 DOI: https://doi.org/10.12349/tie.v3i8.11537

Analysis and Research on pressure relief delay mechanism of brake system based on flow characteristics

Ming Liu[1] Xiaohui An[2]

1. Haizhuang Shanghai Bureau, Shanghai, 200000, China
2. Shanghai Haiying Machinery Factory, Shanghai, 200000, China

Abstract

During the commissioning of the brake system of a product, the problem of slow brake pressure drop occurred. In order to accurately locate the root cause of the fault, this paper designs and implements the measurement and comparison test of the return oil flow of key accessories on the main system pipeline, and comprehensively and deeply analyzes the main factors affecting the slow decline of brake pressure. The specific requirements for system cleaning before installation and the scientific method of preliminary commissioning test were formulated, which provided reliable technical support for fundamentally eliminating the occurrence of similar subsequent failures, and also accumulated valuable experience for the troubleshooting and quality control of the product related systems.

Keywords

brake; slow pressure drop; return oil flow; failure analysis; troubleshooting; system cleaning; preliminary commissioning test

基于流量特性的刹车系统卸压迟缓机理分析与研究

刘鸣[1] 安小慧[2]

1. 海装上海局，中国 · 上海 200000
2. 上海海鹰机械厂，中国 · 上海 200000

摘　要

某产品在开展刹车系统调试工作过程中，出现了刹车压力下降慢的故障问题。为精准定位该故障的根源，本文通过设计并实施主系统管路上各关键附件回油流量的测量对比试验，全面且深入地分析了影响刹车压力下降慢的主要因素。针对性地制定了安装前系统清洗的具体要求以及初调试验的科学方法，为从根本上杜绝后续同类故障的发生提供了可靠的技术保障，也为该产品相关系统的故障排查与质量管控积累了宝贵经验。

关键词

刹车；压力下降慢；回油流量；故障分析；故障排除；系统清洗；初调试验

1 故障现象

某产品在进行刹车系统调试作业时，按照既定调试流程，首先通过供电设备为产品接通电源，随后利用供压设备向 Ⅰ、Ⅱ 系统供压，直至系统压力稳定在 28MPa。接着，通过操作刹车装置实现刹车控制，待系统压力完全稳定后，松开刹车控制装置，对左右两侧刹车压力下降至 1MPa 的时间进行精准测量与记录。

经实测，左侧刹车压力下降至 1MPa 的时间为 1.48s，该时间满足产品技术文件中 “刹车后刹车压力降至 1MPa 时间不大于 1.5s” 的明确要求；而右侧刹车压力下降至 1MPa 的时间为 2.16s，远超规定的 1.5s 标准，不满足技术要求，属于明显的故障现象。

2 故障分析

2.1 工作原理

如图 1 所示系统原理，该产品刹车系统的工作原理如下：推压主刹减压活门套筒的机械机构与刹车操作装置保持联动，通过操纵刹车操作装置能够分别实现对左侧和右侧刹车功能的独立控制。当推动主刹减压活门时，其输出的刹车压力会精准进入对应的刹车装置，进而实现产品的刹车动作；当松开刹车操作装置时，主刹减压活门会迅速关闭刹车腔的进油路，同时将刹车腔与系统回油路进行接通，从而实现松刹车操作，使系统压力恢复至初始状态。

【作者简介】刘鸣（1983–），男，中国山东烟台人，硕士，从事航空维修研究。

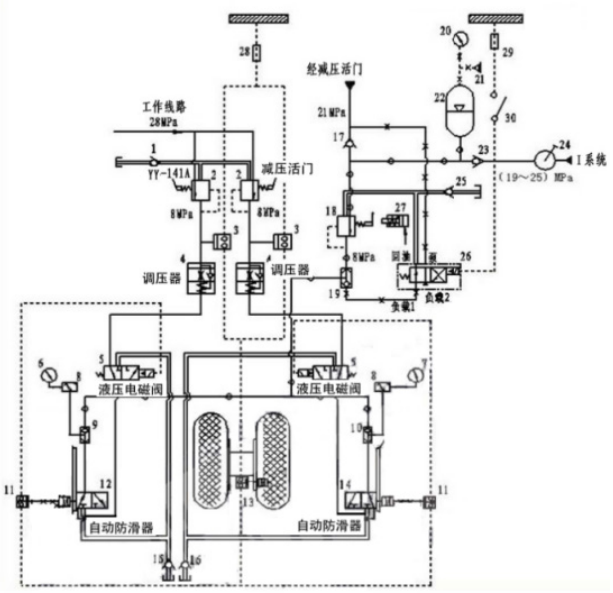


图 1 刹车系统原理图

2.2 原因分析

通过对系统原理图的深入剖析的可知，在松开控制装置的工况下，系统压力下降速度与整个刹车系统通道的流通量之间存在直接关联，即管路流通量越小，压力下降速度越慢。因此，故障的核心症结极有可能是系统管路中存在某处流通量过小的部位，从而影响了刹车时的卸压效率。

