

轨道交通超长铝合金型材加工难点及解决措施

刘郁凤

湖南联诚轨道装备有限公司 湖南株洲 412001

摘要：以轨道交通超长铝合金型材加工为研究对象，从图样设计、工艺分析、刀具选择和程序编制等方面进行对比优化，针对高速加工中存在的振动、噪声大和编程效率低等问题，提出了可行的技术方案和工艺措施。经现场加工验证，解决了超长铝合金型材的加工难点问题。

关键词：铝合金型材；高速加工；工艺分析；解决措施；刀具选择；编程效率

1 序言

目前，通过使用大量轻质、高强度材料，实现车身大幅度减重，已经成为城市轨道交通车体轻量化最主要的手段。由于铝合金型材具有强度高、结构轻、抗冲击、结构稳定和焊接性能良好等多方面的优点，因此中空结构铝合金型材在航空、航天、汽车、机械制造、船舶及轨道交通等领域被广泛应用。据统计，铝合金型材的使用量已达到地铁车体结构总质量的60%以上。但是，由于其特殊的中空薄壁结构和产品超长的结构特征，导致铝合金型材在高速加工过程中，存在容易切削变形、振动开裂、加工噪声大和刀具磨损快等问题，严重影响中空铝合金型材的加工效率和经济效益。

下面以公司常年加工的铝合金车体顶盖边梁、顶盖长梁和底架边梁为例，提供一些高效实用的高速加工方案。案例使用的加工设备为30m五轴桥式加工中心。

2 加工技术要求分析

在铝合金车体结构中，最常见、最主要的细长铝合金型材包括顶盖边梁、顶盖长梁和底架边梁型材，几乎是现有轨道车辆中高铁、动车和地铁车体的主流设计结构，其共同特点是型材截面呈中空不规则的结构，一般型材壁厚3~12mm，不同车型断面结构尺寸各不相同，产品长度一般为15~25m，属于超细长工件。

各类边梁型材的加工具有很大的相似度和集中

度特点，其主要加工特征都集中在总长端面、车门安装口、边梁悬挂筋板缺口及C形滑槽等位置。

边梁作为车体组焊的关键重要配件，总长尺寸、车门安装口尺寸和相邻车门之间的中心距（公差 $\pm 0.5\text{mm}$ ）要求非常高，公差等级达到精密级f。

3 工艺难点分析

工件的加工难点如下。

1) 粗加工效率低。粗加工是采用最高效的加工方式，实现快速去除加工材料的目的。在边梁加工中，总长端面、车门安装口、边梁悬挂筋板缺口及C形滑槽位置集中了70%以上需要切除的材料，这些位置的粗加工占用了整根边梁加工时间的一半以上。

2) 加工振动、变形和噪声大。由于铝合金型材的中空薄壁和细长的特殊结构，因此其本身刚性不足，内壁型腔受切削力挤压时，会产生振动，由此带来的结果就是噪声大、产品变形甚至开裂，同步导致产品加工效率低和刀具损耗快等不良后果。

3) 精加工过切或加工尺寸不到位。铝合金型材在挤压过程中，型材的直线度、扭拧度不可能达到绝对理想的状态。型材挤压也有相应的公差标准，根据EN 755-9: 2001《铝以及铝合金——挤压棒材，管材以及型材 第九部分：型材，尺寸公差与形状公差》，型材截面宽度200~300mm、长6m以上的铝合金型材，其扭拧度标准是7mm，弯曲度偏差 $\leq 1.5\text{mm/m}$ ，由此精加工必须充分考虑铝合金型

材实际状态和理论尺寸之间的误差，举例来说，粗加工预留5mm的加工余量，由于受扭拧度和直线度影响，那么此处实际预留的精加工余量就不是理想的5mm，因此直接导致的结果是过切或是精加工尺寸无法保证。

4) 工件装夹和拆卸辅助时间长。20m长度左右的型材，一般都需要大约10个点位的工装固定。人工手动夹紧效率低，劳动强度较大，当面临产品种类切换时，工装更换和调整周期长。

