

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.04.014

汽车轻量化背景下塑料的应用及其电镀工艺

吴志强¹, 蔡春芳^{1*}, 齐锐丽², 马 勇¹

(1. 汉中职业技术学院 汽车与机电工程学院, 陕西 汉中 723000;

2. 陕西航空职业技术学院 机械工程学院, 陕西 汉中 723000)

摘要: 汽车轻量化是实现节能减排的有效途径, 对汽车工业及人类的可持续发展有着重要意义。塑料是汽车轻量化材料中的关键非金属材料, 用量逐年增长, 并呈现出以塑料代钢的趋势。而塑料电镀工艺的发展与应用, 进一步丰富了塑料在汽车上的应用, 加速了汽车轻量化的进程。本文介绍了汽车轻量化背景下车用塑料的概况, 阐述了碳纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维增强塑料在汽车轻量化上的应用与发展, 并在分析车用塑料 Cu/Ni/Cr 电镀工艺的基础上, 阐明了直接电镀工艺的优势及发展方向。

关键词: 汽车轻量化; 纤维增强塑料; 电镀工艺; 应用

中图分类号: TQ153.3 **文献标识码:** A

Application and electroplating process of plastics under the background of automotive lightweight

Wu Zhiqiang¹, Cai Chunfang^{1*}, Qi Ruili², Ma Yong¹

(1. School of Automotive and Mechatronics Engineering, Hanzhong Vocational and Technical College, Hanzhong 723000, China; 2. School of Mechanical Engineering, Shaanxi Aviation Vocational and Technical College, Hanzhong 723000, China)

Abstract: Automobile lightweight is an effective way to achieve energy saving and emission reduction, which is of great significance to the sustainable development of automobile industry and human beings. Plastic is one of the key non-metallic materials in automotive lightweight materials, and its consumption has been increasing year by year, showing a trend of replacing steel with plastic. The development and application of plastic electroplating technology has further enriched the application of plastics in automobiles and accelerated the process of automobile lightweight. This paper introduces the general situation of automobile plastics in the background of automobile lightweight, expounds the application and development of carbon fiber, glass fiber, basalt fiber reinforced plastics in automobile lightweight, and on the basis of analyzing the Cu/Ni/Cr electroplating process for automobile plastics, expounds the advantages and development direction of direct electroplating process

Keywords: automobile lightweight; fiber reinforced plastics; electroplating process; application

据中国汽车工业协会与公安部数据统计, 2021 年我国汽车产量 2608.2 万辆, 全国汽车保有量达

3.02 亿辆。汽车工业的迅猛发展, 为经济注入了强大活力, 极大改善人们的的生活方式, 同时也让能源问

收稿日期: 2022-11-16

修回日期: 2023-01-06

作者简介: 吴志强(1985—), 男, 学士, 讲师, email: 243223507@qq.com

*通信作者: 蔡春芳(1977—), 女, 硕士, 副教授, email: 287257586@qq.com

题和环境问题日益严峻。面对全球能源紧缺与环境污染的问题,各国都在通过技术标准和法规不断严格汽车排放与燃料消耗量。根据工业和信息化部数据,目前欧盟、美国、日本乘用车每百公里油耗标准目标分别为3.8 L、6 L、4.9 L,而我国制定了传统能源乘用车每百公里平均油耗量2025年5.6 L、2030年达到4.8 L的目标。研究表明,汽车轻量化是减少排放污染和节约燃油的一种有效途径。燃油车自重每降低10%,燃油消耗可下降6%~8%,CO₂排放则可降低5%~6%;而电动汽车重量减少10%,电动里程则可以增加约14%^[1-2]。2020年10月,我国《节能与新能源汽车技术路线图2.0》发布,汽车轻量化技术作为重点领域,制定了整车轻量化系数总体目标,其中燃油乘用车与纯电动乘用车整车轻量化系数到2035年较2020年分别降低25%与35%^[3]。

汽车轻量化可以通过优化结构设计、轻量化材料和先进制造工艺来实现,其中轻量化材料不仅可以直接降低汽车重量,还可以通过优化设计实现二次减重。塑料重量轻,耐腐蚀性好,易于加工成型,其比重远低于钢、铝等金属材料,是用量最多的汽车轻量化非金属材料^[4-5]。电镀是塑料表面金属化的典型工艺,不仅可以使塑料制件具有金属质感,提高了装饰性、舒适性,更能改善塑料件表面耐热、耐候、耐腐蚀等性能,极大地丰富了塑料在汽车上的应用,加速了汽车轻量化进程^[6-7]。

