

# 铝合金车体工件加工变形控制方法及应用研究

孟祥瑞

中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛

收稿日期: 2022年7月14日; 录用日期: 2022年8月18日; 发布日期: 2022年8月29日

## 摘要

铝合金零部件的加工精度直接关系到车体部件装配质量。为降低铝合金车体工件在加工过程中的变形, 从型材变形、焊接变形、挠度变形和加工条件引起的变形等方面对车体零部件的变形种类和原因进行了阐述。在此基础上, 提出了控制加工变形的工艺措施, 即误差补偿、改善装夹方式、试切法和合理设计切削参数, 并结合生产实际对变形控制方法进行了应用研究, 结果表明本文所提出的控制方法可以有效地减小加工变形, 为解决铝合金零件加工变形问题提供参考。

## 关键词

铝合金车体, 加工变形, 工艺措施

# Research on Deformation Control Method and Application of Aluminum Alloy Car Body Workpiece Processing

Xiangrui Meng

CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao Shandong

Received: Jul. 14<sup>th</sup>, 2022; accepted: Aug. 18<sup>th</sup>, 2022; published: Aug. 29<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The processing accuracy of aluminum alloy parts is directly related to the assembly quality of car body parts. In order to reduce the deformation of aluminum alloy car body parts in the process of processing, the types and causes of deformation of car body parts are described from the aspects of profile deformation, welding deformation, deflection deformation and deformation caused by processing conditions. On this basis, the technological measures to control the processing deformation are put forward, including error compensation, improvement of clamping mode, trial cutting method and reasonable design of cutting parameters. Combined with the production practice,

this paper studies the application of the deformation control method. The results show that the control method proposed in this paper can effectively reduce the processing deformation, and provide a reference for solving the processing deformation problem of aluminum alloy parts.

## Keywords

Aluminum Alloy Car Body, Processing Deformation, Technological Measures

Copyright © 2022 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

随着轨道交通行业向着轻量化和高速化的方向发展, 高速列车车体的制造要求也越来越高[1]。铝合金结构具备重量较轻、比强度高, 可加工性好等优点, 广泛地应用于列车车体制造[2]。在车体结构加工过程中, 车体型材、焊接、加工工艺等方面的缺陷会直接影响到加工精度和效率[3]。同时, 由于铝合金材料导热性好、线膨胀系数大, 在机械加工中更容易出现加工变形问题。为此, 本文分析了铝合金工件加工变形产生原因及影响因素, 并针对铝合金车体在机械加工过程中如何控制加工变形和提高加工精度进行分析研究, 图 1 为主要研究内容及研究思路。

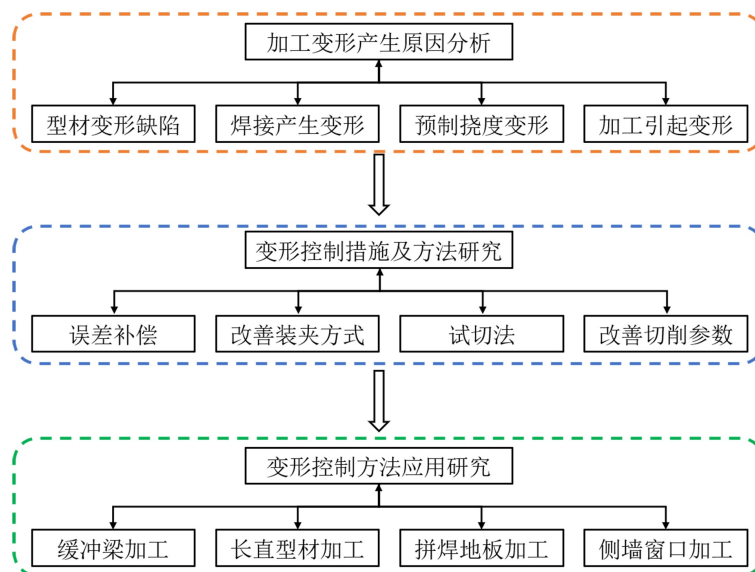


Figure 1. Main research content and research ideas

图 1. 主要研究内容及研究思路

## 2. 车体结构件加工工艺特点分析

图 2 为高速列车铝合金车体的主体结构组成示意图。中间车车体主要由车顶、侧墙、底架和端墙等大部件构成[4], 部件结构为大型中空挤压铝合金型材。铝合金型材截面形状多样、壁厚相差较大、长度一般在 20 m 以上, 通过多块型材拼焊形成整体承载结构。特殊的结构对型材的成型质量提出了较高的要求。由于部件的尺寸精度直接影响装配质量, 也对由型材构成的零部件的加工精度有更高的要求。

