

国内大气环境和道路工况对汽车腐蚀影响的研究

陶军 陆德智

(广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院, 广州 511434)

摘要: 分析和归纳了我国自然环境、工业大气环境和道路工况对汽车金属材料的腐蚀发生和腐蚀加速的影响, 结果表明, 温度、相对湿度、土壤酸碱性、滨海地区盐雾、道路融雪盐和工业大气污染物是诱发和加速汽车车身和零部件腐蚀的关键影响因素。因此, 在汽车开发中, 应基于这些关键影响因素, 进行合理的防腐设计, 并制定相匹配的腐蚀验证方法, 提升汽车防腐性能与实际腐蚀寿命的匹配性, 从而减少防腐质量问题和成本浪费。

关键词: 大气环境 道路工况 腐蚀

中图分类号: TG179

文献标志码: B

DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20200064

Research on the Impact of China Atmospheric Environment and Road Conditions on Automotive Corrosion

Tao Jun, Lu Dezhi

(Automotive Engineering Research Institute, Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou 511434)

Abstract: This paper analyzes and summarizes the impact of China's natural environment, industrial atmospheric environment and road conditions on the occurrence and acceleration of corrosion in automotive metal materials. The results show that temperature, relative humidity, soil acidity and alkalinity, salt spray in coastal areas, road deicing salt, and industrial atmospheric pollutants are key factors that induce and accelerate the corrosion of vehicle bodies and components. Therefore, in automotive development, rational anti-corrosion design should be made based on these key factors, and corresponding corrosion verification methods should be established to improve the compatibility between the anti-corrosion performance of vehicles and their actual corrosion life, thereby reducing quality issues and cost waste related to anti-corrosion.

Key words: Atmospheric environment, Road conditions, Corrosion

1 前言

汽车作为耐用消费品, 服役环境较为恶劣。汽车材料以金属为主, 而腐蚀是金属最为普遍的现象之一。汽车金属零部件腐蚀会影响外观, 引发用户抱怨和投诉, 对汽车的质量、操控性和安全性带来影响, 降低汽车的使用寿命, 腐蚀已经成为汽车开发中必须重点关注的问题之一。目前, 多数国内主机厂不具备健全的整车防腐开发体系, 主

要参照国外主机厂的测试方法及要求进行测试开发。要建立自主的、针对国内汽车腐蚀环境的腐蚀试验方法, 首先需要对国内汽车腐蚀环境及其影响因素有清晰的认识, 从而有针对性地设置模拟腐蚀影响因素的试验工况^[1-4]。

大气环境和道路工况是对汽车腐蚀影响最大的两类因素。大气环境又分为大气自然环境和工业大气环境, 包含温度、相对湿度、太阳辐射、土壤、盐雾、酸雨等因素^[5]; 道路工况则包含道路状

作者简介: 陶军(1984—), 男, 工程师, 博士学位, 研究方向为汽车防腐老化耐久设计和验证。

参考文献引用格式:

陶军, 陆德智. 国内大气环境和道路工况对汽车腐蚀影响的研究[J]. 汽车工艺与材料, 2025(1): 61-67.

TAO J, LU D Z. Research on the Impact of China Atmospheric Environment and Road Conditions on Automotive Corrosion[J]. Automobile Technology & Material, 2025(1): 61-67.

况、融雪剂等。本文根据以上因素对汽车车身和零部件金属材料的腐蚀发生和腐蚀加速的影响,分析和归纳其在汽车腐蚀中发挥的作用。

2 我国自然环境对汽车腐蚀的影响

我国国土面积广大、南北纬度跨越大、气候类型多样,我国内陆属于典型的大陆气候,沿海地区既受大陆气候影响,又受海洋气候影响,气温、降水在南北和东西方向上差异均很大。

2.1 温度

我国不同地区的温度差异较大,长江以南地区年平均气温为16~20℃,华北地区年平均气温为12~16℃,而西北内陆和东北地区年平均气温为4~10℃^[6],如图1所示。

