
中国商用车和轨道车辆可持续涂料及涂装技术 应用报告

艾仕得涂料系统（上海）有限公司

中国化工学会涂料涂装专业委员会

2019年6月

目录

报告简介	2
项目研究背景和目的	2
项目团队与合作伙伴	4
1. 中国商用车与轨道车辆涂装工艺的现状与趋势.....	5
1.1.商用车和轨道车辆市场概述.....	5
1.1.1. 商用车	5
1.1.2. 轨道车辆	6
1.2.商用车与轨道车辆的涂装工艺现状.....	7
1.2.1. 商用车涂装工艺	8
1.2.2. 轨道车辆涂装工艺.....	11
1.2.3. 商用车和轨道车辆的涂料应用.....	12
1.3. 亟待升级的产业模块：涂装工艺需向环保方向转变.....	14
2. 可持续商用车与轨道车辆涂料的技术应用.....	16
2.1. 水性和高固体分涂装技术解决方案.....	16
2.1.1. 商用车(不包括中大客车)	16
2.1.2. 轨道车辆与中大型客车.....	22
2.2. 可持续涂料技术：粉末涂料.....	26
3. 结语与展望	27

报告简介

项目研究背景和目的

当前，中国的汽车和轨道车辆产销量都位居世界前列，其中汽车产销量已连续十年蝉联世界第一¹。与此同时，汽车和轨道车辆的涂装发展为环保和经济可持续性带来的影响也日益得到国家、行业和相关企业的重视。

随着新材料、新设备和新工艺的不断涌现，我国乘用车可持续性涂装领域取得了较快发展，水性、高固体分涂料和粉末涂料这三大绿色可持续涂料解决方案得到乘用车行业领先企业的广泛采用。然而，在商用车和轨道车辆领域，绿色可持续涂料的应用还在积极研讨和推进过程，滞后于乘用车涂装的进度。尽管在产销量方面，商用车和轨道车辆远低于乘用车，但因其单车喷涂面积大、涂装工艺复杂，对涂料的选择及车体涂装工艺带给局部环境的影响仍不可小觑。

2017 年以来，为推动产业升级和绿色制造，各级政府加大了涂料和涂装行业的法规制定和发布力度，是国家环保法规出台密度和强度最高的历史阶段。针对汽车涂装的挥发性有机物（VOCs，Volatile organic compounds,）减排，工信部在 2017 年 12 月发布的《汽车行业挥发性有机物削减路线图》制定了新的削减目标（见下表）并提出了明确的技术路线：

一是开展材料及工艺替代工程，具体包括“新建紧凑型涂装生产线，采用高固体分涂料、水性涂料替代传统溶剂型涂料，推动粉末涂料在商用车领域的应用，推广静电喷涂等高效涂装工艺”；二是推广涂装车间技术改造工程，即对传统溶剂型涂装生产线进行水性或高固体分改造，提高涂装自动化程度、优化喷涂工序，如在面漆线前设编组站，同色车型集中喷涂、推广高速旋杯雾化器，减小换色容量等；三是加强过程监控，即适时安装、配置 VOCs 在线检测设备及便携式测试仪器，对企业生产车间及重点排污口进行实时监测。

¹ 中国汽车工业协会数据

表1：汽车涂装车间VOCs排放目标

车型	单位涂装面积 VOCs 排放量(g/m ²)	
	2018 年 12 月 31 日起	2020 年 12 月 31 日起
乘用车	35	30
货车驾驶舱	75	65
货车车厢	90	70
客车	180	150

数据来源：《汽车行业挥发性有机物削减路线图》

从目前的VOCs削减政策发展来看，传统中低固体分溶剂型整车涂装线3C2B工艺²难以达到环保要求。随着商用车行业的发展，商用车涂装工艺的升级也得到了政府、行业协会和市场参与者的关注，一些整车制造厂和国际涂料生产商开始引进和推广可持续商用车涂装新技术。

本报告将对中国商用车和轨道车辆涂装工艺现状及目前最先进的商用车可持续涂装工艺及解决方案作一阶段性总结和分析。希望此行业报告能够帮助中国商用车和轨道车辆制造商加深对当前涂装产业发展趋势和最先进涂装技术的认识和理解，为商用车和轨道车辆制造商规划企业车辆涂装战略提供一个较为客观全面的参考，助力可持续涂装技术在商用车和轨道车辆产业的推广和应用，推动中国商用车和轨道车辆涂装工艺向更高效、更环保的方向发展。

本报告重点论述的可持续涂装技术包括在技术和应用上发展相对成熟并已得到涂料行业和交通运输产业认可的水性涂料、高固体分涂料和粉末涂料技术。文中的商用车概念是根据中国汽车工业协会的定义，包含所有的载货汽车和9座以上的客车，分为客车、货车、半挂牵引车、客车非完整车辆和货车非完整车辆。轨道交通车辆主要涵盖铁路车辆(包括动车组、铁路货车、客车、牵引机车)和城市轨道车辆。

² 3C2B 工艺是汽车整车主流的喷涂工艺，包括三次喷涂(底漆、中涂和面漆)和两次烘干

项目团队与合作伙伴

本报告由艾仕得涂料系统（上海）有限公司（“艾仕得”）与中国化工学会涂料涂装专业委员会联合发布，在中国化工学会涂料涂装专业委员会和艾仕得涂料系统网站上进行公布，供公众和全行业参阅。

艾仕得是液体及粉末涂料制造、研发和销售国际企业，是全球领先的汽车原厂漆供应商之一，也是中国汽车水性、高固体份和粉末涂料的市场领军企业。

中国化工学会涂料涂装专业委员会是中国化工学会批准设立的分支机构，是由全国涂料与涂装科技工作者组成的跨行业的学术组织和行业组织，在中国化工学会领导下开展学术交流、技术培训、信息咨询等各项工作。

本报告在市场数据和资料整合方面得到全球领先的工业领域市场调研公司SAI市场咨询公司的协助和支持。

法律声明

本报告由艾仕得涂料系统起草并拥有著作权，报告得到中国化工学会涂料涂装专业委员会的支持与认可。任何对本报告的转载和使用，请注明来源及作者。

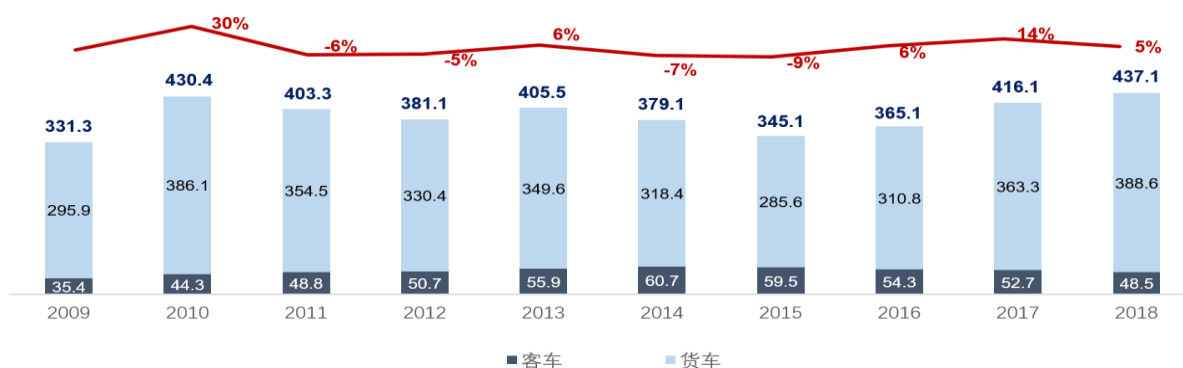
1. 中国商用车与轨道车辆涂装工艺的现状与趋势

1.1. 商用车和轨道车辆市场概述

1.1.1. 商用车

中国商用车经过40多年的快速发展，销量已位居世界第一³。根据中国汽车工业协会统计，2018年中国商用车销量437万辆，其中货车388.6万辆，客车48.5万辆，总产销量占据了全世界40%以上的份额。