5) 编程效率低、程序调试周期长。据了解，目前国内各大轨道交通制造主机厂加工车辆底架、铝合金边梁型材和大型铝合金焊接结构件时，主要还是以手动编程为主。手动编程能更好地满足现场工艺变更、尺寸调整等要求，但其效率和准确性不如自动编程高，程序调试时间长。

4 工艺解决方案

4.1 粗加工方案

采用锯切的方式去除粗加工余量。边梁总长端面、车门安装口位置，都可以采用锯切加工的方式，把整块材料分割切除；边梁悬挂筋板之类的缺口，可采用T型刀（或三面刃铣刀）分割切除，而不是把切割的材料分层加工成切屑。主要做法是在需要切除材料的两端加工一个缺口，使需要切除的材料两端与产品分离，再采用锯片或T型刀把中间部分整体切割下来。此方法的加工效率是常规粗加工的数倍，但是在操作过程中，需要特别注意废料与产品分离时不能碰撞到刀具，使废料向下平稳落地。

采用旋转主轴或角铣头加工边梁总长。一般来说，边梁长度方向单边只有10mm左右的余量，在某些设备不支持大型号锯片时，可采用旋转主轴或利用角铣头，通过铣平面的方式加工总长。

锯切加工应用举例：在广州某条线的底架边梁加工中，铝合金型材上表面需要加工一个长904mm的缺口，加工过程如图1所示。

从图1可以看出，如果采用立铣刀进行粗加工，绝对会出现加工振动大、噪声大以及加工效率低的问题，显然不是去除材料最高效的工艺方案。

锯切加工方案和难点分析认为，该缺口不是一个标准的等腰梯形结构，在缺口的开口位置，左右

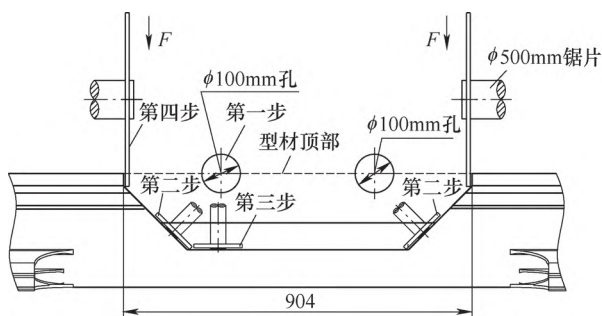


图1 加工过程示意

两端都是垂直向上的直边结构，整个缺口由5个方向的面包围而成，一两段切割刀路无法完成整个缺口的加工；距离缺口131mm位置，设计有12mm厚筋板结构，需要合理选择三面刃铣刀的直径，铣刀既要保证缺口被切透，又要防止刀具伤到缺口侧面12mm厚的筋板；该缺口位于产品型材上表面，切下来的废料不能随自重掉落脱离工件，废料与铝合金型材断开时，存在碰撞刀具的风险，存在很大的安全隐患。

装夹方案如图2所示。具体加工过程：第一步，通过螺旋铣孔加工方法，在需要加工缺口的型材顶部左右两端各加工一个 $\phi 100\text{mm}$ 的半圆通孔，目的是防止三面刃铣刀在执行第二步切割斜面时刀柄与工件碰撞。因为三面刃铣刀长度不够（过长的刀具会导致其刚性不足），所以通过开孔来避让刀具与工件的碰撞^[1]。第二步，采用 $\phi 125\text{mm}$ 三面刃铣刀，在旋转主轴的情况下，对缺口两端的斜面进行切割，分别从型材两侧面各切割一次，使缺口左右斜面和型材分离。第三步，同理，分别从两侧面把缺口底部切断，使斜面切割缝与底部切割缝重合，至此已经完成了3个方向的切割分离。第四步，换用 $\phi 500\text{mm}$ 锯片刀，目的是为了防主机床与型材顶部的碰撞干涉。把主轴机头旋转放倒至 90° 状态，分别对尺寸904mm缺口的左右端面从上往下切割，缺

