Management Science and Engineering 管理科学与工程, 2025, 14(2), 394-401
Published Online March 2025 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mse
https://doi.org/10.12677/mse.2025.142041

Hans汉斯

QC小组活动在提升运载器铝锂合金铆接舱段铆接一次合格率的应用实践

王　磊[1]，王树华[2]，乔腾飞[2]，韩　剑[2]，臧建新[2]

[1]北京航天爱锐科技有限责任公司，北京
[2]首都航天机械有限公司，北京

收稿日期：2025年2月10日；录用日期：2025年3月3日；发布日期：2025年3月14日

摘　要

针对当前运载器铝锂合金铆接舱段铆接一次合格率较低的问题，本文运用多种质量管理理论开展QC小组活动。遵循PDCA原理，按照QC活动十大步骤，对铆接舱段铝锂合金桁条裂纹频发问题进行调查分析，针对要因制定有效措施并开展实施。最终通过工艺方法优化，完成由传统手工模式向自动化铆接的转变，消除因铆接力不稳定导致的质量一致性差问题，有效降低铆接舱段铝锂合金桁条裂纹风险，铆接一次合格率大幅提升，达到预期目标。

关键词

QC小组，PDCA原理，铝锂合金，铆接舱段，合格率

The Application Practice of QC Group Activities in Improving the First Qualification Rate of Riveting in the Al-Li Alloy Riveting Cabin of the Vehicle

Lei Wang[1], Shuhua Wang[2], Tengfei Qiao[2], Jian Han[2], Jianxin Zang[2]

[1]Beijing Hangtian Airui Equipment Installation Co., Ltd., Beijing
[2]Capital Aerospace Machinery Corporation Limited, Beijing

Received: Feb. 10th, 2025; accepted: Mar. 3rd, 2025; published: Mar. 14th, 2025

Abstract

In order to solve the problem of low first qualification rate of riveting in the Al-Li alloy riveting cabin

文章引用: 王磊, 王树华, 乔腾飞, 韩剑, 臧建新. QC 小组活动在提升运载器铝锂合金铆接舱段铆接一次合格率的应用实践[J]. 管理科学与工程, 2025, 14(2): 394-401. DOI: 10.12677/mse.2025.142041

of the vehicle, this paper uses a variety of quality management theories to carry out QC group activities. According to the principle of PDCA and the ten steps of QC activity, the frequent crack occurrence of Al-Li alloy strings in riveting cabin is investigated and analyzed, and effective measures are formulated and implemented according to the main reason. Finally, through the optimization of the process method, the traditional manual mode to automatic riveting was completed, the poor quality consistency caused by the instability of riveting force was eliminated, the risk of cracking of the Al-Li alloy strings in the riveting cabin was effectively reduced, and the first qualification rate of riveting was greatly improved to achieve the expected goal.

Keywords

QC Group, PDCA Principle, Al-Li Alloy, Riveting Cabin, Qualification Rate

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

随着世界宇航技术的发展，铝锂合金在航空航天领域结构件上得到了越来越多的青睐，铝锂合金作为一种轻质、高强和耐腐蚀的金属结构材料，具有密度低、弹性模量高、比强度高和比刚度高、疲劳性能好、耐腐蚀等优良特性，该材料应用在薄壁加筋铆接结构件上，与常规铝合金相比可实现结构减重10%~15%，且轴压失稳破坏形式基本相同[1] [2]。邹成[3]等通过有限元仿真分析，构建了铝锂合金自动化铆接过程中工艺参数与应力应变的关系模型，并通过实验验证了仿真模型的正确性。王树华[4]等针对铝锂合金开展了自动静压铆接和手工锤击铆接接头力学性能试验，验证了该材料电动静压铆接的可行性，从而提高铝锂合金铆接舱段的生产效率、合格率和质量稳定性。

