

doi: 10.7690/bgzdh.2022.08.006

车体大型铝合金侧墙结构件加工技术

陈洪海, 张大舜, 孟凡军, 张磊, 王力军, 谭传杰, 李福坤, 郭波, 桑蒙
(长春设备工艺研究所数字化制造技术研究室, 长春 130012)

摘要: 针对高铁列车侧墙结构件在加工中存在的问题, 在现有数控设备的基础上开展铝合金关键件数控高速高精度技术研究。根据高速列车车体铝合金关键件结构特点与工艺特性进行分析, 从机床动力学特性分析与铣削动力学特性软件分析技术以及列车侧墙结构件曲面数控加工过程中程序的优化技术 2 方面解决加工效率和精度问题。结果表明: 该技术能显著提高关键零件的加工效率和质量, 可在同行业产品加工中推广应用。

关键词: 中空多腔薄壁; 曲率大; 易变形; 工艺数据库

中图分类号: TP27 **文献标志码:** B

Machining Technology of Large Aluminum Alloy Side Wall Structure of Car Body

Chen Honghai, Zhang Dashun, Meng Fanjun, Zhang Lei,
Wang Lijun, Tan Chuanjie, Li Fukun, Guo Bo, Sang Meng

(Digital Manufacturing Technology Laboratory, Changchun Institute of Equipment and Technology, Changchun 130012, China)

Abstract: In view of the problems existing in the processing of side wall structural parts of high-speed railway trains, the research on high-speed and high-precision numerical control technology of aluminum alloy key parts was carried out on the basis of existing numerical control equipment. According to the structural characteristics and process characteristics of aluminum alloy key parts of high-speed train body, the problems of machining efficiency and accuracy are solved from two aspects of machine tool dynamic characteristics analysis and milling dynamic characteristics software analysis technology and program optimization technology in the process of NC machining of train side wall structure surface. The results show that the technology significantly improves the processing efficiency and quality of key parts, and can be widely used in the same industry.

Keywords: hollow multi-cavity thin wall; large curvature; easy deformation; process database

0 引言

目前某公司承担着 250、350 km/h 等多种速度级的高铁列车零部件的研制和生产任务, 型号多、批量大, 零件要求精度高、结构复杂。侧墙结构件结构复杂, 属中空多腔薄壁件, 其特点为曲率大、难装夹、加工易变形、废品率高、单件铣削加工时间长。当前大型铝合金关键件加工中主要存在以下缺陷^[1-2]:

- 1) 加工精度差: 车体铝合金关键件加工精度难以保证。
- 2) 生产效率低: 零件加工用时过长。
- 3) 可靠性低: 加工薄壁件易变形, 装夹不稳定。
- 4) 质量一致性差: 废品率高。
- 5) 缺乏切削工艺数据库与知识库: 缺少大型铝合金关键件数据库的支撑。

为了设计一种高速高效的加工技术, 笔者在现

有数控设备的基础上开展铝合金关键件数控高速高效技术研究, 显著提高关键零件的加工效率和质量, 从机床动力学特性分析与铣削动力学特性软件分析技术以及列车侧墙结构件曲面数控加工过程中程序的优化技术 2 方面解决加工效率和精度问题。

1 高速列车车体铝合金关键件结构特点与工艺特性分析

1) 结构特点。

高速列车外轮廓呈鼓形, 一方面可降低列车行进间的空气阻力, 另一方面可减少两车交会时产生的空气压力波以及横向力作用。中间车体厢体型材包含车顶、侧墙、底架、内端墙以及外端墙等大型中空挤压型材, 这些车厢型材幅面较宽、壁厚相差悬殊、截面形式多样, 插接组装后通过焊接形成整体承载结构^[3]。这就对型材的成型质量提出了较高要求; 同时, 也对型材的加工精度要求更为严格,

收稿日期: 2022-04-27; 修回日期: 2022-05-28

作者简介: 陈洪海(1982—), 男, 吉林人, 硕士, 副研究员, 从事机械加工及电气控制研究。E-mail:173965139@qq.com。

如果难以保证精度，将影响车辆后续的装配生产^[4]。侧墙材料主要为 6061-T6 及 6005-T6，侧墙内侧开有 T 型槽或 L 型导轨。侧墙结构件的 3 维模型如图 1 所示。