图1：2009-2018年中国商用车销量⁴，万辆



在客车市场，2005年至2014年是行业高速增长阶段。受国家大量基建投资、公路改扩建的推动，年均复合增长率约10%。但2014年后市场销量开始下滑，虽然在2016和2018年受新能源客车政策影响，销量有一定上涨，但从长远来看，客车市场似乎增长乏力。根据2019年第16届客车市场研究会的分析，2020年以后，随着新能源汽车补贴退出市场，客车行业将有可能面临3~5年的市场空窗期。客车出口受制于国际经贸环境的变化。此外，到2018年年底，我国大概有超过20万辆二手公交车，对新车销售也应具有一定的抑制作用。

在货车市场，自2016年下半年开始到2018年受治超新政、排放标准不断升级等一系列相关政策的影响，保持高位运行。在2014~2018年，我国货运总量从417

³ LMCA 统计

⁴ 中国汽车工业协会数据；销量数据包括非完整车辆和半挂牵引车

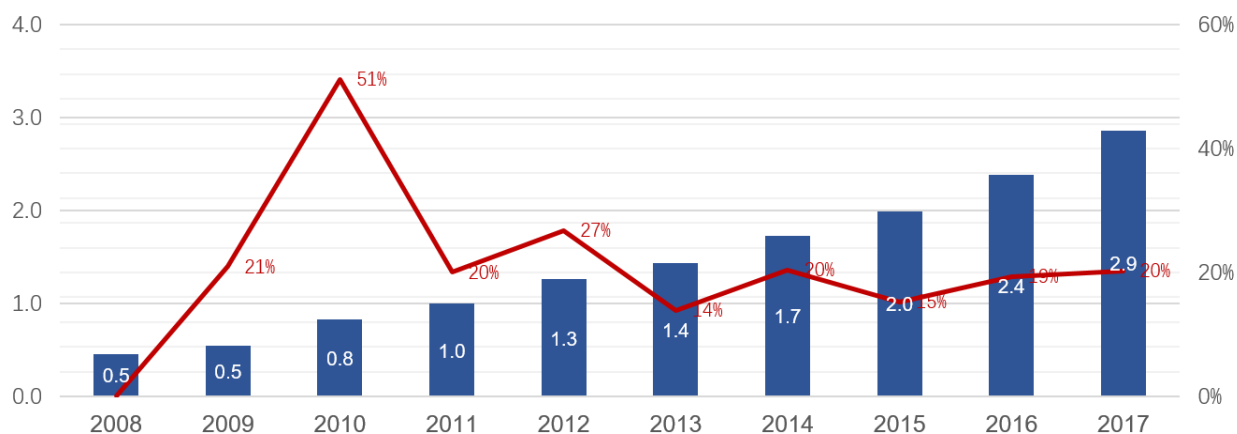
亿吨发展到 515 亿吨⁵。尽管新排放标准实施会释放部分需求，但总体环保治理会导致货车禁行和限行范围扩大，最终有可能导致货车用车总体需求减弱。

1.1.2. 轨道车辆

城市轨道车辆

根据中国城市轨道交通协会发布的数据，截至 2018 年末，共计 35 个城市开通城市轨道交通并投入运营，运营线路长达 5,767 公里。运营车辆在 2017 年就已达到近三万辆，自 2015 年后每年新增运营车辆的数字都有大幅增长。

图2：2008-2017 年我国城轨运营车辆数⁶，万辆



除国内城轨车辆市场外，海外出口也有较大进展。中国中车自 2014 年中标 284 列波士顿红线和橙线地铁项目以来，城轨车辆客户已拓展至土耳其、印度、新加坡、澳大利亚、巴基斯坦、加拿大、伊朗、智利及泰国等国家⁷。据 SAI 公司测算，海外出口车辆目前已占到中国城轨车辆总产量的 30%以上，未来还有上涨趋势。

⁵ 国家统计局数据

⁶ 国家统计局数据

⁷ 《中国中车股份有限公司年度报告》，2015-2017

铁路车辆

铁路固定资产投资从 2003 年的 706 亿元发展到 2018 年的 8,028 亿元⁸，过去 15 年的复合增速高达 17.6%，其中高铁爆发式发展贡献了主要的增长动力。从历年的车辆招标情况来看，中国铁路总公司历年动车组采购量一直保持在 300-400 列之间。

表2：铁路总公司车辆招标采购数量⁹，辆

火车类型	2014	2015	2016	2017	2018
动车(列)	393	418	136	311	337
铁路客车	2,858	1,143	682	14	263
铁路机车	1480	790	263	686	795
铁路货车	10,980	11,315	25,279	40,000	57,940

就未来发展来看，发展空间似乎仍然广阔。根据《中长期铁路规划》，2020 年我国铁路、高铁运营里程分别达到 15 万公里和 3 万公里。基本形成以“八纵八横”主通道为骨架的高速铁路网。展望到 2030 年，远期铁路网规模将达到约 20 万公里，其中高速铁路 4.5 万公里。中铁总在 2018 年 7 月宣布的《2018-2020 年货运增量行动方案》中已承诺铁路到 2020 年承担 47.9 亿吨的货运量，较 2017 年增长 30%。我们可以预计，未来几年动车组需求会继续保持平稳，未来数年铁路货车和机车采购数量有望大幅上涨。

1.2.商用车与轨道车辆的涂装工艺现状

在商用车和轨道车辆产业升级和环保的大趋势下，可持续涂料技术成为车辆生产企业在生产技术和工艺创新以取得持续商业成功的一个重要部分。

先进的可持续涂装工艺都是从传统溶剂型工艺发展而来，通过新的涂装材料的应用，对原来的工艺布局进行一系列的优化组合，达到降低 VOC 排放和设备投入费用的

⁸ 国家统计局数据

⁹ SAI 公司根据历年铁路招标公开资料收集整理

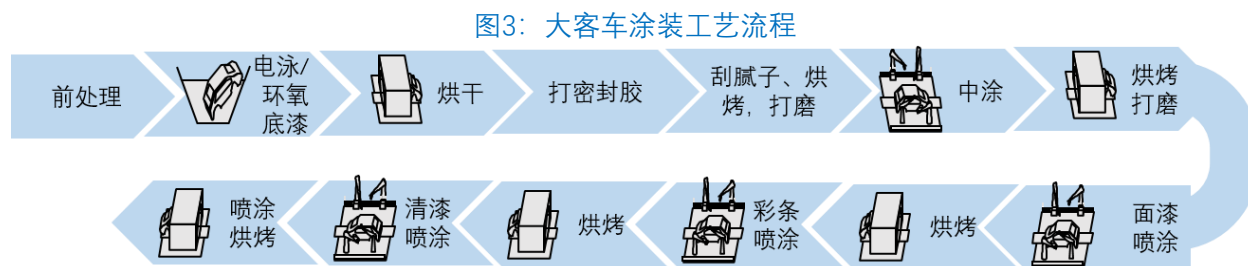
目标。为了更好地理解可持续涂装工艺的优势，下文先简略介绍商用车与轨道车辆传统溶剂型涂装工艺。

1.2.1. 商用车涂装工艺

汽车涂装主要由前处理（俗称漆前处理）、电泳、密封、中涂、面漆和漆后工程几部分组成。根据涂层和烘干过程的不同，商用车涂装工艺分为高温涂装工艺体系和低温涂装工艺体系，不同于乘用车，商用车对车漆的要求更偏重保护性，部分高端车辆对装饰性也有较高要求，色彩要求多而且交车时间短，需要快速配色供货。以下将以大客车和重卡为例分别介绍当前客车和货车主要的涂装工艺和涂料应用。

A. 大客车涂装工艺（低温涂料体系）

大客车涂装主要会包括骨架涂装、底部涂装和车身涂装。大多数客车生产制造厂采用的是 3C3B 的主流涂装工艺，即底漆+中涂+面漆或金属闪光漆/罩光漆。主要工艺流程见下¹⁰：