QC 小组活动遵循 PDCA 循环，即计划(Plan)、执行(Do)、检查(Check)、处理(Act)。其流程一般可细化为十个步骤，每个步骤环环相扣，前一个环节会影响下一个环节的实施。PDCA 是一个周而复始的过程，每一次新发现的问题是下一次 PDCA 的开始，循环前进、阶梯式上升[5]。朱浩[6]等指出 QC 小组的内涵是，一般由企业中管理、技术、生产、服务等岗位人员组成的团队，围绕企业发展目标和战略理念，运用多种质量管理的理论和方法开展活动，攻克对企业发展具有重要性意义的质量难题，从而达到提高个人素质、改进质量、降本增效的目标。杨军[7]等利用基于 TRIZ (发明问题解决理论)与 QC 实践相融合的解决方法，突破了小型密封磁选态铯束管封装效率低的难题，提高了产品综合性能指标和合格率，实现了产品低成本、短周期、高可靠性生产制造的目标。余捷[8]等针对轻型发射机一次装调合格率低的问题组成小组，利用 QC 方法、PDCA 法和统计方法找出问题症结，制定实施对策并巩固措施，实现了提高轻型发射机一次装调合格率的目标。

本文以运载器铝锂合金铆接舱段铆接一次合格率提升为目的，遵循 PDCA 程序，按照 QC 活动十大步骤展开，如图 1 所示，运用质量管理方法开展小组活动，为后续类似质量管理提升项目提供经验。

2. 现状调查及确定目标

2.1. 现状调查

某型号铆接舱段为典型的由端框、桁条、蒙皮组成的骨架式结构，如图 2 所示，采用传统手工铆接装配工艺方法，将上、下端框、中间框、桁条及连接角片组成一个框架结构与蒙皮铆接，大多数桁条约