本文介绍了汽车轻量化背景下车用塑料概况,总结了碳纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维增强塑料在汽车轻量化中的应用,综述了车用塑料Cu/Ni/Cr电镀工艺的研究与应用现状,并对塑料表面直接电镀工艺进行了分析与展望。

1 塑料在汽车轻量化中的应用

1.1 车用塑料的概况

塑料凭借其优异的综合性能和价格优势备受汽车行业的青睐,近年来车用塑料消费量不断攀升,并呈现出以塑代钢的趋势。据国际市场资讯机构统计分析,2021年全球车用塑料市场需求已达到750万吨,未来10年车用塑料市场规模预计将以9%的年复合增长率增长。同时,汽车的单车塑料用量也呈现出快速增长的趋势,塑料在汽车整备质量中的比例从1970年的6%增加到2010年的16%,到2020年达到18%^[8]。单车塑料用量已成为衡量汽车设计与

制造水平高低的一个重要标志,德国的单车平均塑料用量高达300 kg,占汽车整备质量的22.5%,而我国单车平均塑料用量仅占7%~10%,与发达国家相比尚有一定的差距^[9-10]。在车用塑料中,通用塑料如聚丙烯(PP)、聚氯乙烯(PVC)、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)等,价格较低,用量较高;其次是工程塑料如尼龙/聚酰胺(PA)、聚碳酸酯(PC)、聚酯(PET)等,特种塑料如聚苯醚(POB)、聚砜(PSU)、聚醚醚酮(PEEK)等,价格较高,用量相对较少。其中PP、PU、PVC、ABS、PA、PC等,是用量最多的几个塑料品种^[11-13]。塑料作为关键的汽车轻量化材料,不仅可以有效降低零部件的重量,还可以实现复杂零件的注塑成型,提高生产效率。塑料已广泛应用于汽车内外饰件、结构件及功能件。

1.2 车用纤维增强塑料

随着汽车轻量化进程的飞速发展,车用塑料迎来了高强度、高阻燃、高韧性、耐高温、抗冲击等更为严苛的性能挑战。通过填充、共混、增强等方法对通用塑料和工程塑料加工改性成为提高车用塑料性能的主要途径,其中尤以纤维增强塑料最具发展潜力。纤维增强塑料不仅具有比强度和比模量高、密度小、安全等级高等特点,还可以将汽车重量降低15%~40%,碳纤维、玻璃纤维、玄武岩纤维增强塑料在汽车轻量化上的应用成为了业内的焦点^[14-16]。

碳纤维增强塑料(CFRP)强度一般可以达到碳钢的3倍、铝合金的4倍,而在同等强度下,重量却只有钢的1/4,铝合金的1/2,是非常理想的汽车轻量化材料^[17]。但因其成本较高,目前主要应用于高档汽车结构件及功能件,并取得了显著的轻量化效果。自主品牌前途汽车在苏州生产基地建有中国第一条碳纤维汽车零部件生产线,旗下K50纯电超级跑车车身采用了29个CFRP覆盖件。覆盖件重量仅有46.7 kg,相比高强度钢板材料减重40%,比铝合金材料减重20%以上^[18]。张君媛等^[19]采用CFRP替代某乘用车B柱钢材加强板,并对其尺寸和铺层顺序进行了优化,减重率高达78.97%。ARRK Engineering公司^[20]开发了一款CFRP电动汽车齿轮箱壳体,相比原来的铝合金壳体轻30%左右。2021年3月,巴斯夫推出全新Ultramid® Advanced碳纤维增强PPA塑料,可用于制造车身、底盘和动力总成结构件,能实现减重25%~30%而不降低刚度和强度,成为替代镁、铝的车用碳纤维增强塑料标杆。

