一步法与两步法前处理磷化对成本和车身外观质量的影响分析

宋绍朋

（北京奔驰汽车有限公司，北京 100176）

摘要：汽车涂装前处理工艺中，一步法磷化适用于铝含量不高于40%的车身，两步法磷化（磷化+钝化）可处理高铝或全铝车身，对比了2种磷化方法的工艺特点、耗材消耗与车身外观质量。案例分析显示，在铝含量较低时（本案例中铝含量低于30%），两步法单车耗材量比一步法高约20%，且电泳后铝外覆盖件表面易出现条纹和麻坑缺陷。通过优化磷化参数和喷淋工艺可缓解条纹问题，调整铝材电火花毛化处理（EDT）工艺可减少麻坑。研究表明，对于铝含量较低的生产线，一步法在经济性和质量方面更具优势。

关键词：前处理　磷化　钝化　磷化条纹　EDT鳞片

中图分类号：TQ639　　**文献标志码：**B　　**DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250277

Comparative Analysis of One-Step and Two-Step Phosphate Pretreatment: Impact on Cost and Body Surface Quality

Song Shaopeng

(Beijing Benz Automotive Co., Ltd., Beijing 100176)

Abstract: In the automotive painting pretreatment process, one-step phosphating method is suitable for bodies with an aluminum content of ≤40%, while two-step phosphating (phosphating + passivation) can handle high-aluminum or all-aluminum bodies. This paper compares their process characteristics, consumable consumption, and body appearance quality. Case analysis reveals that when the aluminum content is low (below 30% in this case), the two-step method consumes approximately 20% more materials per vehicle than the one-step method. Furthermore, the two-step process is prone to causing streaks and pit defects on the surface of aluminum outer panels after electrophoretic painting. These streak defects can be mitigated by optimizing phosphating parameters and spray processes, while pitting defects can be reduced by adjusting the aluminum sheet's Electro Discharge Texture(EDT) process. The research demonstrates that for production lines with low aluminum content, the one-step phosphating method holds significant advantages in both economy and final quality.

Key words: Pretreatment, Phosphating, Passivation, Phosphating Streaks, EDT Scales

1 前言

前处理磷化是汽车制造业涂装环节的基础工艺。常用的前处理工艺有磷化工艺（亦称磷化或一步法磷化）、磷化钝化工艺（亦称两步法磷化）[1-2]、硅烷工艺、锆化工艺、薄膜工艺（亦称陶化工艺，是锆化与硅烷技术的融合升级，兼具锆化膜的耐腐蚀性和硅烷膜的强附着力），其中，硅烷工艺、锆化工艺、薄膜工艺均属于薄膜前处理技术。

汽车涂装行业中，早期前处理以磷化为主，其技术成熟、工艺性好、质量稳定，但磷化材料中含磷、镍、锰等重金属离子，不利于环境保护。随着环保要求的提升和汽车工业技术的不断发展，无磷前处理成为发展趋势。以锆、硅烷为主的薄膜

作者简介：宋绍朋（1982—），男，高级工程师，硕士学位，研究方向为汽车制造、车身焊接与涂装设备及工艺规划。

参考文献引用格式：

宋绍朋. 一步法与两步法前处理磷化对成本和车身外观质量的影响分析[J]. 汽车工艺与材料, 2026(5): 28-34.

SONG S P. Comparative Analysis of One-Step and Two-Step Phosphate Pretreatment: Impact on Cost and Body Surface Quality[J]. Automobile Technology & Material, 2026(5): 28-34.

前处理相较于传统磷化工艺在节能环保的同时，具有低产渣率、参数监测简便、能与多种金属基材良好适配的优势，在我国整车行业获得广泛应用。近年来新建的涂装车间前处理主流工艺多为硅烷工艺、锆化工艺或薄膜工艺[3-8]。

2010年前后建设的涂装车间前处理大多采用磷化工艺，且多数为一步法磷化工艺。有少数涂装车间设立了磷化+钝化两步法磷化工艺。一步法磷化主要用于以钢板材为主的车身，两步法磷化主要用于铝合金比例含量较高的钢铝混合车身[1]。一步法和两步法磷化工艺各有优劣，本文就此展开分析并给出实践结果。