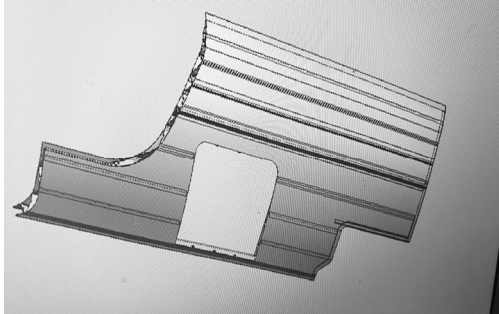


图 1 底盘连接板和侧墙结构件的 3 维模型

2) 工艺特性分析。

目前，高速列车车体主要有 2 种加工方案：1) 整体加工，即先将整体车身装配成型，再完成各结构件上的加工内容；此方案可降低装配以及焊接时产生的误差，但工件体积庞大，无论是装夹还是上下料，都存在一定困难^[5]。2) 先完成各结构件上的加工内容，最后再将它们拼装焊接成型，这就对型材的加工质量提出了较高要求。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，导致其在工艺上具有加工内容多、相邻加工内容距离远、刚性低、装夹难度大且易产生装夹变形等特点^[6]。

侧墙的加工是指车轮位置的侧墙部分加工，侧墙单板的连接位置、骨架滑槽等可在小型立式加工中心上完成。而在龙门式加工中心上完成组焊后的侧墙加工，主要内容为侧墙上的 L 形筋板、车门及窗口位置的加工。

2 关键件铣削动力学特性软件分析

分析铝合金关键零件的工艺特性，确定典型零件数控高效的加工部位。应用机床动力学特性测试与分析系统 DynaCut 和铣削加工动力学仿真系统 SimuCut 软硬件系统，通过模态分析获得机床刀具的动力学特性参数。采用机床动力学特性测试与分析技术，对铣削过程中 X、Y、Z 3 个方向的动态铣削力进行测试，获得动态铣削力；通过模态实验测试对系统的动态性能进行测试，获得系统传递函数；在传递函数数据基础上进行模态拟合，得到固有频率、阻尼比、模态刚度等模态参数；并可通过噪声测试功能分析机床加工声音频率判断加工状况，完成机床动力学特性分析^[7-8]。

在对整个工艺系统模态分析和铣削过程动力学模型分析的基础上，采用切削加工中的再生颤振理论，对加工过程的颤振稳定域进行仿真，给出与铣削加工过程工艺参数相关的颤振稳定域结果^[9]。在动力学仿真计算的基础上，以主要的加工工艺参数主轴转速、进给量、轴向切削深度、径向切削深度为设计变量，以最小加工时间为优化目标进行优化计算，得到满足一定优化目标和优化条件的工艺参数，重点以数控加工工艺参数的优化选择、金属材料去除率增加为目标的数控高速高效加工。针对铝合金关键零件，开展铝合金材料铣削高速高效技术的研究，通过高效数控切削优化实验、生产现场实验进行切削参数的优化选择，实现加工效率提高 0.5 倍以上，形成铝合金高效切削数据手册、铝合金典型零件高效数控加工的程序和工艺规范。具体实施方案如图 2 所示。

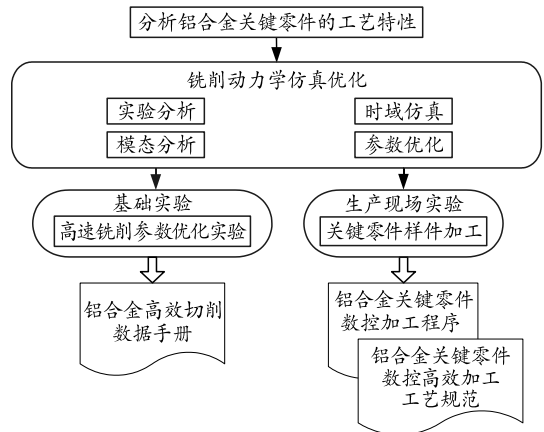


图 2 铝合金关键零件数控加工实施方案

切削参数通过锤击试验，应用 DynaCut V1.0 和 SimuCut V1.0 软件仿真优化后得到，再通过切削试验调整后应用于生产。如图 3 所示，以用于铣削型腔的 $\phi 20$ 硬质合金立铣刀为例，通过锤击试验得到其在 GM2580 机床上的顺铣情况下切宽 ae 分别为 20、10、5 mm 时的颤振稳定域曲线。

