和自动静电喷涂。手工空气喷涂具有涂层均匀和涂膜平滑美观的特点，但是其涂料消耗大、生产效率低且施工环境差，而自动静电喷涂的涂料利用率高、生产效率高和施工环境好，因此研究者对于自动静电喷涂的研究更深入。如赵培[34]巧妙地利用了自动静电喷涂的涂饰质量好、涂料利用率和效率高的特点，将喷雾粒子更好地沉积到塑料表面。韩鸿志[35]结合自动静电喷涂涂料雾化机理、喷涂参数优化和轨迹规划开发出的汽车涂装工艺，实现了商用车车身喷涂的高品质化。

2.2　汽车外饰涂装工艺

汽车外饰涂装工艺集中体现在车身涂装。由于汽车车身大部分以钢材为主，在钢材制造过程中会粘上油污、灰尘并锈蚀，因此汽车外饰涂装工艺第一步是涂装前金属表面的处理。完成前处理后，先通过电沉积工艺在外饰件基材表面镀上防腐和防锈层，紧接着喷涂密封剂，最后，喷涂包含底涂层和透明涂层的面漆。此时，通过该工艺流程的完成，概念设计时的色彩、质感、光泽度、光滑度和鲜映性等汽车外饰效果将得以完整展现。

2.2.1　前处理

汽车外饰涂装的前处理工艺是先进行基材的表面清洁，再通过脱脂、表面调节和磷化处理三个液体浸渍工艺去除焊接残留物[36]。脱脂工艺是将基材浸渍在有机溶液中去除冲压过程中遗留的表面油污。表面调节工艺是先在基材表面产生晶体生长的成核点位磷酸盐，以增加金属表面上结晶核的数量，再通过增强后续磷酸序列的键合机制，使得游离酸蚀刻表面并释放氢，最终以金属磷酸盐离子结晶形式沉淀在表面上，去除自然氧化膜。磷化处理采用惰性金属磷酸盐层工艺，加强了基底表面的耐腐蚀性[37]，在清洁和制备的金属表面上沉积薄而致密的均匀转换层，实现重新附着一层适合粘结的氧化膜，以提高基材的粘结性。

2.2.2　电沉积工艺

经过前处理后，电沉积工艺用于在基材表面镀一层保护基材不被磨损和腐蚀的沉积层。近年来，众多学者聚焦于该工艺的改进研究。如李智等[38]研发了一种 CeO_2 纳米粒子金属陶瓷复合电沉积工艺，该工艺可提高沉积层的耐磨和耐腐蚀性能。王云强[39]研究出的超临界石墨烯脉冲复合电沉积工艺可在金属基材表面形成耐磨性能优良的石墨烯沉积层。范晖等[40]通过对射流电沉积工艺进行优化，使得金属基材表面沉积层的微观结构逐渐致密，从而增强基材的耐磨性。

2.2.3　防锈工艺

防锈工艺是一种在电沉积工艺基础上采取的非基材表面喷涂工艺，具体为使用聚氯乙烯和聚酯氨等密封剂进行接缝密封，以防止金属基材锈蚀。当前，密封剂主要应用在门、行李箱、挡板、金属部件及轮胎等结构的接缝处，以避免空气和水进入内部，腐蚀基材。除了防锈，在最新有关密封剂的研究中，聚氯乙烯和聚酯氨作为阻尼涂层的密封剂被尝试用于车身底部区域，用于防噪和减震。王丙龙等[41]以丙二醇和甘油为混合起始剂，合成一种新型汽车密封剂用聚醚多元醇，这种聚醚多元醇反应活性更稳定，并可与