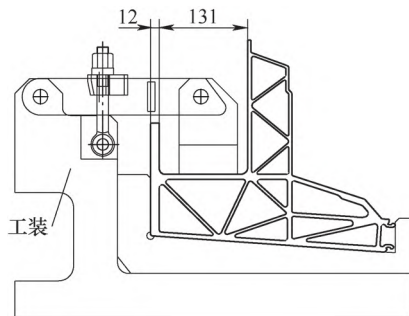


图2 装夹方案示意

口处的废料会脱离工件，此时刀具在工件正上方，从而避免了废料碰撞刀具的问题。

4.2 振动、变形和噪声改善措施

产生振动、变形和噪声的原因归根到底在于在加工过程中工件刚性不足，可以从以下几个方面控制和改善振动等问题。①合理布置各个工装夹紧点之间的距离，结合实际加工经验，每个工装夹紧点之间的跨度最大不能超过2m，对于一些强度差的薄壁型材（型材壁厚4mm及以下），应设置更小距离的工装夹紧点。②工件切削余量大的区域尽可能靠近工装夹紧点位置。③采用小切削量、快进给速度的加工方式。④在使用侧刃加工大余量材料时，刀具中心的进刀方向尽量偏离加工余量的中心，保证刀具侧刃的切削效率^[2]。

4.3 精加工方案

在加工坐标系下，采用雷尼绍测头对加工位置进行X轴、Y轴和Z轴（可根据精加工情况选择X轴、Y轴和Z轴任意一个或几个）方向测量，探头测量的结果就是型材实际状态和理论位置的差值，这个差值会存储在机床参数#地址（西门子系统为R参数）下面，在加工程序中代入该参数，实现产品的精铣加工。此法是最准确的一种精加工方案，但机床必须安装有雷尼绍无线电测头。

在没有雷尼绍无线电测头的情况下，采用人工测量补值法，这也是一种操作性很好的精加工方案。其主要实施过程为：粗加工预留一定的精加工量，粗铣完成后，人工测量粗铣后的实际余量，并输入到机床参数中，通过程序计算得出粗铣预留量和实际测量预留的差值，并在加工过程中自动纠正差值。例如，粗加工编程：G01 Y5 F2000（表示Y轴正方向预留5mm加工余量）；精加工编程：G01 Y[5-#1] F2000（#1表示实际测量的加工余量）。

4.4 快速装夹、拆卸方案

工装设计要充分考虑通用性，一套工装应尽可能满足所有同类型产品的加工。工装设计可以采取模块化结构，一部分为基础工装，主要对产品进行夹紧固定；另一部分为仿形定位结构，作为产品装夹的定位基准。优先采用气动、液压等自动或半自动化装夹，合理的装夹方案，优先满足一次装夹完成所有加工工序，避免工件第二次翻面加工，充分利用机床主轴的旋转功能、角铣头、T型刀和成型

刀等，实现一次装夹完成所有工序。采取合理的工装布局，同一种边梁型材，由于不同的车型和产品有一左一右的对称结构，因此会加工成多种不同的产品，在工装布局中，一种工装布局尽量兼顾所有同种型材加工的产品。

4.5 提高编程效率和准确性

随着工业软件的进步和发展，涌现出了一大批CNC编程软件。软件编程具有速度快、精度高和可靠性高等特点，很多方面是手动编程无法比拟的。现在CAD/CAM行业中普遍使用的软件工具有MASTERCAM、CIMATRON、PRO-E、UG和CATIA等，在轨道交通行业的铝合金型材加工中，主要以二维刀路为主，基于此，MASTERCAM作为二维编程中的佼佼者，是最合适的一款编程工具。软件编程的缺点是产品变更或尺寸变化时，现场程序调试不方便；在某些情况下，CNC编程的加工效率不如手工编程；在边梁精加工时，软件编程不能很好地控制型材变形引起的偏差。