玻璃纤维增强塑料(GFRP)具有耐腐蚀性强、介电性和热性能良好、设计灵活等特性,在汽车上的应用十分广泛。与短玻璃纤维增强塑料相比,长玻璃纤维增强塑料中的纤维较长且分布均匀,具有力学性能高、抗冲击好、耐疲劳等诸多优点,特别是长玻璃纤维增强聚丙烯(PP-LGF)是车用轻量化GFRP材料中应用前景最好的品种^[21-22]。李晓雄等^[23]将40%玻纤质量分数的长玻璃纤维增强PP应用于汽车翼子板,通过测试发现,该材料减重的同时满足了性能的需求。蒋艳云等^[24]对长玻纤增强PP在发动机装饰罩盖上的应用进行了研究,采用PP-LGF30材料可满足工作条件,同时减重22%以上,材料成本降低23%~36%。邵萌等^[25]对PP-LGF材料汽车尾门与金属尾门进行了对比研究,发现通过优化设计PP-LGF材料完全可以达到金属尾门的结构强度要求,可实现减重约30%。2020年8月,北欧化工向北美汽车市场提供其Fibremod品牌的玻璃纤维增强PP牌号,可以给车前端、尾门、仪表板和中控台支架带来更轻质、强度更高和耐冲击的性能。北欧化工制定的方案,以实现减重和工艺成本节约为目标,处于汽车制造业的前沿。

玄武岩纤维增强塑料(BFRP)的纤维由玄武岩石料在1450~1500℃熔融后高速拉制而成,是一种新型无机环保高性能纤维材料,不仅强度高,而且还具有电绝缘、耐腐蚀、耐高温等多种优异性能。玄武岩纤维比碳纤维成本低、实效应变高,与玻璃纤维某些性能相似,但成分更加复杂且具有更高的弹性模量和强度^[26]。玄武岩纤维与诸多聚合物基质都能良好相容,因其是一种天然无污染、无添加剂的环保纤维,成为汽车轻量化新材料的研究热点。德国爱达克(EDAG)公司曾推出Light Car轻型概念车,车身采用玄武岩纤维材料打造,比选用玻璃纤维材料减重30%,还可以百分百回收再利用,环境污染降至最低^[27]。湖南大学谷永强^[28]对玄武岩纤维增强PP汽车内饰件性能进行研究,发现玄武岩纤维在轻量化的前提下,能有效提高PP的阻燃性,改善车门内饰板的刚度与尺寸稳定性。吉林大学徐森^[29]对不同材料的汽车前防撞梁进行了对比研究,玄武岩纤维复合材料防撞梁比钢防撞梁减重21%,在低速碰撞下吸能提升7.96%,碰撞力减少11.82%,侵入量减少了15.59%。玄武岩纤维还具有良好的摩擦性能,目前已有将玄武岩纤维增强酚醛树脂用于汽车刹车片的

应用研究,其不仅热性能稳定,还可以实现对石棉材料的有效替代。

2 车用塑料的电镀工艺

塑料等高分子材料表面金属化工艺一般分为干法和湿法两种。干法工艺主要包括物理气相沉积(PVD)和化学气相沉积(CVD),而湿法工艺主要包括化学还原、化学镀及电镀等^[30-31]。电镀工艺技术成熟、生产参数便于控制,制品镀层应力小、平滑光亮、结晶致密,更适用于实际生产^[32]。塑料电镀制品兼具塑料和金属的双重特性,不仅使塑料具有金属的光泽和质感,实现金属材料的替代,有效降低零部件的重量,还可以改善塑料的力学性能,防止塑料老化,使其具有更为良好的化学稳定性和装饰性。塑料电镀工艺广泛应用于汽车内外饰件,如车内饰板、进气格栅及装饰条、车门拉手、车标、行李架等。