前处理

涂装前处理是涂装工艺的基础，对整个涂层的质量有很大影响。涂装前处理包括表面清理(除油、除锈、去尘等)和磷化处理两部分。

底漆涂装

大客车涂层与金属的结合力主要通过底漆涂层实现，它们的质量优劣直接影响车身的耐腐蚀性和使用寿命。中国的客车制造商已经在 10 年前开始采用连续化电泳涂装工艺，电泳漆具有高防腐性能（可以提供十年以上的防腐保护），漆膜均匀细

¹⁰ 严伯昌，《客车车身的涂装工艺》，电镀与涂饰，2008（02）

腻，几乎可以覆盖所有的内外表面，材料利用率极高，涂装自动化程度高。电泳涂装的引入，可替代传统双组分环氧底漆的使用，降低膜厚减少 VOC 排放。

低产量的客车制造商因规模效益问题无法引入电泳工艺，仍然使用传统的底漆喷涂工艺，底漆膜厚 60-80 μm 。涂膜固化后，用机械打磨机打磨，以求平整光滑。

中涂

中涂层介于底漆与面漆之间，主要作用是改善被涂物表面和底漆涂层的平整度，同时遮蔽并填充腻子刮涂及打磨区域，为面漆层创造良好的基底，以提高整个涂层的装饰性和抗石击性。中涂一般采用静电喷涂法或空气喷涂法，根据膜厚要求或车身需填充部位的喷涂遍数，膜厚要求一般在 40-60 μm 之间。为了节约成本、省时间、提高效率，可采用十字交叉法喷涂，然后湿碰湿喷涂面漆(可节省一道烘干)。这样就要求中涂漆与底漆及面漆有良好的配套性。实际上，国内的工艺由于环境清洁度和工艺不同（需考虑遮蔽腻子痕）等原因，中涂会进行烘干并打磨。

面漆、清漆和彩条喷涂

面漆是汽车车身多层涂装中的最后一道涂层，对车体具有保护和装饰作用。面漆分为实色漆与金属闪光涂料两种。实色漆的喷涂方法与喷涂中涂相仿。金属闪光涂料要先喷底色漆(基色涂料)，然后再喷罩光清漆。如果金属闪光涂料为半透明珠光涂料，中涂漆要事先调整为与之相近的颜色，或按照 3 涂层工艺颜色，先涂装一层配套的底色漆作为打底色。为了提升涂层外观效果，客车厂大都采用二次罩光工艺，以达到更好的外观丰满度和长短波效果。面漆施工完毕，各厂家依照烘房干燥条件，进行烘烤干燥。如需图案喷涂，根据颜色需求可选择 2K 丙烯酸面漆或 1K 丙烯酸涂料(也称双工序涂料)喷涂彩条，一种颜色表干遮蔽后喷另外颜色，待整体图案喷涂结束，进行整体罩光，最终一道烘干。

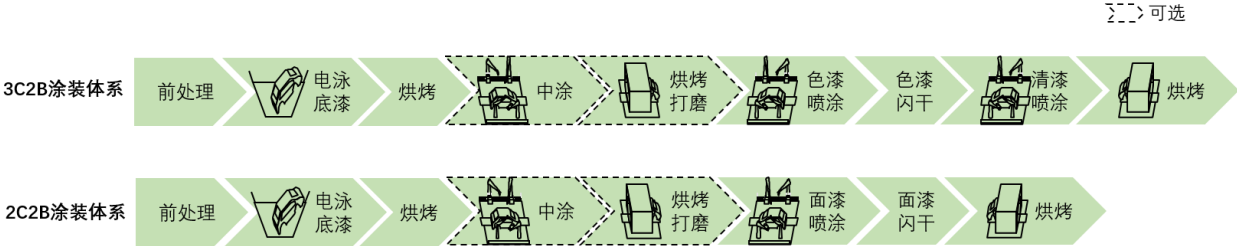
B. 重卡涂装工艺（高温涂料体系）

重卡主要分为驾驶室、车架、车斗三部分，车架、车斗主要以钢结构为主，涂装技术也采用钢结构防腐型涂装技术。中国重卡喷涂工艺与国外涂装有很大的不同，中

国内重卡喷涂大都采用高温涂料体系而国外大多采用低温涂装体系。下面分两部分介绍重卡驾驶室和车架的涂装工艺。

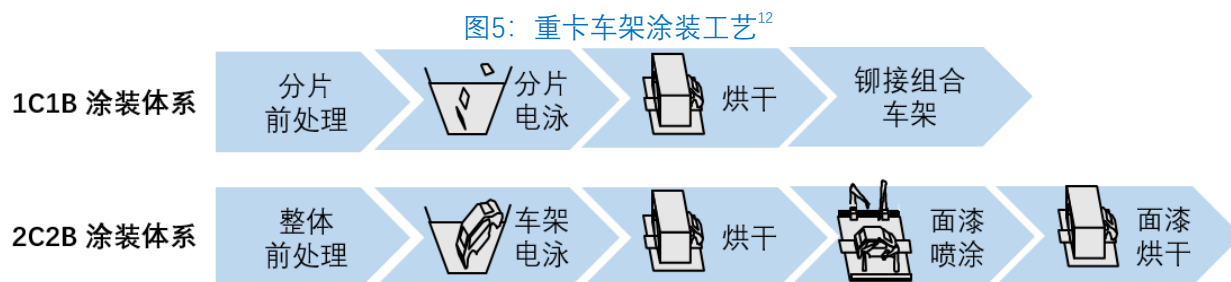
重卡驾驶室的涂装借鉴了乘用车的涂装技术。驾驶室作为整个卡车最主要的部分，对外观要求最高，尤其是驾驶室门等大面积立面上，因此采用的涂装工艺技术和涂料体系都与乘用车类似。目前电泳后的中上涂部分主要采用3C2B /2C2B涂装工艺，使用中低固体分溶剂型产品。国内越来越多的卡车采用免中涂工艺，色漆直接喷涂在电泳涂层上，涉及出口等车型才会喷涂中涂层。由于各地法规的升级，近来很多厂家正处于规划升级阶段，并计划使用绿色可持续的产品及工艺。总的来说老生产线改造大多考虑走高固改造路线，工艺路线与中低固体分产品一样，而新建生产线主要采用水性体系工艺，选用3C2B或3C1B配套2K 或 1K 高温清漆。

图 4：重卡驾驶室涂装工艺



重卡车架作为整个卡车的基体，绝大多数部件和总成都需要通过车架来固定位置且需长期承受路面砂石冲击和各种环境侵蚀，因此其防腐性能极为重要。重卡车架的涂装体系主要有两类：“1C1B”的单涂层工艺，即“前处理+环氧阴极电泳底漆”或“前处理+丙烯酸环氧阴极电泳底漆”工艺和“2C2B”双涂层工艺，即“前处理+环氧阴极电泳底漆+丙烯酸面漆”工艺。其主要区别在于前处理电泳的处理方式。1C1B涂装体系先分片处理电泳，再铆接组合成车架。优点是能大幅度提高纵梁夹层等电泳盲区的漆膜质量，有效提升整个车架的防腐蚀水平，但在贮藏、转运的过程中漆膜表面易划伤，很多老厂改造时还需重新上一条零部件电泳线；2C2B 涂装工艺对整体车架进行前处理电泳，因此同时适用铆接车架和焊接车架。这一工艺的优点是生产组织较为简单，生产效率高，缺点

是生产中由于结构限制等原因, 存在着合梁重叠部位电泳不上等问题, 影响整个车架的防腐性能。¹¹



目前在国内市场销售的重卡由于客户认知及成本等各方面考量, 基本采用 1C1B 单涂层体系, 即采用“底面合一”的丙烯酸环氧阴极电泳底漆。该涂装工艺由于销售时长的不可控及底盘暴露等因素会导致车架不同程度地存在底漆粉化、耐腐蚀性差等弊病; 2C2B 双涂层工艺仅使用在部分出口车车辆¹³。