2　一步法磷化与两步法磷化的工艺对比

一步法磷化与两步法磷化的区别在于两步法增加了钝化工艺，在钢材表面形成磷化膜，在铝材表面形成钝化膜。一步法的常规工艺流程为：洪流冲洗、脱脂喷淋、脱脂浸洗、表调、磷化、水洗喷淋、水洗浸洗。两步法的常规工艺流程为：洪流冲洗、脱脂喷淋、脱脂浸洗、表调、磷化、水洗喷淋、水洗浸洗、钝化、水洗喷淋、水洗浸洗。表1为一步法磷化和两步法磷化使用的化学药剂。

表1　一步法和两步法化学药剂

磷化类型	脱脂	表调	磷化	钝化
一步法	脱脂开槽剂、脱脂补充剂、表面活性剂、PH调节剂	液体表调主剂、液体表调助剂	磷化配槽剂、磷化补加剂、磷化促进剂、中和剂、氟添加剂、游离氟添加剂、磷化结渣剂、磷化锌添加剂、磷化镍添加剂、磷化锰添加剂	
两步法	脱脂开槽剂、脱脂补充剂、表面活性剂、PH调节剂	表面调整剂	磷化开缸剂、磷化补充剂、磷化促进剂、中和剂、氟添加剂、游离氟添加剂、磷化结渣剂、磷化锌添加剂、磷化镍添加剂、磷化锰添加剂、钠离子添加剂	钝化剂、钝化pH调整剂

表2对一步法磷化和两步法磷化对铝件前处理进行了多维度对比（基于年产15~20万台整车的规模）。一步法磷化前处理在处理铝制材料过程中因铝离子析出产生大量的冰晶石沉渣会对整车涂膜品质产生不良影响[9]。钢件产生的磷化渣量通常为0.1~0.8 g/m^2，而铝件产生的磷化渣量通常为10~16 g/m^2。当车身的铝件占比较高时，需加大清渣力度和磷化液的循环强度。一步法磷化通常用于处理平均铝件占比不超过40%的车身。

表2　一步法和两步法对铝件前处理的多维度比较

对比维度	一步法	两步法
车身铝件占比/%	≤40	0~100
铝板产渣量/g·m^{-2}	10~16	3~6
镀锌钢板产渣量/g·m^{-2}	0.1~0.8	0.1~0.8
铝板膜重/g·m^{-2}	2~5	<1
镀锌钢板膜重/g·m^{-2}	1.5~4.5	1.5~4.5
酸洗频次/次·年$^{-1}$	2~3	1~2
压滤机（60~180 m^3/h）数量/台	3	1

两步法磷化增加的钝化工艺更适合处理铝材，可处理任意比例的钢铝混合车身和全铝车身。两步法磷化对钢件磷化渣的生成几乎没有影响，但可大幅度减少铝件磷化渣的生成。钢件产生的磷化渣仍为0.1~0.8 g/m^2，而铝件产生的磷化渣可降低至3~6 g/m^2。钢铝混合车身经过两步法磷化后，在钢板材表面形成磷化膜，在铝板材表面形成钝化膜，两者的膜厚有所不同，磷化膜的厚度为2~3 μm，膜重为1.5~4.5 g/m^2，钝化膜的厚度为20~200 nm，膜重低于1 g/m^2。

相较于硅烷、锆化、薄膜等工艺，磷化的膜厚远大于薄膜工艺（包含硅烷、锆化、薄膜）。薄膜工艺的膜厚通常为20~200 nm。由于薄膜工艺的膜厚薄，若基材表面质量低（细微毛刺缺陷），或在前处理过程中产生了条纹缺陷，在面漆工艺中很难完全遮盖，电泳后需大量抛磨修复，否则会造成漆面质量缺陷。使用薄膜工艺的涂装生产线在喷漆工艺中通常设有中涂，中涂可遮盖前处理产生的条纹或工件自带的细微毛刺，大幅提升面漆品质。使用磷化前处理工艺的涂装生产线可免中涂（即IP2工艺），从而省去中涂喷房和中涂烘房，节省占地面积，减少投资。

