

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2019.07.006

汽车轻量化钢材及零部件表面处理技术的发展趋势

肖革¹, 蓝玉良¹, 向可友¹, 高荣龙¹, 罗泽庭¹, 刘慧丛^{2*}, 李卫平², 朱立群²

(1. 珠海市玛斯特五金塑胶制品有限公司, 广东 珠海 519175; 2. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191)

摘要: 本文针对汽车轻量化用高强度钢铁零件的发展趋势, 讨论了这类钢铁材料的特性及近年来的发展情况; 同时对汽车高强度钢铁零件的表面性能要求以及相应的表面处理技术进行了综述, 尤其是介绍了近年来, 针对恶劣严酷服役环境中用的汽车钢铁零件表面的高耐腐蚀、耐磨损等多种功能要求的技术发展。期望汽车轻量化在节约油耗, 减少 CO₂ 的排放, 提高轻量化的高强度钢铁零件的耐腐蚀等性能方面得到更多的关注。

关键词: 汽车轻量化; 高强度钢铁; 耐腐蚀性能; 表面处理技术

中图分类号: TQ586.5

文献标识码: A

Development Trend of Surface Treatment Technology for Automobile Lightweight Steel and Parts

XIAO Ge¹, LAN Yuliang¹, XIANG Keyou¹, GAO Ronglong¹, LUO Zeting¹,
LIU Huicong^{2*}, LI Weiping², ZHU Liqun²

(1. Zhuhai Master Hardware and Plastic Products Co. Ltd., Zhuhai 519175, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In this paper, according to the development trend of high-strength steel parts for automobile lightweight, the characteristics of such steel materials and their development in recent years were discussed. The surface performance requirements of automotive high-strength steel parts and the corresponding surface treatment technology were introduced. In particular, the technical developments for various functional requirements such as high corrosion resistance, wear resistance of automotive steel parts used in harsh and severe service environments in recent years were described. It is hoped that automobile lightweight will receive more attention in terms of saving fuel consumption, reducing CO₂ emissions, and improving the corrosion resistance of lightweight and high-strength steel parts.

Keywords: automobile lightweight; high-strength steel; corrosion resistance; surface treatment technology

汽车的快速发展不但方便了人们的工作和生活, 同时也给社会带来了环境污染、能源消耗等问题。因此, 对于汽车的轻量化、节能、环保和安全等

要求越来越高。目前研究表明, 汽车轻量化是减少 CO₂ 排放和降低油耗的一种有效方式。因此, 国内外在先进高强钢这类颇具应用前景的汽车材料轻

收稿日期: 2019-05-28

修回日期: 2019-06-15

作者简介: 肖革(1966-), 男, 学士, 工程师, email: xiaoge@mstzh.com

通信作者: 刘慧丛, email: liuhc@buaa.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2002000); 国家自然科学基金项目(U1637204)

量化方面开展了大量研发与应用工作,如钢铁企业加快了汽车用先进高强钢生产体系的设计、投资、研发和应用等一系列工作。再就是对汽车轻量化同样有着明显效果的铝合金、镁合金、工程塑料和复合材料等非钢轻质材料方面也加大了技术研发与投入力度。当然汽车用钢铁材料仍然是最多的,在汽车轻量化用钢方面仍然是大有可为^[1-12]。

实际上,对于轻量化用高强钢材料所制造的汽车零部件而言,还有一个重要环节就是在高强度钢零件表面进行化学镀、电镀和油漆等处理,从而实现汽车零部件材料表面的防腐蚀、耐磨和外观装饰等综合性能的提高^[13-22],来满足人们对于整体汽车功能使用的需要。因此,在国内外汽车零部件行业开展高性能表面处理技术的研发与应用,来满足零部件的清洁生产、环保法规等也越来越重要。

本文对于国内外近年来在汽车轻量化用高强度钢材料的发展及应用情况进行综述,同时对于这些汽车轻量化高强度钢铁材料制造的零部件表面处理防护新技术也进行了介绍,为汽车轻量化的材料及汽车零部件表面新技术的应用打下基础。