2.1 Cu/Ni/Cr电镀体系

随着对汽车轻量化及豪华美观的不断追求,电镀塑料制品以其金属光泽的外观及易加工、减重好、性能优异等众多的优点,越来越多地代替金属应用于汽车的制造和设计中。Cu/Ni/Cr电镀体系是车用塑料防护兼装饰性电镀的典型,各汽车厂家针对不同用途的塑料电镀件均制定了工艺标准,如通用GMW14668、丰田TSH6504G、大众TL528、一汽Q/CAF01等^[33-34]。从以上标准中不难发现,一般汽车内饰件的Cu镀层厚度 $\geq 20\text{ }\mu\text{m}$,Ni镀层总厚度 $\geq 10\text{ }\mu\text{m}$,Cr镀层厚度 $0.15\sim 0.5\text{ }\mu\text{m}$;而外饰件的Cu镀层厚度 $\geq 25\text{ }\mu\text{m}$,Ni镀层总厚度 $\geq 20\text{ }\mu\text{m}$,Cr镀层厚度 $0.3\sim 1.0\text{ }\mu\text{m}$,且ABS及ABS/PC合金是最主要的车用电镀塑料。为保证金属镀层与基体有良好的结合力,ABS中丁二烯的含量应控制在18%~23%^[35],而通过与PC共混得到的ABS/PC合金,可以大幅提升ABS的耐热性和拉伸强度等性能,极大地扩展了ABS的应用范围。由于ABS塑料不导电,传统的电镀工艺常与化学镀相结合,其流程一般为:去应力→除油→粗化→六价铬还原→钯锡活化→去氢氧化锡→化学镀镍(或铜)→预镀→电镀。沈宇等^[36]在传统塑料电镀工艺的基础上,提出了一种汽车部件塑料电镀方法。该方法在Cu/Ni/Cr电镀体系中使用多层镀镍,在活化解胶后通过化学镀镍、预镀铜、镀酸铜、镀半光镍、镀光亮镍、镍封、镀铬步骤,可使塑料表面嵌入 $0.003\sim 0.120\text{ mm}$ 的金属层,镀层表面

光滑、附着力高,避免了镀层疏松、鼓包、脱皮等现象。

为了使塑料制件表面获得色泽更加柔和的珍珠亚光视觉效果,可将镀光亮镍调整为镀珍珠镍。珍珠镍镀层还具有结构细致、孔隙少、耐腐蚀性好、耐刻痕能力佳等优点,广泛应用于门把手、装饰板等汽车塑料件^[37]。由于六价铬毒性大、致癌,对环境污染严重,因此采用硫酸盐体系或氯化物体系的三价铬电镀成为车用塑料Cu/Ni/Cr工艺的一次环保革命,并取得了良好的环境效益和社会效益^[38-39]。随着三价铬电镀的普及,电镀黑铬以其独具魅力的黑色高端视觉感,成为目前一种比较流行的车用塑料电镀工艺,但其镀层耐蚀性、耐候性有待进一步提升。柳金龙等^[40]对车用装饰性电镀黑铬的耐候性能进行了研究,发现其耐自然暴晒性能、耐腐蚀性能均较传统亮铬差,不适合应用于汽车外饰零部件。陈敏娟等^[41]对汽车内饰电镀黑铬塑料件进行了盐雾腐蚀试验,发现三价黑铬镀层的耐蚀性不如六价铬,并给出了提高电镀黑铬塑料件耐蚀性的建议。

对于纤维增强塑料,可以通过优化工艺、复合导电纤维,添加导电剂等方式实现化学镀或电镀。钟国刚等^[42]对碳纤维增强聚醚醚酮表面化学镀镍的工艺过程、影响因素、原理及质量评价方法进行了研究,提出了规范的工艺流程。按照该工艺进行适当的镀前处理和严格化学镀,可获得镀层均匀、结晶细致、结合力优良的化学镀镍层。何超雄等^[43]公开了一种适于电镀的增强ABS树脂组合物,其组分是一定配比的ABS树脂、碳纤维(3%~10%)、分散剂、润滑剂、主抗氧剂、辅助抗氧剂。该材料利用碳纤维增强了ABS的导电性,有效增加了镀层的结合力,缩短了预处理时间。许第修等^[44]发明了一种玻璃纤维增强尼龙易电镀复合材料,其组分包括一定配比的尼龙10T、助电镀功能添加剂、改性玻璃纤维、润滑剂及抗氧剂。其中电镀功能添加剂为苯乙烯丙烯腈共聚物接枝马来酸酐,与尼龙10T质量比为0.1~0.15。经实验测定,该复合材料具有较好的耐热性能、力学性能及电镀性能。

2.2 塑料表面直接电镀

传统的塑料电镀过程使用了大量的铬酐、硫酸等强氧化性溶液及钯、锡等贵金属,过程繁琐、上镀较慢、成本较高,对环境污染较大,追求一种经济、高效、环保的电镀工艺尤为重要。表面直接电镀作为