3 一步法与两步法的单车耗材消耗量

3.1 单车耗材消耗量对比

涂装车间A采用一步法，涂装车间B采用两步法，对比分析涂装车间A和涂装车间B的前处理单车耗材消耗量。A车间生产的车身与B车间生产的车身在等效表面积（每个车间均生产多种车型，根据每种车型的排产比例折算等效面积）处于同级别。2024年，2个车间所生产的车身等效表面积和等效铝材含量（每个车间均生产多种车型，根据每种车型的排产比例折算等效铝材含量）如表3所示。

表3 A车间和B车间生产车身的等效面积与等效铝合金含量

对比项	A车间	B车间
车身等效面积/m^2	100.08	103.45
铝合金等效含量/%	28.38	17.16

A车间于2005年投产，设计产能20万台/年，当时车身均为钢件，几乎没有铝件，采用一步法工艺路线。B车间于2014年投产，设计产能15万台/年。鉴于车身铝件占比逐年增加，采用两步法工艺路线。

实际生产中，由于产品调整，导致A车间生产的车身等效铝合金含量超过B车间（B车间车身铝合金含量在40%及以上的产品排产量较低）。2024年生产数据显示，B车间车身等效铝合金含量仅为17.16%，A车间车身等效铝合金含量为28.38%。

2024年，A车间和B车间在前处理的耗材消耗统计如图1所示。B车间的前处理消耗细化占比分析如图2所示。B车间前处理的单车耗材消耗量为4.23 kg，相较A车间的3.49 kg，增加了21.20%。分析B车间的耗材耗量构成可知，磷化和脱脂耗材消耗量占比最大，分别为57.68%、36.17%。

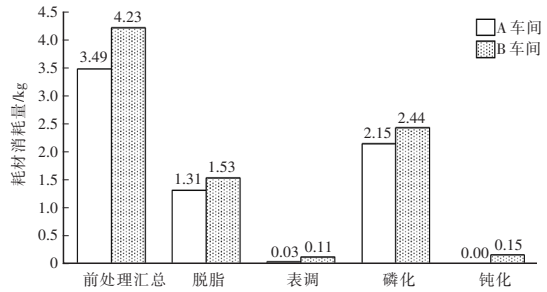


图1 2024年A车间和B车间前处理耗材消耗统计

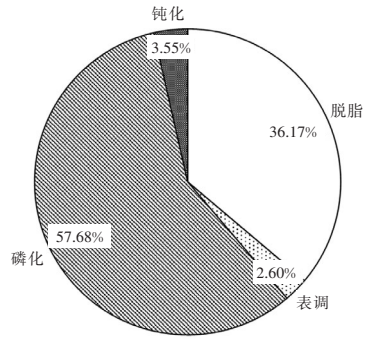


图2 2024年B车间前处理耗材消耗细化占比

3.2 耗材耗量差异分析

由图1、图2可知，B车间在前处理的每个工序的耗材消耗量均大于A车间，但表调和钝化的耗材用量占比较低，脱脂和磷化的消耗量占总消耗量的93.85%。脱脂使用的化学药剂有脱脂剂、表面活性剂、pH调整剂及脱脂配槽剂。磷化使用的化学药剂有磷化开缸（配槽）剂、磷化锰添加剂、磷化镍添加剂、磷化锌添加剂、磷化补充剂、氟添加剂、游离氟添加剂、磷化促进剂、磷化中和剂和磷化结渣剂。对脱脂和磷化进一步分析，如图3所示。

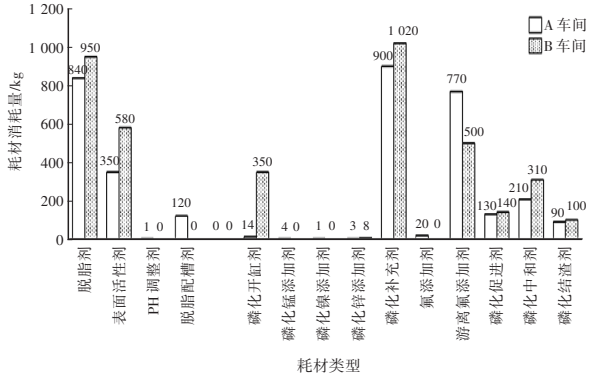


图3 2024年B车间脱脂和磷化耗材消耗统计

由图3可知，B车间的脱脂剂、表面活性剂、磷化开缸（配槽）剂、磷化补充剂和磷化中和剂消耗量较高，磷化药剂消耗量高主要为工艺原因。

B车间采用两步法工艺，通过控制游离酸和游离氟的参数，使铝板材在磷化中几乎不被刻蚀，未形成磷化膜，仅在钢板材表面形成磷化膜。铝板材在后续的钝化中形成钝化膜。控制游离酸的含量需补加中和剂（氢氧化钠），但会同步降低总酸，因此，需增加磷化补充剂提高酸度。如此往复循环，提高了磷化药剂的消耗量。