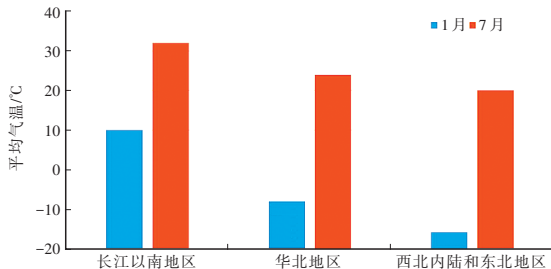


图1 我国平均气温分布

对金属材料来说,温度升高,扩散加快,同时电解液电阻下降,腐蚀反应会加快,且高温导致汽车漆面的油分加快散失,长期累积会促进车身漆面老化,影响漆膜防护作用。但温度升高也会促进金属表面液膜蒸发,减少润湿时间,一定程度上阻碍了腐蚀的进程。

南方沿海地区年最高气温为30~40℃,华东和华南部分地区年最高气温超过40℃,而这些地区的相对湿度往往也较高,发生锈蚀的概率相对较高。

虽然低温环境下腐蚀速率相对较低,但低温时空气中的水蒸气在金属表面形成凝露水膜。北方冬天早晚温差大,清晨时汽车发动机舱内零件表面极易产生凝露,如果车辆长时间静置,机舱内零件表面的水分很难蒸发,潮湿环境下被腐蚀的概率大幅增加。

2.2 相对湿度

通常情况下,钢铁在相对湿度高于65%、锌在相对湿度高于70%时,潮气会在金属表面附着形成0.001~0.01 μm的薄液膜。当膜层厚度达到20~30

个分子厚度时,就成为电化学腐蚀所需要的电解液膜。研究表明,当液膜厚度为1 μm~1 mm时,金属的腐蚀速度最大,如图2所示。

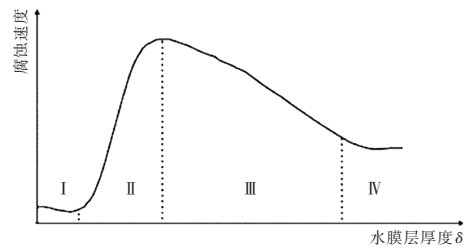


图2 钢铁材料腐蚀速度与表面液膜厚度的关系

若零件表面存在污染或表面水膜中溶解有酸、碱、盐等,则金属发生腐蚀的临界相对湿度会进一步降低,腐蚀进一步加快。在潮湿环境中,Cl⁻和SO₂在液膜中的溶解度及在金属表面的吸附量显著提高,当相对湿度由60%提高至95%以上时,SO₂在碳钢表面的吸附量将增大60~90倍^[7]。特别是在钣金件的搭接处、铆接处、焊接处,在车窗橡胶密封条、装饰条和流水导槽处,水蒸气、污染物进入缝隙后,形成闭塞氧浓差腐蚀电池,加速了这些部位的电化学腐蚀。

研究表明,一旦达到临界相对湿度,金属材料腐蚀速率将呈指数增加,如图3所示,且温度每升高10℃,金属材料的腐蚀速率会提高1~3倍^[8-9]。

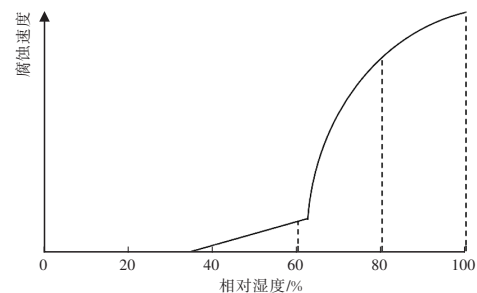
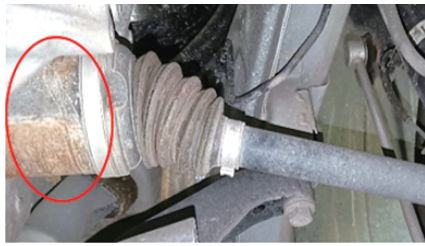