在主系统管路上，安装有多个与流量控制（内部设有节流孔）密切相关的关键附件，具体包括减压活门、调压器、液压电磁阀、自动防滑器。结合右侧系统刹车压力下降慢的故障现象，通过逐一梳理各附件的功能特性与工作逻辑，初步判断可能导致该故障的原因主要有以下几点：

减压活门回油流量不足，无法满足系统快速卸压的流量需求；

调压器内部反向单向活门未能正常打开，导致出口流量偏小，影响回油效率；

液压电磁阀内部节流孔存在堵塞情况，或其出口流量本身未达到设计标准；

自动防滑器内部节流孔发生堵塞，或其出口流量无法满足系统卸压要求；

刹车装置内部弹簧力不足，可能导致刹车装置动作迟缓，间接影响压力下降速度。

3 故障排查

3.1 故障检查

为精准定位故障根源，依据上述原因分析，制定了逐一排查的试验方案，对每个可能的故障点进行了全面、细致的检测与验证，具体过程如下：

3.1.1 减压活门回油流量小排查

减压活门的工作原理是通过刹车操作装置改变套筒行程来实现对系统压力的精确控制，其内部的分油活门配备有缓冲器，该缓冲器能够有效避免刹车压力出现剧烈波动，保障刹车过程的平稳性。由于该产品左侧刹车压力下降时间符合技术要求，可判定左侧相关系统部件工作正常，因此选取左侧减压活门作为基准件，重点校验其在 3MPa 压力工况下的流量及流阻参数。为确保校验数据的准确性、可靠性以及代表性，除基准件外，另选取 2 件同型号的减压活门（A、B）一同进行流量校验试验。校验结果显示，在 3MPa、2MPa 及 1MPa 等不同刹车压力下，产品右侧、左侧减压活门与备选件 A、B 的回油压力及对应流量数据均基本相当，未出现明显差异，均处于合理的误差范围内。为进一步验证该部件与故障的关联性，开展了部件互换试验：将左侧基准件安装于产品右侧，将备选件 A 安装于产品左侧后，重新进行刹车压力下降时间测试。测试结果表明，右侧故障现象无任何明显变化，左侧仍保持合格状态。综合以上流量校验数据及部件互换试验结果，可得出明确结论：该故障与减压活门无关联，减压活门的流量特性在刹车过程中，对系统压力下降慢的故障现象无明显影响。

3.1.2 调压器反向单向活门未打开，出口流量小排查

调压器在刹车系统工作时，其内部设置的节流孔能够有效保证刹车压力平稳增长，避免压力突变；而在刹车卸压阶段，调压器内部的单向活门应及时打开，确保油液能够迅速回油，保障压力快速下降。本次排查核心是验证该调压器在小压力工况下单向活门打开后的流量是否满足设计要求。因产品上装配位置特殊，采用替代验证方式，另选 1 件调压器进行专项流量校验。校验结果表明，该调压器出口流量与此前测试的减压活门基本相当，未出现明显偏小。同时从结构原理分析，卸压阶段内部单向活门能迅速响应打开，无节流阻力，确保油液快速回油。综上判定，该故障与调压器无关联，其回油流量特性对系统压力下降慢的故障现象无实质性影响。

3.1.3 液压电磁阀内部节流孔堵塞或出口流量小排查

液压电磁阀在主系统正常工作时，处于断电常通状态，其内部节流孔的通畅性及出口流量大小直接影响回油效率。基于右侧刹车压力下降慢的故障现象，需重点校验液压电磁阀在小压力工况下的流量特性。试验中拆下产品右侧正在使用的液压电磁阀，并另选 1 件同型号电磁阀进行对比校验。结果显示，产品右侧电磁阀在 3MPa、2MPa、1MPa 刹车压力下的流量分别为 89ml/s、71ml/s、48ml/s；对比件流量分别为 97ml/s、78ml/s、52ml/s。横向对比发现，液压电磁阀流量数值明显偏小且流阻较大，初步存在故障诱因可能。为确保结论可靠，进一步开展两组验证：一是左右两侧电磁阀互换安装，故障现象无明显改善；二是短接试验，采用专用工艺导管直接短接右侧电磁阀进口与刹车口模拟完全通畅工况，复试后故障现象仍无变化。综合流量校验数据及两组验证试验结果，液压电磁阀自身流量小、流阻大的固有特性对系统刹车压力下降速度影响极小，该故障与液压电磁阀无

关联。

3.1.4 刹车装置弹簧力不足排查

根据系统工作原理，当系统处于刹车卸压状态时，油液会直接回油，无需经过自动防滑器、调压器、减压活门等部件，因此刹车装置的工作状态直接影响回油效率。本次排查重点关注刹车装置的弹簧力是否充足及是否存在动作迟缓问题。试验分别测试了刹车装置在 A、B 两种状态下的刹车压力下降时间，结果显示卸压状态时均能实现快速回油，整体时间比主刹车系统工作时更短，说明刹车装置本身的回油效率基本满足要求。为彻底排除其关联性，开展了部件互换试验。互换后右侧刹车压力下降时间明显改善，而左侧变差，表明故障根源并非刹车装置本身，而是右侧系统管路存在影响回油效率的因素。综上判定，该故障与刹车装置无关联，其弹簧力及自身工作特性对系统压力下降慢的故障现象无影响。