1 汽车轻量化用高强度钢材的特点与发展趋势

通常人们在保证汽车强度和安全、可靠性的前提下,尽可能的降低汽车整体的重量,从而提高轻量化汽车的动力等性能,以减少燃料消耗,降低排气对大气环境的污染。实际上在整个汽车的生命周期,燃油消耗占整个汽车生命周期总消耗的70%左右。汽车重量的增加不仅直接影响其行驶阻力和速度,也直接影响到汽车的油耗或者其他动能消耗。目前降低汽车油耗的最主要途径之一是实现整体汽车的轻量化,不仅可以降低汽车油耗、减小行驶过程中的阻力,还可以提高汽车的转向、加速和制动等机动灵活性,同时降低尾气排放对大气环境的污染。

现代的汽车材料构成主要有6大类:钢占车重比例为55%~60%,铸铁占12%~15%,塑料占8%~12%,铝合金材料占6%~10%,复合材料占4%左右,陶瓷和玻璃占3%左右,其他材料(铜等有色金属、油漆、各种液体等)共占10%左右,可以看出,钢铁材料仍然占较大比例。

因此,人们将普通碳钢板替换为高强度钢板(通过提高强度而降低钢板厚度),再结合液压成

形、激光拼焊等技术可使汽车整体车重减轻25%左右。如液压成形汽车框架结构、内板部件、门窗结构、车顶棚和前后盖板等都采用了高强度钢材。有的汽车部件用薄的高强度钢板可以实现减重30%,基本上与铝制超连接悬挂件的重量相近,还使成本降低20%。

在低合金高强度钢冶炼过程中添加一些微量元素,使钢晶粒细化,增加强化相,来提高低合金高强度钢材的强度等性能。如冷轧加磷低合金高强度钢,就表现出较高强度和好的深冲性能,受到了汽车等行业的广泛关注,用在汽车车门外板、发动机盖板、顶盖等外覆盖零部件,以及横梁、纵梁等汽车内部的加强结构等零部件。人们在冷轧低碳钢或超低碳钢过程中,利用所加入磷元素对钢的固溶强化作用,提高钢铁材料的强度等性能,而且磷元素的固溶强化效果明显,成本较低,当磷原子进入冷轧低碳钢的铁原子晶格内,与铁原子置换形成固溶体,并且利用磷元素和铁的原子半径差异,在磷原子周围产生弹性变形而使冷轧低碳钢材得到强化。常见的汽车用冷轧加磷高强度钢不仅具有高的强度,且成形性能和塑性平衡、点焊性能和耐腐蚀性能也较好,从而得到人们的青睐。

一些低碳钢或低碳微合金钢作为汽车用的先进高强度钢,是经两相区热处理或控轧、控冷而得到的新型高强度钢材料,在基体铁素体的晶界或晶内弥散分布着硬质相马氏体,从而得到了好的钢铁材料综合性能,而用于汽车的前、后内纵梁等结构安全零部件。

多相合金钢主要是由细小的铁素体和大量的马氏体、贝氏体硬质相构成,含铌、钛等元素,通常是由于马氏体、贝氏体和析出强化的复合作用,使得合金钢材料强度高达800~1000 MPa,还具有较高的成形性和能量吸收能力,特别适合用于汽车的防撞杆、保险杠等零部件的制造。

一些汽车厂商通过优化汽车各个部分的结构设计,使汽车部件用高强度钢材的各处承载截面及钢材厚度更加合理;并且改进汽车发动机、底盘、内饰等零部件的结构,更进一步减轻汽车零部件及整车重量。可以说钢板的高强度化在汽车轻量化中做出了重要的贡献。

Christian等^[5]的研究表明,在过去的20年,使用高强度钢的汽车车身设计得到了快速的增长,目前仍然是集中在提高钢铁材料的强度和延展性,作

为汽车轻量化设计的主要驱动力。未来的发展则不仅仅限于强度和延展性,还可推广到更多范畴,特别是钢板的成形性,因为它依赖于汽车制造过程中应用的特定成形过程,需要不同的特性要求,如局部和全部成形性的加工设计。这将已知的材料概念扩展到新的维度,如均匀伸长、 n 值、拉伸翻边能力、弯曲角、氢脆等。