二苯基甲烷二异氰酸酯反应合成聚氨酯预聚体密封剂。该密封剂具有优良的防噪和减震性能，能为消费者提供更为舒适的乘车环境。

2.2.4 面漆工艺

面漆工艺是汽车外饰涂装工艺的最后一步，该工艺一般采用湿碰湿法，在短暂闪蒸后将透明涂料喷涂到底涂层，然后在烘箱中将涂料固化。该工艺过程往往会由于设备故障、金属表面性质和工艺流程的问题造成面漆出现表面缩孔、桔皮和起泡等外观缺陷。湿碰湿法需要专用的空气处理系统，其过滤和涂层设备特性决定了涂层操作的整体效率和涂层质量。因此，有研究者从设备优化角度展开了面漆工艺优化的研究。如张殿平等[42]通过一系列实验，验证在轻卡涂装线上出现面漆缩孔是由于压缩空气气管老化和打磨设备润滑不够造成的，并从改进工艺和管理流程角度提出了解决类似问题的思路。结合金属表面性质来改进面漆工艺具有显著效果。刘士海[43]通过分析面漆橘皮的产生机理，发现钢板粗糙度和车身面漆橘皮的产生存在重要关联，并进一步提出可以从金属色漆的膜厚、黏度以及慢干流平剂的补加量等方面防止出现橘皮。工艺流程的优化对面漆工艺的优化也具有重要意义，其中刘汉功[44]通过分析闪干时间、漆膜厚度、溶剂挥发量等因素，查找并归纳了水性双组分聚氨酯面漆起泡的原因。这些研究表明，通过上述面漆工艺的改良，可有效预防面漆喷涂时易形成的缺陷，提高汽车面漆涂膜的外观装饰性能，为汽车外饰设计涂装工艺的持续优化提供方向。

3 汽车内外部设计用涂料和工艺的发展趋势

3.1 汽车内外饰设计用涂料的发展趋势

溶剂型涂料在涂装时不可避免地会产生大量的 VOC 污染，而目前政府环保政策日趋严格，消费者环保意识不断增强，在此背景下，更具环保性的水性涂料受到众多研究者的青睐。研究者力求在现有水性涂料优异性能的基础上，进一步改善水性涂料的力学、硬度、耐候和稳定等性能。其中王海峰等[45]制备的环氧树脂改性水性聚氨酯涂料具有良好的力学性能。樊小丽[46]制备的双组分水性聚氨酯汽车面漆选用含羟基丙烯酸酯乳液与水性异氰酸酯固化剂进行交联固化和改性，可增强漆面的环保和综合机械性能。康园等[47]制备的有机硅改性水性聚酯氨乳液拥有耐候性优良、稳定性持久和无污染的优点。由于汽车内外饰设计对涂层本身有如高彩度、高光泽度以及优良质感的外观装饰性要求，因此针对涂料的外观装饰效果的研究也正在兴起。如黄梅菊[48]制备的水性丙烯酸酯清漆具有良好的外观装饰性，给汽车外观带来全新的视觉效果。

3.2 汽车内外饰设计用涂料工艺的发展趋势

当前，汽车涂料工艺还处在不断发展与完善的进程中，不可避免地存在一些问题。其中一个重要问题在于喷涂过程中只有 50%~60%的雾化涂料能覆盖到汽车表面，其他雾化涂料会扩散到空气中，并带来严重的环境污染。除此之外，绝大部分汽车涂装仍然采用传统的手工操作工艺流程，存在效率低、消耗高等问题。为此，楚绍华[49]开发设计的涂装工艺参数智能调控系统已经成功投入某汽车制造公司的涂装生产线，智能化的系统实现了喷涂参数和工艺过程的优化，显著提升了喷涂效率并降低了能耗，所采用的绿色环保的水性 3B1C 工艺（中途、色漆、清漆三道油漆一起喷涂，一次烘干）也较大程度地降低了 VOC 的产生，具有良好的环保效果[50]。由此可见，汽车涂装工艺研究正朝着智能化和绿色化的方向迈进。

另外，提高汽车内外饰外观设计效果开展的涂料工艺研究也正在不断深化。其中汽车等离子表面技术不仅可以让汽车设计者设计迷人的外观，还具有提高驾驶乐趣、低排放、高可靠性等优势[51]。其中司先锋等[52]采用等离子喷涂技术制备涂层，研究了不同参数下涂层的性能，结果表明随着等离子喷涂功率的增加，涂层的光学性能有了明显改善，这对于汽车内外饰的外观性能有较大提高。因此等离子喷涂技术具有一定的研究价值。