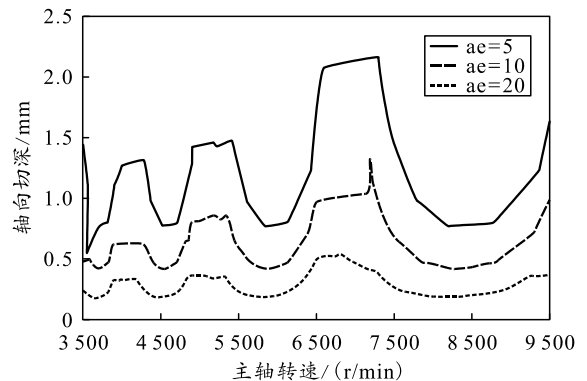


图 3 颤振稳定域曲线

刀具由北京机床研究所生产，型号为 GM2580，类型为圆柱螺旋立铣刀，其信息如表 1 所示，不同

切削条件下时域仿真结果如表 2 所示，经过试验调整后的应用切削参数如表 3 所示。

表 1 刀具信息表

悬臂长度/mm	齿数	螺旋角/(°)	半径/mm	R 角半径/mm	刀具材料	工件材料	润滑方式	刀具型号	刀柄型号
30	3	55	10	0.5	CB25	2A12-T4	乳化液	φ20	BT50

表 2 不同切削条件下时域仿真结果

序号	切削参数						切削过程仿真结果						数据状态		
	径向切宽/mm	轴向切深/mm	主轴转速/(r/min)	切削线速度/(m/min)	每齿进给量/(mm/flute)	进给速度/(mm/min)	Y 向切削力峰值/N	XY 平面切削力峰值/N	切向力峰值/N	最大扭矩/Nm	最大切削功率/W	材料去除速率/(cm ³ /min)	主轴功率利用率	仿真	实验应用
1	16	0.5	4 500	282.74	0.05	675	36.69	38.52	43.71	0.44	205.98	5.40	0.94	●	▲★
2	16	0.5	4 500	282.74	0.10	1 350	58.14	60.36	63.41	0.63	298.81	10.80	1.36	●	▲
3	16	0.5	4 500	282.74	0.15	2 025	79.88	82.46	83.11	0.83	391.63	16.20	1.78	●	
4	16	0.5	4 500	282.74	0.20	2 700	101.72	104.64	102.80	1.03	484.45	21.60	2.20	●	
5	16	0.5	4 500	282.74	0.25	3 375	123.60	126.87	122.50	1.23	577.28	27.00	2.62	●	
6	16	0.5	4 500	282.74	0.30	4 050	145.50	149.12	142.20	1.42	670.10	32.40	3.05	●	
7	12	0.5	4 500	282.74	0.05	675	36.69	38.52	33.59	0.34	158.30	4.05	0.72	●	▲★
8	12	0.5	4 500	282.74	0.10	1 350	58.13	60.36	55.18	0.55	260.01	8.10	1.18	●	▲
9	12	0.5	4 500	282.74	0.15	2 025	79.88	82.46	76.76	0.77	361.73	12.15	1.64	●	
10	12	0.5	4 500	282.74	0.20	2 700	101.72	104.64	98.35	0.98	463.45	16.20	2.11	●	
12	12	0.5	4 500	282.74	0.25	3 375	123.60	126.87	119.93	1.20	565.17	20.25	2.57	●	
13	12	0.5	4 500	282.74	0.30	4 050	145.50	149.12	141.52	1.42	666.88	24.30	3.03	●	
14	8	0.5	4 500	282.74	0.05	675	36.69	38.01	33.08	0.33	155.87	2.70	0.71	●	▲★

表 3 经过试验调整后的应用切削参数

刀具材料	刀具规格	铣刀齿数	刀柄型号	主轴转速/(r/min)	进给速度/(mm/min)	切深/mm	切宽/mm
硬质合金	φ20×120	3	BT50	2 000~3 500	500~1 000	10~20	0.2~2