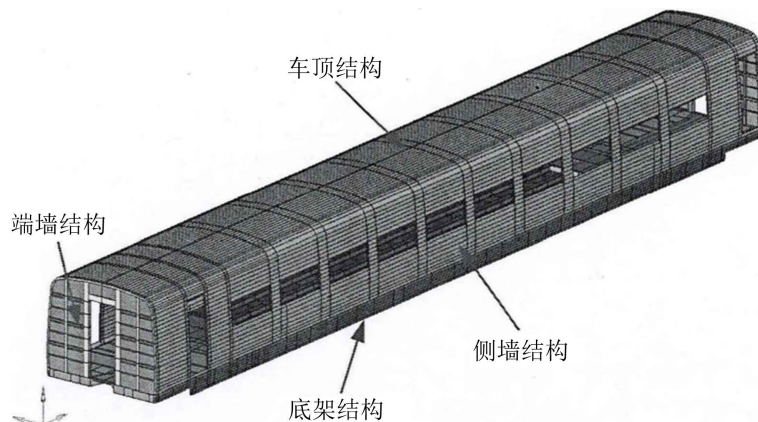


Figure 2. Composition of aluminum alloy car body [4]

图 2. 铝合金车体组成[4]

车体结构件具有纵向尺寸大、壁薄多腔、截面复杂、表面曲率变化大的结构特点，导致了其在工艺上具有加工内容多、相邻加工内容距离远、装夹难度大且易产生装夹变形等工艺特点。

### 3. 变形种类及原因分析

车体型材自身的变形缺陷、多块型材拼接焊接产生的变形、产品技术要求的挠度变形和加工条件引起的变形都会对铝合金部件的加工精度产生影响，本文从这四个方面对影响加工变形的因素进行探究。

#### 3.1. 型材变形缺陷

型材的形状尺寸缺陷直接影响到后续的机械加工精度。形状尺寸缺陷主要包括尺寸不满足要求、平面度、直线度和轮廓度等指标不满足要求。在列车型材的加工作业内容中，不同的零部件对形状尺寸的要求不同。在底架边梁和车顶边梁的加工作业中，需要关注型材直线度是否达标；在地板、车顶板和侧墙的作业中，主要考虑型材的平面度和轮廓度。

#### 3.2. 焊接变形

在高速列车的车体结构设计中，底架地板、侧墙、车顶等大部件均是由多块长直型材搭接拼焊而成，然后由加工中心对局部特征进行机械加工。在焊接过程中，热输入量大、焊缝长度长且数量较多，加之铝合金线膨胀系数高，因此会产生一定的焊接变形，会直接影响大部件局部特征的位置精度和尺寸精度。如图 3 所示，地板型材拼焊后出现上翘的挠曲变形，需要在后续加工工序中进行误差补偿。

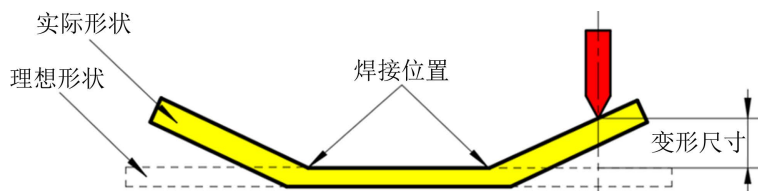


Figure 3. Schematic diagram of welding deformation error

图 3. 焊接变形误差示意图

#### 3.3. 预置挠度变形

由于车体后续要进行内外饰的安装以及在正式运营中乘员对底架中部的载荷作用，会导致车体产生下挠的变形，因此对车体采用预置挠度的方式解决此问题。侧墙和地板需要进行预置挠度，对于后续的

机械加工精度有很大的影响，与焊接变形处理方法相同，需要在加工前进行误差补偿。如图 4 所示，为配合底架预置挠度，侧墙组成在组焊时也会预置一个挠度，最终加工成型的窗口轮廓与侧墙轮廓相匹配。

