离子风与非接触式接地检测技术在汽车保险杠涂装中的协同应用

刘哲均 赵燕武 胡乾锋 陈浩

（岚图汽车科技股份有限公司，武汉 430056）

摘要：聚丙烯（PP）类树脂汽车保险杠因其高绝缘性极易积累静电，易导致颗粒物通过库伦力牢固吸附于表面，在静电喷涂过程中若接地性能不良，将造成安全隐患并降低涂装效率。以汽车保险杠涂装全流程为研究对象，分析了保险杠材料的静电积累机理与颗粒受力特性，提出了“离子风预处理+离子风吹扫”协同除静电除尘工艺方案，并说明了非接触式静电接地检测系统的工作原理、调试标定方法及工艺应用流程。实践结果表明，离子风综合应用方案可显著降低出炉颗粒数，接地检测系统可有效消除静电喷涂安全隐患，两者的有机结合使保险杠涂装质量和安全性均得到全面提升，实现了降本增效的生产目标。

关键词：离子风 保险杠涂装 接地检测 颗粒控制 静电消除

中图分类号：U466 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260242

Synergistic Application of Ion Wind and Non-Contact Grounding Detection Technology in Automotive Bumper Coating

Liu Zhejun, Zhao Yanwu, Hu Qianfeng, Chen Hao

(Voyah Automotive Technology Co., Ltd., Wuhan 430056)

Abstract: Polypropylene (PP) resin automotive bumpers tend to accumulate static electricity due to their high insulation, which causes particles to firmly adsorb on the surface through Coulomb force, and also leads to safety hazards and reduced coating efficiency when grounding performance is poor during electrostatic spraying. Taking the full bumper coating process as the research object, this paper systematically analyzes the static electricity accumulation mechanism and particle force characteristics of bumper materials, proposes a collaborative destaticization and dust removal process scheme that combines ionized-air pre-treatment with ionized-air purgingThe working principle, calibration method, and process implementation procedure of a non-contact electrostatic grounding detection system are also described in detail. Practical results show that the integrated ionized air application scheme can significantly reduce the number of particles after baking, and the grounding detection system can effectively eliminate the safety hazards of electrostatic spraying. The organic combination of the 2 comprehensively improves both the quality and safety of bumper coating, achieving the production goal of cost reduction and efficiency improvement.

Key words: Ionized air, Bumper coating, Grounding detection, Particle control, Static elimination

1 前言

汽车保险杠在整车涂装体系中与车身同等重要，其涂层需满足严格的外观性能、力学性能和化学性能要求。在众多品质指标中，涂膜颗粒数量与尺寸往往是最严苛的考量标准，直接影响产品合格率和用户感知质量。

现代保险杠普遍采用改性聚丙烯（Polypropylene，PP）复合材料制造。聚丙烯属于典型的高绝缘高分子材料，其体积电阻率高达1×10^{16}~1×10^{18} Ω·cm，

作者简介：刘哲均（1988—），男，工程师，学士学位，研究方向为设备维修技术。

参考文献引用格式：

刘哲均，赵燕武，胡乾锋，等. 离子风与非接触式接地检测技术在汽车保险杠涂装中的协同应用[J]. 汽车工艺与材料，2026(10): 65-72.

LIU Z J, ZHAO Y W, HU Q F, et al. Synergistic Application of Ion Wind and Non-Contact Grounding Detection Technology in Automotive Bumper Coating[J]. Automobile Technology & Material, 2026(10): 65-72.

极易在摩擦、剥离或感应作用下积累静电荷。空气中的灰尘和粒子大多数带有正电荷或负电荷，这些带电粒子在库伦力作用下被紧紧吸附到带相反电荷的保险杠表面。

静电效应给涂装工艺带来2个问题：一是在喷涂前处理阶段，静电荷形成库伦力，使空气中漂浮的细微颗粒牢固吸附于保险杠表面，常规压缩空气吹扫难以有效去除；二是在静电喷涂阶段，当保险杠挂具接地性能不良时，静电荷将以电容形式积聚，存在瞬间放电点燃可燃漆雾的重大安全风险，同时直接影响涂料在工件表面的沉积效率和均匀性。