60 根为 1420 铝锂合金材料，该舱段的装配工艺流程如图 3。

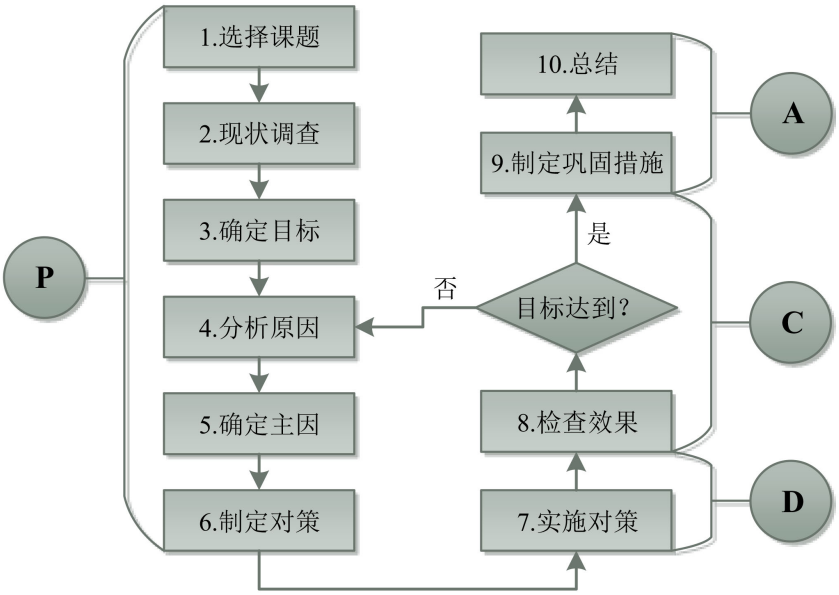

Figure 1. Flow chart of QC method ten steps
图 1. QC 方法十大步骤流程图

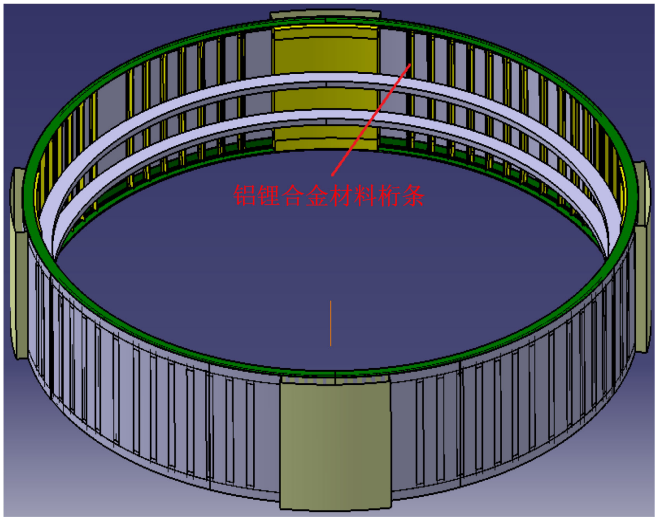

Figure 2. Al-Li alloy strings riveting compartment diagram
图 2. 铝锂合金桁条铆接舱段示意图

铝锂合金材料桁条在铆接过程中极易发生裂纹缺陷，如图 4 所示。针对铝锂合金材料的特殊性，所有钻孔、铰孔、铆接工作要严格按规程文件要求进行操作和检验，并以舱段轴线对称铆接进行。且所有铝锂合金桁条领取零件后、桁条数控钻导孔前后、产品骨架装配后、铆接前及壳体铆接后下架前，都要进行全流程 100%检查工作，目视检查并用 10 倍放大镜仔细检查是否存在裂纹缺陷。整个生产过程耗时较长，严重制约生产效率。且一旦桁条发生裂纹缺陷，必须进行返修，由于产品形成骨架整体后无法单独拆卸更换桁条，需将整体结构拆分再重新铆接，增加零件报废风险，耗时耗力，延长生产周期，返修代价极大。