当然,在满足汽车轻量化的同时,还要保证汽车的安全性,可以采取调节汽车用高强度钢板的厚度,来提高汽车零件的抗变形性能,减缓碰撞冲击性,扩大钢材的弹性应变区等措施。Hamid等^[6]对汽车高强度钢板进行评估车辆碰撞安全性能仿真,从结果中提取汽车结构变形、内部能量、接触力、侵入力和加速度等对整车结构耐撞性的影响。他们以美国联邦汽车安全标准为基础,对道奇等汽车进行全正面、侧面碰撞和车顶压溃的碰撞试验模拟,以评估汽车结构高强度钢的安全耐撞性。结果表明,先进的高强度钢材料凭借其优异的性能,在车辆碰撞安全性能方面具有相当大的发展潜力。

Sun等^[7]的研究表明,防撞性设计制造薄壁结构在汽车行业仍然是一个主要挑战。车身吸能构件多用冲压工艺制造,其厚度不均匀,残余应变/应力较大,特别是高强钢或高级高强钢等材料。此外,材料性能、冲压工艺和几何形状的不确定性一般从制造阶段传播到操作阶段,可能导致冲击响应的不可控波动。针对这些关键问题,他们提出了一种基于多目标可靠性的设计优化方法,将冲压不确定性与薄壁结构进行耦合优化。首先将冲压过程的有限元分析结果转化为耐撞性仿真。其次,采用替代建模技术,从均值和标准差两方面对成形和冲击响应进行近似化处理。第三用多目标粒子群优化算法,结合蒙特卡罗仿真,寻找最优可靠的设计解。结果表明,该方法不仅显著提高了汽车零件结构的成形性和耐撞性,而且能提高其安全可靠性。

Tang等^[8]的研究表明,由于车辆的能量耗散能力显著下降,抗撞性能的提高成为轻型车辆发展的关键。因此,他们进行了材料增强和结构优化,如汽车结构涉及到的薄壁框架,表面机械磨损处理,在不牺牲延性的前提下诱导金属纳米结构增强强度等措施,充分利用了先进高强度钢材的优异性能,进行了大量的实验和数值模拟,测试结果表明,与目前市场上的同类产品相比,产品重量轻、强度高、安全影响程度高,可以满足轻量化汽车的要求。

Ozcanli等^[9]在2018年发表了通过使用有限元分析法,对于两种不同钢铁材料的座椅框架在不同的加载条件下进行优化厚度和改进设计,他们研究发现软钢材料制造的车座框架与用先进的高强度钢材代替,使用先进的高强度钢材可以显著减轻座椅框架的重量,同时可以在车辆的使用寿命内提高燃油效率,并减少CO₂排放。除了比较结构安全性和减重,还可以应用于电动/混合动力公交车的轻量化座椅。

Wang等^[10]在2018年报道了他们在先进高强度钢板的加工方面研究成果,通过设计一种新型的凹口冲头实现汽车高强度钢板的一次冲程多步翻边,采用增量成形的概念,改进拉伸翻边冲头形状,提高汽车用先进高强钢的拉伸翻边性能,结果表明,与单步翻边法相比,这种新方法的最大拉伸应变从0.406降至0.280,拉伸角边大应变转移到直翻边区域。此外,还可以抑制汽车高强度钢板的过度减薄。

Ruszkiewicz等^[11]的研究表明,材料轻量化汽车涉及到高强度重量比材料的成型和连接,例如铝和先进的高强度钢。与传统的汽车用钢相比,这些金属具有成形性下降和回弹增加的缺点。他们通过对等效波形的比较,研究了其它电辅助工艺性能的预测因子,如电能和功率。结果表明,能量比电流密度能更好地预测工艺加工性能。

Thomas等^[12]研究了汽车用先进的高强度钢板厚度与保持碰撞安全所需整体强度的关系。发现材料内部缺陷(孔隙、夹杂物、微裂缝)、微观结构缺陷(不同粒度分布、晶界上的沉淀物、各向异性)和表面缺陷(微裂缝、沟槽)是应力的集中点,在拉深和使用过程中都是破坏的起始点。建议在车身深拉工艺中要考虑减少材料的损伤,可以进一步减少材料的用量,减轻车身重量。研究表明,在高强度钢板成形过程中,改变载荷路径有助于减轻损伤对材料的影响。

总之,从近年来关于汽车轻量化用高强度钢铁材料的发展趋势看,人们在汽车用高强度钢的安全性、加工等方面开展了大量的工作。采用高强度钢板的汽车通过减少所用钢板的厚度,实现汽车的轻量化,而且通过钢铁材料的强度性能,提高汽车的安全可靠性。目前应用于一些超轻高强度钢车身,一些概念汽车等在减重、节能降耗、安全可靠和降低废气排放等方面表现出了好的发展空间。