针对上述问题，本文从保险杠涂装全流程出发，从理论与实践2个层面进行研究：一是基于静电消除和颗粒动力学理论，提出并验证以离子风为核心的涂装前处理方案；二是引入非接触式静电接地检测技术，对静电喷涂前保险杠的接地状态进行在线监控，从根本上保障喷涂安全和涂装品质。通过二者的有机结合，形成完整的静电管控体系。

2 保险杠材料特性与静电积累机理

2.1 改性PP复合材料的基本特性

目前，汽车保险杠最常用的材料是改性PP复合材料。纯PP材料具有无毒、无味、密度低（约0.91 g/cm^3）、电绝缘性能良好、力学性能优异、延伸性与抗弯曲疲劳性好、耐酸碱腐蚀等优点，但其耐低温冲击性能较差，且易老化，因此不直接用于制造汽车保险杠。实际生产中多以PP为主材，添加适量橡胶增韧剂、无机填料等经混炼制成改性PP复合材料，该材料不仅机械性能优良，而且成型性好、易于加工，能满足汽车保险杠严苛的使用要求。

从材料学角度看，改性PP复合材料的微观结构决定了其静电特性。PP分子链由非极性的碳氢基团构成，缺乏永久偶极矩，分子间仅存在弱范德华力，电荷载流子（自由电子和离子）极为稀少，这是其高绝缘性的根本原因。加入三元乙丙橡胶（Ethylene Propylene Diene Monomer，EPDM）和滑石粉后，材料的表面状态趋于复杂，但绝缘性本质并未改变。

2.2 静电积累物理机制

聚丙烯体积电阻率通常为1×10^{16}~1×10^{18} Ω·cm，表面电阻率为1×10^{16}~1×10^{17} Ω。由于电阻率较高，在保险杠经历注塑脱模、转运、输送等工序时，由于接触-分离摩擦效应，材料表面不可避免地产生静电荷积累。

根据接触起电理论，2种不同材料接触时，功函数较小的材料会向功函数较大的材料转移电子，接触分离后形成静电荷分离。对于PP类材料，在摩擦带电序列中位于负电端，摩擦后倾向于携带负电荷。由于其具有极高的电阻率，产生的静电荷泄漏极慢，时间常数$\tau=\varepsilon\rho$（ε为材料介电常数，ρ为电阻率）可达数百秒甚至更长，这意味着静电荷将长时间稳定积聚于表面[1]。

通过系统测量多套保险杠素材表面，其静电电位分布呈现以下规律：正负电荷区域交替分布；静电压绝对值呈现中间高、两端低的趋势，最大约为5 000 V；在注塑成型后24 h内，静电压局部峰值可达数千伏特。这一量级的静电电位对颗粒物吸附具有显著的库伦力效应，在尘埃粒径为0.05~0.1 mm的范围内，静电结合力可能超过气流剪切力数倍，成为阻碍吹扫除尘的主要因素。

3 保险杠涂装工艺及颗粒控制体系

3.1 保险杠涂装工艺流程

本文中的保险杠涂装线采用水性3C1B喷涂工艺，如图1所示。该工艺在传统溶剂型3涂1烘（3 Coats 1 Bake）工艺基础上，结合水性底漆、水性色漆中水分在常温下挥发缓慢的特性，将水性底漆、水性色漆喷涂后的常温流平工序调整为60~80 ℃的强制闪干流平，以满足水性涂料脱水率的工艺要求，降低下道工序湿碰湿喷涂时的漆膜缺陷风险。

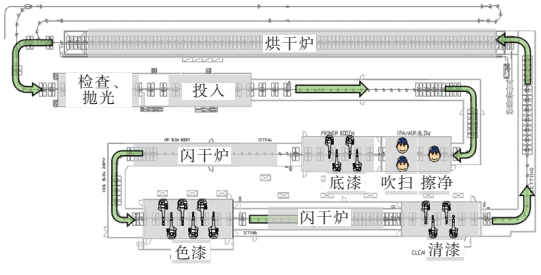


图1 保险杠涂装工艺流程

涂装线的主要工序依次为:素材上线、吹扫+擦拭(擦净室)、水性底漆喷涂、闪干、水性色漆喷涂、闪干、清漆喷涂、烘烤、出炉检查、下线。其中,擦净室的吹扫擦拭工序是颗粒控制的最后一道防线,对最终涂装品质具有决定性影响。

