DOI: 10.3969/j.issn.1000-6826.2023.06.1401

探秘汽车装饰不锈钢:多样外观与超强耐蚀背后的科技密码

The Science Behind Automotive Decorative Stainless Steel: Aesthetic Diversity and Superior Corrosion Resistance

供稿|顾磊明 / GU Leiming

内容导读

不锈钢因其优良的装饰性、成形性和耐蚀性，在汽车装饰件上得到广泛应用。近年来，为满足汽车消费者对于装饰多样化的需求，各种新型装饰不锈钢材料应运而生，作为装饰材料的两大特点——外观和耐蚀性能已成为相关研究人员关注的重点。本文结合 2023 年上海国际车展的车型外观调研，总结了汽车装饰不锈钢材料的最新发展趋势、外观参数、牌号选择要点以及各类腐蚀方法的适用范围和特点，最后对各类新型装饰不锈钢开发和应用的技术难点进行了预测。

不锈钢因具有良好的耐蚀性能、加工性能和表面质量，目前已广泛应用于传统燃油汽车的排气系统、燃油系统和车内外装饰零件。新能源汽车，尤其是纯电动汽车，因没有排气和燃油系统，其单车不锈钢的用量大大下降。2023 年 1 月，商务部公布 2022 年中国新能源汽车销量超过 688 万辆，同比增长 93.4%。随着新能源汽车市场的快速增长，不锈钢在汽车上的开发和应用转向各类外观的不锈钢装饰件、新能源燃料电池双极板等新领域。本文将重点讨论汽车装饰不锈钢的发展趋势。

汽车装饰不锈钢的外观类型

汽车装饰金属以不锈钢和铝合金材料为主。因铝合金材料成本高，加上汽车行业竞争越来越激烈，越来越多的铝合金装饰被不锈钢装饰取代。随着汽车消费者对新式外观的追求，装饰不锈钢材料趋于多样化发展。2023 年 4 月的上海国际汽车展展出的车窗饰条中，除应用最广的高光本色不锈钢外，还出现了哑光本色不锈钢、哑光银灰色喷漆不锈钢和钢琴黑效果的高光黑色喷漆不锈钢，如图 1 所示。高光和哑光本色不锈钢主要通过冷轧不锈钢板光亮退火（Bright annealing，BA）[1] 和平整工艺[2] 获得光洁均一的高质感表面。

此外，汽车内饰如金属喇叭罩盖、侧门迎宾踏板和尾门踏板、汽车排气装饰尾管等也常使用不锈钢材料，这些零件常见的外观有不锈钢拉丝、镜面抛光和电镀等，此类外观均需对不锈钢板进行相应的表面处理。目前行业内外观评估以目视为主，本文首次汇总了各类装饰不锈钢的常见外观参数范围，见表 1。表中拉丝表面为 ASTM A480—23 规定

作者单位：泛亚汽车技术中心有限公司，上海　201208

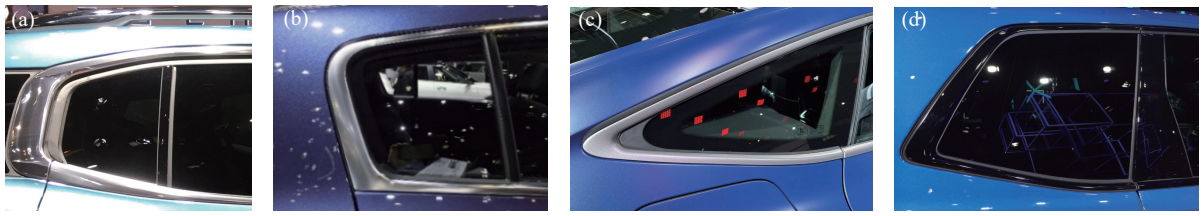

图 1　装饰不锈钢：(a) 高光本色不锈钢；(b) 哑光本色不锈钢；(c) 哑光银灰色喷漆不锈钢；(d) 高光黑色不锈钢

的 No.4 表面，下文出现的 BA 表面、2B 表面（冷轧光洁表面）均为该标准中的定义。

表 1　各类装饰不锈钢的外观参数汇总

外观类型	20°角光泽度/GU	粗糙度，R_a/μm
高光本色	1000~1100	0.020~0.035
哑光本色	100~200	0.150~0.350
拉丝表面	150~250	0.150~0.250
高光黑色	170~250	0.020~0.035
镜面抛光	1250~1350	0.005~0.015