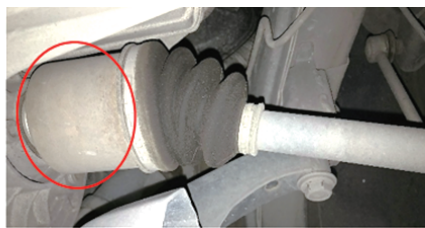
图3 钢铁材料腐蚀速率与临界相对湿度的关系

我国内陆地区除了个别季节湿度较大外,年平均相对湿度整体不高;沿海地区因降水量多,且靠近海洋,相对湿度显著高于内陆地区,华南和东南沿海地区年平均相对湿度普遍超过70%,部分地区年平均相对湿度常年高于80%,华南沿海地区春季(3月~4月)、夏季(7月~9月)相对湿度可达到90%以上。通过对比同纬度的内陆地区(相对湿度较低)和沿海地区(相对湿度较大,非近海位置)汽车零件未做表面处理的部位的腐蚀状态可知,相同服役年限的同一零件在两地的腐蚀程度可相差3

级以上,表明相对湿度是大气环境中汽车腐蚀的重要影响因素,如图4所示。



(a)福建沿海(平均相对湿度>80%,端面锈蚀4~5级)



(b)云南某地(平均相对湿度≈70%,端面锈蚀2~3级)

图4 某车型驱动轴在同纬度、不同相对湿度下的腐蚀情况

2.3 太阳辐射

我国太阳辐射条件呈现明显的地域差异。西北及华北内陆太阳辐射时间及强度显著高于沿海地区,而东南沿海在短期内又高于北方沿海,如图5所示。

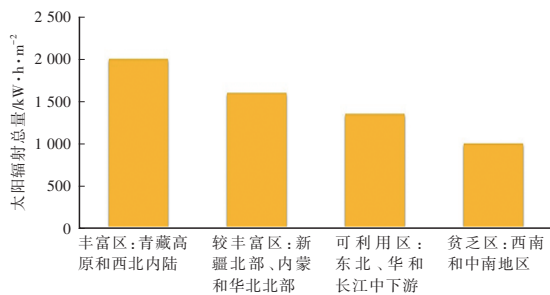


图5 我国年平均太阳辐射总量分布

通常,太阳辐射对汽车腐蚀没有直接影响。但太阳辐射强度大,在紫外线照射下,汽车漆面老化加快,长期使用后产生龟裂甚至粉化的可能性升高。外界腐蚀介质会沿裂痕渗透进车漆内部,引发基材生锈,因此,汽车防腐开发中也应考虑到漆面防紫外线辐射的问题,为车身选择和搭配合理有效的防紫外线车漆。

2.4 土壤

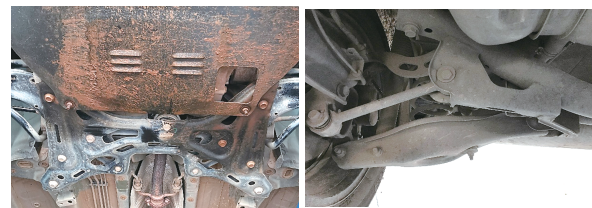
我国土壤pH值大多数为4.5~8.5,地理分布呈现“南酸北碱”的特点。长江以南地区土壤多呈酸性或强酸性,酸性土壤pH值低、含水量高、粘度高,而长江以北的土壤多呈中性或碱性,如表1所示。

表1 中国土壤酸碱度分布

| 土壤类型 | pH值 | 主要分布地区 |
|-------|---------|-------------------------|
| 强酸性土壤 | <5 | 长江以南地区、云贵高原 |
| 酸性土壤 | 5.0~6.5 | 黑龙江北部和东部、阿尔泰山周围、青藏高原东部 |
| 中性土壤 | 6.5~7.5 | 长江中上游地区、东北中南部、山东半岛和天山南麓 |
| 碱性土壤 | 7.5~8.5 | 华北地区、内蒙古东部、川渝地区和长江下游地区 |
| 强碱性土壤 | >8.5 | 内蒙古中西部、西北内陆和青藏高原西部 |

南方的酸性土壤黏度较高,尤其是华南一带的红壤和砖红壤富铝化现象明显。汽车经常处于高速运动状态,行驶过程中路面和道路两旁的土壤会被车轮带起呈片状或块状黏附到车身和底盘区域零件上。这些酸性土壤颗粒物对大部分零部件的涂层和钢铁基材具有侵蚀性。由于土壤成分的非均匀性,腐蚀往往以非均匀的方式进行,对零件的破坏性很大。