2 汽车轻量化用高强度钢零部件的表面性能要求

实际上汽车应用的所有钢铁零件,在多种环境中都需要进行表面防护处理,包括电镀层、化学镀层、有机涂层(油漆)等,目的主要是为了表面防护(防腐蚀)的需要,当然也有表面装饰、耐磨等要求。相对于汽车用普通钢板材料的表面处理来说,高强度钢板尽管强度高,但是材料本身的厚度薄,为了使用过程中的安全可靠,对其表面涂镀层的耐腐蚀性能的要求比普通碳钢零件要高^[13-21]。

随着汽车轻量化的高强度钢铁零件的大量应用,世界一些知名的汽车厂商对于高强度钢铁电镀零件的中性盐雾试验出白锈时间由原来的72~120 h,提高到了168~240 h。出红锈时间由312 h提高到720 h以上^[20-21]。当然,电镀锌镍合金的汽车零件和电镀锌、锌镍再阴极电泳的零件耐腐蚀性能的要求会更高。

除了汽车零部件电镀层耐腐蚀性能高之外,由于高强度钢零件在电镀过程中会析氢,容易引起高强度钢零件的氢脆敏感性增加,因此,在高强度钢铁汽车零件电镀后要进行严格的除氢工艺进行处理,以消除汽车高强度钢电镀零件的氢脆敏感性。

另外,有些汽车高强度钢铁零件的表面镀层有滑动磨损性能的要求,希望零件表面有更稳定的低摩擦系数和低的磨损率。一般镀锌层的表面摩擦系数在0.02~0.16。这也需要在镀锌钝化之后的封闭溶液里,加入一些减摩物质(如二硫化钼、聚四氟乙烯等),才能满足这种低摩擦系数的性能要求。

一些汽车厂商要求经过镀锌、镀锌镍合金镀层既要进行三价铬钝化,提高镀层的耐腐蚀性能,同时还希望保留镀锌、镀锌镍的本色(消除零件镀层钝化膜的彩色),目前国内外通常是通过镀锌镍钝化后的封闭,即可以消除零件镀层钝化膜的色泽,说明封闭实现了很好的遮色效果,同时提高了电镀零件的耐腐蚀性能。另外,这种封闭有时还可以满足汽车高强度钢铁零件的表面镀层滑动磨损性能的要求,通过钝化后的封闭实现了稳定的低摩擦系数和磨损率,零件表面摩擦系数在0.10~0.16之间。

还有一些汽车零件电镀后希望能够满足表面亲水或者疏水的要求,可以通过锌复合镀层或者锌镍复合镀层来实现,当然这种锌或者锌镍复合镀层的耐腐蚀性能也得到大幅度提高。

总之,随着汽车的综合性能不断提高与汽车轻量化发展动态看,由于恶劣的使用环境^[19],人们对于汽车高强度钢铁零件表面的涂镀层的功能要求会越来越高,进而促进了汽车钢铁零部件表面处理技术的快速发展。

3 汽车轻量化用高强度钢零部件的表面处理技术发展趋势

汽车轻量化用高强度钢零部件常用的表面涂镀层主要有:镀锌、镀锌镍合金、镀锌铁合金、化学镀镍磷合金、化学镍+镀锌镍、阴极电泳、锌镍电镀+阴极电泳、镀锌+阴极电泳、化学镍+锌镍合金+阴极电泳等多种表面涂镀层处理工艺。

其中汽车零件表面镀锌钝化是最常见的一种防腐蚀措施,在一些严酷腐蚀性的大气环境中,汽车零件表面的镀锌层作为阳极镀层会很快遭到腐蚀,甚至基体材料也会发生腐蚀生锈,所以汽车零部件表面的镀锌钝化膜层很难满足现代汽车严酷的使用环境与高的质量要求。目前应用较多的汽车零件电镀Zn-Ni(含Ni 13%左右)、Zn-Fe(含Fe 0.6%左右)等锌基高耐腐蚀合金镀层,通常是镀锌层的2~6倍,因而在现代汽车的钢铁零部件上获得了广泛应用^[13-24]。