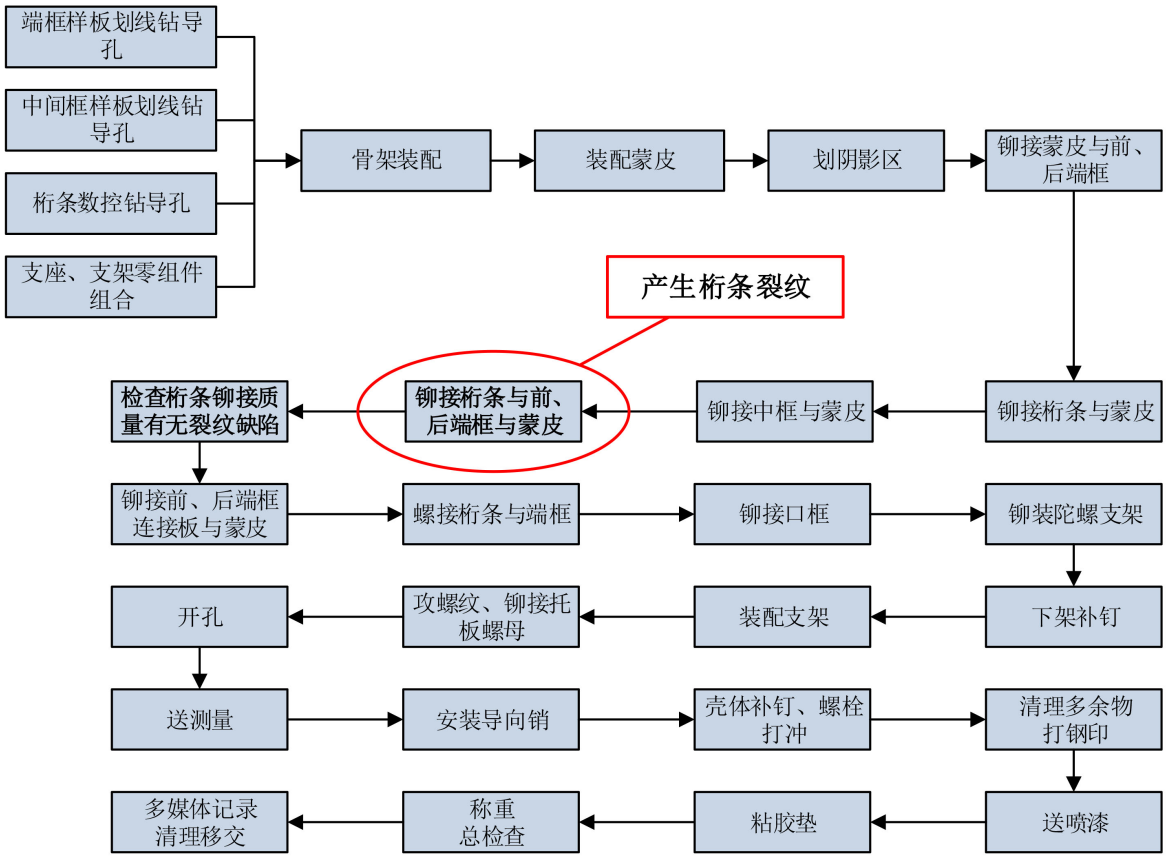

Figure 3. Process flow of Al-Li alloy strings riveting compartment assembly
图 3. 铝锂合金桁条铆接舱段配工艺流程

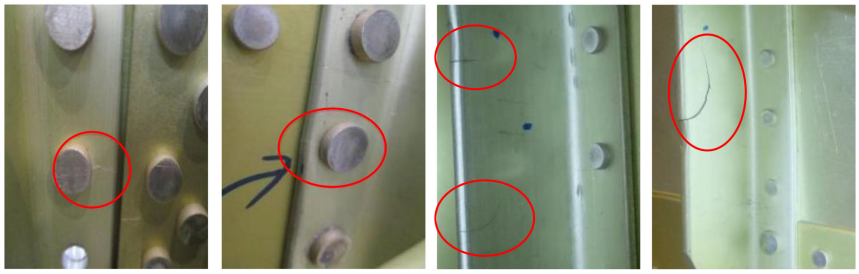

Figure 4. Diagram of crack defect of Al-Li alloy strings
图 4. 铝锂合金桁条裂纹缺陷示意图

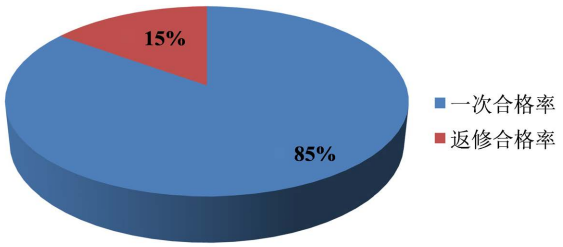

Figure 5. Current status of pass rate of Al-Li alloy strings of riveting compartment
图 5. 铝锂合金桁条舱段铆接合格率现状

经小组成员统计，近年来铝锂合金铆接舱段的生产现状，查阅返修的检验记录，20 个铆接舱段中有 3 件出现桁条铆接裂纹现象，统计饼状图见图 5，铆接一次合格率 85%，质量一致性和可靠性亟待提高。因此选定课题：提高铝锂合金桁条蒙皮结构铆接一次合格率。

2.2. 确定目标

综上所述，锂合金桁条蒙皮结构铆接舱段铆接一次合格率为 85%，不合格现象主要是出现裂纹缺陷。QC 小组拥有高级工程师、工程师、高级工，具备丰富的技改创新和舱段铆接装配经验，本小组将铝锂合金桁条蒙皮结构铆接部段铆接一次合格率由 85%提高至 95%以上并保持稳定设定为小组活动目标。

3. 原因分析

经分析，裂纹成因主要归结于两方面：

① 材料特性方面：铝锂合金材料相较于常用的铝合金材料延伸率较低，铆接性能差；

② 铆接工艺方面：传统手工气动锤击铆接力不稳定，铆接成型过程中，铆钉孔受力膨胀容易产生裂纹，影响产品质量。

小组全体成员运用头脑风暴法，从“人、机、料、法、环”五个方面，对铝锂合金桁条蒙皮结构铆接舱段装配过程中，对铝锂合金桁条裂纹频发问题进行了分析，并找出 5 项末端原因。原因分析鱼骨图如图 6 所示。