塑料电镀工艺的伟大创举,目前已有大量成果涌现。直接电镀工艺根据采用的导电性物质不同一般分为: Pd/Sn体系、碳离子悬浮液体系、导电性高分子聚合物体系三种,其中又以Pd/Sn体系与导电性高分子聚合物体系应用最为广泛。

Pd/Sn体系主要有PdS活化工艺和Futuron工艺。PdS活化工艺是将塑料件粗化后经胶体钯活化,经水洗后在NaOH溶液中解胶,最后在Na₂S溶液中浸浴后电镀^[45-46]。该工艺省去了敏化工序,基体在高Pd²⁺浓度的活化液中更易吸附Pd²⁺,使得上镀速率迅速增加,适合ABS、ABS/PC及其他新型工程塑料。Futuron工艺由Atotech(安美特)公司于1996年推出,是塑料表面在Futuron活化液中沉积Pb/Sn复合层,随后在Culink Futuron溶液中将锡置换为铜,经水洗后电镀铜或镍^[47-48]。该工艺是塑料电镀技术上的一次重大革新,其最大的优点是省去了化学镀工序,体系稳定性和镀层质量大大提升,为电镀连续自动化生产创造了条件。经过多年的改进,该工艺能同时满足ABS及高PC含量的ABS/PC复合材料的电镀,而且活化液中钯浓度可以降低至100~150 mg/L,更加经济环保。

导电性高分子聚合物体系是在塑料基体表面包覆一层高分子导电材料后进行电镀,常用的导电性聚合物主要是多炔、聚吡咯、聚硫代苯和聚苯胺,其中聚吡咯最具商业应用价值^[49]。为了使直接电镀技术在塑料等高分子表面金属化中有更广泛的应用,开发新型的导电高分子材料或探寻新的导电层种类是研究的热点。张鹏等^[50]研究了以吡咯为单体、FeCl₃为主要氧化剂和掺杂剂、通过氧化聚合的方法在ABS表面形成聚吡咯导电聚合物膜后进行直接电镀的工艺。结果表明:聚吡咯导电层能良好实现塑料直接电镀,加入适量的FeCl₃可显著提高聚吡咯的导电性。李璐等^[51]将石墨烯等碳纳米材料与多种辅助试剂混合研磨,制备了稳定的石墨烯复合导电材料,用于ABS塑料表面,形成石墨烯导电涂层后直接进行电镀。该方法有效避免了贵金属和重金属盐的使用污染,且电镀后金属光泽良好,镀层包覆完整、不易脱落。刘贵昌^[52]公开了一种汽车部件石墨烯电镀方法,电镀前在塑料上涂覆一层石墨烯作为导电层,可以使车用电镀级塑料更加多样化,生产工艺更加环保、经济。导电高分子材料应具备良好的导电性能、力学性能及加工性能,制作导电层的成本

要低,工序要简单,且与镀层之间要有较强的结合力,才便于大批量生产。

3 结语与展望

在节能减排、绿色发展的历史潮流中,轻量化技术已成为汽车工业可持续发展的关键。塑料已然是用量最多的汽车轻量化非金属材料,并呈现出了巨大的活力。汽车技术的不断发展,对塑料的性能提出了更高的要求,以纤维增强塑料为主的复合材料成为研究与应用的主流。长玻璃纤维增强塑料应用广泛,碳纤维增强塑料成本较高,玄武岩纤维增强塑料有望成为新型绿色汽车轻量化材料。

电镀工艺不仅使塑料件具有金属的光泽和质感,还可以大幅改善塑料件的综合性能,极大地丰富了塑料的车用,加速了汽车轻量化的进程。Cu/Ni/Cr电镀体系仍然是目前车用塑料防护兼装饰性电镀的典型工艺,三价铬电镀较六价铬电镀更加环保,珍珠镍电镀、黑铬电镀以其独特的色泽与视觉效果成为一种流行。表面直接电镀技术相比传统电镀工艺有着很大的优势,但也存在一定的局限性。进一步研制新型导电复合材料,探寻新的导电层、改良电镀工艺是直接电镀技术发展的关键。

