

一种新型柴油机前端箱体加工工艺研究

史立峰 王宁刚 姚 俊

中车戚墅堰机车有限公司 江苏 常州 213000

摘 要:针对新开发的一种新型低排放内燃机车,其柴油机装配的前端为大型薄壁复杂箱体。该前端箱体集成度高,结构复杂,加工开发难度大。本文针对新型前端箱体薄壁、干涉、斜深孔等多个方面的问题,通过工艺流程合理设计、工装刀具选型、三维软件技术应用等措施,有效解决了易变形、易碰撞等加工难点,实现了前端箱体大型复杂薄壁箱体加工精度的有效控制,确保产品质量符合要求。

关键词:内燃机车;大型薄壁复杂箱体;工艺设计;加工技术

引言

前端箱体作为新型低排放柴油机的重要组成部分,内置油水管路、气腔等,较以往仅安装增压器、精滤器的集成度单一的前端而言,该新型前端安装部件达十多种,集成多种功能,结构极其复杂。前端箱体作为其他部件安装的基础,其精度对组装、使用和运行安全有直接影响。针对该情况,必须先进行工艺研究,解决薄壁变形、深腔加工难点以及斜深孔加工难点,确保工艺可行、可靠,实现产品高标准的一次性合格完成加工。

1 工艺分析

新型前端箱体作为柴油机核心部件,外形尺寸约 $1.8 \times 1.8 \times 0.7\text{m}$,具有结构复杂、空间多角度斜深孔及深窄狭腔的特征。通过对前端箱体图纸进行分析,结合现有设备、刀具、工装等,对加工能力进行评估,识别关键难点,并针对以下关键难点进行专项分析,使工艺研发突破设备、工装、刀具适配性限制^[1]。

1.1 大尺寸工件与复杂结构适配性不足

箱体大型尺寸,接近机床工作台的极限,给压装和加工带来了空间上的限制。特别是中冷器内腔深度达到0.7米,夹腔间距狭窄,常规刀具在这种环境下易发生干涉。为了解决这一问题,必须定制超长刀具,并严格匹配机床的行程范围,确保刀具在加工过程中能够准确、稳定地运行^[1]。同时,还需要对机床的工作台、夹具等进行适应性改造,以提高与大尺寸工件的适配性。

1.2 空间多角度斜深孔加工风险突出

箱体内置的多种规格斜深孔,如 $\Phi 39$ 斜孔,其空间角度水平为 8.4° 、垂直为 32.1° ,加工难度极大。需要根据机床坐标系偏置规则重新计算加工路径,定位偏差一旦超过 0.5° ,就有可能钻穿侧壁。此外,深孔的长径比高达20左右,排屑困难,易导致刀具断裂。因此,必须采用特殊的深孔加工技术和刀具,如枪钻或BTA深孔钻,并优化

切削参数和排屑方式,以降低加工风险。

1.3 专用工艺装备缺失

由于箱体结构异形,缺乏适配的专用铣头和装夹工装。现有设备在压紧时力分布不均,易引发工件变形。特别是中冷器内腔底部的 $\Phi 70$ 密封孔加工,需要使用伸出量 $\geq 0.7\text{m}$ 的加长悬伸刀具,但由于刚性不足,导致镗孔圆度误差超过0.03毫米、粗糙度 R_a 大于3.2微米。因此,必须研发专用的铣头和装夹工装,提高压紧力的均匀性,并优化刀具结构,提高其刚性。

1.4 深腔加工精度控制困难

在深腔加工过程中,刀具的振动和切削热的累积会对密封面的形位公差产生影响。同时,多工序基准的转换也会加剧孔系位置度的偏差风险。为了控制加工精度,需要采用高精度的测量设备和加工技术,如在线测量和补偿技术,以及优化加工工艺和工序顺序,减少基准转换的次数和误差。

2 工艺流程设计

在对图纸进行深度分解的基础上,进行了全面的精度评估与工艺性分析。通过对各部分结构的精度控制要点进行细致梳理,完成了系统的全尺寸分析,确保了加工前的数据准确性。接下来,根据工艺流程策划的要求,对重要加工工序所需的设备规格、功能进行了严格的核查与识别^[2]。结合前端箱体的尺寸要求以及机床的加工范围、能力,精心策划了加工流程与加工工艺方法。特别对于关键加工内容,进行了合理的分流设计,确保了加工过程的高效与精准。同时,还对设备加工内容进行了详细规划,以确保整个工艺流程的顺利进行。

3 加工工艺的实施

3.1 工装的设计、制作

为确保前端箱体各平面的平行度、垂直度以及孔系位置度均能达到设计要求,决定采用一次装夹的方式来

完成箱体四周各面及孔的加工。这就要求工装的设计必须极为精巧，既要避开加工区域，又要确保工件在装夹过程中的稳定性和刚度。根据机床的规格和加工内容，精心设计了前端箱体正放加工时的工装，并进行了三维摆放模拟，以确保工装能够满足实际使用要求。工装采用了一面两销的形式，通过定位安装面及安装面上的两个油孔（一个作为主定位，另一个作为辅助定位）来确保前端箱体的装夹效率和稳定性。这种设计不仅提高了装夹的准确性，还有效减少了因装夹不当而引起的变形问题^[2]。