4 总结和展望

在绿色和个性化消费观念深入人心的背景下，汽车内外饰涂装材料和工艺面临新的发展机遇与挑战。其中，汽车内饰涂料中溶剂型涂料的污染高，不如水性涂料环保，于是，众多学者的研究主要聚焦在向水性涂料中加入特殊物质实现改性。汽车外饰涂料的发展则表现为底漆向环保、防腐蚀和耐盐雾发展；中涂漆向耐磨性和高机械性能发展；面漆向高装饰性和耐候性发展，且系统探索三者关联性以提升外饰涂料综合性能的研究趋势正在涌现。从整体上看，研究绿色环保、高装饰性、高实用性的涂料是目前主要的研究方向，其中对水性聚氨酯、水性丙烯酸、水性氟碳涂料的研究还需进一步深化，而围绕底漆、中涂漆和面漆的综合性研究也显得愈发重要和迫切。

为解决不同基材的表面处理问题，正在加强对特殊基材表面前处理工艺的探索，底、面漆涂装工艺表现为从手工喷涂向电泳和静电等自动喷涂发展。汽车外饰涂装的前处理工艺朝着更好实现金属表面清洁的液体浸渍工艺方向发展，电沉积工艺不断向增强基材的耐磨和耐腐蚀性目标迈进，防锈工艺正深入研究具有更优良防音和减震性能的密封剂，面漆工艺则从设备、金属表面性质和工艺流程方面实现自我改良。

随着技术的进步，内外饰涂装的各工艺流程都涌现出各种新型的工艺技术和方法，并且逐渐向高品质、高效率的智能化和低污染、低消耗的绿色化方向发展。

参考文献

[1] 刘宪文. 我国汽车涂料的现状及进展[J]. 现代涂料与涂装, 2011, 14(10): 20-23.
LIU Xian-wen. The present situation and development of Chinese automobile coating[J]. Modern paint and finishing, 2011, 14(10): 20-23.

[2] 陈慕祖. 汽车涂料的研究现状及发展方向[J]. 材料保护, 2000, 33(1): 68-70.
CHEN Mu-zu. Research status and development direction of automotive coatings[J]. Material protection, 2000, 33(1): 68-70.

[3] 刘军, 钟宏, 周海斌. 浅谈水性聚氨酯汽车内饰涂料[J]. 中国涂料, 2007, 22(4): 40-44.
LIU Jun, ZHONG Hong, ZHOU Hai-bin. Waterborne polyurethane automobile interior decoration coatings[J]. China coating, 2007, 22(4): 40-44.

[4] 李金旗. 用于汽车内饰件的水性双组分聚氨酯柔感涂料[J]. 电镀与涂饰, 2008, 27(10): 41-43.
LI Jin-qi. Waterborne two-component polyurethane soft-feel coatings used for automobile interior parts[J]. Electroplating and finishing, 2008, 27(10): 41-43.

[5] 朱林宗. 双组分水性聚氨酯涂料在 ABS 塑胶上的应用研究[J]. 中国涂料, 2018, 33(11): 29-32.
ZHU Lin-zong. Application of two-component waterborne polyurethane coatings for ABS plastics[J]. China coatings, 2018, 33(11): 29-32.

[6] 万雪期, 姚伟, 郭翠翠, 等. 水性含氟丙烯酸涂料的制备及性能研究[J]. 中国涂料, 2018, 33(10): 54-58.
WAN Xue-qi, YAO Wei, GUO Cui-cui, et al. Preparation and characterization of waterborne fluorinated acrylic coatings[J]. China coatings, 2018, 33(10): 54-58.

[7] 成绵江. 石墨烯改性水性丙烯酸树脂涂料的制备与性能[J]. 生物化工, 2018, 4(3): 128-132.
CHENG Mian-jiang. Preparation and properties of graphene modified waterborne acrylic resin coatings[J]. Biological chemical engineering, 2008, 4(3): 128-132.

[8] 陈鑫. 纳米氧化锌改性水性丙烯酸涂料的制备与研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
CHEN Xin. The Study of preparation of nanometer ZnO improvement waterborne acrylic coating[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.

[9] 胡梦. 钢结构用高光泽高硬度水性丙烯酸面漆的制备与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
HU Meng. Preparation and study of properties of water-borne acrylic coating with high hardness and high-gloss for steel structure[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.

[10] NOBEL M L, PICKEN S J, MENDES E. Waterborne nanocomposite resins for automotive coating applications[J]. Progress in organic coatings, 2007, 58(2-3): 96-104.

[11] 韩小可. 高固含量羟基丙烯酸涂料树脂的制备及性能研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2018.
HAN Xiao-ke. Study on the preparation and properties of high solid content of hydroxyl acrylic coating resins[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2018.