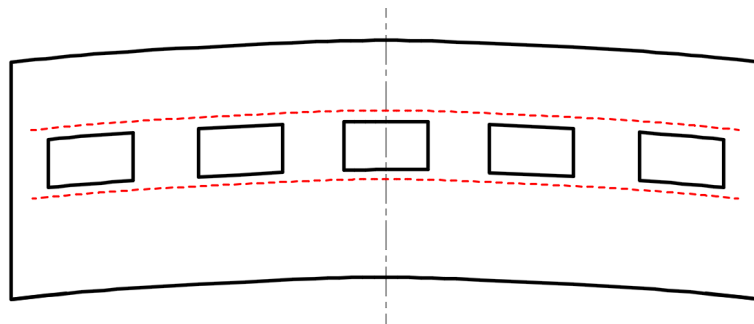


Figure 4. Preset deflection deformation of side wall  
图 4. 侧墙预置挠度变形

### 3.4. 加工条件引起的变形

导致铝合金在加工的过程中出现变形的因素有很多，主要包括有机床、夹具、刀具、切削参数以及切削工艺[5] [6] [7]。机床的影响主要有定位的精度；工装夹具的位置、尺寸和夹紧力也会给铝合金材料的加工带来影响，如果尺寸及夹紧力不合理的话，将会导致加工变形现象的发生。刀具参数、加工顺序和加工量直接影响工件的加工变形程度。

## 4. 变形控制措施

### 4.1. 误差补偿

关于铝合金型材因焊接变形和预设挠度导致的加工精度较低的问题，一般有两种控制措施，分别为多次对刀和探头测量进行误差补偿。对于有探头测量的设备，根据加工内容使用探头进行工件表面轮廓度的测量，将测得的数据反馈至机床的主机，进行误差补偿，从而保证加工精度。对于无法使用探头测量的设备，一般采用多次对刀的方法减小因工件变形带来的影响。本文将误差补偿法应用至动车组车体零件加工中，对其在提高加工精度方面进行了研究。

1) 多次对刀误差补偿：在缓冲梁加工中，需要在缓冲梁的三个面进行加工，采用多次对刀法进行三次定位夹紧，在每一次定位夹紧工步中均进行了对刀操作，以此提高加工精度。在底架边梁长直型材的加工中，为保证加工精度，根据长度方向上滑槽开口等特征的分布情况，进行分段作业并在每个区域均进行多次对刀。通过应用多次对刀进行误差补偿，实现边梁滑槽尺寸偏移量由 4 mm 减小至 0.5 mm，避免了过切和加工深度不足的问题。

2) 探头测量误差补偿：将带探头测量设备应用至车体大部件的加工中，以此对焊接变形和预制挠度变形进行误差补偿，提高加工精度。在组焊地板加工中，由于焊接变形导致两侧地板翘起，最大变形量为 3 mm，为满足地板孔、槽等特征的加工内容，采用探头进行变形测量后进行误差补偿，极大提高了地板的加工精度。在对有预制挠度变形的侧墙大部件加工作业中，使用带探头测量设备进行加工作业，实现补偿挠度变形量 17 mm，使得加工成型的窗口轮廓与侧墙轮廓相匹配，有效避免了因预制挠度变形导致加工尺寸偏移问题。

### 4.2. 改善装夹方式

对于由于夹紧力引起的加工变形，可以通过改变装夹方式进行改善。对薄壁薄板工件进行加工时，

选用真空吸盘进行装夹，以获得分布均匀的夹紧力，再以较小的切削用量来加工，可以很好地防止工件变形。如图 5 所示，在车体缓冲梁加工中，为增加工件的工艺刚性，在工件内部添加支撑，以减少装夹和切削过程中工件的变形。表 1 为缓冲梁装夹方式改善前后加工变形对比。可以看出，未加刚性支撑时，由于工件壁厚较小，刚度较小，导致在切削及铣削过程中产生较大加工变形，尺寸减小了 6 mm，而通过内部加刚性支撑改善装夹方式，使得工件刚度提高，加工变形较小，尺寸仅减小了 1 mm，有效提高了工件的加工精度和质量。

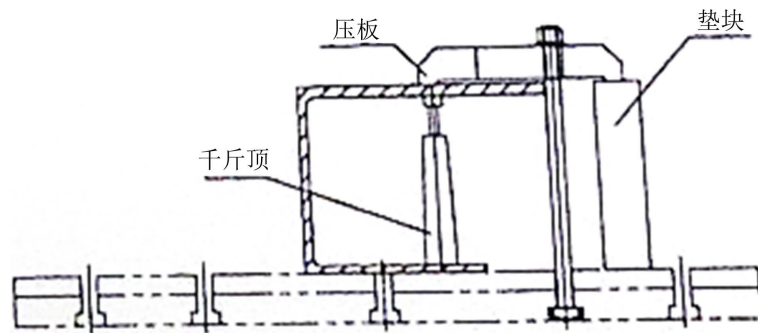


Figure 5. Internal support of buffer beam  
图 5. 缓冲梁内部支撑

Table 1. Comparison of processing deformation before and after the improvement of the buffer beam clamping method  
表 1. 缓冲梁装夹方式改善前后加工变形对比