参考文献

- [1] 王登峰,卢放.基于多学科优化设计方法的白车身轻量化[J].吉林大学学报(工学版),2015,45(1):29-37.
- [2] Taub A, De Moor E, Luo A, et al. Materials for automotive lightweighting[J]. Annual Review of Materials Research, 2019, 49(1): 327-359.
- [3] 中国汽车工程学会.节能与新能源汽车技术路线图2.0[M].北京:机械工业出版社,2020.
- [4] 蒋晓斌,江健,陈定江,等.中国乘用车塑料的动态物质流分析[J].中国环境科学,2020,40(9):4106-4114.
- [5] 周文.我国汽车塑料产业发展机遇挑战和战略对策[J].塑料工业,2020,48(3):15-19.
- [6] 向可友,肖革,蓝玉良,等.表面处理技术在汽车轻量化方面的应用[J].腐蚀与防护,2021,42(7):48-52.
- [7] Melentiev R, Yudhanto A, Tao R, et al. Metallization of polymers and composites: State-of-the-art approaches[J]. Materials & Design, 2022, 221: 110958.
- [8] Miller L, Soulliere K, Sawyer-Beaulieu S, et al. Challenges and alternatives to plastics recycling in the automotive sector[J]. Waste Management and Valorization, 2017: 237-266.
- [9] Vieyra H, Molina-Romero J M, Calderón-Nájera J De D, et al. Engineering, recyclable, and biodegradable plastics in the automotive industry: A review[J]. Polymers, 2022, 14(16): 3412.
- [10] Todor M P, Kiss I. Systematic approach on materials selection in the automotive industry for making vehicles lighter, safer and more fuel-efficient[J]. Applied Engineering Letters, 2016, 1(4): 91-97.
- [11] 吕吉平.塑料在汽车轻量化中的应用[J].合成树脂及塑料,2020,37(6):87-90,94.
- [12] 高春雨,杨桂英.车用塑料的现状与发展趋势[J].当代石油石化,2015,23(4):1-6,15.
- [13] 王利刚,李军.我国汽车轻量化材料"十三五"时期发展回顾及未来展望[J].新材料产业,2020(6):25-30.
- [14] Zhang W, Xu J. Advanced lightweight materials for automobiles: A review[J]. Materials & Design, 2022, 221: 110994.
- [15] 叶辉,刘畅,闫康康.纤维增强复合材料在汽车覆盖件中的应用[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(2):417-425.
- [16] 马玲.汽车碳纤维增强塑料翼子板的设计及性能研究[J].塑料工业,2019,47(1):156-158,162.
- [17] 吴飞.基于轻量化概念的碳纤维复合材料汽车保险杠设计[J].塑料工业,2018,46(8):14-17.
- [18] 赵文博.前途汽车:电动超跑有"前途"?[N].新能源汽车报,2018-08-13(12).
- [19] 张君媛,姜哲,李仲玉,等.基于抗撞性的汽车B柱碳纤维加强板优化设计[J].汽车工程,2018,40(10):1166-1171,1178.
- [20] Schneider T. Lightweight construction: First composite gearbox housing with layer-optimized organo sheeting weighs 30% less than a comparable aluminum component[J]. Reinforced Plastics, 2019, 63(1): 40-45.
- [21] 王敏,胡仁其,吴谦.长玻璃纤维增强聚丙烯材料在汽车领域中的应用及前景展望[J].上海塑料,2019(4):10-15.
- [22] 和晋川,汪国庆,于人同,等.纤维表面改性对PA66/玄武岩纤维复合材料性能影响[J].工程塑料应用,2021,49(5):125-130.
- [23] 李晓雄,杨小祥.长玻纤增强聚丙烯在汽车翼子板上的应用[J].玻璃纤维,2021(6):1-4.
- [24] 蒋艳云,蓝先,李坚,等.长玻纤增强PP材料在发动机装饰罩盖上的应用研究[J].汽车零部件,2017(1):30-33.
- [25] 邵萌,王燕文.长玻纤增强材料在汽车塑料尾门中的应