[12] 杨景花. 纳米二氧化钛改性氟碳涂料及涂装工艺的研究[D]. 湖南: 湖南大学, 2006.
YANG Jing-hua. Research on nano-Ti_2 modified fluorocarbon coating and painting process[D]. Hunan: Hunan University, 2006.

[13] 潘云飞, 张睿, 周如东, 等. 新型高固体份常温固化 FPVE 氟碳涂料的研制[J]. 涂层与防护, 2018, 39(6): 18-23.
PAN Yun-fei, ZHANG Rui, ZHOU Ru-dong, et al. Development of novel high solid room temperature curing FPVE fluorocarbon coatings[J]. Coatings and protection, 2018, 39(6): 18-23.

[14] 吕钊, 王科, 于雪艳, 等. 水性氟碳面漆的制备与性能研究[J]. 中国涂料, 2018, 33(9): 31-35.
LV Zhao, WANG Ke, YU Xue-yan, et al. Study on preparation and performance of waterborne fluorocarbon coatings[J]. China coatings, 2018, 33(9): 31-35.

[15] 高洁. 碳纳米管/氟碳树脂涂料的制备及其性能研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2017.
GAO Jie. Preparation and properties of carbon-based thermal conductivity coatings[D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2017.

[16] 谭振, 周振强, 刘平平, 等. 环保型汽车用水性环氧树脂底漆的研制[J]. 上海涂料, 2009, 47(3): 9-11.
TAN Zhen, ZHOU Zhen-qiang, LIU Ping-ping, et al. Development of water-based epoxy resin primer for environment-friendly automobile[J]. Shanghai coatings, 2009, 47(3): 9-11.

[17] 张红素. 新型丙烯酸汽车底漆自动沉积涂料的制备及无铬涂装工艺条件的研究[D]. 成都: 四川大学, 2007.
ZHANG Hong-su. Study on preparation of the new-style acrylic auto-primer autodeposition coating and chromium-free coating process[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.

[18] 周荣华, 沈球旺, 刘忠, 等. 一次性直接喷涂汽车用聚丙烯塑料底漆的制备[J]. 中国涂料, 2009, 11(3): 57-60.
ZHOU Rong-hua, SHEN Qiu-wang, LIU Zhong, et al. Preparation of polypropylene pp plastic primer of direct spraying for automobile[J]. China coatings, 2009, 11(3): 57-60.

[19] 王庆军, 孙光明, 孙文俊, 等. 高固体分环氧底漆的配方设计[J]. 中国涂料, 2018, 33(11): 68-71.
WANG Qing-jun, SUN Guang-ming, SUN Wen-jun, et al. Preparation of high solids epoxy primer[J]. China coatings, 2018, 33(11): 68-71.

[20] 张理, 王雅兰, 欧阳晓东, 等. 高性能水性双组分环氧底漆的研制[J]. 现代涂料与涂装, 2018, 21(6): 4-8.
ZHANG Li, WANG Ya-lan, OUYANG Xiao-dong, et al. Development of waterborne two-component epoxy primer with high performance[J]. Modern paint and finishing, 2018, 21(6): 4-8.

[21] 吕晓东. 我国车用涂料市场现状及发展趋势[J]. 当代石油石化, 2015, 248(8): 34-38.
LV Xiao-dong. Market status and development trends of domestic automotive coating[J]. Petroleum and petrochemical today, 2015, 248(8): 34-38.