1.2.2. 轨道车辆涂装工艺

轨道车辆较多使用铝合金材料, 由于其耐蚀性和外观装饰性能不高, 车体、蒙皮需要靠喷砂、油漆涂装等表面处理方法来提高防腐蚀性和外观装饰性。牵引机车、轨道客车(包括普通客车、动车组和城轨车辆)主要经受的是大气腐蚀, 而货车除受到大气腐蚀外还要受到酸、碱、盐类等化学腐蚀¹⁴。在涂装工艺上, 牵引机车和轨道客车会采用三涂层涂装体系, 其底漆通常采用高压无气喷涂法分两道进行喷涂, 烘干后进行打磨, 漆膜干膜厚度不小于 60 μm ; 中涂一般也采用高压无气或者混气喷涂, 烘干后进行打磨, 漆膜干膜厚度 40-60 μm , 再进行两道或三道湿碰湿的面漆层喷涂¹⁵。铁

¹¹ 杜彪, 《浅谈重卡车架涂装》, 现代涂装, 2012 (09)

¹² SAI 公司根据公开资料整理

¹³ 王福才, 《重卡车架防腐性能提升的涂装工艺浅谈》, 现代涂装, 2016 (04)

¹⁴ 黄春辉, 《浅谈轨道车辆铝合金表面涂装》, 现代涂料与涂装, 2016 (07)

¹⁵ 罗瑞, 《铁路客车的防腐涂装工艺探究》, 现代涂装, 2017 (04)

路货车车体涂装工艺基本采用简单的“底涂+面涂”体系，两道涂装的涂层总厚度要求达到 120 μm 以上即可¹⁶。详细工艺流程见下：

图6：轨道客车和机车与货车车体涂装工艺比较

轨道客车和机车



铁路货车

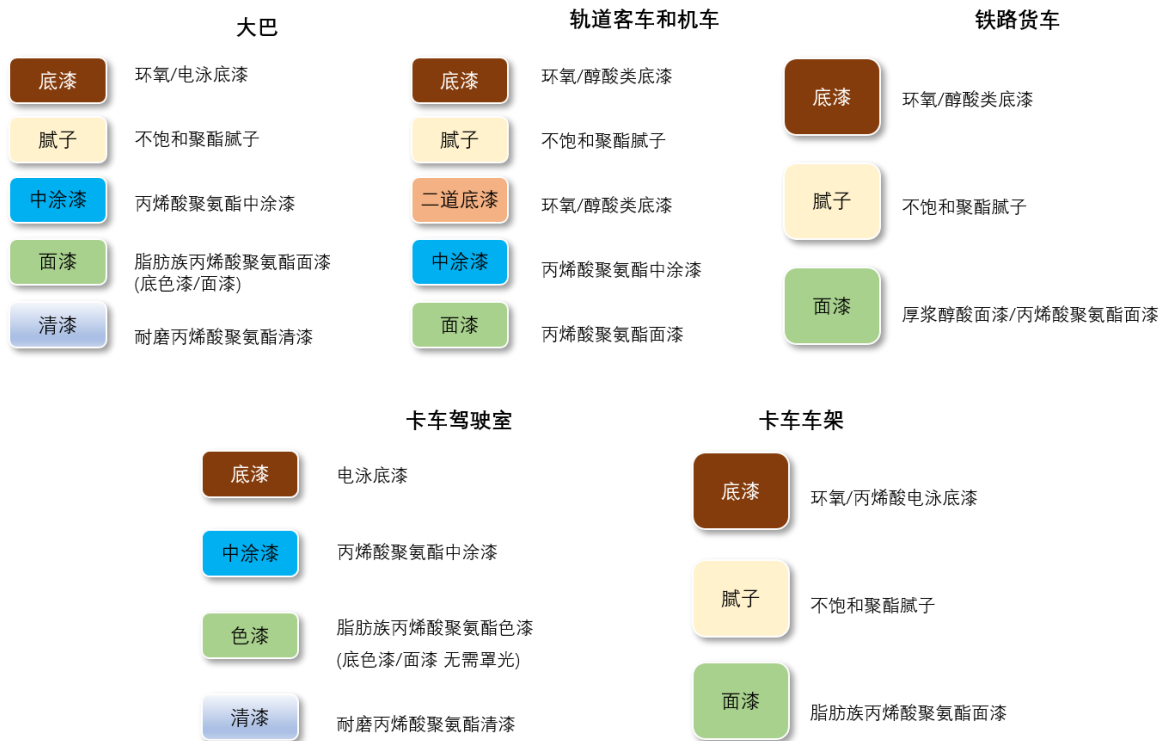


1.2.3. 商用车和轨道车辆的涂料应用

车身涂装大多数还在使用传统的溶剂型中低固体系涂料。按照下面涂层结构来进行介绍。

¹⁶ 张宇，《水性涂料在铁路货车涂装中的应用》，铁道车辆，2018（04）

图 7：商用车和轨道车辆涂料体系¹⁷



底漆

电泳底漆在漆膜附着力、机械性能、耐磨，耐冲击、耐腐蚀性能和保质期方面表现良好，在商用车整车涂装已有大量应用，卡车车架的底漆也基本采用电泳底漆。目前客车规模制造企业基本使用电泳底漆，少数未投入电泳底漆的厂家还采用喷涂双组分环氧底漆。

在轨道车辆领域，双组分环氧底漆是目前的主要应用，仅有部分铁路货车还在使用单组分环氧底漆。此外，由于环氧丙烯酸阴极电泳底漆与环氧树脂电泳底漆相比，具有更优越的耐光性和耐老化性，在客车和轨道车辆车架上也正在逐渐被推广¹⁸。

¹⁷ SAI 公司根据公开资料整理

¹⁸ 魏仁华，《铁路车辆用涂料市场发展现状及展望》，涂料技术与文摘，2011 (03)

中涂漆

中涂漆选料以保证漆层填充，物理机械性能，以及防紫外穿透为主。卡车的中涂为丙烯酸氨基或聚酯氨基体系，国内卡车基本都为免中涂工艺，色漆直接涂装在电泳漆层上，部分涉及出口的车型会喷涂中涂层。

客车和轨道车辆一般选用浅色并可调整颜色的双组分涂料，目前无论是哪种车辆类型大都采用丙烯酸聚氨酯或聚酯氨基体系的中涂漆。

面漆、图案色漆和清漆

卡车高温色漆体系使用丙烯酸氨基面漆和金属闪光底色漆，罩光清漆也为丙烯酸氨基清漆，产品系列都是成熟的溶剂型体系产品，跟国内乘用车所用中低固分产品基本一致。

客车和轨道车辆全面使用丙烯酸聚氨酯或聚酯改性丙烯酸聚氨酯面漆，特别是脂肪族丙烯酸聚氨酯面漆，在抗老化性、粉化性、保光性、保色性、硬度、耐划伤性、装饰性等方面有着优良的性能，仅有部分铁路货车还在使用醇酸树脂；金属闪光漆采用以金属铝粉和丙烯酸及聚酯树脂为主体配制的闪光漆，罩光清漆为丙烯酸聚氨酯清漆。¹⁹

以上介绍的每个涂层目前都有根据其特性发展出的可持续涂料技术和产品。如在底漆层，有电泳漆、水性环氧底漆和高固体分底漆；在中涂层，有水性、高固体分和粉末中涂，在色漆层，有水性和高固体分色漆；在清漆层，有高固体分、粉末和水性清漆。本文第 2 章节会具体介绍可持续涂料的具体应用领域。

1.3. 亟待升级的产业模块：涂装工艺需向环保方向转变

自 2013 年中国开展大气污染防治工作以来，限制 VOCs 排放的政策开始逐步收紧，特别是 2015 年实施的涂料消费税和 VOCs 排污费更是明确了政府要求涂料企业向节能环保型企业转型的决心。在整车涂装领域，早在 2006 年国家环保总局颁布了 HJ/T 293—2006《清洁生产标准 汽车制造业(涂装)》，确定了汽车涂装 VOCs 排放限值。在 2013 年 9 月工信部又发布了 HG/T 4570—2013《汽车用水性涂料》确立了中国汽车用水性涂料的标