近年来,一些汽车公司(如GM和Ford)的部分高强度钢铁紧固件采用了电镀锌(或者锌镍合金)+阴极电泳涂装,不但具有更高的耐腐蚀性能,还赋予钢铁零件丰满度高的不同色泽的外观。黑色阴极电泳代替镀锌黑色钝化可以大幅度提高钢铁零件的耐腐蚀性能。

与传统镀锌钝化工艺相比,阴极电泳和锌合金电镀等技术,不但能够赋予汽车轻量化高强度钢铁零件表面的高耐腐蚀性能,还要满足不同钢铁汽车零件的耐热、低氢脆性、低摩擦系数等功能要求,同时材料成分等要符合欧洲有关报废汽车指令性规定(ELVD)与法规要求。

电镀锌镍合金应用较多的是电镀汽车钢板、汽车紧固件、各种油管、汽车锁具零件等。这是基于锌镍合金电镀工艺的显著优点:镀层防护性高,比镀锌层高两倍以上,经白色或黑色钝化、封闭后,其耐腐蚀性能大幅度提高。锌镍合金电镀工艺的氢脆敏感性小,但是对于汽车用高强度钢或弹簧零件,在电镀锌镍合金后,仍然需要进行除氢处理,然后进行钝化及封闭处理。另外,钢铁零件在电镀锌

镍合金后,一般不改变钢材的屈服强度、抗张强度和延伸率,可塑性好等特点。

随着汽车轻量化快速发展,一些高强度钢零件的结构越来越复杂,再加上恶劣严酷的服役环境,对汽车零件使用性能和耐腐蚀性能不断提出更高的要求,目前一些常用的表面涂镀层技术是难以达到要求的,因此,近年来,国内外一些能够满足恶劣严酷环境使用的,汽车零部件表面高耐腐蚀多层复合防护技术应运而生。

如一些汽车钢铁复杂结构的管状零件(如油管、水管和供油轨等),为了保证管件内部流体冲击及耐腐蚀性能,我们公司通过实验研究,在这些复杂结构的钢铁零件上得到了先化学镍磷合金(利用化学镀良好的分散覆盖特征)3~5 μm 厚度,然后再镀8~12 μm 厚度的锌镍合金(含镍13%)。这样利用了化学镀镍磷与锌镍合金各自的优势,提高了这种复杂零件内外的耐腐蚀性能。

还有些耐腐蚀要求更高的汽车水管零件,采用镀锌与阴极电泳,镀锌镍与阴极电泳的多层复合技术。如在镀锌+阴极电泳零件的电泳涂层表面进行中性盐雾试验,可达到1200 h的耐腐蚀要求。对于有更高耐腐蚀性和抗温变化要求的汽车钢铁零件,电镀锌镍合金和阴极电泳涂层复合,表面进行中性盐雾试验,可达到2400 h的耐腐蚀要求。

Lee等^[23]研究了Zn-Ni合金镀层在不同大气环境湿度(相对湿度分别为0、20%、40%和60%)的表面滑动磨损性能,研究发现,在负载为3.5 N的条件下的不同湿度环境中,随着环境湿度增加,这种Zn-Ni合金镀层表面具有更稳定的摩擦系数和更低的磨损率。他们分析认为,可能是大气环境中的湿气与锌镍合金镀层磨损形成的ZnO导致了低的表面磨损率。

近年来,人们在Zn-Ni合金镀液中,添加第三种元素或者纳米颗粒,获得Zn-Ni-X合金镀层或者复合镀层^[25-30],其耐腐蚀等性能比单纯Zn-Ni合金镀层更高。Behrouz等^[24]研究了Zn-Ni合金镀液成分和工艺参数对Zn-Ni-P合金的影响,他们通过改变电流密度,在同一个镀液体系中沉积出Ni-P和Zn-Ni合金的多层镀层,在低电流密度下,从Zn-Ni-P镀液中沉积出Ni-P镀层,在较高电流密度下,获得含3.2 wt% P的Zn-Ni-P合金镀层。实验结果表明,这样叠加的Ni-P/Zn-Ni-P合金多层,对于提高钢铁基体的防腐蚀性能非常有效,优于Zn-Ni合金镀层。