[22] 郑齐, 刘善江, 康立训, 等. 水性饱和聚酯树脂的研制

及其在汽车中涂漆中的应用[J]. 涂料技术与文摘, 2015, 36(5): 35-39.
ZHENG Qi, LIU Shan-jiang, KANG Li-xun, et al. Preparation of waterborne saturated polyester and its application in automotiveintercoat[J]. Coatings technology and abstracts, 2015, 36(5): 35-39.
[23] 黄松. 水性聚酯涂料的制备及其在汽车中涂漆中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
HUANG Song. Preparation of waterborne polyester coating and its application on automotive primer surfacer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
[24] 沈球旺, 刘忠, 周荣华, 等. 高性能聚酯氨基汽车中涂漆的制备[J]. 电镀与涂饰, 2009, 28(2): 56-59.
SHEN Qiu-wang, LIU Zhong, ZHOU Rong-hua, et al. Preparation of high-performance polyester-amino automotive intermediate paint[J]. Electroplating and finishing, 2009, 28(2): 56-59.
[25] 吕钊, 王科, 于雪艳, 等. 高耐候氟碳面漆的制备与性能研究[J]. 中国涂料, 2018, 33(10): 50-53.
LV Zhao, WANG Ke, YU Xue-yan, et al. Study on preparation and performance of fluorocarbon topcoat of high weatherability[J]. China coatings, 2018, 33(10): 50-53.
[26] 周树军. 聚酯改性丙烯酸聚氨酯汽车面漆的研制[J]. 现代涂料与涂装, 2012, 15(4): 10-12.
ZHOU Shu-jun. Preparation and research of polyester modified acrylic polyurethane automotive finish[J]. Modern paint and finishing, 2012, 15(4): 10-12.
[27] 翟英雷, 高鹏, 乔衡, 等. 丙烯酸氨基汽车面漆的研制[J]. 天津科技, 2010, 11(3): 7-9.
ZHAI Ying-lei, GAO Peng, QIAO Heng, et al. Development of acrylic amino auto topcoat[J]. Tianjin science and technology, 2010, 11(3): 7-9.
[28] 王长庚. 高品质高固体份汽车面漆的研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
WANG Chang-geng. The study of high-solids automotive finishes with high quality[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
[29] 孙永泰. 塑料涂饰前的表面处理技术[J]. 塑料助剂, 2007(61): 52-53.
SUN Yong-tai. Surface treatment technology before plastic finishing[J]. Plastics additives, 2007(61): 52-53.
[30] 赵秋蓉, 张慧茹. ABS 塑料小件化学镀银及银层氯化的研制[J]. 电镀与涂饰, 2014, 33(20): 874-877.
ZHAO Qiu-rong, ZHANG Hui-ru. Research and preparation of electroless silver plating on tiny ABS plastic pieces and chloridization of the silver coating[J]. Electroplating and finishing, 2014, 33(20): 874-877.
[31] 刘杨, 吕新颖, 陶岩, 等. 木粉/聚乙烯复合材料的等离子体表面处理——等离子体处理时间对复合材料表面特性的影响[J]. 高分子学报, 2010(6): 782-787.
LIU Yang, LYU Xin-ying, TAO Yan, et al. Plasma surface treatment of wood powder/polyethylene composites—effect of treatment time on surface characteristics of the composites[J]. Acta polymerica sinica, 2010(6): 782-787.
[32] 黄亚男. 电晕处理对聚丙烯薄膜表面特征及印刷适应性影响的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
HUANG Ya-nan. Effect of corona discharge treatment on the surface properties and printability of polypropylene film[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
[33] 刘存吉. 简论汽车车身涂装工艺[J]. 现代涂料与涂装, 2018, 21(6): 58-64.
LIU Cun-ji. Brief discussion on painting process of automotive body[J]. Modern paint and finishing, 2018, 21(6): 58-64.
[34] 赵培. 多场耦合作用机器人静电空气喷涂沉积厚度模型研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2017.
ZHAO Pei. The research of deposition model of robot electrostatic spray under the coupling of multi field[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
[35] 韩鸿志. 高品质汽车涂装工艺及装备关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
HAN Hong-zhi. Research on key technology of high quality automotive finishing process and equipment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
[36] 常丽萍. 浅析汽车车身结构对前处理和电泳工艺的影响[J]. 上海涂料, 2011, 49(8): 21-22.
CHANG L P. Analysis of the influence of car body structure on the pretreatment & electrophoresis process[J]. Shanghai coatings, 2011, 49(8): 21-22.
[37] AKAFUAH N K. Automotive paint spray characterization and visualization[J]. In automotive painting technology, 2013(5): 121-165.
[38] 李智, 马春雨, 刘娜娜, 等. CeO_2 纳米粒子金属陶瓷复合电沉积工艺性能研究[J]. 稀土, 2017, 38(6): 103-111.
LI Zhi, MA Chun-yu, LIU Na-na, et al. Technological properties of CeO_2-metal-ceramic-nanocomposites synthesized by electrodeposition[J]. Chinese rare earths, 2017, 38(6): 103-111.
[39] 王云强. 超临界石墨烯脉冲复合电沉积工艺研究[D]. 常州: 江苏理工学院, 2017.
WANG Yun-qiang. Study on pulse composite electrodeposition process of supercritical graphene[D]. Changzhou: Jiangsu University of Technology, 2017.
[40] 范晖, 赵阳培, 王善奎. 射流电沉积工艺优化对铜镀层形貌及微观结构的影响[J].电镀与精饰, 2017, 39(8): 1-14.
FAN Hui, ZHAO Yang-pei, WANG Shan-kui. Influence of optimization of jet electrodeposition process on the morphology and microstructure of copper coating[J]. Plating and finishing, 2017, 39(8): 1-14.
[41] 王丙龙, 刘小会, 董立红, 等. 新型汽车密封胶用聚醚多元醇的合成及其应用[J]. 聚氨酯工业, 2015, 30(3): 47-50.
WANG Bing-long, LIU Xiao-hui, DONG Li-hong, et al. The synthesis and application of a new polyether polyol used in automobile sealant[J]. Polyurethane industry, 2015, 30(3): 47-50.
[42] 张殿平, 李丁丁, 于春毅, 等. 轻卡驾驶室面漆缩孔原因分析及应对措施[J]. 材料保护, 2018, 51(7): 141-143.
ZHANG Dian-ping, LI Ding-ding, YU Chun-yi, et al. Reason analysis and countermeasures of shrinkage of top coat of light truck cab[J]. Materials protection, 2018, 51(7): 141-143.
[43] 刘士海. 汽车面漆桔皮缺陷的机理分析与工艺控制[D]. 吉林: 吉林大学, 2007.
LIU Shi-hai. Mechanism analysis and technological controlling of orange peel of automobile top coat[D]. Jilin: Jilin University, 2007.