我国北方某些地域(如华北地区、内蒙古、甘肃、新疆等干旱和半干旱地区)的土壤表层中盐分含量较高,土壤中含有大量Mg、Na、K、Ca盐类化合物,也有硫酸盐。由于北方空气相对干燥,汽车车身和底盘零件会吸附地面上的碱性尘粒。这些含盐尘土沾污在金属表面,一方面大幅提高了金属表面的吸湿性能,即使大气相对湿度小于60%,金属表面也易形成不可见水膜,导致腐蚀发生,另一方面由于盐类尘粒中的盐离子(主要是氯离子)半径小、穿透能力强,会强力吸附在零件表面,破坏Al、不锈钢等表面的钝化膜,引起点蚀,如图6所示。



(a)华南红壤环境

(b)华北盐碱地环境

图6 不同土壤类型的汽车底盘使用状况对比

2.5 滨海地区盐雾

滨海地区海平面以上由于海水蒸发,形成含有大量盐雾的大气环境。各海域的整体盐雾水平存在差异,受气候条件、水文条件和地理环境等多方面因

素的影响,我国东南沿海盐雾含量略高于北方沿海。

富含盐分的大气环境不仅会增大汽车表面液膜的电导率,还会导致金属表面钝化膜破裂,加速电化学腐蚀。对于汽车车身内腔、钣金缝隙等相对潮湿的部位,大气中的盐微粒和部分气体溶解在汽车金属表面的液膜中,氯离子通过电泳穿过具有阴离子选择性的锈层到达基体表面,即阳极反应区。随着锈层变厚,阳极反应区溶解氧含量降低,发生闭塞电池效应,使阳极反应区 pH 值降低。随着铁基体氧化成 Fe²⁺,再氧化成 Fe³⁺,Fe³⁺在 Cl⁻条件下水解造成蚀孔内电解液酸化,促进了阳极溶解过程,如图 7 所示。Cl⁻参与的腐蚀产物 β-FeOOH 形成,其还原性加速了腐蚀过程。

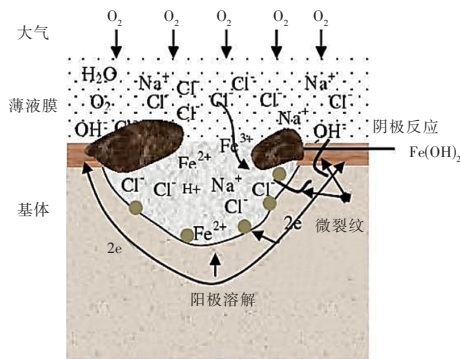


图 7 腐蚀机理模型示意

我国许多海滨城市受海洋大气的影响,汽车腐蚀问题比较严重。图 8 为滨海城市汕头的某私家车的车身外覆盖件照片。该车长期在距海 1~5 km 的高盐雾浓度地域使用,相比内陆区域的车辆腐蚀程度至少加重 3 级,部分部位甚至发生锈蚀穿孔。



图 8 汕头滨岸地区某车型车身锈蚀

盐雾在海面上产生后,随着上升气流向内陆传播,在传播过程中由于重力的作用,部分盐粒沉降。由于氯离子沉降速率受与海洋距离的影响明显,随距离的增加而降低。西南技术工程研究所的监测结果发现,除不同海域的整体盐雾水平存在差异以外,同一海域与海洋不同距离的盐雾沉积速率差异更大,实测表明,Cl⁻含量在距海边 100 m 处为 0.185 3 mg/m³,在 350 m 处则为 0.029 4 mg/m³[10]。事实上,随着盐雾含量及盐雾沉降速率的快速降低,国内在距海 5 km 以上的大气环境中盐雾含量对腐蚀的加速作用相对微弱,空气相对湿度和空气中污染物对腐蚀的加速作用居于主导地位。本文在青岛等滨海城市进行了实车调查,对于同一品牌相同服役年限的车辆底盘,日常活动和停放地点在距海 1~5 km 的车辆比距海 5~10 km 的车辆的腐蚀程度平均高出 1~2 级,且远海地域的车辆与其他的在内陆地域使用的车辆相比,腐蚀程度没有明显加深。