汽车装饰不锈钢的材料选择

汽车装饰不锈钢常用材料牌号相对统一，主要有改性 430、改性 436 等 400 系铁素体不锈钢和 304、304L、316、316L 等 300 系奥氏体不锈钢。外饰车窗装饰不锈钢以改性 430、改性 436 和 304 为主。装饰尾管的制作涉及冲压或辊压、焊接、抛光或电镀等工艺，且零件应用环境温度高，需选择成形性优异、焊接性能、抗高温氧化性、耐腐蚀性良好的低碳含量的牌号。316 和 316L 因含较多的 Mo 元素，成本不具优势，而 304 的碳含量高且焊后有晶间腐蚀失效风险，不适合焊接，选择牌号为 304L 的低碳不锈钢更为理想，能同时满足使用性能与低成本需求。其余装饰零件因外观设计和耐蚀性能要求不同，以上 400 系和 300 系牌号不锈钢均有应用。其中，需要注意的是，改性 400 系装饰不锈钢的稳定化元素通常选择 Nb 而非 Ti，原因是 Ti 的加入易在不锈钢中形成 TiN 和 TiC 等硬质夹杂物，进而在最终产品上留下斑点或条纹缺陷，影响不锈钢的外观和耐蚀性能。

汽车装饰不锈钢的耐蚀性能

汽车装饰不锈钢零件除零件交样外观要求外，耐腐蚀性能也是需要重点评估的指标。产品开发过程中，可通过各类腐蚀试验验证不锈钢样板或零件的耐蚀性。除整车耐久腐蚀外，常用的实验室加速腐蚀方法有点蚀试验（Pitting corrosion test，PCT）、中性盐雾试验（Neutral salt spray test，NSST）、铜盐加速醋酸盐雾试验（Copper-accelerated acetic acid-salt spray，CASS）、循环腐蚀试验（Cyclic corrosion test，CCT）、晶间腐蚀试验（Intergranular corrosion，IGC）等。

点蚀试验

点蚀是不锈钢表面局部位置出现麻点或腐蚀小孔的腐蚀现象。不锈钢的耐点蚀性能可通过点蚀试验进行评价。马金达等[3]利用点蚀电位对各类 400 系不锈钢进行了耐蚀性比较，指出点蚀结果与不锈钢的成分、表面状态及应用环境等均有关联，应根据不同材料的特性推荐合适的应用范围。图 2 所示为笔者完成的 BA 表面 304 和 304L 不锈钢点蚀试验样板照片。试验采用化学浸泡法，按照标准 GB/T 17897—2016《金属和合金的腐蚀不锈钢三氯化铁点腐蚀试验方法》进行测试。试验结束后，取出试样、洗净腐蚀产物、烘干、称重并观察表面腐蚀情况。表 2 为根据腐蚀失重计算得出的腐蚀速率。从图 2 的点蚀状态和表 2 的腐蚀速率可以看出，304L 的点蚀坑数量远少于 304，且点蚀的腐蚀速率也远小于 304，因此，在该酸性环境下，304L 的耐点蚀性明显优于 304。

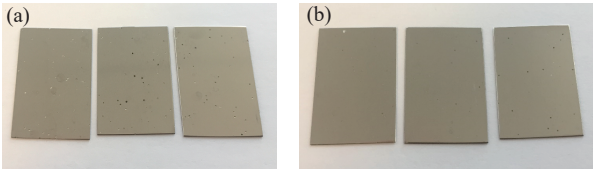

图 2　不锈钢点蚀示意图：(a) 304；(b) 304L

表 2　不锈钢平均腐蚀速率

不锈钢牌号	腐蚀速率/[g/(m^2·h)]
304	20.36
304L	6.86

中性盐雾试验

中性盐雾试验是目前材料行业最常用的一种试验方法，碳钢、铝合金、不锈钢等材料均可使用该方法进行耐蚀性验证，很多研究人员进行过相关的试验研究[4-6]，其中，在与海洋大气环境有密切关系的应用环境下最适宜采用该试验方法[7]。目前不锈钢企业出厂质量检测方法以中性盐雾试验为主，对于新开发的装饰不锈钢材料，因其耐蚀性好，中性盐雾试验强度低，对腐蚀预判性差，研究人员在前期开发过程中应尽量选择其他腐蚀试验条件更为苛刻的加速试验进行验证，从而降低后期零件应用过程中的腐蚀失效风险。

铜盐加速醋酸盐雾试验

因不锈钢的耐蚀性较好，不锈钢的中性盐雾试验周期往往较长，通常至少进行 120 或 240 h，甚至 480 h 的盐雾试验[8-9]，影响了材料开发和零件出现腐蚀后的问题分析与解决进程。因此汽车装饰不锈钢样板和零件常采用铜盐加速醋酸盐雾试验进行加速试验验证[10]。笔者进行了 304L 不锈钢（2B 表面）的铜盐加速醋酸盐雾试验，试验时长为 16 h。其腐蚀模式与点蚀不同，铜盐加速醋酸盐雾试验后样板表面以局部区域的片状腐蚀为主，且样板边缘附近更易发生锈蚀。因此，在零件结构设计时，应处理好零件的边缘区域，例如采用塑料端盖覆盖或折边处理，避免加工边缘布置于客户可见位置。