[44] 刘汉功. 水性双组分聚氨酯面漆起泡原因分析[J]. 涂料技术与文摘, 2016, 37(7): 47-49.
LIU Han-gong. Cause analysis of blister on surface of waterborne 2K PU topcoat[J]. Coatings technology and abstracts, 2016, 37(7): 47-49.

[45] 王海峰, 庄妍, 于晓燕, 等. 一种环氧树脂改性水性聚氨酯涂料的制备及其性能研究[J]. 胶体与聚合物, 2018, 36(4): 148-149.
WANG Hai-feng, ZHUANG Yan, YU Xiao-yan, et al. Preparation and properties of waterborne polyurethane coating modified by epoxy resin[J]. Chinese journal of colloids and polymer, 2018, 36(4): 148-149.

[46] 樊小丽. 双组分水性聚氨酯汽车面漆的制备与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
FAN Xiao-li. Preparation and study of property of two-component water-borne polyurethane automobile topcoating[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.

[47] 康圆, 郑水蓉, 苏航, 等. 有机硅改性水性聚氨酯乳液的制备及其性能研究[J]. 中国胶粘剂, 2011, 20(3): 4-7.
KANG Yuan, ZHENG Shui-rong, SU Hang, et al. Study on preparation and properties of waterborne polyurethane emulsion modified by organic silicone[J]. China adhesives, 2011, 20(3): 4-7.

[48] 黄菊梅. 水性丙烯酸酯清漆的制备及漆膜性能的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2012.
HUANG Ju-mei. Preparation of water-borne acrylic clearcoats and study on the film properties[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2012.

[49] 楚绍华. 涂装工艺参数智能调控系统设计开发[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
CHU Shao-hua. Design and development of intelligent control system for painting process parameters[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.

[50] 曾德锦, 吴珍珍, 金忠. 浅谈水性3C1B汽车涂装工艺的应用[J]. 汽车实用技术, 2018(21): 245-250.
ZENG De-jin, WU Zhen-zhen, JIN Zhong. Brief talking on the application of waterborne 3C1B automotive painting process[J]. Automobile applied technology, 2018(21): 245-250.

[51] LAMPE T, EISENBERG S, RODR´IGUEZ C E. Plasma surface engineering in the automotive industry—Trends and future prospectives[J]. Surface and coatings technology, 2003, 174-175: 1-7.