3 我国工业大气环境对汽车腐蚀的影响

工业大气环境是指煤炭、石油、化工、电力等工业聚集地区的大气环境。这类环境的大气中常年含有 SO₂、NO_x 和粉尘颗粒物等多种污染物。在这种大气环境中,汽车的腐蚀会明显加快,其中,酸雨对汽车的危害最大[11]。

汽车车身和零部件大量通过涂覆金属、非金属或有机涂层进行保护。调查发现,酸雨对这些保护层,特别是金属性保护层的破坏非常快。SO₂ 大量溶解于液膜,通过气相或液相的氧化作用生成硫酸,引起表面液膜的酸化[12]。酸性成分不仅会使汽车车身油漆漆面产生褪色变黄、白点,还会与汽车金属材料发生强烈的腐蚀反应。如非酸雨环境下的 Ni/Cr 镀层零件,保护寿命可维持 5~10 年,但在酸雨环境下,仅 1 年就出现较严重锈蚀[13],如图 9 所示。

我国酸雨地区占国土面积的 40%,其中以长三角地区、珠三角地区、成渝地区和华中地区最为严重,如表 2 所示。这些地区工业发达,SO₂、NO_x 等污染物排放量大,降水中酸性物质较多,降水 pH 值年平均平均值低于 4.5。我国北方地区因能源重化工工业

排放以及大量燃烧含硫量高的煤,也普遍存在SO₂污染问题,但由于北方土壤偏碱性,在碱性尘粒影响下,降水中pH值相较于南方偏高^[14-15]。



图9 酸雨对汽车漆面和基材的腐蚀破坏

表2 2014年以后中国SO₂和酸雨污染地区分布

| 土壤类型 | pH值 | 主要分布地区 |
|-----------------------|---------|---------------|
| 西南酸雨区 | <4.5 | 重庆及周边工业区 |
| 华中酸雨区 | <4.5 | 湖北、湖南及珠三角工业区 |
| 华东沿海酸雨区 | <4.5 | 长江三角洲工业区 |
| SO ₂ 污染控制区 | 4.5~5.6 | 北方能源、石化等重工业城市 |
| 轻微污染地区 | >5.6 | 西北内陆地区 |

对国内某品牌汽车在北方地区的锈蚀反馈进行统计,邯郸、洛阳、淮北、鞍山等典型的能源重化工城市位居前列,如图10所示,表明工业大气污染对汽车腐蚀有显著影响。因此,在防腐工业设计和防腐试验验证中不能忽视工业大气污染物对汽车腐蚀的影响。

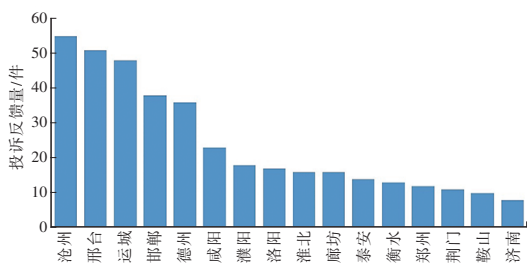


图10 2022~2023年某品牌汽车在北方地区锈蚀反馈量

4 我国道路工况对汽车腐蚀的影响

4.1 道路状况

道路状况主要影响汽车车身下部、动力舱下部及底盘零件的腐蚀。汽车行驶中受到沙石飞溅撞击、凹凸路面托底、路面水冲刷,车身和零件表面的防护涂层会破损剥落,基材外露引发锈蚀。

截至2023年,我国公路总里程已达到544×10⁴ km,其中,高速公路和城市道路84×10⁴ km、农村公路460×10⁴ km,农村公路中99.6%为硬化路。因此,仅就路面质量而言,我国当前的道路状况对汽车防