循环腐蚀试验

循环腐蚀试验与上述单一腐蚀环境试验不同，通常是交变的腐蚀环境，即包括盐雾、干燥、高湿等腐蚀阶段的组合循环，更接近汽车实际使用过程的温湿度变化和路况变化的多变环境。张斌等[11]、朱家琰等[12]详细比较了各车企常用的 PV1210、GMW14872、ISO 11997—1 等循环腐蚀试验标准。

不锈钢材料循环腐蚀的腐蚀形态与铜盐加速醋酸盐雾试验类似，均以片状腐蚀为主。图 3 为某 430 不锈钢样板在标准 GMW14872 试验条件下经 26 个循环腐蚀后的光学显微照片。从图 3(a) 可以看出，循环腐蚀试验后，样板表面形成了不规则的片状腐蚀，在腐蚀深度较浅的片状腐蚀区域，往往同时存在腐蚀深度较大的点蚀坑。图 3(b) 为经过抛光的腐蚀区域显微照片，抛光后点蚀坑洞由于腐蚀较深仍然保留于样板表面，显微镜和肉眼均可观察到腐蚀点。因此，对于腐蚀试验结果评判，应结合光学显微镜下的锈蚀区域观察。若整片样板均为浅表的片状腐蚀，通常可通过抛光打磨去除锈迹，此时可视为试验通过；若存在腐蚀坑洞，很难通过抛光去除锈蚀坑，此时应视为腐蚀失效。

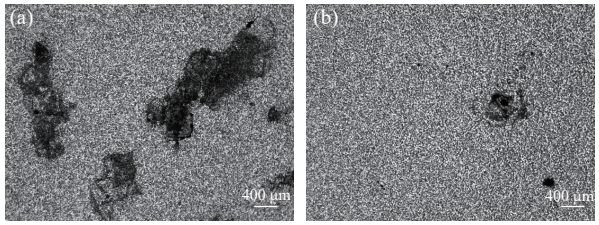

图 3　430 不锈钢 26 周期循环试验后的显微照片：(a) 未抛光的腐蚀形貌；(b) 抛光后的腐蚀形貌

晶间腐蚀试验

晶间腐蚀是指材料在特定的腐蚀介质中沿着晶界发生腐蚀，造成晶粒间结合力降低从而引起腐蚀失效。覃士敏等[13]通过试验分析了 304 奥氏体不锈钢的晶间腐蚀倾向，指出合金中增加 C、Ni 含量，降低 Cr 含量，以及添加 Cu，都对晶间腐蚀性能产生不利影响。对于汽车装饰不锈钢，高温服役应用主要是汽车装饰尾管，该类材料应进行晶间腐蚀敏感性测试。

以上各类腐蚀试验方法的验证侧重点不同，研究人员需根据实际应用情况选择合适的方法进行不锈钢耐蚀性考察。表 3 为各装饰不锈钢腐蚀试验方法。

汽车装饰不锈钢的技术难点

汽车装饰不锈钢的技术难点主要围绕装饰不锈钢的两点应用要求，即外观和耐蚀性。国内大型不锈钢企业如宁波宝新等已能够量产高光本色不锈钢，拉丝工艺也相对成熟，钢厂或不锈钢表面加工企业可实现各类拉丝纹理钢板的量产。值得注意的是，拉丝后钢板表面粗糙度增大，在进行腐蚀试验或实车使用时，灰尘、细小颗粒和盐雾易在拉丝产生的缝隙中沉积，从而使钢板表面更易发生腐蚀。应用拉丝不锈钢时，需要选择合适的拉丝纹理和应

表 3　装饰不锈钢的腐蚀试验方法汇总

试验	常用溶液	常用试验温度/℃	适用范围与特点
点蚀试验	$FeCl_3$+HCl	35	试验周期短，适合快速验证和车辆海运验证
中性盐雾试验	NaCl	35	腐蚀强度相对弱，周期长，与整车耐久腐蚀对应性差
铜盐加速醋酸盐雾试验	NaCl+$CuCl_2$+CH_3COOH	50	腐蚀较强，试验周期短，适合不锈钢快速验证
循环腐蚀试验	NaCl	根据循环阶段不同而异	接近整车耐久，可增加外部加载（温度、腐蚀液等）
晶间腐蚀试验	Cu+H_2SO_4+$CuSO_4$	溶液沸点	300系不锈钢高温应用（适用于有焊接或高温的应用）