脱脂药剂的高消耗主要为设备规划和选型原

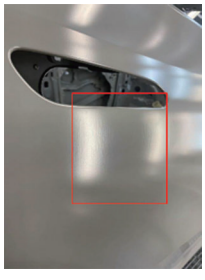
因。A车间脱脂工艺仅配备超滤除油设备,流量为1.5 t/h,该设备直接参与生产过程。该设备将收集的脱脂废液进行超滤浓缩,产生的废油作为危废处理,回收的脱脂液返回槽体继续使用,消耗的脱脂液较少。B车间的脱脂工艺配备有撇油器和超滤除油设备,主要靠撇油器除油,撇油器直接部署于生产系统,处理大部分油污。脱脂液进入撇油器后,会在静置槽静置,然后将漂浮在脱脂液上的油污撇走,该过程会带走部分脱脂液。超滤除油设备的流量仅为0.5 t/h,仅能收回部分脱脂液。

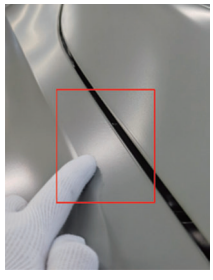
一步法和两步法的差异会造成磷化药剂的消耗量不同,不影响脱脂药剂的消耗量。选择的除油设备不同会导致脱脂药剂产生消耗差异。

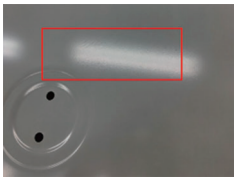
4　一步法与两步法的车身外观质量

4.1　铝外覆盖件外表面磷化条纹的形成分析

如前文所述,A车间和B车间均生产一定铝件含量的车身。A车间、B车间的等效铝合金含量分别为28.38%、17.16%。经前处理工艺后,A车间的铝外覆盖件表面无磷化条纹,外观质量合格。B车间的铝外覆盖件表面出现多处磷化条纹,如图4所示。


(a)车门磷化条纹


(b)翼子板磷化条纹


(c)发动机罩磷化条纹


(d)行李箱磷化条纹

图4　铝外覆盖件表面磷化条纹

B车间两步法处理后的车身在铝外覆盖件表面形成了少量磷化条纹,电泳后不能被遮盖。若在漆前准备时未进行打磨处理,漆后车身表面条纹依然可见。在电泳前对磷化车身产生的条纹进行打磨处理,电泳后条纹消除。

对磷化条纹的成因进行分析。铝板表面的磷化条纹是磷化出槽时磷化液流淌印迹造成的。正常磷化过程中,两步法磷化对铝板产生磷化膜的作用极小,铝板材在磷化中几乎不被刻蚀,不形成磷化膜。当车身磷化出槽时,由于温差较大,车身表面的磷化液水分挥发快,相当于磷化液在此时浓缩,增大了车身成膜的可能性。B车间的磷化输送工艺为RoDip M翻转工艺。车身在翻转出槽时,车身结构中的磷化液持续流出,相当于磷化二次成膜,亦增大了车身成膜的可能性。

为验证分析的正确性,设计试验如下:分别取A车间和B车间的磷化液,使用规格为200 mm×100 mm×1 mm的6块铝板(定义为1#~6#)模拟磷化液流淌。调整试验用磷化液参数如表4、表5所示,其中,1#板对应的槽液为B车间调整前磷化液,5#板对应的槽液为A车间调整前磷化液。将6块铝板分别浸入对应的磷化液中,3 min后取出,垂直停放30 s,然后在纯水中浸洗1 min。之后挂板随车在生产线进行电泳,电泳后取下铝板,目视对比试验结果。6块铝板电泳后的表面状态如图5所示。