腐的影响不大。

我国城市发展步伐加快,但城市道路排水系统更新缓慢,一些大城市夏天降雨后路面长时间积水、内涝越来越频繁。污浊的路面水(电解液)和浸泡其中的汽车(电极)构成了良好的电化学腐蚀系统,加速了汽车零部件的电化学腐蚀。此外,路面水以及路面水裹挟的泥沙对汽车下车体产生的冲刷腐蚀和磨损腐蚀也不可忽视。

近年来,新能源汽车的市场占有率越来越高,部分车型的动力电池组安装在乘员舱地板下方,电池包(特别是轿车电池包)的防路面水冲刷腐蚀和防浸泡腐蚀要求比传统燃油车更加严苛,对新能源汽车的防腐设计提出了更高要求。

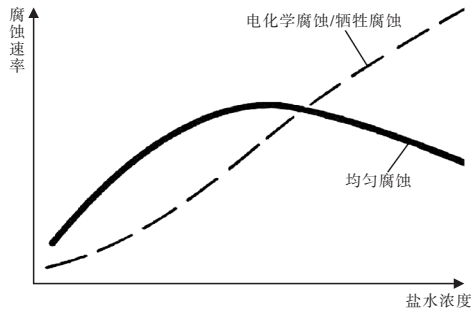
4.2 融雪盐

目前,融雪盐是我国北方冬季处理道路冰雪的常用方法之一。我国北方广泛使用价格低廉的氯盐型融雪盐,这类融雪盐主要包括氯化钠、氯化钙、氯化镁等。利用盐类物质可降低冰点的原理来降低雪的熔点,从而消除路面积雪。然而,氯离子对汽车金属零部件的腐蚀破坏有不利的影响,如表3所示。

表3 不同氯盐融雪剂特性对比^[16]

| 参数 | 氯化钠 | 氯化钙 | 氯化镁 | 氯化钾 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| 对金属的腐蚀性/% | 100 | 50~70 | 40~60 | 5~20 |
| 适宜工作温度/℃ | -10~-1 | -30~-1 | -20~-1 | -40~-1 |
| 融雪速度/% | 100 | 150 | 150 | 200 |
| 保持时间/天 | 1 | 1~2 | 2~3 | 4~7 |

含氯水溶液比不含氯水溶液具有更强的腐蚀性。一方面,Cl⁻会增强液膜的导电性,加快电化学腐蚀进程,图11展示了不同Cl⁻离子浓度对腐蚀速率的影响;另一方面,Cl⁻会加速破坏材质表面钝化膜,促进局部腐蚀。融雪盐溅附到车辆底盘、发动机、排气管、制动系统、卡箍等不锈钢和灰铸铁材质的金属构件上,会引发剧烈的电化学腐蚀破坏,甚至引发点蚀穿孔,降低汽车的使用寿命,而点蚀穿孔对汽车安全性和使用性将产生极为不利的影响^[17]。

图 11 Cl^- 浓度对腐蚀速率的影响^[18]

在含氯水溶液中,虽然镀锌钢板相较于冷轧钢板的腐蚀速率降低约 50%,采用镀锌钢板可显著提高汽车耐蚀性,但融雪盐中的 Cl^- 可破坏由 $\text{Zn}(\text{OH})_2$ 和 ZnO 组成的二次腐蚀产物膜的稳定性,使镀锌钢在成膜-破坏-再成膜-再破坏的循环中发生腐蚀^[19]。

近年来,国内由于融雪盐腐蚀的汽车召回逐渐增多。通用汽车于 2010 年召回了数千辆凯迪拉克 CTS 轿车,因为融雪盐或腐蚀性杂质的雪水可能进入前车轮制动分泵的制动软管接头护套中,引起接头腐蚀。严重的腐蚀会导致制动液渗漏,带来操控和安全隐患。因此,在进行全国车型的防腐蚀设计和腐蚀验证试验时,必须考虑北方地区冬季道路融雪盐的影响。

5 结束语

本文分析和归纳了我国自然环境、工业大气环境和道路工况对汽车金属材料的腐蚀诱发和腐蚀加速的影响,研究发现,在制定腐蚀试验方法时,应重点考虑国内沿海地区高盐分空气、南方地区湿热天气、工业大气污染物、北方地区降雪后融雪盐路面、沙石路面等环境和道路工况。