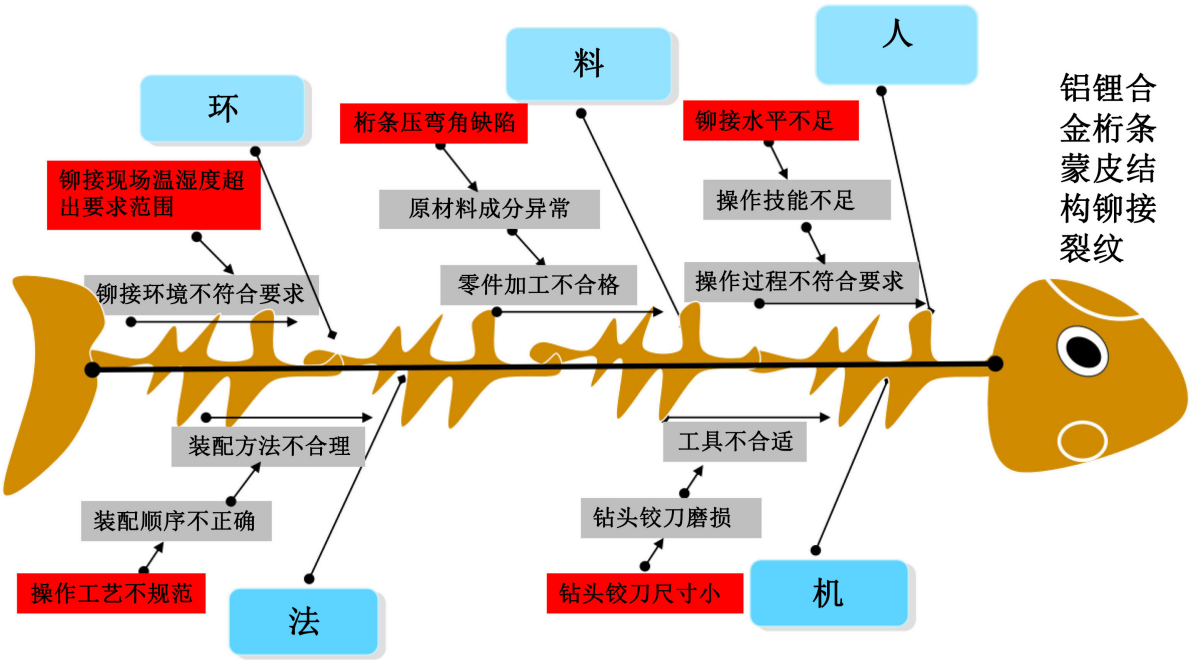

Figure 6. Fishbone diagram of cause analysis of rivet crack in Al-Li alloy strings compartment
图 6. 铝锂合金桁条舱段铆接裂纹原因分析鱼骨图

4. 确定主因

小组成员根据鱼骨图对 5 项末端原因采取调查检测、现场检查、测试试验等分析方法进行逐项确认，并制定铝锂合金桁条舱段铆接裂纹要因确认表，如表 1。根据确认结果进行分析：手工锤击铆接是利用风钻手工制孔后使用铆枪和顶铁通过多次振动锤击使铆钉铆接成型，由于手工制孔孔径存在差异，振动时

铆钉孔受力膨胀不均匀且冲击较大，会影响接头力学性能及稳定性。根据测量之前桁条裂纹发生位置铆钉铆成型的尺寸，存在超差问题。最终确定是因为操作工艺不规范，铆接质量一致性差。

Table 1. Confirmation table for causes of rivet crack in Al-Li alloy strings compartment
表 1. 铝锂合金桁条舱段铆接裂纹要因确认表

