

轨道车辆构件油漆起鼓脱落问题分析及 检测方案研究

彭艳华

中车株洲电力机车有限公司 湖南株洲 412001

摘要: 针对某型车辆运行过程中的油漆起鼓、脱落问题进行了研究。研究发现贯通性缺陷为主要诱因, 分别通过压力气泡检测、无压液体渗漏检测、磁粉检测、相控阵超声波检测和涡流检测对贯通性缺陷进行了工艺试验研究。结果表明: 压力气泡检测为最优检测方案。

关键词: 油漆脱落; 贯通性缺陷; 压力气泡检测

Analysis and solution of paint swelling and peeling of railway rolling stock in service

PENG Yanhua

CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Zhuzhou 412001, Hunan, China

Abstract: The problem of paint swelling and peeling during the operation of a certain type of rolling stock was studied in this paper. It is found that penetration defect is the main cause. The penetration defects were studied by carrying out the experiments of pressure bubble testing, non-pressure liquid leakage testing, magnetic particle testing, phased array ultrasonic testing and eddy current testing. The results show that the pressure bubble testing is the optimal scheme.

Keywords: peeling of paint; penetrant defects; pressure bubble testing

1 序言

某型车辆在运行过程中发现不同程度的油漆起鼓、脱落现象, 集中在侧墙与底架侧梁的结合部位, 影响了车体整体美观。然而, 在评定过程中发现, 产生该问题的原因不同于一般的油漆起鼓及脱落, 无法从油漆涂装、附着及应用的角度着手解决问题, 给后续涂装及应用增添了诸多不确定性, 不利于产品交付和使用。因此找到油漆起鼓、脱落的真实原因、确定合适的解决措施, 是改善该问题的亟待之举。

2 原因分析

文献^[1-3]中概括了车体油漆脱落的常见原因: ①焊接后车体表面清除不干净。②预涂的底漆存在质量问题, 烧损区域大, 不易清除。③漆膜烘烤时间、温度控制不当。归根结底, 主要是由于漆层与基体, 或漆层的层与层之间的附着力不足、存在污染物等原因造成的。

审视整个涂装环节, 湿度、温度控制良好, 基体表面状态良好, 油漆各层厚度满足要求, 且不存在以上这几种问题情况, 因此基本排除是涂装过程

作者简介: 彭艳华, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事轨道车辆质量技术管理工作, E-mail: 010200000100@crccgc.cc。

造成的问题。

将油漆起鼓、脱落部位的残留漆层去除后，经目视检测发现一些肉眼可见的焊接气孔。猜测该类油漆起鼓、脱落的原因是存在焊接缺陷。将所有起鼓、脱落位置的油漆去除后，通过目视检测，发现这些部位均存在不同程度的焊接不良问题。

经分析发现，真正引起油漆在役脱落的更倾向于贯通性缺陷：若存在大缺陷，则在首次涂装时油漆会发生明显的凹陷或变形；若存在小的非贯通性缺陷，则在首次涂装时不会发生明显的凹陷或变形，使用过程中无外力诱因导致起鼓、脱落。贯通性缺陷的一侧受空气或气流的影响，可能导致气流向其另一侧的漆层运行，在周期性作用下会导致油漆起鼓、脱落。

3 问题区域结构

该部位为对接接头，焊接位置为横焊。通过两道或三道焊缝填满，将侧墙和侧梁连接，焊接结构如图1所示。

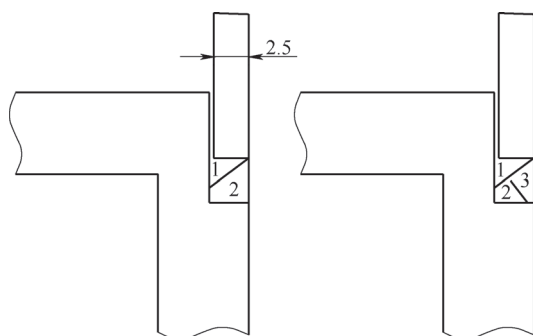


图1 问题区域焊接结构

该处焊接接头尺寸较长，每辆车超过50m。限于现有状况，该处接头采用MAG人工焊接。焊接过程采用多段连接方式，300mm/段复合连接，如图2所示。人工焊接长焊缝，会受到工作疲劳和姿势走形的双重影响。同时多段复合焊接方式，会形成很多焊缝接头（见图2中红色区域），若不合理清理接头部位，则极易因引弧而导致焊接状态不良，进而