3.1.5 自动防滑器内部节流孔堵塞或出口流量小排查

自动防滑器在主刹车系统工作时，处于常通状态，其内部节流孔的通畅性和出口流量大小对回油效率至关重要。结合此前各部件的排查结果，以及该部件在系统中的功能定位，将其作为重点排查对象，校验其在小压力工况下的流量特性，以确认是否存在内部节流孔堵塞或出口流量不足的问题。

试验过程中，从产品右侧拆下正在使用的自动防滑器，同时选取 1 件经前期验证合格的自动防滑器作为对比件，一同进行流量校验试验。校验结果显示，在 2MPa 刹车压力、0.10MPa 回油压力工况下，故障件流量仅为 5ml/s，而合格件流量高达 15.2ml/s；在 1.8MPa 和 1.6Mpa 压力下，故障件流量分别为 4.1ml/s 和 3.3ml/s，合格件则为 15ml/s 和 12ml/s。

从 2MPa 压力下的流量数据进行重点对比分析，与此前测试的减压活门、调压器、YY-38 液压电磁阀相比，自动防滑器的流量数值最小，流阻最大。进一步对比同压力等级下的出口流量，产品右侧拆下的自动防滑器流量明显小于合格对比件，差距极为显著。综合以上流量校验结果，可明确判定：自动防滑器内部节流孔堵塞或出口流量不足，导致回油严重受阻，是造成产品右侧刹车压力下降慢的主要原因。

3.2 排除方法

基于上述全面、系统的故障排查与分析结果，制定了针对性的故障排除方案：更换产品右侧的自动防滑器（将故障件更换为合格件）。更换完成后，按照原调试标准进行试验，测试结果显示，右侧刹车压力下降至 1MPa 的时间为 1.5s，完全符合技术文件中 “不大于 1.5s” 的要求，故障得到成功排除。

为进一步量化验证自动防滑器在刹车状态时回油流量对压力下降时间的影响程度，开展了补充试验：采用专用工艺导管短接自动防滑器（即直接连接该部件的进油口和刹车口，消除其流阻影响），重新测试右侧刹车压力下降时间，结果显示下降时间仅为 0.5s，远低于规定标准。这一试验结果进一步证实，自动防滑器是整个主刹车系统中流通量最小的关键节点，其流量特性直接决定了系统刹车压力的下降速度。

4 结论

自动防滑器属于外委采购部件，由于厂内缺乏完整的技术资料，相关技术参数不明确，给本次故障排查工作带来了一定的困难和阻碍。该部件结构设计复杂，其固有特性表现为流通量小、流阻大，且流阻远大于液压电磁阀等其他相关部件。

从该产品的流阻参数（当流量 Q=（2±0.2）L/min 时，压力损失△ P=（4.9±0.49）MPa）进行深入分析可知，自动防滑器是整个主刹车系统中回油流量最小的部件，同时也是抗污染能力最差的核心部件。

结合本次故障排查结果，最终确定本次刹车压力下降慢故障的直接原因是：刹车系统油液受到污染，污染物进入自动防滑器内部，导致其回油腔限流小孔发生堵塞，进而使得回油流量大幅减小，系统卸压速度变慢，最终表现为右侧刹车压力下降时间超出技术要求。

5 建议与措施

强化安装前管路清洗：在安装自动防滑器之前，必须对刹车系统的整个管路进行充分、彻底的清洗。清洗过程应采用专用清洗设备和符合要求的清洗介质，按照规定的清洗流程操作，确保清除管路内壁附着的油污、铁屑、灰尘等各类杂质，从源头减少污染物进入自动防滑器内部的可能性。清洗完成后，需对管路内的清洁度进行检测，检测合格后方可进入后续安装工序。

优化初调试验流程：主刹车系统进行初调试验时，暂不安装自动防滑器，而是采用专用工艺导管对该部件的安装位置进行短接，构建临时回油通路。通过该临时通路进行系统调试，在调试过程中实现刹车装置内液压油的动态循环更换，利用循环油液的冲刷作用，进一步清除系统内部残留的杂质，确保系统油液清洁度满足要求。

严格执行油液化验标准：在完成初调试验及液压油动态循环更换后，必须对系统内的液压油进行取样化验。化验项目应包括油液的清洁度等级、水分含量、粘度、颗粒度等关键指标，只有当油液化验结果完全符合相关技术标准和使用要求后，方可拆除工艺导管，安装自动防滑器。通过该措施可有效避免因油液清洁度不达标导致的二次污染，确保自动防滑器的工作环境满足设计要求，从而保障其正常工作性能。

参考文献

[1] 时彦林.液压与气压传动[M].北京:化学工业出版社,2024.

[2] 薛岩.机械零件基础知识及选用[M].北京:化学工业出版社,2022.

[3] 朱新才.液压传动与控制[M].重庆:重庆大学出版社,2020.