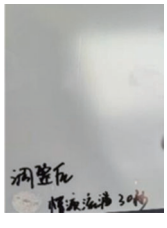
表4　B车间磷化液参数

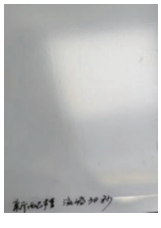
项目	范围	1#铝板	2#铝板	3#铝板	4#铝板
总酸度/point	20~30	20.1	20.6	21.7	20.3
游离酸度/point	0.8~1.8	1.8	1.5	1.4	0.8
游离氟/×10^{-6}	25~80	20	20	80	60
总氟/×10^{-6}	200~800	308	320	300	430
促进剂/point	1~4	2	2	2	2.1

表5　A车间磷化液参数

项目	范围	5#铝板	6#铝板
总酸度/point	20~27	21.5	21.3
游离酸度/point	0.6~1.3	0.9	1
游离氟浓度/×10^{-6}	100~160	140	135
总氟浓度/×10^{-6}	500~1 600	500	800
促进剂/point	1.5~3.5	2	2


(a)1#铝板


(b)2#铝板


(c)3#铝板



(d)4#铝板 (e)5#铝板 (f)6#铝板

图5 试验铝板电泳后表面状态

由图5可知,1#磷化条纹明显。随着游离酸的降低,2#铝板~4#铝板磷化条纹依次减轻,但不能彻底消除。5#铝板有轻微的磷化条纹,用手抚摸无凹凸感。当总氟浓度为800×10^{-6}时,使用6#铝板模拟,铝板表面正常,未产生磷化条纹。试验结果表明,上文对两步法在铝外覆盖件表面形成磷化条纹的分析准确。

4.2 铝外覆盖件外表面磷化条纹的消除措施

由4.1节中对磷化条纹形成原因的分析可知,减少出槽过程中车身流淌的磷化液在铝外覆盖件的停留时间(即避免出槽过程中车身表面磷化液水分挥发快而导致铝外覆盖件表面成膜),可有效避免磷化条纹。可采用的优化方案为在车身出槽时增加磷化喷淋和纯水喷淋频次。如图6所示,在车身出槽翻转垂直位置,增加一排喷淋,以此排为基准向后增加2环磷化液喷淋,形成3环磷化喷淋。喷嘴采用锥形实心喷嘴,每环喷淋可独立控制。在出槽最后一环纯水喷淋前增加1环纯水喷淋,形成2环纯水喷淋。磷化出槽由之前的1环磷化喷淋+1环纯水喷淋改造成3环磷化喷淋+2环纯水喷淋。经实践验证,工艺优化后,铝外覆盖件表面的磷化条纹消失。该方案解决了磷化条纹问题,但增加了纯水的消耗量和危废的产生量。

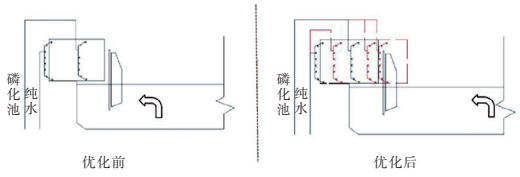


图6 磷化出槽喷淋优化示意

4.3 铝发动机罩泳后外观质量

车身外覆盖件中,部分车型的发动机罩冲压外板在试制阶段,发现无论A车间还是B车间,泳后均出现了随机密集的小点(本文称为麻坑)。缺陷形貌如图7所示,在电泳后发动机罩表面肉眼可见大量麻坑。

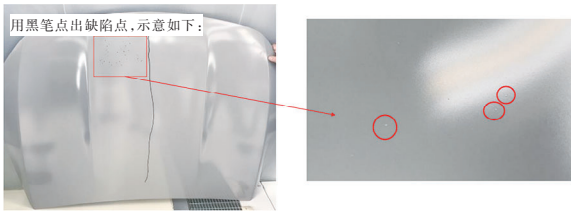
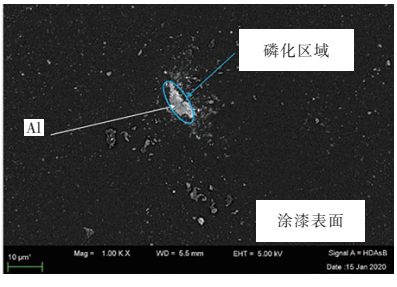
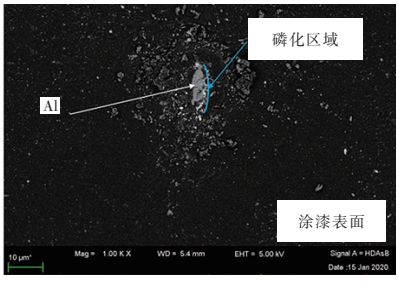