¹⁹ 魏仁华，《铁路车辆用涂料市场发展现状及展望》，涂料技术与文摘，2011（03）

准。此后上海、重庆、北京、江苏、山东、河北、广州等地方政府陆续出台了多个汽车整车制造排放标准。这些新的环保法规的实施，为中国确立了严格的汽车涂装的 VOCs 排放标准。甚至某些情况下即使采用最先进的水性紧凑型涂装工艺流程，仍然无法达标，必须增加末端治理措施²⁰。

在 2016 年新修订的《国家危险废物名录》中，涂料生产和使用环节产生危险废物的条目中加入了“不包括水性漆”的括号注释，自此，水性涂料生产和使用过程中产生的废物不被列为危险废物。

随着法规的支持和技术的完善，不仅是水性漆工艺，高固体分工艺在汽车涂装法规上也逐渐被认可。2016 年由中国涂料工业协会牵头，艾仕得涂料系统等涂料生产企业及部分汽车生产企业共同制定了涂料行业第一分高固体分涂料团体标准 T/CNCIA 01001—2016《汽车用高固体分溶剂型涂料》。该标准填补了汽车用高固体分溶剂型涂料领域的空白，并为汽车涂装行业相关政策的制定提供了依据；同年颁布的《涂装行业清洁生产评价指标体系》也体现了对汽车高固体分涂装工艺技术的支持。2016 年 12 月环境保护部办公厅印发执行的《汽车整车制造建设项目环境影响评价文件审批原则》首次明确支持在改扩建项目中采用高固体分工艺。2018 年，由中国涂料工业协会牵头，艾仕得涂料系统等企业参与共同制定了高固体分涂料团体标准 T/CNCIA 01009-2018《商用车辆低 VOCs 低温烘烤涂料标准》，颁布了对低温体系高固分和水性体系的施工固体分、施工状态的 VOCs 含量，并按照涂层和及不同的颜色大类进行了规定，对目前中大客车使用的低温体系工艺升级提供了清晰的指导和参考。

对于商用车制造商来说，尽管在当前的市场大环境下，对可持续技术进行投资和应用还是有较大挑战，但越来越多的商用车制造商开始在可持续涂装工艺上进行尝试，根据 SAI 的抽样市场调查，部分领先企业已采用了可持续绿色涂装解决方案。在轨道车辆领域，中车集团已制定三年绿色涂料推广计划，主要针对环境污染控制，大力推广水性涂料，以铁路货车行业作为推广试点，然后推广到机车、动车。中车在 2018 年开始也编订了轨道车辆用水性涂料的标准，将在 2019 年 4 月发布，后续还将逐步把标

²⁰ 闫福成，《中国汽车涂料工业的“十二五”回顾及“十三五”展望》，中国涂料，2015（12）

准系列化，包括中车用的特种涂料，例如绝缘涂层、防滑涂层等都将在这个标准里面完善²¹。

2. 绿色可持续商用车与轨道车辆涂料的技术应用

2.1. 水性和高固体分涂装技术解决方案

2.1.1. 商用车(不包括中大客车)

由于中大客车可持续涂装技术方案与轨道车辆相似，本章重点介绍货车车体可采用的前沿可持续涂料工艺。

2000-2010 年间在中国建成的汽车涂装线绝大多数采用的是传统中低固体分溶剂型涂料系统，仅有少数生产线按水性涂料涂装系统建设。随着近年新的环保法规和标准的陆续出台，各汽车制造厂纷纷加速建设新涂装厂，关停旧的溶剂型涂装厂，或者将现有溶剂型涂装线进行技术升级改造。在这个过程中，水性 3C1B 工艺等紧凑工艺等开始逐渐被应用。目前商用车涂装采用面漆水性涂装的比例已逐渐上升²²。如卡车厂 2010 年前还鲜有水性涂装体系的应用，2010 年后新建的涂装线大都采用水性涂料，2017 年，卡车用涂料水性化已达到 31.5%²³。

A . 高温水性和高固体分涂装工艺介绍

图8： 可持续涂料工艺比较²⁴

水性3C2B	水性3C1B	高固体分
面漆烘干	面漆烘干	面漆烘干
清漆喷涂	清漆喷涂	清漆喷涂
色漆闪干	色漆闪干	色漆闪干
色漆喷涂	色漆喷涂	色漆喷涂

²¹ 信息来自中车四方股份公司高工赵民在 2018 年 12 月 2 日在广州召开的中国涂料产业峰会创新赋能论坛的嘉宾讲话

²² 中国涂料工业协会，<http://www.chinacoatings.com.cn/focus/2016-12-28/5205.html>

²³ 闫福成，《2017 年度汽车及汽车涂料工艺发展（一）》，中国涂料，2018（3）

²⁴ SAI 公司根据公开资料整理

中涂打磨	热风闪干 或常温闪干	室温闪干或烘烤
中涂烘干		
中涂喷涂	中涂喷涂	中涂喷涂

水性3C2B和3C1B涂装工艺

水性 3C2B 涂装工艺是由溶剂型涂装工艺发展而来，工艺布局与国内常见的溶剂型 3C2B 工艺基本类似，即水性中涂喷涂后进行烘干，色漆喷涂前中涂进行表面检查和微打磨，然后喷涂水性色漆，在色漆喷涂后加入强制闪干以满足色漆脱水率的需求，然后喷涂清漆后流平闪干，进入烘烤烘干。

而 3C1B 实质上是 3C2B 工艺的简化。水性 3C1B 工艺结合了水性涂料的水分在常温下挥发慢的机理，通过水性 B1 的产品优化升级，将原有的水性中涂需要流平闪干+烘烤的工艺，优化为直接常温闪干或热风闪干，省去了传统的中涂烘干工序，即只在电泳底漆烘干后，直接进行 B1 的喷涂，膜厚控制在 10-20um，低于传统 3C2B 中涂，省去中涂烘烤，B1 经过强闪或常温闪干后进行水性色漆 B2 喷涂，色漆喷涂后需要强制闪干满足水性色漆脱水率的需求，然后进行清漆喷涂，流平闪干后进烘烤线烘烤。水性 B1 通常颜色比较简单一般为中灰，深灰即可配套大多数色漆颜色，如有配套珍珠白等 3 工序明亮颜色可配套白色 B1。

高固体分涂装工艺

高固分体系是从引进溶剂型高固体分 3C1B 体系开始的。该体系涂装工艺于 2007 年在北美工厂首次使用。而溶剂型高固体分涂装工艺由传统溶剂型中低固涂装工艺发展而来，就工艺布局方面与传统溶剂型工艺相一致。再由传统高固体分体系进一步研发出来的溶剂型高固体分 3C1B 工艺。具体为一种在电泳涂层后采用湿喷湿方式喷涂中涂、色漆和罩光清漆，中间室温闪干，并一次性烘干的工艺²⁵。对于传统产线的升级，可按原有的工艺布局特点进行选择。溶剂型高固产品对于传统溶剂型的产线升级的优势在于，两者均基于溶剂型产品体系开发。具有对于生产线线体的布局，设备材质，循环系统管路的改造较小，施工工期较短等优势。

²⁵ 黄小钧，《高固体分溶剂型 3C1B 涂装工艺的应用及涂膜外观影响的研究》，中国涂料，2014（04）

高固体分 3C1B 工艺不仅具有低 VOC 的特点，同时还具有低能耗，低 CO₂ 排放的特点。由于取消了中涂烘烤，直接节约了天然气的使用，节约了周转时间，减少了打磨区域，有效降低了电力使用。高固体分溶剂型 3C1B 体系的车间的 CO₂ 排放比其他体系降低约 30%。CO₂ 主要来源于火力发电、天然气和 VOC 燃烧。

高固体分 3C1B 更是由于其属于溶剂型漆的特点，对施工环境的敏感度低。相对水性漆来说，溶剂型高固体分 3C1B 体系没有水性漆那样对喷漆室的温度（25+/-2 度）和湿度（65+/-5%）所提出的苛刻要求，因此在施工环境控制上节约了大量的能源。高固体分 3C1B 工艺 CO₂ 排放只有水性漆的 65%左右。