3.2　传统人工吹扫工艺

传统保险杠涂装工艺中,由人工使用压缩空气进行逐行吹扫,边吹扫边使用防静电无尘布擦拭。吹扫工序从格栅中间开始,再对侧面大面积部位进行吹扫,最后对灯孔等凹陷部位进行针对性吹扫,如图2所示。

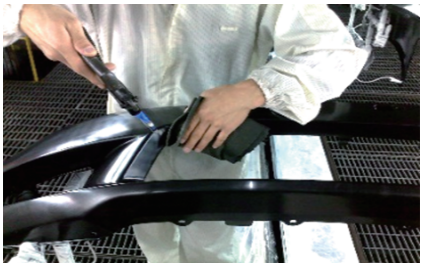


图2　传统人工吹扫作业示意

传统人工吹扫存在以下局限性:首先,人工操作一致性差,不同操作员对凹陷区域和边角位置的处理深度参差不齐;其次,使用普通压缩空气,不具备消除静电的功能,无法有效去除因静电吸附的细微颗粒,如图3所示;如再者,人员在喷涂区域频繁操作,自身携带的纤维和尘埃构成二次污染风险。

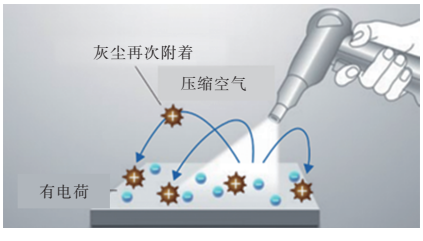


图3　压缩空气吹扫过程中再次附着灰尘

3.3　涂装颗粒的产生机制与分类

涂装生产中,颗粒的产生贯穿于整个生产过程,其来源主要可归纳为以下4类。

a. 环境污染源:供风系统过滤失效导致洁净度下降;喷房、晾干间壁板及格栅附着颗粒;格栅堵塞导致送风不畅,湿漆雾在室内沉降不良发生反弹,形成二次颗粒污染。

b. 涂料自身缺陷:涂料在储存或调配过程中,金属铝粉颗粒沉淀结块或涂料表层结皮,这些絮状物经输调漆系统进入喷枪后涂覆于工件表面,形成颗粒缺陷。

c. 操作人员携带:喷涂和检查人员在进入喷漆室前若未通过风淋室净身,所携带的纤维、尘埃会直接落于工件表面或湿膜表面,形成颗粒缺陷。

d. 工件表面静电吸附:保险杠素材在转运、输送过程中不可避免地积累静电,持续吸附环境中的漂浮颗粒。若前处理吹扫工位不能有效消除静电及颗粒,将直接影响后续涂装品质。这是本文研究的核心问题。

4　颗粒运动与受力理论分析

4.1　颗粒受力模型

为深入分析保险杠表面颗粒的去除机理,对沉降于工件表面的颗粒建立如图4所示的力学模型[2],基本假设如下:**a.** 颗粒不改变局部气流速度场;**b.** 颗粒为球形或以“当量直径”表示;**c.** 各颗粒视为独立个体,忽略颗粒间的相互影响;**d.** 颗粒附近气流速度为V_a;**e.** 工件工作面与水平面的夹角为θ。

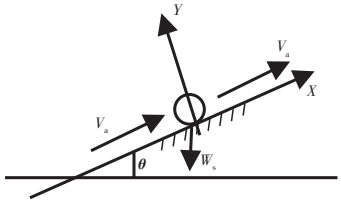


图4　颗粒受力运动示意

在上述假设条件下,作用于颗粒的力由以下4个部分组成:颗粒自重W_s;气流速度V_a引起的气动推力R;颗粒与工件表面之间的切向粘着力F_τ;工件表面对颗粒的法向支持力N(包含法向粘着分量)。作用在颗粒上的受力关系如图5所示。