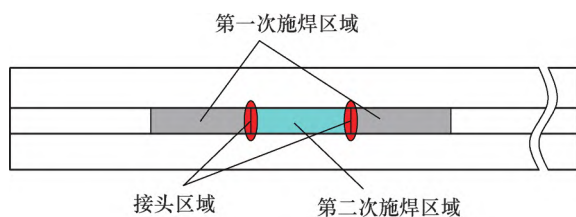


图2 多段焊接示意

诱发缺陷。另外，由于焊接位置为横焊，因此操作难度较大，第一道焊缝成形状态不良会对第二道、第三道（如果有）焊缝造成不良的焊接基础，若不及时清理，就会诱发潜在的问题^[4]。

通过焊接过程控制及检测方案设计来综合管控该位置焊缝的质量。

4 焊接过程控制

焊前清理污物（油、脂、毛刺等），并确保母材配合间隙达到工艺要求。选用具有较高焊接水平和责任心的焊工，使用80%Ar+20%CO₂混合气体保护，降低气孔类显示的出现概率。由于焊接位置为横焊，因此采用辅助小车坐姿焊接，焊工双手持焊枪匀速焊接。下道焊接前需对上道焊缝清根。

5 检测方案设计

5.1 压力气泡检测

压力气泡检测原理如图3所示，检测表面状态如图4所示。

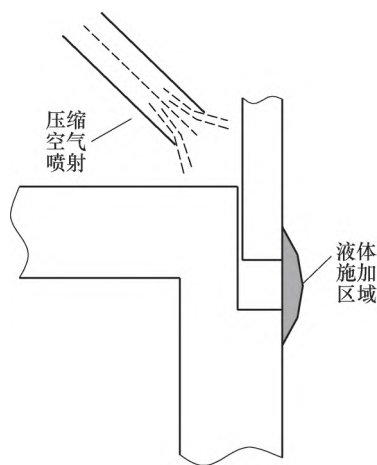


图3 压力气泡检测原理



图4 压力气泡检测表面状态

选用洗衣粉或肥皂等易起泡原料，以特定配比配制液体。典型配比见表1。

表1 液体配比

原料	洗衣粉/g	水/L
用量	20~35	20

采用压缩空气，对待检焊缝的一侧进行施压，压力 $\geq 0.6\text{MPa}$ 。与此同时，在焊缝另一侧对应的相同区域采用无绒布涂抹配制好的液体。

基于表面张力的作用，液体涂抹后呈气泡状。若存在贯通性缺陷，则在压缩空气的作用下，气泡会逐渐胀大、破裂。

由于液体无色透明，形成的气泡颜色与打磨后的焊缝底色难以产生比较明显的色差，对比度较差，因此观察条件要求较高，即白光照射度 $\geq 1000\text{lx}$ ，借助5倍放大镜辅助观察，可发现裸视无法看见的微小变化。同时，内侧压缩空气与外侧液体施加的移动速度应控制在 200mm/min 以内。

5.2 无压液体渗漏检测

在一侧施加渗透剂或高渗透性、润湿性液体，基于毛细作用，渗透剂或高渗透性、润湿性液体会进入表面开口型缺陷并形成一定深度。在另一侧施加显像剂，若渗透剂或高渗透性、润湿性液体进入贯通性缺陷，在另一侧施加显像剂，则在毛细与吸附的共同作用下，缺陷内部的液体会被显像剂吸附出来并扩展成明显的显示（见图5）。



图5 无压液体渗漏检测显示

5.3 磁粉检测试验

磁粉检测操作较为简单。但受结构或组织磁特性不均的影响，可能形成非相关显示（见图6），有些区域结构凹陷（如咬边）易引起磁悬液滞留^[5]，进而形成伪显示。非相关显示和伪显示都干扰了相关显示的评定，最为关键的是磁粉检测无法确定缺陷是否贯通。



图6 磁痕显示

5.4 相控阵超声波检测试验

设计制作带有缺陷的模拟试块：在现有结构上截取长约400mm的部分，并排钻3个孔，孔径为 $\phi 2\text{mm}$ ，孔深分别为5mm（1#孔）、3mm（2#孔）、0.5mm（3#孔），如图7所示。