3 侧墙结构件数控加工程序的优化

在侧墙结构件加工过程中，各个曲线段在合成速度一定的情况下，各个轴的分速度是随时发生变化的，以准确到达曲线拟合交点处。尤其在曲面薄壁件加工时，由于加工时机械振动严重，为保证加工精度，对工件的装夹方式和加工时的重复定位精度提出了很高的要求，因而给侧墙结构件加工带来了很大难度。同时走刀步长是影响刀具轨迹生成的一个重要因素。走刀步长过小，意味着刀具轨迹线上刀位数据的密度大，零件加工程序膨胀，编程效率下降，更重要的是在一般加工方式下，小步长零件加工程序的执行会产生进给速度波动和平均速度下降，从而影响工件表面加工质量和加工效率；走刀步长过大，意味着刀具轨迹线上刀位数据的密度小，加工效率高，但轮廓逼近精度低，表面质量恶化，因此合理步长的确定非常重要^[10-11]。

为克服现有的侧墙结构件加工方法加工精度差，加工效率低，不能满足生产实际需求的技术缺陷，提供一种高精度曲面加工方法。提出侧墙结构件数控编程的数学模型建立方法、轨迹路径方向采取自适应筛选法确定走刀步长的计算方法、利用 VC++ 生成程序代码的方法、联合数控系统进行参数配置、程序指令编程方法以及铣削和磨削的程序区

别。实际加工结果表明，该方法提高了侧墙结构件加工精度和效率。电气系统硬件包括数控系统、刀具主轴变频调速电机及其变频器、回转轴 A 伺服电机及其伺服驱动器、轴向进给轴 Z 伺服电机及其伺服驱动器、深度进给轴 X 伺服电机及其伺服驱动器、回转轴 A 的绝对编码器；软件包括代码生成软件 VC++、数控系统 G 代码编程、数控仿真软件 CIMCO，其特征是：

1) 在刀具轨迹路径方向采用自适应筛选法。

① 在刀具轨迹上采集一系列密集点，其中 x 坐标为等差数列，点 $p_1, p_2, p_3, p_4, \dots, p_s$ ；

② 确定第一个走刀步长起点为 p_0 ，终点为 p_s ；

③ 计算 p_i 点坐标 (x_{p_i}, y_{p_i}) ，

$$t_0 = t * t_0;$$

$$D_{pi} = \sqrt{(y_{p_s} - y_{p_0})^2 + (x_{p_s} - x_{p_0})^2} / t_0 * (x_{p_s} - x_{p_0}) / t_0;$$

$$x = (x_{p_s} - x_{p_0}) / (t * t_0) + x_{p_0};$$

④ 如果 $\varphi = D_{pi} > E$ ，则按照步骤③、步骤④重新计算，如果 $D_{pi} < E$ ，则替换下一个点 p_2 。

2) 根据所建立数学模型及自适应筛选算法，利用 VC++ 软件产生 G 代码，点坐标为 double 类型，坐标准确，精度高，步长 0.01 mm，生成 97 000 多点，避免 A 轴、Z 轴方向步长阶跃。

3) 数控系统采用西门子 802D 数控系统实现 X、Y、Z 轴 3 轴数控轴, X、Z 轴两伺服轴两轴联动。

4) X 轴上安装绝对编码器实现了闭环位置控制, 每次加工均回参考点, 避免误差积累。

5) 根据模型确定编程轨迹, 铣削程序编制在连续轨迹路径上有多段减速段, 将完善后程序输入数控仿真软件 CIMCO 进行速度与轨迹路径仿真。

6) 联合调整数控参数配置加速度、加加速度、Z 轴反向间隙补偿, 在程序中设定 FFWON、SOFT、ACC、G64、G601、ACP、F 等关键指令。

① FFWON, FFWOF。

通过先导控制功能可以把轨迹运行时速度相关的随动距离减少为零, 利用先导控制功能, 可以使轨迹运行精度更准确, 从而使加工结果更令人满意;

FFWON: 先导控制功能接通;