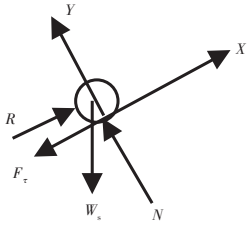


图5　颗粒受力分析

4.2　切向粘着力的组成及分析

颗粒与保险杠表面之间的切向粘着力F_τ一般可表示为各分力之和:

$$F_\tau = \left(F_v + F_e + F_b + W_s \cos\theta\right) f \qquad (1)$$

式中：$F_v=(H/12r_0^2)d_s$ 为颗粒表面与零件表面分子间的相互作用引起的化学结合力，即范德华力（H 为 Hamaker 常数，r_0 为粒子与零件工作面间的分子距离，d_s 为颗粒直径）；$F_e=q(q/d_s)^2$ 为静电结合力（q 为粒子带电量）；$F_b=\pi\cdot\sigma\cdot d_s\cdot c_1$ 为水对颗粒产生的表面张力（σ 为水的表面张力系数，c_1 为无量纲常数）；f 为滑动摩擦因数。

上述各分力对颗粒运动的影响随粒径变化而呈现显著差异，这是制定有效除尘策略的理论依据。

当颗粒直径较小（d_s< 0.1 mm）时，化学结合力 F_v 与颗粒直径 d_s 成正比，而静电结合力 F_e 与颗粒电荷量平方成正比、与粒直径成反比，二者相对较大，对细小颗粒的吸附起主导作用；随着粒径增大（d_s>0.1 mm），水的表面张力 F_b 及颗粒自重 W_s 逐渐增大，对颗粒运动的影响亦逐渐增加，重力和毛细力成为大粒径颗粒的主导作用力。

保险杠表面颗粒直径主要集中在 0.05~0.1 mm 范围内，在这一尺寸范围的颗粒中，静电结合力与化学结合力是主要的吸附力[3]。因此，去除保险杠表面细微颗粒的关键在于：一方面消除静电结合力，另一方面提供足够大的气动推力以克服范德华力。

4.3 气流临界吹扫速度分析

颗粒在气流作用下从静止进入运动状态需满足临界条件：气流对颗粒的推力 R 不小于切向粘着力 F_τ。在常规吹扫条件（气流速度 V_a 约为 25 m/s）下，当气流沿工件表面水平吹扫时，通常只能在气流直接冲击的位置形成有效推力，而对于凹陷区域（格栅等），气流折转后的实际作用速度往往大幅衰减，难以达到所需的临界速度，

传统压缩空气吹扫（无静电消除）时，颗粒所受静电结合力 F_e 依然存在，要克服 F_e 需更高的气流速度，且即便颗粒被暂时吹离，由于工件仍携带静电，颗粒可能被重新吸附至表面，这正是常规吹扫效果局限性的理论根源。

引入离子风消除表面静电后，F_e 趋近于 0，颗粒的吸附力大幅降低，临界吹扫速度也相应降低，相同气流速度下的除尘效率显著提升。以 0.05 mm 粒径颗粒为例，消除静电后的临界吹扫速度可从约 25 m/s 降低至约 18 m/s，降幅约 28%，在实际喷吹参数不变的情况下颗粒去除率大幅提升。

5 离子风技术原理及保险杠涂装前处理应用

5.1 离子风消静电原理

离子风（Ionized Air）是利用电晕放电原理产生正负离子气流，以中和带电体表面静电的技术。其核心器件为电晕放电式离子发生器（Ion Generator），放电针与接地极之间施加超高压交变或直流电场，在针端形成高度不均匀电场（场强可达 1×10^7 V/m），当场强超过空气击穿阈值（约 3×10^6 V/m）时，附近空气分子发生电离，产生大量正负离子对，如图 6 所示。