由于有效地提高了施工固体分，3C1B 涂料体系应用过程中单耗有明显的降低，尤其是机器人喷涂，相对传统涂料，其单耗至少降低 40 - 50%。而且 3C1B 涂料体系不需要现场稀释，减少了稀释剂的使用。同时由于中涂烘房的取消，减少了烘房的过滤棉使用和烘房设备维修和维护所需的等材料 and 人工。取消了中涂打磨工艺，使该工序的人员以及打磨材料都不再需要；中涂和面漆的湿碰湿工艺可以提高涂装的一次合格率，节省了材料和能源，提高了生产效率和产能。

2008 年得到福特汽车公司认可该工艺并逐渐推广到全球其它工厂。2011 年溶剂型高固体分 3C1B 涂装工艺正式引入至中国福特工厂，并陆续推广到其它汽车生产商的中国工厂。

2016 年底，高固体分涂料团体标准：T/CNCIA 01001—2016《汽车用高固体分溶剂型涂料》发布对其中高固分的施工固体分按照涂层及不同的颜色大类进行了规定（见下表），为地方标准的制定做了参考指示。

表3：汽车用高固体分溶剂型中涂漆和面漆产品要求

施工性能	中涂漆	本色面漆	实色底色漆	金属底色漆	罩光清漆
施工固体分%	≥57 (3C1B) ≥60 (3C2B)	≥60 (白色) ≥50 (黑、红) ≥55 (其它)	≥60 (白色) ≥45 (其它)	≥42	≥58

B. 水性涂装和高固体分涂装工艺比较

在环保减排方面，高固体分涂料的施工固体百分比远高于传统的溶剂型，水性涂料施工固体分则跟传统溶剂型涂料类似，其两种方案的 VOCs 排放也基本处在一个水平线上。水性 3C1B (B1B2) 体系通过取消了中涂烘烤、中涂打磨及面漆前的吹擦净工序，直接节约了天然气、压缩空气及打磨吹擦净工位空调运行的电能、汽能等消耗。此外高水含量也提高了安全性，涂装使用工具及设备可用水清洗，溶剂使用较少；同时水性产品由于本身的触变性特点，在循环系统中，停线时可关闭或间歇式开启环系统，节约能耗；高固体分 3C1B 属于溶剂型涂料，不需要预烘干水分。相对水性涂料来说，溶剂型高固体分没有水性涂料需确保温度(25±2) °C、湿度 65%±5%这一较苛刻要求，在施工环境控制上也节约了能源。福特公司有案例显示，在其它条件基本相同的情况下，高固体分工艺的 CO² 排放可比传统工艺约少 34%²⁶。

表 4: 不同涂装技术体系的 VOCs 排放对比²⁷

涂装工艺	VOCs 排放水平(g/m ²)
传统中低固体分溶剂型 3C2B 体系	55~75
水性 3C2B 体系	15~35
水性 3C1B 体系	10~25
高固体分	20~35

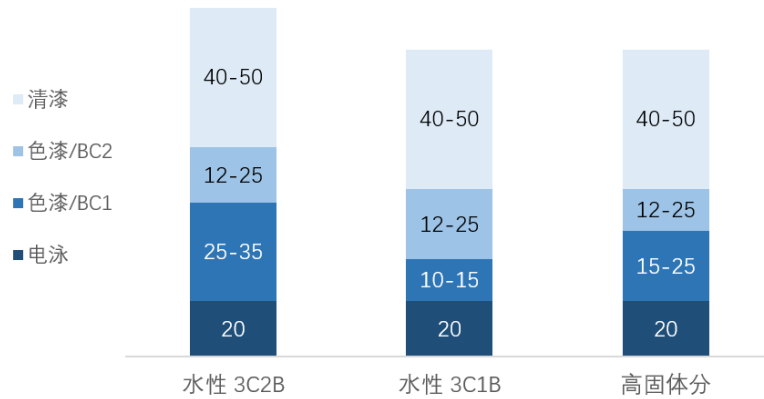
在成本方面，水性/高固体分 3C1B 工艺主要通过膜厚的降低和工序减少来实现。水性/高固体分 3C1B 生产线水性取消了中涂烘烤和中涂打磨，简化了工艺，因此在车间面积以及设备投资可以节约大概 10%~15% 的前期投资费用，并将整个汽车在涂装车间的工艺时间大大缩短；该工艺膜厚减少 15-25μm (见下图)，也降低了涂料单耗及辅料的消耗。

据测算，对于采用传统溶剂型中低固体分涂装工艺的工厂，改为高固体分 3C1B 体系可实现 VOCs 排放标准，并比改为水性工艺在投资和转换时间更低。

²⁶ 和军强，田云，曹英，《汽车涂装高固含和水性工艺的社会责任相关项探讨》，电镀与涂饰，2017 (18)

²⁷ 王志祥，《高固分涂料在汽车涂装中的应用技术》，中国涂料，2017 (11)

图9：不同工艺的膜厚对比，膜厚/ μm (根据不同颜色B1/B2会有区别)



在施工条件方面，水性喷涂工艺对喷房的温湿度和以及溶剂型清漆喷涂之前的水性漆热风闪干要求都很严格。温湿度波动使中涂、色漆涂层中水分/溶剂挥发速度不稳定，对中涂、色漆成膜影响较大。通常水性漆施工过程中，强闪后，湿涂膜中的水分必须充分挥发，湿膜固体分达到 85%以上，才能湿喷下一道涂料，并且防止烘烤时的突沸引起气泡孔等。涂料厂家可通过改造空调设备以改善喷房的恒温恒湿环境，也可通过建立夏季涂料和冬季涂料两套施工体系来解决喷房温湿度波动问题。

表 5：各工艺喷房及烘炉施工参数对比²⁸

工艺		水性 3C2B	水性 3C1B (B1B2)	高固体分 (推荐最优)	
中涂/BC1 喷涂	喷房温度	21-25°C		15-30°C	
	喷房湿度	60-70%		55-85%	
中涂烘干/闪干		160°C * 20 min	60-80°C 5min	室温 7-10min	烘烤
色漆/BC2 喷涂	喷房温度	21-25°C		15-30°C	
	喷房湿度	60-70%		55-75%	
色漆/BC2 闪干		60-80°C * 5 min		室温 5-7min	
清漆喷涂	喷房温度	15-30°C			
	喷房湿度	55-85%			
面漆烘干		140°C * 20 min		140°C * 20 min	

²⁸ 冯日华，《水性 3C2B、3C1B 及 B1B2 免中涂涂装工艺浅析》，2015 年中国汽车工程学会涂装技术分会学术年会论文

C . 水性涂装和高固体分涂装工艺在施工时需注意的问题

水性3C1B涂装工艺

水性 3C1B 工艺体系较 3C2B 相比，最常见的外观弊病为橘皮，具体表现为漆膜表面呈现橘子皮的视觉效果。主要原因一是由于 3C1B 工艺体系的中涂膜厚偏薄，导致中涂层对于底材的填充性变差，二是因为高温烘烤程序的取消对底材填充的平滑性又缺乏了一道保护措施。但这个外观弊病可以在施工时通过以下方面得以避免²⁹：

- *优化底材*：控制钢板和电泳的粗糙度，降低砂纸打磨量和减少电泳漆膜弊病。
- *控制膜厚*：中涂膜厚控制在 16-19 μm 之间并减少色漆膜厚，增加清漆膜厚，控制好色漆的流平状态。在喷涂总量一定的条件下，控制好色漆第一道喷涂与第二道喷涂的比率。
- *控制施工条件和主要施工参数*：需要控制好喷漆室的温湿度及风速、油漆雾化状态、涂料黏度、稀释剂的质量、机器人喷涂参数、漆膜流平时间和油漆更新速度等。

高固体分涂装工艺

常规的 3C1B 高固体分涂装的中涂，色漆的闪干时间较长。因此对洁净度的要求很高，日常维护很困难。需要通过设备改装，改善闪干段的送排风系统。并选用合适精度的过滤袋、过滤棉，增加维护频次，日常严格执行全封闭管理，达到 3C1B 高固体分涂装所要求的洁净度³⁰。