FFWOF: 先导控制功能关闭。

② SOFT。

SOFT 机床坐标轴按上升的加速度轨迹运行, 直至达到所要求的进给率; SOFT 加速度性能避免了加速度的突变, 从而使产生的轨迹精度更高, 并减轻对机床的负担。

③ ACC 比例加速度补偿。

在该情况下, 轴就以这种比例加速度进行插补;

ACC[A]=50%: 用于进给轴;

ACC[Z]=50%。

④ G64/G601 连续路径加工/准确定位。

连续路径加工方式的目的是在一个程序段到下一个程序段转换过程中避免进给停顿, 使其尽可能以相同的轨迹速度转换到下一个程序段, 并以可预见性的速度执行下一个程序段的功能; 在铣削时, 大缠角的轨迹过渡时有时必须降低速度, 从而保证程序段转换时不发生速度的突然变化, 或者加速度的改变受到限制^[12]。

⑤ 回转轴中使用的特殊指令 ACP。

回转轴 A:

A=ACP(0): 绝对数据输入, 在正方向逼近 0 度位置。

对于曲面的数控程序优化解决数控铣削时加工刀具变形技术问题, 实际加工结果表明, 该方法提高了槽、侧面加工精度和效率。根据数学模型确定加工轨迹, 在轨迹路径上自适应筛选法算法模型利用 VC++ 生成的数控程序, 点坐标为 double 类型, 坐标准确, 精度高。刀具轨迹路径上步长

均匀, 不会出现步长的突然阶跃, 直接影响到加工效果。试验结果表明, 这种方法在工件的加工过程中, 引起的工件和刀具的振动会小一些。加工侧墙曲面时 $\phi 20$ mm 刀具步长展开图如图 4 所示, VC++ 生成数控程序流程如图 5 所示。

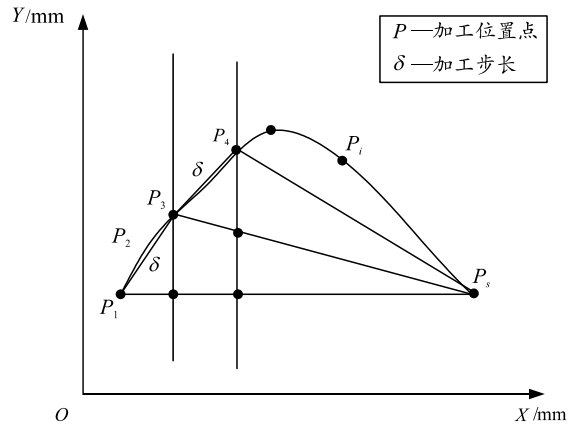


图 4 加工侧墙曲面时 $\phi 20$ mm 刀具步长展开图

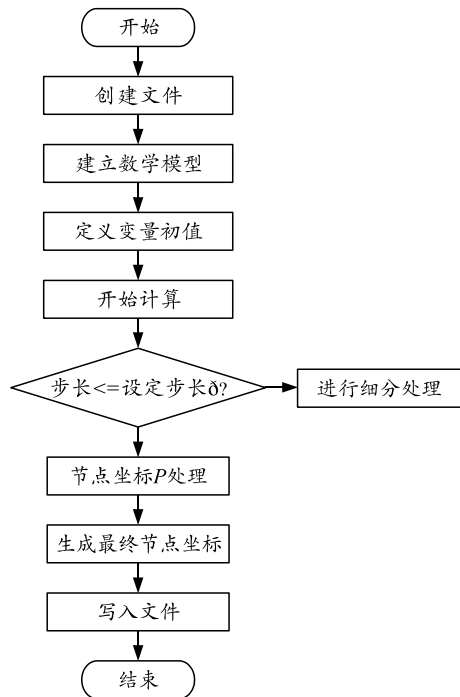


图 5 VC++ 生成数控程序流程

4 结束语

通过机床动力学测试和铣削动力学仿真技术, 以及侧墙结构件曲面数控加工过程中程序的优化技术, 使侧墙结构件加工效率提高了 0.5 倍, 车体侧墙结构件加工进给速度达到 1 000 mm/min, 尺寸精度达到 ± 0.1 mm, 解决了车体大型铝合金结构件的加工效率和精度问题。该技术可在同行业产品加工中推广应用。