Das等^[27]采用类似的研究思路,在低碳合金钢上电沉积得到双层的Zn-Ni/Ni-Co-SiC纳米复合镀层,其耐腐蚀性能更高。关键是在Ni-Co-SiC纳米复合镀层下面引入了含Ni约12%的Zn-Ni镀层作为底层,即可以提高镀层与钢铁基体的结合力,又提高了这种叠层的耐腐蚀性能。另外表面的Ni-Co-SiC纳米复合镀层的硬度为760 HV,呈现出好的表面耐磨损特性,为一些重型机器领域所需要的表面硬质,耐磨,耐腐蚀等高性能复合镀层的开发打下基础。

同样,Shourgeshty等^[28]研究了Zn-Ni和Zn-Ni- Al_2O_3 复合镀层的耐腐蚀、磨损性能,发现在低碳合金钢基体上电沉积获得的Zn-Ni和Zn-Ni- Al_2O_3 复合镀层,其耐腐蚀性与镀层中氧化铝纳米颗粒有关。而且这种Zn-Ni复合镀层中的氧化铝纳米颗粒在提高复合镀层的表面耐磨性,降低摩擦系数等方面发挥了重要作用,包括Zn-Ni- Al_2O_3 镀层的磨损是粘合和磨料磨损的协同作用等,从而提高了Zn-Ni这类复合镀层的表面的耐腐蚀、摩擦磨损等性能,因此,将这种Zn-Ni复合镀层应用于汽车零部件,来提高汽车的整体性能是完全可能的。

4 结语

汽车轻量化是一种大的趋势,既可以降低汽车油耗,节约能源,又可以减少 CO_2 排放,减少对大气环境的污染。那么就要求汽车用高强度钢零件的耐腐蚀性能满足恶劣严酷环境的要求,一些复杂结构的、要求高耐腐蚀性能的汽车零件表面涂镀层技术一定会越来越多的得到应用于,尤其是表面镀层的复合化、化学镀与电镀结合、电镀与电泳结合、Zn-Ni合金镀层中添加第三种元素和纳米颗粒的复合镀层等表面处理技术的应用会越来越广泛。

当然,需要我们关注的是镀层与镀层之间的界面结合、合金镀层中元素含量的控制、复杂结构零件的辅助阳极配置、表面涂镀层的高耐腐蚀、耐摩擦磨损等性能。从而满足汽车轻量化高性能的要求。

参考文献

- [1] 杨丽霞,赵明哲.汽车轻量化用高强钢的介绍[J].科技风,2015,10:64-64.
- [2] 康永林.汽车轻量化先进高强钢与节能减排[J].钢铁,2008,43(6):1-7.