手动编程前期工艺准备时间较长，但手动编程具有更强的适应性和灵活性，通过边梁的图样分析可以看出，各种边梁的结构和加工特征基本相同，可以大量采用宏程序、调用固定循环命令以及调用自定义子程序等方式，提高手工编程的效率和准确性。例如，顶盖边梁上C形滑槽的加工，每个滑槽只需要在程序中定义C形滑槽的长度和中心位置坐标即可^[3]。创建模块化编程结构和自定义子程序库，编制同类型边梁的程序结构，下次遇到类似结构的新产品，可以在现有的程序上进行更改，类似结构位置的加工程序可以直接在子程序库调用。对于一些复杂的轮廓、曲面和编程坐标计算量大的特征，可以充分发挥计算机软件编程的作用；对于一些简单、类似的结构，采用手动编程更实用。

5 结束语

本文针对超长铝合金型材加工中存在的难点，提出可行的解决措施。从工艺方案、刀具选择和程序编制等方面进行优化，通过加工验证，取得了很好的效果。对于超长铝合金型材加工，要善于总结经验，借鉴和推广高效的工艺方案，不断进行工艺优化和技术攻关，多去学习了解加工方面的前沿知识和工艺，例如新设备、新型刀具和自动化装夹方

复杂立方结构零件的柔性制造工艺

董钺¹, 赵磊², 卫晓栋²

1. 空军装备部驻新乡地区军事代表室 河南新乡 453000

2. 新乡航空工业(集团)有限公司 河南新乡 453000

摘要: 基于复杂立方结构零件的结构特点和工艺方案, 提出使用柔性制造系统(FMS)进行加工以提高加工效率和质量。通过优化工艺方案、夹具和刀具等具体措施, 合理安排生产, 实现了零件在FMS生产线的柔性加工, 取得了良好效果。

关键词: 壳体零件; 立方结构; 工艺优化; 柔性制造; FMS生产线

1 序言

复杂立方结构零件是航空附件厂常见的壳体零件, 其外形包容面呈立方结构, 其中5、6个面均需要使用加工中心进行加工, 具有加工内容多, 尺寸、几何公差要求严格的特点。以某拳头产品壳体零件(见图1)为例, 零件一有5个面需要使用加工中心进行加工, 零件二有6个面需要使用加工中心进行加工。

两种零件在以往的加工过程中, 存在以下共同点。

1) 二者需要的设备均以加工中心为主, 根据零件结构特点, 需要使用三轴加工中心、四轴加工中

心及五轴加工中心等设备。

2) 两种零件精加工均以孔系加工为主, 孔系结构复杂, 需要的刀具数量多, 对加工过程稳定性要求较高。

我公司零件的生产特点为多品种、小批量, 换型频繁。在传统离散型制造模式下, 零件在各工序、各工种之间反复周转, 工序间的等待、准备时间较长; 每次加工需要重复进行夹具设置、刀具准备及对刀试切等工作, 导致全局设备效率(OEE)常年保持在30%~40%的较低水平, 大大延长了零件的生产周期。以零件一为例, 据统计, 一批12件零件, 精加工周期在40天左右。在反复周转零件过

案等, 学会在实际工作中融会贯通, 不固守现有的工艺方法和思路。工艺没有最好, 只有更好, 在实际应用中要持续改进, 不断创新。

参考文献:

- [1] 张政民, 王忠平, 宋福田. 轨道车辆薄壁铝型材的典型加工工艺[J]. 新技术新工艺, 2013(9): 80-83.
- [2] 徐宗涛, 肖冲. 高速动车组薄壁类铝型材零件机械加工工艺研究[J]. 现代制造技术与装备, 2020(11): 140-141.
- [3] 孙明. 浅析铝合金板类型材的高速加工工艺[J]. 科技创新与应用, 2013(16): 53.

专家点评

超长铝合金型材由于其特殊的中空薄壁结构, 因此在高速切削加工中存在变形、振动、加工噪声大和刀具磨损快等问题。作者综合考虑以上因素, 制定可行的解决方案, 通过提高工艺刚性, 改善加工中的振动、变形和噪声问题; 通过设计工装夹具, 实现型材的快速装夹与拆卸; 粗加工采用锯切方法快速去除大部分余量; 数控加工采用宏程序、自定义子程序等方法, 提高了编程效率。

MW 20240423