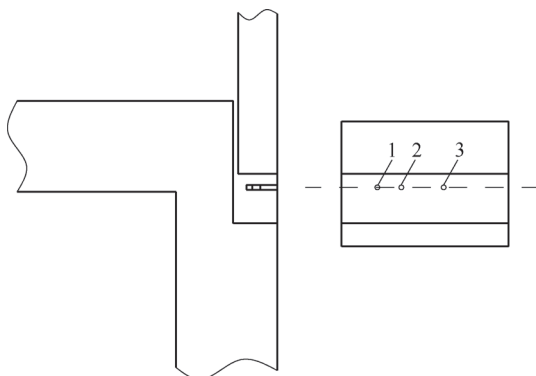


图7 缺陷模拟试块

在相控阵检测设备中输入焊接接头相关参数，植入模型结构。采用相控阵斜声束进行检测，首先设定范围和灵敏度，扫查状态如图8所示，扫描模式为S扫，扫查方式为沿线扫查。

在缺陷模拟试块上执行检测，发现预制的人工

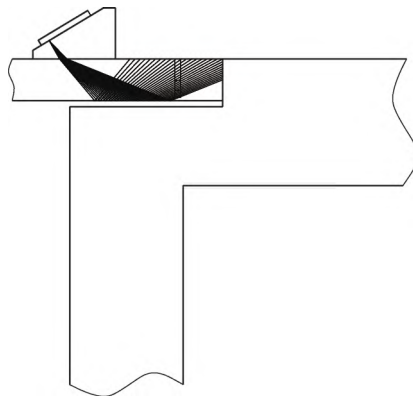
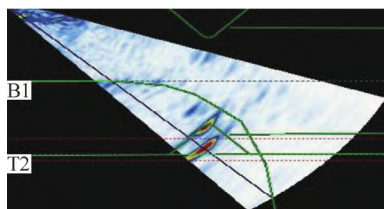
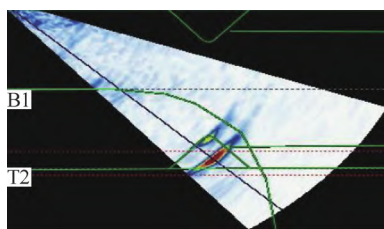


图8 相控阵超声波检测示意

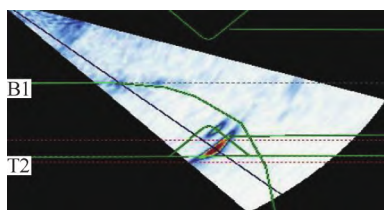
缺陷, 分别如图9所示。由图9可见, 人工缺陷图像清晰可辨, 但难以在图像中精准显示钻入深度(表示缺陷延伸深度), 因此难以确定贯通性缺陷。



a) 1[#]人工缺陷显示图像



b) 2[#]人工缺陷显示图像



c) 3[#]人工缺陷显示图像

图9 相控阵超声波检测缺陷成像

5.5 涡流检测试验

选用点式探头, 采用图7所示的缺陷模拟试块。涡流检测信号如图10所示: 缺陷信号相位发生改变, 其幅值达到一定高度, 无缺陷位置信号呈微小浮动。但是, 缺陷延伸深度很难通过相位和幅值量化来表示, 因此难以确定贯通性缺陷。



a) 缺陷信号



b) 无缺陷处信号微小浮动

图10 涡流检测信号

6 试验对比分析

选择100m长(约4倍车体长度)的区域, 分别采用上述5种检测方法进行检测。以下分别从缺陷评定、检测效果、检测成本及效率等方面进行综合评价, 以确定该油漆起鼓、脱落区域的检测方案, 实现对贯通性缺陷的理想检测。

6.1 缺陷评定

缺陷评定情况见表2。由表2可见, 压力气泡检测和无压液体渗漏检测检出的疑似缺陷数量差不多, 相差的4个缺陷全部来源于图2所示的接头区域(红色区域)。而磁粉检测的疑似磁痕多达383个, 无法逐一分辨其相关性及其贯通性。相控阵超声波检测检出的缺陷比前两种方法稍多, 但也无法评定缺陷贯通性。涡流检测检出的疑似缺陷较少, 这是因为某些较小的显示引起的涡流信号变化不明显。

表2 缺陷评定情况

序号	检测方法	疑似缺陷数量/个	不确定性
1	压力气泡检测	59	可以确定是否为贯通缺陷
2	无压液体渗漏检测	63	可以确定是否为贯通缺陷
3	磁粉检测	383	难以确定是否为缺陷, 无法确定是否贯通缺陷
4	相控阵超声波检测	131	难以确定是否为贯通缺陷
5	涡流检测	38	难以确定是否为贯通缺陷