- 用[J]. 汽车零部件, 2016(5): 86-89.
- [26] Girgin Z C, Yildirim M T. Usability of basalt fibres in fibre reinforced cement composites[J]. *Materials and Structures*, 2016, 49(8): 3309-3319.
- [27] 杨堃. 玄武岩纤维在汽车轻量化中的应用[J]. *新材料产业*, 2018(10): 30-34.
- [28] 谷永强. 玄武岩纤维增强聚丙烯材料汽车内饰件性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [29] 徐森. 玄武岩纤维前防撞梁结构优化设计[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [30] 谢菁琛, 李丽波, 杨秀春. 高分子材料的金属化[J]. *电镀与环保*, 2011, 31(6): 5-9.
- [31] Teixeira L A C, Santini M C. Surface conditioning of abs for metallization without the use of chromium baths[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 170 (1-2): 37-41.
- [32] 姚卫国, 鲁姗姗, 窦艳丽, 等. 高分子表面金属化技术[J]. *化工进展*, 2018, 37(5): 1852-1859.
- [33] Datcheva M, Chalakova G, Nikolov A, et al. Indentation hardness and modulus of electrochemically deposited triple protective-decorative Cu-Ni-Cr system[J]. *MATEC Web of Conferences*, 2018, 145: 02005.
- [34] 卢振光. 汽车塑料出风口的电镀性能分析[J]. *电镀与涂饰*, 2017, 36(20): 1090-1094.
- [35] 吴水苟. ABS 塑料与电镀层结合力差的原因分析及其控制[J]. *电镀与涂饰*, 2009, 28(2): 13-15.
- [36] 沈宇, 张健. 一种汽车部件塑料电镀方法: 中国, 104499019A [P]. 2015-04-08.
- [37] 李丽波, 杜金田, 赵耀, 等. 酸性化学镀珍珠镍的工艺与性能研究[J]. *电镀与环保*, 2020, 40(4): 40-42.
- [38] 郭崇武, 陈康. 三价铬镀铬废水的处理方法[J]. *电镀与精饰*, 2020, 42(12): 43-46.
- [39] Adachi K, Kitada A, Fukami K, et al. Crystalline chromium electroplating with high current efficiency using chloride hydrate melt-based trivalent chromium baths[J]. *Electrochimica Acta*, 2020, 338: 135873.
- [40] 柳金龙, 黄小军, 张国良. 汽车用装饰性电镀黑铬耐候性能研究[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(11): 85-88.
- [41] 陈敏娟, 陆松, 余晓杰, 等. 汽车内饰塑料电镀黑铬件盐雾腐蚀现象分析[J]. *电镀与涂饰*, 2022, 41(14): 1034-1037.
- [42] 钟国刚, 于桂斌. 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料化学镀镍工艺[J]. *电镀与精饰*, 2016, 38(2): 29-33, 41.
- [43] 何超雄, 王亮, 程庆, 等. 一种适于电镀的增强 ABS 树脂组合物及其制备方法与应用: 中国, 104045962B [P]. 2019-03-29.
- [44] 许第修, 包含. 尼龙 10T 易电镀复合材料、其制备方法及其电镀坯件: 中国, 109385077B[P]. 2021-06-29.
- [45] 李卓, 戴玲, 黄小兵, 等. 活化工艺对化学镀镍的影响[J]. *电镀与环保*, 2016, 36(6): 22-24.
- [46] 孙永泰. 塑料电镀中的敏化活化一步法[J]. *塑料制造*, 2015(10): 65-69.
- [47] 吴文俊. 新型 Futuron 前处理工艺在汽车塑料件电镀上的应用[J]. *电镀与环保*, 2009, 29(6): 26-28.
- [48] 覃毅. 塑料基体直接电镀的前处理工艺[J]. *电镀与精饰*, 2010, 32(8): 9-12, 44.
- [49] Li J, Zhou G, Jin X, et al. Direct activation of copper electroplating on conductive composite of polythiophene surface-coated with nickel nanoparticles[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 154: 257-262.
- [50] 张鹏, 何大容, 赵发云. 塑料(ABS)表面直接电镀工艺研究[J]. *材料保护*, 2001(6): 30-32, 2.
- [51] 李璐, 刘飞翔, 罗慧玲, 等. 石墨烯复合浆料应用于 ABS 塑料电镀前表面处理[J]. *中国塑料*, 2021, 35(6): 40-45.
- [52] 刘贵昌. 一种汽车部件石墨烯电镀方法: 中国, 109594111A[P]. 2019-04-09.