	未加刚性支撑/mm	施加刚性支撑/mm	设计值/mm
加工尺寸	194	199	200

### 4.3. 试切法

试切法是针对需加工的零部件采用多次逐步切削，直至满足加工要求的一种方法。部分车体零部件的某些部位加工精度要求高，不易加工，而且由于存在变形缺陷更增加了加工难度。针对这类情况，仅仅依靠工装和正常加工方法无法保证加工精度，采用试切法可以较好地解决这类问题。如图 6 所示，在加工窗口等类似部位时，不采用一次下刀加工至要求位置，而是分多次进刀切削，即渐进式的逼近要求的加工位置，直到完成最终的加工。

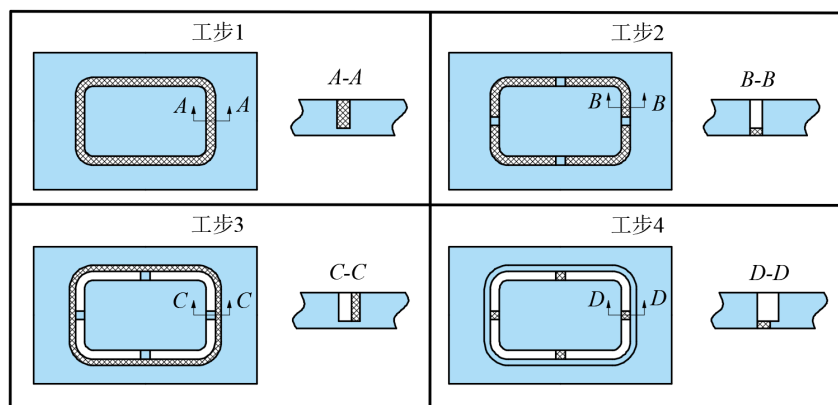


Figure 6. Schematic diagram of multiple milling of side wall window  
图 6. 侧墙窗口多次铣削示意图

#### 4.4. 合理设计切削参数

对于由于切削力、切削热引起的变形,可以通过正确选择和设计刀具参数以及合理安排加工顺序来完成[8]。合理选择刀具几何参数,前角适当选择大一些,可以减少切削变形,使排屑顺利,进而降低切削力和切削温度。粗铣时,由于进给量大,切削负荷重,发热量大,要求刀具散热条件好,因此,后角应选择小一些。精铣时,要求刃口锋利,减轻后刀面与加工表面的摩擦,减小弹性变形,因此,后角应选择大一些。同时,也可以通过合理安排加工工序来实现,采用粗加工-半精加工-精加工的加工工序,采用对称加工和分层多次加工等方法可以减小加工变形。

### 5. 结论

1) 本文对轨道交通车辆铝合金车体零部件加工变形的种类进行了总结并对变形原因进行了分析,主要为车体型材自身的变形缺陷、多块型材拼接焊接产生的变形、产品技术要求的挠度变形和加工条件引起的变形等。

2) 针对不同的变形缺陷及原因提出了可提高和保证零件加工精度的控制措施,主要为误差补偿、改善装夹方式、试切法和合理设计切削参数等。

结合生产实际,对多种加工变形控制措施及方法进行了应用研究,结果表明本文所提出的控制方法可以有效地减小加工变形,保证零部件的加工精度。

### 参考文献

- [1] 冀敏. 高速列车车体结构件高效加工系统关键技术研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2018.
- [2] 陈亮, 袁芬芬, 陈海莹. 铝合金零件加工变形的解决方法[J]. 内燃机与配件, 2021(4): 103-104.
- [3] 韩如冰, 刘凯, 刘俊, 徐敏. 铝合金车体零部件加工变形分析及其解决方案[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(4): 28-31.
- [4] 史艳民. 高速列车车体结构分析及优化方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [5] 吴庆锋. 铝合金加工变形分析与控制研究[J]. 黑龙江科学, 2018, 9(24): 68-69.
- [6] 王国成. 铝合金加工变形控制探析[J]. 世界有色金属, 2019(11): 166-167.
- [7] 胡相斌. 铝合金零件加工变形原因分析及工艺控制措施[J]. 机械研究与应用, 2020, 33(2): 185-187.
- [8] 耿小云. 铝合金加工变形分析与控制[J]. 世界有色金属, 2017(15): 284+286.