图7 电泳后发动机罩麻坑缺陷

使用扫描电镜对麻坑进一步分析。如图8所示,采用扫描电镜-能谱分析法(Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy,SEM-EDS)分析泳后发动机罩表面的2个麻坑位置,结果显示该位置的元素成分为铝。如图9所示,对该麻坑位置的横截面进行SEM-EDS分析,可知麻坑位置附近有脱落的铝金属片,金属片的上表面有磷化而下表面无磷化。麻坑周边有磷化而麻坑位置无磷化,说明缺陷点的横截面有金属从表面脱离,且为磷化工序后。溶解表面的油漆层后,使用SEM分析发动机罩麻坑位置表面的形貌,如图10所示。在溶解油漆层后,发现局部区域缺少磷化层且有断裂痕迹。在溶解涂漆层和磷化层后,发现部分电火花毛化处理(Electro Discharge Texture,EDT)鳞片缺失或断裂[10]。综上可知,麻坑缺陷的产生是由于在电泳过程中,发动机罩表面的部分EDT鳞片剥离了原来的铝材表面。

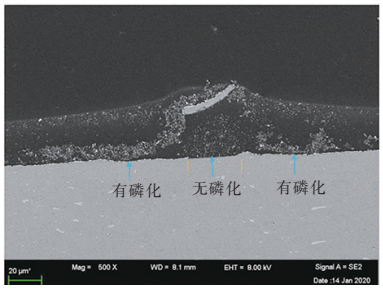


(a)随机麻坑位置1

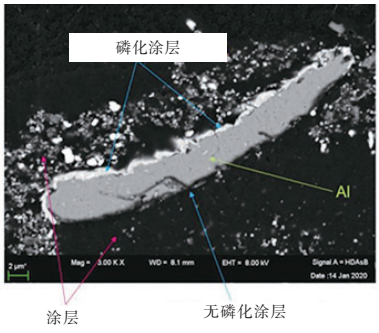


(b)随机麻坑位置2

图8 电泳后发动机罩麻坑位置SEM-EDS成分分析

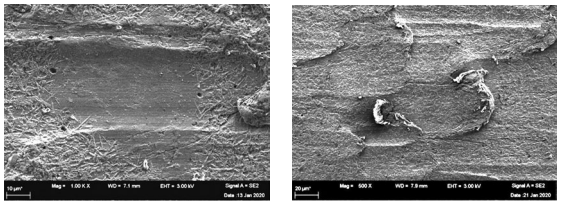


(a)麻坑及附近横截面成分



(b)脱落金属片上下表面成分

图9　电泳后发动机罩麻坑位置横截面SEM-EDS成分分析

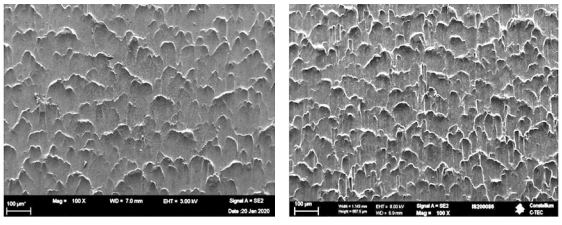


(a)局部区域缺少磷化层　(b)EDT鳞片有缺失或断裂

图10　电泳后发动机罩麻坑位置SEM缺陷分析

4.4　铝发动机罩电泳后外观质量的改善措施

减少EDT鳞片的延伸有助于消除缺陷。对EDT工艺进行优化,通过减少EDT轧制道次的压下量,缩短EDT鳞片的长度。图11所示为EDT轧制道次压下量优化前、后的SEM表面分析结果。由图11可知,减少了EDT压下量的表面延伸略小。