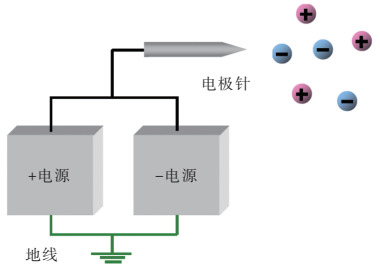


图 6 电晕放电离子发生器工作原理

在压缩空气携带下，正负离子随气流输送至保险杠表面附近，实现电荷中和。当工件表面带负电时，气流中的正离子受到吸引并趋近工件表面，负电荷被中和；当工件表面带正电时，气流中的负离子被吸引趋近表面，正电荷被中和，如图 7 所示。这一“异性相吸、同性相斥”的电荷中和机制，使工件表面静电位趋近于 0（残余电压通常低于 100 V），从而有效消除静电结合力 F_e，为后续的气流吹扫去除颗粒创造了有利条件。



图 7 离子风消除表面静电原理

在设备选型方面，根据前述保险杠表面静电电压测量结果（最大约 5 000 V），离子发生器应选择额定发生电压大于 5 kV 的型号，以确保在最大静电荷情况下仍能实现充分中和。图 8 所示为本

系统所采用的微风除静电器。



图8　微风除静电器

5.2　离子风涂装前处理方案设计

5.2.1　空间离子风预处理

在保险杠进入擦净室之前,于擦净室入口段设置空间型离子风预处理装置,该装置由2套微风型除静电棒(Ion Bar)组成,安装于工件两侧,以适当角度向工件倾斜照射,形成覆盖保险杠整体轮廓的离子化区域。图9所示为空间离子预处理装置的典型布局及覆盖范围示意。

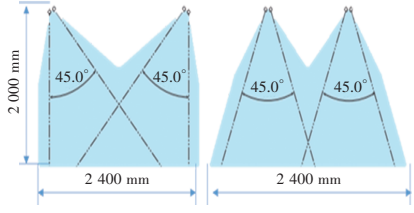


图9　空间离子风预处理装置布局及覆盖范围

空间离子风预处理的作用机制分为2个层面:一是对通过该区域的保险杠进行全面预中和,将其表面静电电位从千伏量级降低至百伏以下,消除颗粒吸附的静电结合力基础;二是对擦净室内的空间进行离子化处理,降低室内空间及操作人员、工具表面的静电积累,减少空间静电引起的颗粒二次吸附。图10所示为空间离子预处理装置安装效果。

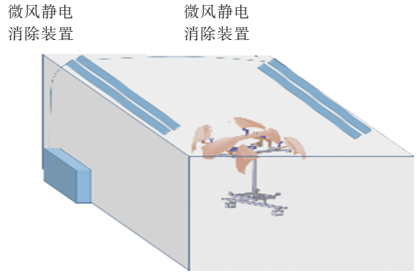


图10　空间离子预处理装置安装效果

5.2.2　仿形离子风精准吹扫

在擦净室内的吹扫工位,设计并部署了一套仿型离子风吹扫系统。该系统在保险杠的路线上设置了1套三面吹扫装置,附带有离子发生器,离子发生器内集成了电晕放电离子发生器和压缩空气喷嘴阵列,能够在近距离(约50~200 mm)同步向工件表面输出离子化气流,如图11所示。

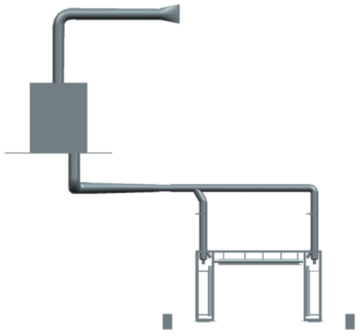


图11　仿形离子风吹扫设计

离子风吹扫系统采用类似“逐行扫描”的方式遍历保险杠各区域,包括主体大面、格栅区域、灯孔凹陷区及边缘倒角区域,如图12所示。

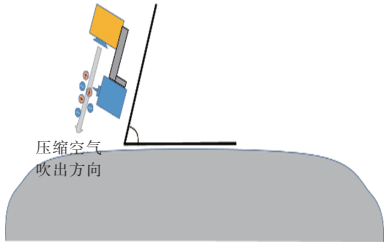


图12　离子风吹扫方向示意

相较于传统人工吹扫,离子风吹扫的优势有:离子发生器的介入有效消除了工件表面残余静电,使细微颗粒失去静电结合力,临界吹扫速度大幅降低,除尘效率提高;精确角度控制保证了吹扫覆盖的一致性和重复性,避免了人工操作带来的遗漏;以机器代替人工,减少了操作人员在喷涂区域的在场时间,降低了人为颗粒污染的风险;节省了人工成本,实现了降本增效。