6.2 检测效果

各种检测方法检测效果分析见表3。由表3可见, 前两种检测方法可以通过简单的控制方式提升检测效果(信噪比及缺陷的评定分辨), 而后3种检测方法存在较大的问题, 难以通过简单的方式来有效提升检测效果。

6.3 检测成本

检测成本分析见表4。由表4可见, 压力气泡检测所需成本最低, 而无压液体渗漏检测和磁粉检测需要较高的消耗料成本。相控阵超声波检测及涡流检测主要成本来源于设备和探头(消耗量较低)。

6.4 检测效率

检测效果见表5。由表5可见, 前两种检测方法的检测时间和评定时间都较短, 而后三种方法在缺陷及其贯通性评定时需耗费大量时间, 且效果不佳。

表3 检测效果分析

序号	检测方法	影响检测效果的因素	处理方式
1	压力气泡检测	显现及胀大、破裂的气泡与焊接接头金属光泽之间的对比度	1) 提高白光照度增加敏感性 2) 采用放大镜提升细节分辨力
2	无压液体渗漏检测	红色渗透剂与白色显像剂之间的对比度	控制白光照度
3	磁粉检测	1) 相关显示与非相关显示、伪显示之间的分辨情况 2) 相关显示中贯通缺陷与非贯通缺陷的分辨情况	1) 去除磁痕、再次磁化、目视观察 2) 渗透检测辅助 3) 其他检测技术辅助
4	相控阵超声波检测	1) 缺陷显示与结构类显示的分辨情况 2) 缺陷显示中贯通缺陷与非贯通缺陷的分辨情况	其他检测技术辅助
5	涡流检测	1) 非磁饱和状态下的信号干扰 2) 缺陷显示中贯通缺陷与非贯通缺陷的分辨情况	其他检测技术辅助

表4 检测成本分析

序号	检测方法	检测成本来源
1	压力气泡检测	洗衣粉，水
2	无压液体渗漏检测	渗透检测套剂（渗透剂、清洗剂、显像剂）
3	磁粉检测	磁悬液、反差增强剂
4	相控阵超声波检测	相控阵检测仪器、探头、耦合剂
5	涡流检测	涡流检测仪器、探头

表5 检测效率

序号	检测方法	检测效率
1	压力气泡检测	配制液体：5min 压力气泡检测速度：200mm/min 评定时间：10min/m
2	无压液体渗漏检测	渗透时间：30min/全长 显像时间：20min/全长 评定时间：10min/m
3	磁粉检测	磁粉检测时间：20min/m 评定时间：不确定（延长评定时间仍不确定是否为相关显示，也无法确定其贯通性）
4	相控阵超声波检测	相控阵超声波检测速度：6m/min 评定时间：1m/h
5	涡流检测	涡流检测速度：2m/min 评定时间：不确定（延长评定时间仍不确定其贯通性）

6.5 其他问题

在检测过程中，还应注意一个在役阶段的重要问题：腐蚀。压力气泡检测残留的水可能造成金属基体的腐蚀。无压液体渗漏检测时，渗透检测材料中若含有大量S、Cl元素，且在溶液中以离子态存在，比较活泼，则易腐蚀检测区域。磁粉检测时，水基磁悬液若不清除，则有可能腐蚀检测区域。

综上所述，最终选择压力气泡检测覆盖所有检测区域，在接头部位及靠近墙板缝隙处采用无压渗漏检测局部检查。执行压力气泡检测后及时干燥，

无压渗漏检测后，若存在贯通性显示或单侧显示，则应将检测区域彻底清洗干净并干燥。

7 结束语

综合缺陷评定、检测结果、检测成本及效率多因素分析，压力气泡检测为该油漆起鼓脱落的理想无损检测方法，既可确保贯通性缺陷的检测效果，又可实现检测的高效、低成本运行。

参考文献：

[1] 唐合龙. 货车车体油漆脱落原因分析及解决措施[J]. 机车车辆工艺, 2007, 264 (4) : 47-48.
[2] 汪金奇. 铁道客车外皮涂层起泡脱落分析[J]. 现代涂料与涂装, 2008, 11 (5) : 41-43.
[3] 黄娟. 高压开关铝壳体油漆脱落原因分析及改进措施[J]. 现代涂装, 2016, 19 (5) : 67-69.
[4] 姚上卫, 孙磊, 范会卿. 船舶与海工平台建造焊接质量问题统计与分析[J]. 金属加工 (热加工), 2024 (1) : 32-38.
[5] 万升云, 等. 磁粉检测技术及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.

MW 20241005