(a)EDT标准表面　(b)减少EDT压下量表面

图11　EDT工艺优化前、后SEM表面鳞片分析

EDT工艺优化后的铝发动机罩经过A车间的前处理电泳工艺后,表面麻坑缺陷消失。但B车间的麻坑仍然存在,需要经过白件打磨处理后经过前处理电泳工艺才可消除麻坑缺陷。分析原因为,B车间的两步法磷化工艺在铝发动机罩表面形成的纳米级钝化膜无法完全遮盖EDT鳞片,而A车间的一步法磷化工艺在铝发动机罩表面形成的微米级磷化膜可完全遮盖EDT鳞片。

5　技术路线平衡

一步法与两步法的选择需根据实际需要规划和设计。通过上文的分析可知,一步法相较于两步法可节省辅料且外观质量较高,但一步法的适用范围仅限等效铝含量低于40%的生产线,两步法更适合铝件含量高于40%的生产线。

B车间高铝含量产品的实际投放低于初期规划预期,当前B车间的等效铝件含量仅为17.16%。从该案例的实际情况考虑,将B车间的两步法切换为一步法既可降低辅料消耗又可提升外观质量,还能减少2名发动机罩打磨工人。

由表1可知,两步法切换成一步法技术难度较低。脱脂药剂无需变化,表调需完全切换药剂,磷化仅需切换主药剂,将游离氟和游离酸分别调整为两步法的范围即可。直接取消钝化药剂,将钝化槽改为水洗浸洗槽。按照上述方案,将B车间的两步法切换为一步法,切换后各工艺参数正常。切换后的铝外覆盖件表面的磷化条纹缺陷消失,铝发动机罩在前处理前无打磨的情况下,麻坑缺陷消失。经统计,2025年2月5日至2025年9月5日,单车辅料消耗相较切换前降低了20%。

6　结论

a. 一步法适用于铝含量≤40%的车身,相较两步法具有耗材少、成本低、质量稳定的优势。

b. 两步法虽能处理高铝含量的车身,但辅料消耗量高、易产生磷化条纹和麻坑缺陷。通过参数调整、喷淋工艺优化及铝材EDT工艺改进,可有效提升质量。针对EDT鳞片导致的泳后麻坑缺陷,可通过增加白件打磨工艺解决。

c. 低铝产线采用一步法更经济高效,高铝产线可使用两步法,但需配套缺陷控制措施。

d. 随着工艺的日趋成熟,即使免中涂的涂装车间也有望实现采用硅烷、锆化、薄膜等环保工艺替代磷化工艺。

参考文献：

[1] 王鹏洁, 郑卫刚 . 铝合金表面磷化工艺研究[J]. 表面工程与再制造, 2015, 15(2): 31−33.

[2] 上海凯密特尔化学品有限公司 . 磷化工艺如何应对汽车铝板的普及[J]. 汽车与配件, 2015(50): 80−81.

[3] 孔坤, 殷齐松, 季旭, 等 . 硅烷薄膜前处理在某商用车厂的应用初探[J]. 轻型汽车技术, 2024(1): 18−20.

[4] 李杨, 张洋, 邹方维 . 硅烷薄膜前处理工艺中无磷脱脂剂的开发与性能测试[J]. 电镀与涂饰, 2025, 44(8): 107−113.

[5] 苗天浩, 刘春良, 赵志英, 等 . 浅谈硅烷、锆系薄膜前处理工艺的应用[J]. 上海涂料, 2019, 57(1): 20−24.

[6] 崔昆 . 硅烷成膜原理及常见问题的控制措施[J]. 现代涂料与涂装, 2024, 27(12): 30−32.

[7] 戴竞舸, 赵艳亮, 李耀民 . 汽车涂装锆化前处理工艺技术的发展及应用[J]. 宝钢技术, 2025(2): 1−7.

[8] 李生娟, 徐腊平, 殷坤, 等 . 汽车涂装磷化转锆化前处理工艺研究和工程实践[J]. 涂料工业, 2025, 55(1): 76−81+88.

[9] 李宽 . 硅烷薄膜工艺对车身耐腐蚀和外观的影响[J]. 全面腐蚀控制, 2021, 35(5): 13−19.

[10] 韩德地, 梁安祥, 师庆龙, 等 . EDT 汽车铝板表面粗糙度影响因素的探究及控制策略[J]. 有色金属加工, 2024, 53(3): 52−55.

AT&M