另外，由于 3C1B 高固体分涂装的中涂膜厚度低，在涂装过程中，必须保证车身各部位施工均匀。在烘烤过程中，中涂，色漆，清漆三涂层一次烘烤，同时需满足涂膜的表干及烘烤的升温的要求，否则会导致颜色、外观的不稳定，严重时，出现回渗、失光等涂膜弊病³¹。

对于卡车的高固体体系的涂装，一般采用无中涂体系和 3C2B 的高固体体系：

²⁹ 马力平，吴凤刚，《浅谈汽车涂装 3C1B 工艺体系及其橘皮改善探索》，现代涂料与涂装，2018（2）

³⁰ 黄小钧，《高固体分溶剂型 3C1B 涂装工艺的应用及涂膜外观影响的研究》，中国涂料，2014（04）

³¹ 李鹏、吕正芳、李康，《传统涂装生产线改用 3C1B 工艺的探究》，汽车工艺与材料，2008（08）

无中涂体系：对于性能及外观要求稍低的系列产品，采用无中涂体系，即在电泳车身上直接进行面漆喷涂（单色面漆或底色漆漆+清漆）和烘烤的工艺。

3C2B高固体系：对于高端卡车，可使用3C2B体系，即在电泳上先进行中涂的喷涂和烘烤，然后再进行面漆喷涂（单色面漆或底色漆漆+清漆）和烘烤的工艺。

应用于卡车的以上两种高固工艺与常规的中低固溶剂型生产工艺相似。同时又可以兼顾无中涂体系与3C2B体系的共线生产。如果应用于常规溶剂型生产线的升级，对设备的改造较小。对施工的环境窗口相对较大，施工工艺相对稳定，容易被客户接受。

2.1.2. 轨道车辆与中大型客车

铁路货车自2008年起陆续引进水性漆，其涂装工艺简单，已达到溶剂类产品质量标准，目前推行得最为广泛³²。对于轨道客车(普通客车和高铁动车组)、牵引机车和中大型客车，因其涂装不能承受高温烘烤，一般均采用低温烘干，即在60~80°C烘干或常温自干，水性涂装工艺已逐渐从零部件和内饰件慢慢过渡到车体外表面。如地铁车辆领域，自2010年开始在部分出口车辆逐渐批量使用水性涂装体系。2011年新加坡地铁项目在四方车辆股分公司生产的车辆选用的就是水性环氧底漆及水性聚氨酯中涂和面漆的配套体系。之后四方厂又陆续承接了新加坡151B地铁，并开始在国内地铁车辆上开始使用³³。在大中客车领域，已有整车制造商如北汽福田在批量采用水性涂料。

A. 水性和高固体分涂装工艺介绍

中大客车/轨道客车、机车的可持续涂装工艺与铁路货车车厢差别较大，以下将分别介绍：

图10：轨道车辆与中大型客车水性和高固体系涂装工艺³⁴

中大客车/轨道客车高固体涂装	中大客车/轨道客车水性涂装	铁路货车水性涂装
烘烤干燥/高固分清漆烘烤	烘烤干燥/高固分/水性清漆	面漆烘干
高固分面漆喷涂/底色漆	水性面漆喷涂/底色漆	底面合一水性漆喷涂

³² 张宇，《水性涂料在铁路货车涂装中的应用》，铁道车辆，2018（04）

³³ 高敬民，岳斌，《水性涂料在轨道交通领域中的应用现状及发展趋势》，现代涂装，2016（09）

³⁴ SAI公司根据公开资料整理

烘干打磨	烘干打磨	闪干/检查
高固中涂喷涂	水性中涂喷涂	
烘干 刮涂腻子 烘干打磨	烘干 刮涂腻子 烘干打磨	
高固环氧底漆	水性底漆	一道底面合一水性漆

中大客/轨道客车和机车低温高固体体系涂装

根据2018年高固体分涂料团体标准（T/CNCIA 01009-2018《商用车辆低 VOCs 低温烘烤涂料标准》），各涂层和颜色的性能要求如下：

表 6：溶剂型高固体分涂料性能要求

项目	底漆	中涂漆	本色面漆	面漆	
				底色漆	清漆
在容器中状态	搅拌后均匀无硬块				
原漆固体分%	≥70	≥70	白色≥70 其它颜色≥55	白色≥50 其它颜色商定	≥55
施工固体分%	≥65	≥70	白色≥60 其它颜色≥50	白色≥50 其它颜色商定	≥55
VOCs含量 g/L(施工状态)	≤420	≤420	≤420	≤420	≤420

以艾仕得新发布的艾珑™ Elite (Imron Elite) 系列产品为例，这个系列是低温溶剂型高固体体系，其中的高固分环氧底漆、高固分丙烯酸中涂都跟传统中低固产品涂装工艺一样，只是施工固体分有很大提升，其他方面对环境及设备的需求都变化不大。需要注意高固双组分的混合和可使用时间，高固分体系使用高固低粘的小分子树脂体系，活性较高，与传统溶剂型体系相比，可使用时间较短，如果使用双组分混合系统需要对主剂和固化剂进行充分的混合。高固分清漆相对传统中低固分清漆有较大优势，成膜效率高，干燥过程中涂膜收缩小，外观更丰满，施工合适可取消传统中大客车的常用的两次罩光工艺，即可达到同样的外观效果，从而减少工艺流程，减少烘烤打磨工序，降低能源消耗和人工，节约成本。

艾珑™ Elite 高固体体系的色漆包括面漆和底色漆，均是 2K 聚氨酯体系，配套固化剂使用。溶剂型高固体分体系相同体积的涂料可以施工更大的面积，单位面积涂料的使用量显

著降低，VOC 排放量成倍降低，可以满足 420g/L 的 VOC 含量要求。其施工固体分大大高于传统的中低固 20-25%的水平，跟前面提到的一样，需要注意双组分体系的混合和使用时间。因为施工固体分很高，要求喷涂时有更好的雾化效果，采用交叉的喷涂方式比较容易吸收过喷的漆雾，第一道和第二道漆膜间最好是湿喷湿状态，否则在喷涂行程交界重叠的区域容易产生干喷的漆雾影响最终的外观效果。对于效果颜料的底色漆，其修补过程比较特殊，需要用驳口水先润湿修补的表面然后再用原漆进行修补喷涂，否则效果颜料的定向与前面已固化的漆膜外观会不一致。总之，高固分体系色漆的施工与传统的中低固分色漆产品有一定区别。

由于有效地提高了施工固体分，高固体分涂料体系应用过程中单耗有明显的降低，尤其是机器人喷涂，相对传统涂料，其单耗可降低高达 40-50%。而且高固涂料体系不需要大量稀释，减少了稀释剂的使用。同时由于可以和中涂湿碰湿施工，取消了中涂打磨工艺，使该工序的人员以及打磨材料都不再需要；中涂和面漆的湿碰湿工艺可以提高涂装的一次合格率，节省了材料和能源，提高了生产效率和产能。

铁路货车水性涂装工艺

铁路货车水性涂装施工方法和喷涂设备与既有溶剂型涂料一样。现有喷涂工艺一般为喷涂一遍底漆和一遍面漆，且每遍喷涂后需充分干燥。而水性涂料属单组分自干涂料，底漆、面漆合一，只需喷涂一遍，涂膜厚度达 80 ~ 100 μm 即可。温度低于 20℃时需要在 20 ~ 25℃下烘烤 20 分钟，如超过 20℃无需烘烤³⁵。

用水性漆喷涂时，只需用水来稀释，而且产生的漆渣不存在危险性，对周边环境无影响，还减少了烘干时间和能耗，提高了施工效率，满足节能减排的要求。

中大客/轨道客车和机车水性涂装

以大巴的水性施工方式为例，水性漆的施工建议使用雾化良好的水性漆专用喷枪口径 1.3mm。根据不同涂料的设计调整到施工粘度，根据需要施工 1.5 到 2.5 遍，达到湿膜固含要求后 60-80℃低温烘烤 40-60 分钟。由于水性漆的自干主要靠水的挥发，而水的挥发速度既与温度、湿度和风速有关，所以为保证涂装质量和效率，建议对施工环境进行控制。