[52] 司先锋, 马壮, 高丽红, 等. 等离子喷涂沉积 Al_2O_3-SiO_2 涂层的光学性能[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(2): 236-242.
SI Xian-feng, MA Zhuang, GAO Li-hong, et al. Optical properties of Al_2O_3-SiO_2 coating deposited by plasma spraying[J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2019, 47(2): 236-242.

（上接第 313 页）

[16] 夏伶勤, 韩建民, 崔世海, 等. SiC_p/A356 复合材料微弧氧化陶瓷膜的生长规律与性能[J]. 材料工程, 2016, 44(1): 40-46.
XIA Ling-qin, HAN Jian-min, CUI Shi-hai, et al. Growth law and properties of ceramic coatings on SiC_p/A356 composite fabricated by micro-arc oxidation[J]. Journal of materials engineering, 2016, 44(1): 40-46.

[17] 朱庆振, 薛文斌, 鲁亮, 等. $(Al_2O_3$-$SiO_2)_{sf}$/AZ91D 镁基复合材料微弧氧化膜的制备及电化学阻抗谱分析[J]. 金属学报, 2011, 47(1): 74-80.
ZHU Qing-zhen, XUE Wen-bin, LU Liang, et al. Preparation of micro-arc oxidation coating on magnesium matrix composite and its electrochemical impedance spectroscopic analysis[J]. Acta metallurgica sinica, 2011, 47(1): 74-80.

[18] 马臣, 高燕, 李慕勤, 等. 纳米 SiO_2 对纯镁超声微弧氧化涂层组织结构及性能的影响[J]. 中国体视学与图像分析, 2014(1): 50-56.
MA Chen, GAO Yan, LI Mu-qin, et al. Effect of n-SiO_2 on microstructure and mechanical properties of the coatings formed on pure magnesium by ultrasonic-micro-arc oxidation[J]. Chinese journal of stereology and image analysis, 2014(1): 50-56.

[19] MA K J, BOSTA M M S A, WU W T. Preparation of self-lubricating composite coatings through a micro-arc plasma oxidation with graphite in electrolyte solution[J]. Surface & coatings technology, 2014, 259: 318-324.

[20] CHEN Q Z, JIANG Z Q, TANG S G, et al. Influence of graphene particles on the micro-arc oxidation behaviors of 6063 aluminum alloy and the coating properties[J]. Applied surface science, 2017, 423: 939-950.

[21] WANG S Y, SI N C, XIA Y P, et al. Influence of nano-SiC on microstructure and property of MAO coating formed on AZ91D magnesium alloy[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2015, 25(6): 1926-1934.

[22] KASEEM M, LEE Y H, KO Y G. Incorporation of MoO_2 and ZrO_2 particles into the oxide film formed on 7075Al alloy via micro-arc oxidation[J]. Materials letters, 2016, 182: 260-263.

[23] GUPTA B, KUMAR N, TITOVICH K A, et al. Lubrication properties of chemically aged reduced graphene-oxide additives[J]. Surfaces & interfaces, 2017(7): 6-13.

[24] SHIN K R, NAMGUNG S, YOO B, et al. Electrochemical response of ZrO_2-incorporated oxide layer on AZ91 Mg alloy processed by plasma electrolytic oxidation[J]. Surface & coatings technology, 2011, 205(13): 3779-3784.

[25] CHEN F, ZHANG Y L, ZHANG Y. Effect of graphene on micro-structure and properties of MAO coating prepared on Mg-Li alloy[J]. International journal of electrochemcal science, 2017, 12(7): 6081-6091.

[26] CUI L Y, GAO S D, LI P P, et al. Corrosion resistance of a self-healing micro-arc oxidation/polymethyltrimethoxysilane composite coating on magnesium alloy AZ31[J]. Corrosion science, 2017, 118: 84-95.

[27] LI O L, TSUNAKAWA M, SHIMADA Y, et al. Corrosion resistance of composite oxide film prepared on Ca-added flame-resistant magnesium alloy AZCa612 by micro-arc oxidation[J]. Corrosion science, 2017, 125: 99-105.

[28] JONI M S, FATTAH-ALHOSSEINI A. Effect of KOH concentration on the electrochemical behavior of coatings formed by pulsed DC micro-arc oxidation(MAO) on AZ31B Mg alloy[J]. Journal of alloys & compounds, 2016, 661: 237-244.