- [3] 卢凤喜,王向成. 汽车用高强度表面处理钢板的生产技术特征[J]. 冶金信息导刊, 2006, 3: 14-16.
- [4] 康永林,陈贵江,朱国明,等. 新一代汽车用先进高强钢的成形与应用[J]. 钢铁, 2010, 45(8): 1-6.
- [5] Lesch C, Kwiaton N, Klose F B. Advanced high strength steels (AHSS) for automotive applications - tailored properties by smart microstructural adjustments[J]. Steel Research International, 2017: 1700210.
- [6] Safari H, Nahvi H, Esfahanian M. Improving automotive crashworthiness using advanced high strength steels[J]. International Journal of Crashworthiness, 2018, 23(6): 645-659.
- [7] Sun G, Zhang H, Wang R, et al. Multi-objective reliability-based optimization for crashworthy structures coupled with metal forming process[J]. Structural and Multi-disciplinary Optimization, 2017, 56(6): 1571-1587.
- [8] Tang T, Gao Y, Yao L, et al. Development of high-performance energy absorption structures based on the structure design and nanocrystallization [J]. Materials & design, 2017, 137: 214-225.
- [9] Ozcanli M, Dede G. Evaluation of advanced steel usage on seat construction to reduce bus weight in compliance with FMVSS and APTA regulations [J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2018, 25(2): 235-247.
- [10] Menghan W, Shuaijun W, Zhi L. Multi-step forming punch (MFP) for improving stretch-flange ability of advanced high-strength steel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 99: 1627-1638.
- [11] Ruszkiewicz B J, Mears L. Investigation of the electroplastic effect through nominally equal energy deformation [C]. ASME 2018 13th International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2018, 6: 18-22.
- [12] Thomas B, Matthias N, Andreas F. Numerical-experimental investigation of load paths in DP800 dual phase steel during nakajima test[C]. Proceedings of 21st International Esaform Conference on Material Forming (ESAFORM 2018), AIP Conference Proceedings: 960: UN-SP 160021.
- [13] 王华,陆士堃,欧阳泽华. 最新汽车紧固件表面处理技术[J]. 上海涂料, 2018, 56(3): 48-51.
- [14] 徐关庆,林胜荣. 汽车防护性表面处理技术发展[J]. 电镀与精饰, 2007, 29(4): 27-32.
- [15] 刘军松,刘定富,苏琪,等. 电镀Zn-Ni-P合金及其耐腐蚀性研究[J]. 电镀与精饰, 2019, 41(2): 5-9.
- [16] 吴忠. 汽车用ZL101A铝合金表面Ni-Co合金镀层的硬度[J]. 电镀与精饰, 2018, 40(11): 5-9.
- [17] 徐良,向可友,刘梦兰,等. 汽车零部件电沉积锌-锰合金镀层进展[J]. 电镀与精饰, 2017, 39(9): 24-27.
- [18] 卢帅,郭昭,齐海东,等. 占空比对脉冲电镀Zn-Ni-Mn合金镀层的影响[J]. 电镀与精饰, 2017, 39(11): 1-4.
- [19] Kozhukharov S V, Samichkov V I, Girginov C A. Actual trends in the elaboration of advanced multifunctional coating systems for the efficient protection of lightweight aircraft alloys [J]. Corrosion Review, 2017, 35 (6) : 383-396.
- [20] 周阳亮. 高效环保型汽车零配件碱性无氰镀锌的性能对比[J]. 上海涂料, 2018, 56(2): 32-36.
- [21] 张靖,赵晓宏,高成勇,等. 汽车用锌镍合金电镀现状及研究进展[M]. 2015中国汽车工程学会年会论文集, 2015, 3: 217-220.
- [22] 高荣龙,向可友,林建华,等. Zn-Ni合金镀层中添加第三种元素和纳米颗粒的研究新进展[J]. 表面技术, 2018, 47(10): 262-268.
- [23] Lee L, Behera P, Sriraman K R, et al. Effects of humidity on the sliding wear properties of Zn-Ni alloy coatings [J]. RSC Advances, 2017, 7(37): 22662-22671.
- [24] Behrouz B, Mohammad G. Electrodeposition of Zn-Ni-P compositionally modulated multilayer coatings: An attempt to deposit Ni-P and Zn-Ni alloys from a single bath [J]. Electrochemistry Communications, 2017, 81: 93-96.
- [25] Abou-Krishna M M, Assaf F H, El-Naby S A. The influence of Fe^{2+} concentration and deposition time on the corrosion resistance of the electrodeposited zinc - nickel - iron alloys [J]. Arabian Journal of Chemistry, 2016, 9 (2): S1349-S1356.
- [26] Aboukrisha M M, Assaf F H, Alduaij O K, et al. Deposition potential influence on the electrodeposition of Zn - Ni - Mn alloy [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2016, 70(1): 31-40.
- [27] Das S, Banthia S, Patra A, et al. Novel bilayer Zn, Ni/Ni, Co, SiC nanocomposite coating with exceptional corrosion and wear properties by pulse electrodeposition [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 738: 394-404.
- [28] Shourgeshty M, Aliofkhaezai M, Karimzadeh A, et al. Corrosion and wear properties of Zn-Ni and Zn-Ni- Al_2O_3 multilayer electrodeposited coatings [J]. Materials Research Express, 2017, 4(9): 096406.
- [29] Abdulwahab M, Fayomi O S I, Popoola A P I, et al. In-situ hybrid study of thermal behaviour of ZnNi and Zn-Ni- Al_2O_3 nanocrystallite thin films induced TEA/MEA by electrocodeposition [J]. Results in Physics, 2017, 7: 213-215.
- [30] Roventi G, Giuliani G, Pisani M, et al. Electrodeposition of Zn-Ni- ZrO_2 , Zn-Ni- Al_2O_3 and Zn-Ni-SiC nanocomposite coatings from an alkaline bath [J]. International Journal Electrochemical Science, 2017, 12: 663-678.