序号	末端因素	确认内容	确认方法	确认依据	确认结果	是否要因
1	铆接水平不足	对操作人员职业资格进行检查，并通过铆接测试验证	调查检测	操作者具备上岗证，掌握1420 锂铝合金铆接结构制造和验收技术条件相关文件	操作者均具备上岗证，铝锂合金试片铆接测试均一次合格	非要因
2	钻头铰刀尺寸小	钻头铰刀是否磨损严重，对制孔进行尺寸检测，铆枪窝头、顶铁尺寸是否合适	调查检测	制孔工具及铆接工具尺寸正确	钻头铰刀制孔孔径均在公差范围内，铆枪窝头、顶铁符合要求	非要因
3	桁条压弯角缺陷	检查桁条零件是否办理质疑单，原材料成分是否异常，桁条压弯角是否合格	调查检测	零件合格证检验合格，现场零件实测尺寸合格	随机抽查桁条零件均无质疑单，尺寸符合设计图纸要求，无裂纹	非要因
4	操作工艺不规范	检查桁条装配工序是否正确，是否严格按照要求钻孔铆接，是否进行对称铆接	现场检查	钻孔铆接铆钉铆成型尺寸合格，铆接过程无空枪	铆接测试中，不同铆钉孔径垂直度及大小不同，铆成型尺寸存在差异，一致性较差	要因
5	现场温湿度超出要求范围	检查舱段铆接现场湿度记录	现场检查	厂房温度：10℃~30℃，湿度 ≤75%	厂房温湿度符合生产要求	非要因

5. 制定对策与实施

针对主要原因，小组成员制定了两项对策，并依据有效、方便、可操作的原则，结合生产实际对比评价，最终选定一套方案。首先开展电动压铆与手工锤铆接头力学性能试验，验证电动压铆方式的可行性；然后利用自动钻铆系统设备开展试验件验证，摸索并总结最佳钻铆工艺参数；最终实现产品工程应用，消除由于手工锤击铆接力不稳定因素。小组通过 5W1H 的方法制定对策实施计划表，措施具体、有针对性，目标明确、量化，如表 2 所示。

Table 2. Countermeasure implementation plan table
表 2. 对策实施计划表

序号	主要原因	对策 What	目标 Why	措施 How	负责人 Who	地点 Where	完成日期 When
1	操作工艺不规范	优化工艺方法，电动静压铆接替代传统手工铆接	电动静压铆接铆接力稳定，质量稳定可靠，一次铆接合格率 ≥95%	接头力学性能分析	XXX	计量理化所	20230620
				编程及试验件验证	XXX	生产现场	20230820
				工程化应用	XXX	生产现场	20231020

6. 效果检查

6.1. 有形效果

实施 QC 小组制定的对策，优化工艺方法采用自动化设备静力铆接后，截至目前共计生产 5 件铝锂合金桁条蒙皮铆接舱段产品，经十倍放大镜检查，无裂纹发生，一次铆接合格率高达 100%，见图 7，达到且超出预定目标。