3.2 深窄狭腔内孔的加工

前端箱体的深窄狭腔内存在 $\phi 50$ 和 $\phi 70$ 两种孔径，且与内腔壁的间距极小，特别是 $\phi 70$ 孔与腔体端面的距离仅有63mm。由于铣头无法进入内腔，只能选择使用加长刀杆进行加工，刀具长度需达到700mm左右。然而，刀具加长后，其长度和重量的增加会导致刀具稳定性下降，震动增大，从而影响加工精度和表面粗糙度。为了解决这一问题，专门设计制作了抗震刀杆，通过优化刀杆结构来提高其稳定性，进而提升镗孔精度。刀杆被设计成可换接杆的形式， $\phi 50$ 和 $\phi 70$ 孔可使用同一根刀杆，仅需更换精镗头即可，这大大降低了试制期间的刀具成本^[3]。此外，还对各类型精镗头的刀垫和刀片进行了试加工验证。通过调整镗头刀片的垫主偏角和刀片前角，最终找到了最佳的加工参数，使得镗孔后的孔内光洁度得到了

显著提升。

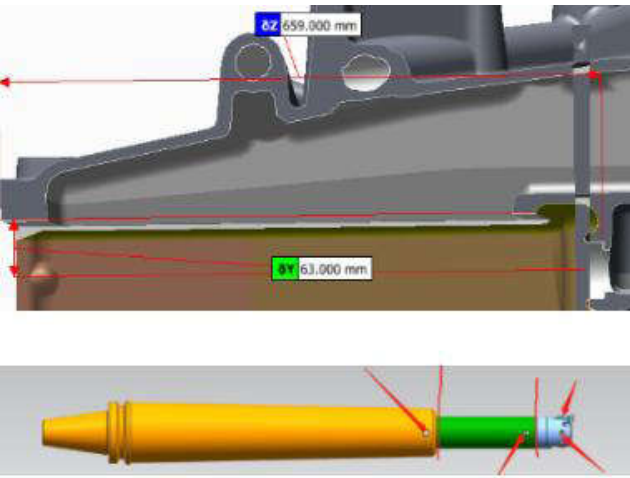


图1 尺寸分析及刀具设计

3.3 斜深孔的加工

3.3.1 加工方式的选择与优化

前端箱体中存在众多空间角度各异的斜深孔，其中部分孔的深度达到了600mm左右。针对这类斜孔，有两种主要的加工方式可供选择：一种是采用斜垫将斜孔撑平，然后使用可转角铣头进行加工；另一种则是利用加工中心的五轴联动功能，使刀具的加工角度与孔的空间角度保持一致。为了更直观地比较这两种加工方式，制作了表1，列出了不同孔径（ $\Phi 49$ 、 $\Phi 39$ 、 $\Phi 19$ ）在两种加工方式下的加工需求、难度、成本及效率等情况：

表1 工艺方式比对表

斜孔	加工方式	加工需求	难度	成本	效率	加工方式选择
$\Phi 49$	斜垫	5.5°斜垫 8°斜垫 12°斜垫	简单	高	1、斜垫更换重新加工，存在较大时间浪费 2、一体式装夹加工，无周转工序浪费	1、斜垫加工方式不作推荐，加工虽然加工简单，但成本极高，工序耗时长； 2、推荐五轴联动加工方式，加工成本低，工序耗时短，采用三维和仿真软件降低加工风险
	五轴联动	平垫	较大	低		
$\Phi 39$	斜垫	10°斜垫 12°斜垫	简单	高		
	五轴联动	平垫	较大	低		
$\Phi 19$	斜垫	5°斜垫 10°斜垫	简单	高		
	五轴联动	平垫	较大	低		

通过比对，可以清晰地看到，斜垫加工方式虽然操作相对简单，但成本极高，且斜垫的更换会浪费大量时间。因此，不推荐使用斜垫加工方式。相反，五轴联动加工方式虽然技术难度稍大，但加工成本低，耗时短，且能够通过三维和仿真软件有效降低加工风险^[4]。因此，决定采用新科堡五轴联动加工方式，以确保加工角度的准确性，消除加工风险，同时保证产品质量，降低生产成本和加工时间^[3]。

3.3.2 斜孔角度的重新识别

针对 $\Phi 49$ 、 $\Phi 39$ 、 $\Phi 19$ 等斜深孔，利用三维软件根据机床坐标系旋转的规则和要求，对斜孔的角度进行了重新识别，再将转化后的角度要求，输入机床进行加工参数设定。具体结果如表2所示：