6　静电喷涂工艺与非接触式接地检测技术

6.1　静电喷涂的原理与接地要求

保险杠经过离子风除静电除尘处理后进入静电喷涂工序。静电喷涂(Electrostatic Spraying)是利用高压静电场使涂料粒子携带电荷,在电场库伦力的作用下定向运动并沉积于工件表面的涂装技术。相比传统空气喷涂(涂料传递效率仅30%~35%),静电喷涂的涂料传递效率可达50%以上,减

少了溶剂挥发量和漆雾污染。

在本涂装工艺中，色漆和清漆喷涂均采用静电喷涂方式，旋转雾化器（Rotary Atomizer）向涂料粒子施加约-60 kV 的高压，使粒子携带负电荷，在工件与旋转雾化器之间形成高压电场，带负电的漆雾粒子在电场力作用下高效吸附至工件表面，形成均匀致密的涂膜。

静电喷涂对工件接地有严格要求。工件必须通过导电挂具可靠接地（接地电阻通常要求不超过 1 MΩ），以维持工件的电位为 0（或接近地电位），从而在涂料粒子与工件之间建立有效静电电位差。若工件接地不良，将造成以下影响。

a. 涂装效率下降：工件因积累负电荷与带负电漆雾产生排斥力，涂料上漆率降低，涂膜厚度不均，出现流挂、漏涂等缺陷；

b. 安全隐患：在高压静电场中，未接地工件的电容储能 $Q=CU$（C 为工件电容，U 为感应电位）。当工件接近接地体时，可能发生瞬间放电，产生的电火花足以点燃喷涂区域内悬浮的可燃漆雾（溶剂型清漆的闪点通常低于 23 ℃），引发火灾或爆炸事故[1]。

因此，在每台保险杠进入静电喷涂工位之前，须对其接地状态进行在线监测，是静电喷涂工艺安全生产的关键保障措施。

6.2 非接触式接地检测仪的工作原理

接地检测仪分为接触式和非接触式。接触式检测仪需使用探针与工件表面直接接触，操作繁琐、效率低，且在高压静电喷涂区域存在安全风险；非接触式接地检测仪通过对工件施加可控高压并检测其衰减特性以判断接地状态，安全、高效，适合在线全检。

非接触式接地检测仪的工作原理如图 13 所示。由高电压发生器产生受控高电压（如 -20 kV），通过绝缘电缆连接至带电电极（Charging Electrode）；带电电极采用压缩空气将高压电荷喷射至保险杠表面特定区域，使该区域积累一定量的负电荷；与此同时，采用静电检测探头对同一区域进行非接触式电压测量，将检测到的静电电压经信号处理后在显示屏上实时显示。

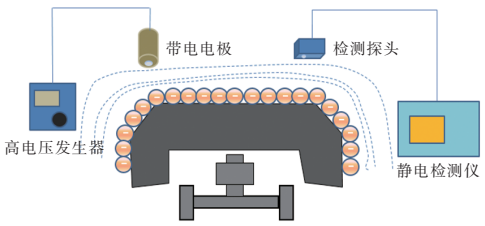


图 13 非接触式接地检测系统工作原理

接地性能的判断依据如下：若保险杠通过导电挂具接地良好，施加的高压电荷会迅速通过挂具泄漏至大地，工件表面积累的静电电压将保持较低值（接近 0 V）；若工件接地不良（导电路径断开或接触电阻过大），电荷无法稳定泄漏，工件表面将维持高静电电压（负电位，绝对值大于设定阈值），触发报警信号。