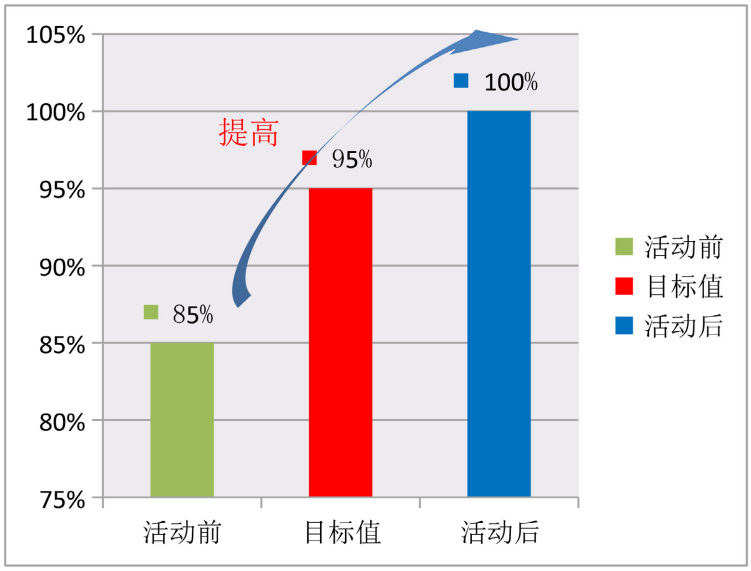

Figure 7. First riveting pass rate target achieved
图 7. 一次铆接合格率目标达成情况

6.2. 无形效果

(1) 通过由传统手工方式向自动化铆接的工艺方法优化，降低操作者劳动强度和现场噪音，消除了损伤工人身心健康的危害，符合绿色环保的生产理念；

(2) 在提高生产效率、加快生产进度的同时，也为提升产品合格率和质量稳定性提供了保障，大大降低了因出现桁条裂纹返修消耗的人力、物力及时间成本；

(3) 为后续将自动钻铆技术持续推广至其他特殊材料不断提供思路，持续扩大自动化生产范围，提升设备利用率，推动铆接装配车间向智能化、信息化发展。

6.3. 效益分析

(1) 节约返修周期

结合某型号研制经验，15%的产品会产生裂纹问题，单件返修周期 14 天。每年按 6 件铝锂合金桁条铆接舱段计算，共节约 6 × 14 × 8 × 0.15 = 100.8 h。

(2) 降低研制成本

工艺改进后，单个产品生产周期由原来的 2 人 15 天缩短为 1 人 10 天，单个产品正常研制共可节省 160 h，人工费率按 150 元/小时计算，年产 6 件产品，共节省人工成本：160 × 150 × 6 = 14.4 万元。

7. 巩固措施

(1) 将优化后的自动钻铆工艺方法落实工艺规程中，按工序选用相应的自动化程序进行加工，摸索并固化自动钻铆系统设备的最佳钻铆工艺参数；

(2) 明确操作细节，优化程序和加工路径，加强生产控制要求，细化技术交底书，提高人员操作质量意识；

(3) 后续持续关注工艺方法优化后的产品铆接一次合格率情况，通过不断优化自动钻铆铆接工艺参数、提升设备性能、完善刀具结构、规范现场操作，持续提高铝锂合金桁条铆接舱段铆接质量稳定性和可靠性。

8. 总结

本课题针对铝锂合金桁条舱段铆接裂纹问题，积极利用 QC 工具，按照 PDCA 程序开展活动，运用头脑风暴法、鱼骨图、调查表、5W1H 对策实施计划表等质量工具，分析出质量问题的主要原因并制定有效措施，通过工艺优化改进措施，最终实现铝锂合金桁条铆接舱段零裂纹，生产合格率达到 100%，实现预期目标。此次 QC 活动的开展，提高了组员问题意识、质量意识、改进意识、团队意识和参与意识，大幅提升了生产人员的团队协作与沟通能力，显著增强了团队凝聚力和创新力。

参考文献

[1] 阳志光, 范瑞祥. 1420 铝锂合金在宇航薄壁加筋铆接结构上的应用研究[J]. 宇航材料工艺, 1998(4): 74-76.

[2] 刘志鹏, 肖阳, 马凯杰, 等. 航空航天铝锂合金开发及其研究进展[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(11): 8-17.

[3] 邹成, 凡志磊, 王宇波. 铝锂合金自动化铆接过程应力应变特性研究与分析[J]. 现代制造技术与装备, 2017(11): 74-75.

[4] 王树华, 季一伟, 高亮, 等. 1420 铝锂合金材料自动压铆和手工锤铆接头力学性能研究[J]. 材料科学, 2024, 14(1): 1-7.

[5] 赵斌, 黄长羽, 杜晓旭, 江磊. 基于 QC 小组降低 A 膜涂布过程“竖条道”缺陷发生率[J]. 质量探索, 2022(4): 75-82.

[6] 朱浩, 郑斌, 张钊, 等. 基于 QC 小组活动的全面质量管理创新与实践[J]. 水电与新能源, 2019(10): 49-51.

[7] 杨军, 陈江, 马寅光, 杨炜, 雷志忠. 基于 TRIZ 理论提高磁选态铯束管真空封装效率的 QC 小组活动实践[J]. 质量与可靠性, 2021(4): 42-51.

[8] 黄奕, 李爱华, 吴海东, 左亦功. 应用 QC 方法提高轻型发射机一次装调合格率[J]. 质量探索, 2023(2): 85-93.