³⁵ 张宇,《水性涂料在铁路货车上的运用》, 铁道车辆, 2018 (04)

B. 水性涂装工艺在施工时需注意的问题

水性涂料的施工对涂装前车体的前处理、预涂底漆、涂膜的层间处理、施工环境温度、湿度等要求较高。因此，要减少缺陷，提高水性漆的涂膜质量，必须根据具体的施工环境不同及作业现场的实际情况采取相应的针对性措施。其中，涂装表面的清洁度尤为重要。这就需要涂装前的表面处理除正常的钢材预处理外，还要对表面彻底清理，用砂轮、钢丝刷、砂纸等打磨车体表面，重点清理焊渣、焊缝及烧伤部位，清除车体表面的油污、灰尘等所有的污物。

一般橘皮和流挂是水性涂装最经常出现的问题。由于水分挥发相对溶剂较慢，水性漆漆膜表干比较慢，在干燥过程中湿膜会有向下流坠的趋势，这种要流挂而未流挂的现象最终导致漆膜的橘皮现象。此外，湿膜过厚也会产生流挂。可通过控制湿膜的厚度，避免喷涂过后避免流挂³⁶。

双组分聚氨酯水漆以及双组分水性清漆施工，由于水分挥发慢，针孔现象也是比较常见的问题，选用合适的喷涂设备，控制合适均匀的漆膜厚度可以很大程度上规避针孔问题。

C. 水性涂装技术的涂料选择

轨道客车、机车和大中型客车的水性涂装体系相同，主要为：水性环氧底漆+不饱和聚酯腻子+水性聚氨酯中间漆+水性聚氨酯面漆。根据外观要求的不同，在水性聚氨酯面漆层表面还可再增加水性聚氨酯底色漆和水性聚氨酯清漆。目前部分替代溶剂型涂层更为实际，如采用双组分水性环氧底漆+溶剂型聚氨酯中间层+溶剂型面漆等³⁷。

铁路货车车厢的水性涂装体系主要是单组分环氧底漆和水性丙烯酸。

水性涂料常用的涂料品种和特点如下³⁸：

水溶性醇酸树脂涂料

³⁶ 陈翔宇，《水性工业涂料在轨道客车上的施工工艺》，第四届水性工业涂料会议，<https://www.toodudu.com/article-2071.html>

³⁷ 陈旭，韩玉红，夏海渤，赵民，《水性涂料在轨道车辆上的应用及影响要求》，涂料技术与文摘，2017（03）

³⁸ 张煜，《水性材料在电力机车与城轨车辆上的应用现状及发展趋势》，现代涂料与涂装，2011（07）

水溶性醇酸树脂涂料采用“底+面”配套体系，在实际应用中各方面综合性能都能达到溶剂型涂料，但因其耐候性及耐水性不溶于水性环氧树脂涂料和水性聚氨酯涂料，故有被后者逐渐取代的趋势。

水性环氧树脂涂料

水乳化型环氧树脂具有易固化、粘附力强、耐化学药品、电绝缘性等优异性能。其结构与溶剂型环氧树脂在结构上基本一致，但固化机理与一般聚合物乳液成膜机理有很大区别，并且由于环氧树脂乳液中含有芳香醚键，涂膜经日光照射后易降解断裂，户外耐候性较差，因此水性环氧树脂涂料主要用作防腐底漆。

水性聚氨酯涂料

水性聚氨酯面漆以及水性清漆主要由含羟基的水性多元醇树脂和改性异氰酸酯固化剂制备而成的一种涂料。相对于传统聚氨酯涂料，改性后的水性双组分聚氨酯在耐蚀、耐磨、附着力等方面性能更优异，且具有无毒、无刺激性气味、低 VOCs、不燃、成本低等特点，是目前最为活跃的研究领域之一。选用不同的二异氰酸酯或多异氰酸酯与不同的二元醇或多元醇就可以得到多种品种的聚氨酯树脂。与溶剂型聚氨酯涂料相比，水性聚氨酯涂料具有无刺激性气味、污染小、不燃、成本低等特点，可用水直接稀释，使用方便、易于清洗；水性聚氨酯涂料与多种水性树脂的相容性较好，可以共混使用，以改进性能或降低成本。

水性单组分底色漆涂料主要由含少量羟基的水性聚氨酯分散体和改性丙烯酸乳液制备而成的一种涂料。相对于传统单组分底色漆涂料，改性后的水性单组分底色漆在颜色、遮盖力、附着力等方面性能更优异，且具有无毒、无刺激性气味、低 VOCs、不燃、成本低等特点，且可用水清洗，使用方便，易于清洗，是目前最为活跃的研究领域之一。在底色漆中添加固化剂，可以提高色漆的抗胶带粘结性，从而使分色变得更简单，同时固化剂的加入也可以提高整体漆膜的耐性。

2.2. 可持续涂料技术：粉末涂料

粉末涂料具有明显的可持续涂料的优势。其在整个喷涂过程中，散落的粉末涂料可以重新使用，无溶剂也无废水废渣废气排放，同时不需要用化学药剂和漆雾去除系统去除过

喷漆雾，可以长时间保持烘房的清洁度。粉末罩光涂料具有与溶剂型涂料同等的涂膜外观，现有涂装设备稍做改造即可投入使用，综合能耗及设备投资低³⁹。由于粉末涂料不能象液态涂料那样可以快速换色，目前汽车用粉末涂料只是单色漆系列，其应用主要集中在汽车零部件方面，如汽车发动机、汽车底盘、车轮、滤清器、操纵杆、反光镜、雨刮器和喇叭等。江淮汽车于2015年在轻型车车厢上国内首创采用粉末涂料作为面漆（CED底漆），烘干温度为140℃，不提高综合成本，性能超越了溶剂型涂料⁴⁰。

随着粉末涂料新产品及新技术的开发，汽车粉末涂料技术已逐渐提升到一个新水平。在汽车轮毂上，“轮毂粉”因其更好的耐划伤性、耐石击性以及表面性能已逐渐替代溶剂型底漆。传统的汽车轮毂用水电镀达到镀铬效果，水电镀一般的镀层材质采用“六价铬”，具有严重环境污染问题。为了解决污染问题而使用真空电镀工艺，即“底粉+溶剂型底漆+溶剂型介质漆+电镀层+清漆”工艺。而应用“轮毂专用介质粉”可完美替代“溶剂型底漆+溶剂型介质漆”。随着环保要求越来越严和粉末涂料技术的不断提高，未来汽车领域会有更多的粉末涂装案例⁴¹。

3. 结语与展望

商用车和轨道车辆产业的可持续发展不仅意味着生产过程的可持续性，也意味着车辆产品本身能够更可持续。商用车和轨道车辆可持续涂料实现可持续性的途径是通过保护其所涂覆的材料，使其免受侵蚀，最大程度延长产品的使用寿命，同时在涂料生产和使用的过程都能满足环保需求，并进一步降低加工成本。

随着对涂料品质和环保要求的逐渐提高，工业机器人和智能化生产的普及以及喷涂工艺水平的提高，水性、高固体分和粉末涂料技术无疑是未来汽车涂料的重点发展方向，在商用车和轨道车辆市场的应用将不断地提升。我们相信会有越来越多有远见的车辆生产商与涂装材料生产企业和相关研究设计机构联合行动，推进先进的可持续涂料技术在商用

³⁹ 张贵智，王秀锦，徐国庆等，《浅谈环保涂料在汽车涂装中的应用》，上海涂料，2015（03）

⁴⁰ 皮沁，杨绪，邢汶平，李金，罗川，《车厢“漆改粉”粉末涂层质量控制要点》，涂层与防护，2019（01）

⁴¹ 师立功，《未来环保涂料市场粉末涂料能否异军突起笑傲江湖》，涂料工业，2018（05）

车和轨道车辆的应用和创新，不断激励开发新技术、新工艺和新涂装材料，通过涂装升级，促进商用车和轨道车辆的产业升级。