6.3 接地检测系统的组成与设备选型

完整的非接触式接地检测系统由 3 个功能模块组成：

a. 高压放电模块：核心部件为高电压发生器（本文选用春日 KTK-125，放电电压等级可达-20 kV），负责向保险杠表面施加定量高压电荷，作为接地性能检测的激励源。

b. 静电检测模块：核心部件为静电检测仪（本文选用春日 KSD-0109，具备本质安全防爆认证），检测范围为-19.9~19.9 kV，探头以非接触方式测量工件表面静电电压并输出报警信号。

c. 控制模块：系统控制中心，负责协调高压放电时序与检测采样时序，并与输送链控制系统及机器人控制系统进行数据交互。当检测结果正常时，系统发出放行信号，输送链和喷涂机器人正常工作；当检测报警时，控制模块向输送链和机器人发出停止指令，并启动异常处理流程。

6.4 接地检测系统工艺参数与工作流程

6.4.1 关键工艺参数

在实际应用中，非接触式接地检测系统需严格控制以下工艺参数以确保检测准确性和安全性。

a. 带电电极与检测探头之间的安全距离不小于 150 mm，防止高压电场对检测探头的干扰。

b. 带电电极与工件之间的工作距离为70~100 mm，距离过近可能导致电荷放电不均，过远则充电效率下降。

c. 检测探头与工件之间的检测距离约100 mm,在此距离下,KSD-0109的有效检测范围为-19.9~19.9 kV,灵敏度和抗干扰性能最优[4]。

6.4.2　标准工作流程

接地检测系统的标准工作流程主要包括以下环节:保险杠随输送链到达检测位、控制模块触发高压放电、带电电极向工件施加高压、静电检测探头采样工件表面电压、判断是否超出报警阈值、根据判断结果给出放行或报警指令。

当工件表面静电电压低于设定阈值(接地良好)时,系统输出放行信号,输送链正常运行,机器人按程序进行喷涂作业。

当检测到接地不良(报警)时,控制模块发出停止指令,机器人停止运行,输送链暂停;机器人操作员检查保险杠静电接地夹是否正常,若接地夹虚接,处理后手动复检,若复检通过则恢复运行,若复检仍报警则按接地异常处理;若确认接地夹正常但仍报警,说明台车接地回路存在异常,需将该台车切出输送链,检查修复。

7　应用与效果验证

7.1　完整静电管控工艺流程

将离子风技术与非接触式接地检测技术相结合,形成了保险杠涂装全流程静电管控体系。以工件从素材上线至静电喷涂完成为时序,完整的静电管控工艺流程如下。

a. 阶段1(静电预消除):保险杠素材上线后,在进入擦净室前通过空间离子风预处理装置的照射区域,工件表面静电电位被降至±500 V以下。

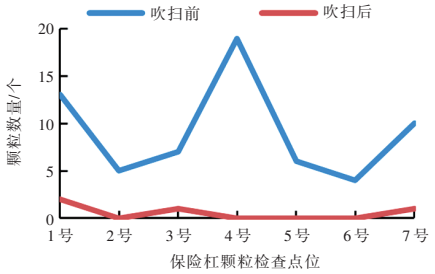
b. 阶段2(精准吹扫除尘):工件进入擦净室吹扫工位,离子风刀头按设定角度对工件进行全覆盖扫描式吹扫。离子化气流在消除残余静电的同时,将工件表面颗粒物高效清除,工件表面残余静电降至±100 V以下,颗粒数量显著减少。

c. 阶段3(接地检测):吹扫完成后,工件随输送链运行至接地检测工位,非接触式接地检测系统对每台工件进行检测。接地性能合格的工件进入喷涂工位,不合格工件触发报警并暂停,按异常处理流程处置。

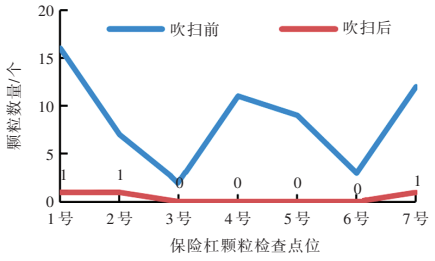
d. 阶段4(静电喷涂):通过接地检测的工件进入静电喷涂工位,旋转雾化器在-60 kV高压下雾化涂料,带电涂料粒子高效沉积于接地良好的工件表面,形成均匀涂膜。