用零件，避免过深的拉丝深度或过于严苛的应用环境引起腐蚀失效。此外，拉丝过程中使用研磨液进行冷却，拉丝后对钢板进行清洗去除研磨液和表面残余颗粒，整个工艺过程中这些外界因素对钢板的耐蚀性影响需要重点关注。

对于哑光本色不锈钢，由于其外观的特殊性，工艺控制窗口较窄：光泽度太高时，则失去哑光的仿铝外观质感，光泽度太低，则粗糙度增大，影响不锈钢的耐腐蚀性能。不锈钢生产企业应深入研究，探索出平衡外观质感与性能的稳健工艺。

目前对于黑色覆膜、黑色喷涂、灰色喷涂工艺的技术难点，部分龙头企业已攻克。钝化着色不锈钢作为最新的汽车装饰材料，仅由部分国外精密不锈钢生产企业生产，其优势在于钢卷出钢厂即带色。对于应用端而言，材料使用更便捷，同时因为膜层厚度薄，着色不锈钢可以与高光本色不锈钢、哑光不锈钢等材料共用零件模具。相较于喷涂不锈钢，钝化着色不锈钢更能展现金属质感，其技术难点在于钝化膜层工艺窗口窄，膜厚的不同会影响光干涉形成的外观效果，同时影响钢板的耐蚀性能，着色不锈钢膜厚如何稳定控制在较小公差范围是该新兴材料开发和应用过程中需要重点攻克的技术难点。

结束语

汽车装饰不锈钢材料较铝合金装饰材料有较大成本优势，因此应用越来越广。2023 年上海国际车展调研结果显示，除高光本色装饰不锈钢外，哑光本色、哑光银灰和高光钢琴黑外观的喷漆不锈钢等新外观在更多车型上得到应用，汽车装饰不锈钢外观呈现多样化发展趋势。针对层出不穷的新外观，应建立合理的光泽度、粗糙度等外观参数指标，采用合适的不锈钢材料牌号，并通过点蚀试验、铜盐加速醋酸盐雾试验、循环腐蚀和晶间腐蚀试验等加速腐蚀试验方法考察材料耐蚀性能，预判材料和零件腐蚀风险，确保新外观装饰不锈钢材料同时满足外观和耐蚀性能等汽车装饰零件应用需求。

参考文献

[1] 李春明. 不锈钢光亮退火板表面质量控制. 冶金设备，2017(4)：57
[2] 王佳. SUS430 不锈钢平整质量控制手段. 金属世界，2012(5)：63
[3] 马金达，林炜，胡青松，等. 400 系不锈钢耐蚀性行为的研究. 金属世界，2010(1)：26
[4] 李安邦，徐善华. 中性盐雾加速腐蚀钢结构表面形貌分形维数表征. 材料导报，2019，33(20)：3502
[5] 杨强，高鹏，何肖，等. 中性盐雾腐蚀对 AA6061–T6 铝合金冲击疲劳寿命的影响研究. 航空科学技术，2021，32(12)：107
[6] 林和，吴群雄，朱宇勋，等. TSZ410 不锈钢焊接接头在盐雾试验中的腐蚀行为. 电镀与涂饰，2021，40(9)：701
[7] 王崇武，苏纳，何汶华. 中性盐雾试验实验室之间的比对及结果分析. 涂料工业，2021，51(9)：48
[8] 何忠树，曹刚，吴德俊，等. SUS304 和 SUS316L 在汽车后排气口装饰件上应用的性能对比//2018 中国汽车工程学会年会论文集. 上海，2018：1875
[9] 张俏，张雯. 不锈钢水切亮条防腐试验关联性及评价. 汽车工程师，2017(6)：51
[10] 杨陈军，伍军华，王文涛，等. 乘用车不锈钢装饰条耐蚀性能研究. 环境技术，2015，33(3)：14
[11] 张斌，张志松. 典型车企循环腐蚀试验标准解读. 电镀与涂饰，2020，39(2)：100
[12] 朱家琰，阮姮妍，郑思维. 汽车材料循环腐蚀标准的试验参数归纳及发展趋势分析. 环境技术，2020，38(3)：196
[13] 覃士敏，程续，兰银辉，等. 普通 304 奥氏体不锈钢晶间腐蚀性能及测试方法. 金属世界，2016(6)：37

作者简介：顾磊明（1986—），女，2008 年 6 月、2011 年 3 月分别于南京理工大学和上海交通大学获得工学学士学位和硕士学位。现为泛亚汽车技术中心有限公司金属材料资深专家。目前主要研究领域为汽车用不锈钢和铝合金材料。通信地址：上海市浦东新区巨峰路 2199 号，Email：leiming_gu@patac.com.cn。