3.3.3 三维模拟与角度校验

由于加工中心的B、C轴旋转分度为0.5的倍数，部分角度无法与图纸完全统一，相差约0.3°左右。针对这

一情况,利用三维软件对图纸角度和实际加工角度下的工件实物进行了比对和分析。以 $\Phi 49$ 孔为例,按机床坐标系计算,其在机床上加工的角度应为 $B-33.5067^\circ$ 、 $C104.76237^\circ$,但实际加工中简化为 $B-33.5^\circ$ 、 $C75.5^\circ$ 。通过三维模拟,画出了这两种不同角度下的圆柱,并计算出在孔的出口处的误差为 0.5mm 。同样地,对其他 $\Phi 49$ 孔也进行了三维模拟,结果显示两种不同角度在孔的出口处的误差均在设计要求范围内(如 0.4mm 、 1.9mm 等),从而确保了加工前工艺准备的正确性。

表2 角度识别转化表

斜孔	偏置	图纸角度	实际加工角度
$\Phi 49$	B轴	32.6°	-33.3°
	C轴	8°	75.24°
$\Phi 39$	B轴	30°	-84.03°
	C轴	12°	190.43°
$\Phi 19$	B轴	30°	-85.67°
	C轴	5°	177.49°

3.3.4 加工仿真与参数设定

为了确保斜孔加工的准确性,根据前期设定的加工参数和图纸尺寸,对斜孔的加工进行了仿真和模拟。特别是针对深油孔的加工,由于前端箱体壁薄、稳定性差、油孔直径大,在高转速情况下刀具震动极大,存在加工风险。针对这一问题,通过多次分析和试验,最终采用了低转速、低进给的方法。将加工参数设定在 $S = 400\text{r/min}$ 、 $F = 60\text{mm/min}$ 时,加工震动基本消除,且符合加工中心加工进给 $0.06\text{--}0.15\text{mm/r}$ 的特点。这一参数的设定,为实际加工提供了有力的技术支撑,确保了加工的准确性。

4 精度检测

4.1 三坐标测量机检测

前端箱体的结构复杂性表现在其存在众多空间线性关联尺寸,这些尺寸之间的相对位置和精度要求极高。传统的手工检测方式,由于其局限性,已经无法满足这种高精度、多维度的检测需求。因此,决定引入先进的三坐标测量机来进行精度检测。三坐标测量机以其高精度、高效率的测量能力,成为了检测前端箱体的首选工具。在检测过程中,首先统一了加工基准,确保所有测量数据都基于同一个参考系。然后,对前端箱体的各个孔、面进行了全面的检测,仔细核对每一项尺寸是否与

图纸上的精度要求相符。检测完成后,测量机会输出详细的检测数据,为后续的加工和调整提供有力的依据^[4]。

4.2 精度调整与优化

为了充分利用三坐标测量机的优势,在前端箱体半精加工阶段就进行了精度检测。这一阶段的检测对于确保最终加工精度至关重要。通过三坐标检测,能够及时发现加工过程中可能存在的问题,如装夹不稳、程序参数设置不当等。通过比对检测数据和加工参数,可以对加工过程进行针对性的调整和优化。例如,如果检测数据显示某个孔的尺寸偏大,就可以调整装夹方式或程序参数,以确保在精加工阶段能够达到图纸要求的精度。这种在半精加工阶段就进行精度检测的方法,不仅有助于及时发现并解决问题,还能确保精加工后的前端箱体精度符合机床加工规律,最终尺寸精度完全符合图纸要求。这不仅提高了加工效率,还大大提升了产品的质量和可靠性。

结语

通过本文的研究和实践,成功解决了新型柴油机前端箱体加工中的多个难点问题。通过三维绘图及仿真模拟验证了工装、刀具规格参数的合理性;通过仿真技术输出了加工程序,消除了复杂结构的加工风险;在工艺准备环节和现场加工环节,在避免出现质量问题的同时,通过优化工艺提高了加工效率20%以上;开发了LK三坐标在线精度测量技术,实现了前端箱体尺寸精度、形位精度的全尺寸测量,具备了后续前端箱体生产质量的有效监控和提升。这些成果不仅为新型柴油机前端箱体的批量化生产奠定了基础,也为同类型产品的研制积累了宝贵经验。

参考文献

- [1]高博,陈晓龙,郭敏,等.某型柴油机箱体铸造工艺设计研究[J].中国铸造装备与技术,2021,56(02):80-83.
- [2]王新渝,周鹏刚,胡华林,等.机车柴油机前端箱体铸造缺陷数值模拟及工艺研究[J].热加工工艺,2015,44(01):88-91.
- [3]石峰,胡豪,刘增凯,等.柴油机缸体异型结构共线复合加工[J].农业工程,2022,12(06):104-108.
- [4]姚建方.农用多缸柴油机缸体的数控加工工艺研究[J].南方农机,2020,51(05):49-50.