7.2　离子风技术应用效果

为定量评估离子风技术的除尘效果,对常规人工压缩空气吹扫与离子风吹扫方案分别进行跟踪测量,各取10套出炉保险杠(数据已取整处理),从保险杠左侧到右侧依次编号(1~7号位),统计涂装后工件表面颗粒数,结果如图14所示。



(a)常规人工吹扫



(b)离子风吹扫

图14　人工吹扫与离子风吹扫效果对比

测量结果表明:常规吹扫工艺的平均颗粒数约为4个/件,离子风吹扫工艺的平均颗粒数降低至3个/件,颗粒减少率约25%(具体数值随现场条件有所差异)。尤其对于0.05~0.1 mm粒径范围的细微颗粒,离子风吹扫的清除率提升显著,这与前述颗粒受力理论分析的预测结果高度吻合,即消除静电结合力后,细微颗粒的主要吸附力大幅减弱,气流吹扫效率提升。

此外,引入仿形离子风自动吹扫后,每班次可减少1名操作人员,工序节拍时间从约60 s缩短至约45 s,在提升效率的同时有效降低了人为因素引入颗粒的风险。

7.3　接地检测系统应用效果

接地检测系统投入运行后,在以下方面取得了显著成效。

a. 安全保障:系统实现了对保险杠的100%检

测，彻底消除了因接地不良工件进入静电喷涂区域可能引发的火灾或爆炸的安全隐患，将静电喷涂安全风险降至可接受水平。

b. 品质提升：通过对接地不良台车的及时识别和处置，有效避免了接地不良导致的涂料分布不均缺陷（流挂、漏涂等）。

c. 设备预防性维护：系统通过对接地报警频率和规律的统计分析，可识别出导电性能下降的台车，为台车接地回路的预防性维护提供数据支撑，避免了因台车批量失效导致的大范围质量事故。

8 结束语

本文针对保险杠涂装全流程静电管控，将离子风技术与非接触式接地检测技术有机融合，从理论分析和工程实践角度进行研究，得出以下结论。

a. 改性PP保险杠因高绝缘性易积累静电（表面电位可达5 000 V），静电结合力是0.05~0.1 mm粒径细微颗粒吸附的主导因素。通过消除静电结合力，可以在不提高气流速度的条件下显著提升除尘效率。

b. 空间离子风预处理+离子风吹扫的双阶段处理方案，通过电晕放电产生的正负离子对工件表面静电进行阶梯式消除，形成协同增效的除静电除颗粒体系，出炉颗粒数相较常规吹扫方案降低25%以上，同时实现了降本增效和减少人为污染的目标。

c. 非接触式接地检测技术实现了对保险杠接地性能的100%检测，有效消除了静电喷涂的安全隐患，同时提升了涂装品质，其系统调试标定方法和异常处置流程具有良好的工程可移植性。

d. 本文建立的涂装前静电管控+喷涂中接地保障综合体系将静电危害管控贯穿于保险杠涂装工艺的全链条。

后续研究方向有：一是开展不同环境温湿度条件下离子风消除静电效果的研究，建立温湿度修正模型；二是探索将接地检测数据与制造执行系统集成，实现台车接地性能的全生命周期追溯管理；三是研究纳米级颗粒的静电吸附机理与新型消除手段，进一步提升涂装品质。

参考文献：

[1] 刘尚合. 静电理论与防护[M]. 北京：兵器工业出版社，1999.

[2] 李兴华，徐妙新. 表面沉降颗粒的吹扫速度分析[J]. 机电设备，1996(5)：28-31+45.

[3] COOPER D W，WOLFE H L，YEH J T C，et al. Surface Cleaning by Electrostatic Removal of Particles[J]. Aerosol Science and Technology，1990，13(1)：116-123.

[4] 魏明，叶伟，魏光辉. 非接触式静电电压表校验研究[J]. 仪表技术与传感器，2002(12)：46-48.

AT&M