在产品防腐开发初始阶段和产品腐蚀试验验证阶段,整车道路强化腐蚀试验是判定汽车防腐设计和腐蚀验证合理性的重要手段。目前,欧美和日本等先进车企分别具有较完善的腐蚀评价方法,而我国自主品牌的汽车强化腐蚀试验方法主要参考美国汽车企业,以 QC/T 732—2005《乘用车强化腐蚀试验方法》为典型代表。但我国与北美在大气腐蚀环境、用户驾驶习惯、汽车保养方式、道路状况、融雪剂使用等方面存在较大差异^[20]。因此,现有腐蚀试验方法必然与中国汽车腐蚀工况

存在不匹配性,且 QC/T 732—2005 发布较早,该试验方法的某些工况设置已与当前现实情况存在较大的差异。

对于自主品牌整车企业,急需基于当前我国汽车腐蚀环境和用户用车工况,结合整车防腐目标,制定与汽车实际使用相匹配的腐蚀验证方法,从而减少防腐质量问题和成本浪费。

参考文献:

- [1] 胡林林,徐文嘉. 汽车防锈技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] 黄建中. 汽车腐蚀与防护技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [3] 吴涛. 汽车防腐涂装的现状和发展[J]. 涂料工业, 2001(6): 19-23.
- [4] 陈玉燕. 浅谈提高汽车耐腐蚀性[J]. 轻型汽车技术, 1998(2): 62-67.
- [5] 王振尧,于国才,韩薇. 我国自然环境大气腐蚀性调查[J]. 腐蚀与防护, 2003(8): 323-326+344.
- [6] 齐浩,张文,张苏平. 近百年中国北方沿海地区气温年代际变化及趋势预测[J]. 海洋湖沼通报, 2015(3): 21-31.
- [7] 韩薇,贾薇,汪俊,等. 凝露状态下 SO_2 对 A3 钢腐蚀机理的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002(6): 22.
- [8] MATT M G. 气候及老化之因素[J]. 环境技术, 2001(6): 12-23.
- [9] 左景伊. 腐蚀数据手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1982.
- [10] 唐其环. 海洋大气腐蚀性分类分级[J]. 环境技术, 2003(1): 2-4.
- [11] Corrosion of Metals and Alloys - Corrosivity of Atmospheres - Classification, Determination and Estimation: ISO 9223: 2012[S/OL]. (2012-02-01) [2020-02-28]. <https://www.iso.org/standard/53499.html>.
- [12] 李彤. 汽车整车腐蚀试验现状[C]// 第五届全国腐蚀大会. 北京: 中国腐蚀与防护学会, 2009: 1-6.
- [13] 萧以德,王光雍,李晓刚,等. 我国西部地区大气环境腐蚀性及其材料腐蚀特征[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2003(4): 57-64.
- [14] ZHENG Y P, WANG Z Y, ZHANG F Q. Influence of Acid Deposition on Atmospheric Corrosion of Zinc[J]. Journal of Environmental Sciences, 1991, 3(2): 53-60.
- [15] 马长李,马瑞萍,白云辉. 我国沿海地区大气环境特征及典型沿海地区大气腐蚀性研究[J]. 装备环境工程,

- 2017, 14(8): 65-69.
- [16] 骆虹, 罗立斌, 张晶. 融雪剂对环境的影响及对策[J]. 中国环境监测, 2004, 20(1): 57-59.
- [17] 付益平, 张晓东, 王俊, 等. 典型乘用车整车道路强化腐蚀试验方法对比分析[J]. 环境技术, 2019, 37(1): 22-25.
- [18] Society of Automotive Engineers. Proving Ground Vehicle Corrosion Testing: SAE J1950-2016[S/OL]. (2016-04-05)[2020-02-28]. https://www.sae.org/standards/content/j1950_201604/.
- [19] 史艳华, 梁平, 刘峰. 含氯融雪盐对汽车用镀锌钢腐蚀行为的影响[J]. 材料保护, 2014, 47(3): 53-55+71.
- [20] 王永豪, 蔡元平. 汽车整车腐蚀试验主观评价方法的探讨[J]. 环境技术, 2014, 32(1): 6-9+35.