高空作业车臂架精度提升的研究与应用

曾 旭 任创智 刘 雄
湖南中联重科智能高空作业机械有限公司，湖南 长沙 410000

[摘要]随着高空作业机械行业的不断发展，臂架轻量化已经成为一个行业主流，工业智能制造对工件精度要求的提高，超长板折弯精度的提升成为了一个重要的研究课题。文章综合分析了超长板折弯过程中的关键技术问题，包括设备因素、模具因素、板材因素、工艺因素、人为因素等，再通过理论分析、模拟仿真和实验验证，提出有效的技术方案，以提高高空作业车臂架筒体折弯的精度。

[关键词]臂架折弯；原材料；折弯对中；回弹；加凸
DOI：10.33142/ec.v8i5.16653 中图分类号：TH213.1 文献标识码：A

Research and Application of Improving the Accuracy of the Boom of Aerial Work Vehicles

ZENG Xu, REN Chuangzhi, LIU Xiong
Hunan Zoomlion Intelligent Access Machinery Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410000, China

Abstract: With the continuous development of the high-altitude operation machinery industry, lightweight boom has become the mainstream of the industry. The improvement of precision requirements for workpieces in industrial intelligent manufacturing and the enhancement of bending accuracy for ultra long plates have become important research topics. The article comprehensively analyzes the key technical issues in the bending process of ultra long plates, including equipment factors, mold factors, plate factors, process factors, human factors, etc. Through theoretical analysis, simulation and experimental verification, effective technical solutions are proposed to improve the accuracy of bending the arm frame cylinder of high-altitude work vehicles.

Keywords: arm bending; raw material; bending alignment; rebound; add convexity

引言

臂架是臂式高空作业车的关键部件之一，其设计与制造直接影响整机的性能。随着高空作业机械行业的高度发展，高米段的臂式高空作业车的需求不断增加，在保证设备使用性能及安全的前提下，对臂架进行轻量化设计，能有效的降低整机质量，提升产品使用性能。为达到臂架轻量化的目的，一般会用更高强度的结构钢和改进臂架截面设计两种方法。目前行业内臂架结构正从常规的矩形臂架转变为需折弯的多边形臂架，臂架的折弯精度对焊接乃至整机产品的使用性能都有巨大影响，如焊缝间隙不均匀导致的变形，臂架伸缩抖动、异响等。本文针对高空作业车臂架自由折弯的精度提升进行探讨。

1 设备因素

数控折弯机是折弯的关键设备，其设备精度及设备状态是影响折弯精度的重要因素。

1.1 滑块

滑块在折弯过程中受到油缸向下的压力，同时受到板材对其向上的反作用力，此时滑块会出现一定程度变形，在加工过程滑块的最大变形量是影响折弯精度的重要因素。通过分析，可以找出滑块的薄弱位置，并采用不同的优化方案来减小滑块变形，提高滑块的直线度和重复定位精度，可以有效提高折弯精度，如图 1。

1.2 油缸精度

油缸精度直接影响凸模进入凹模的深度控制，这是影

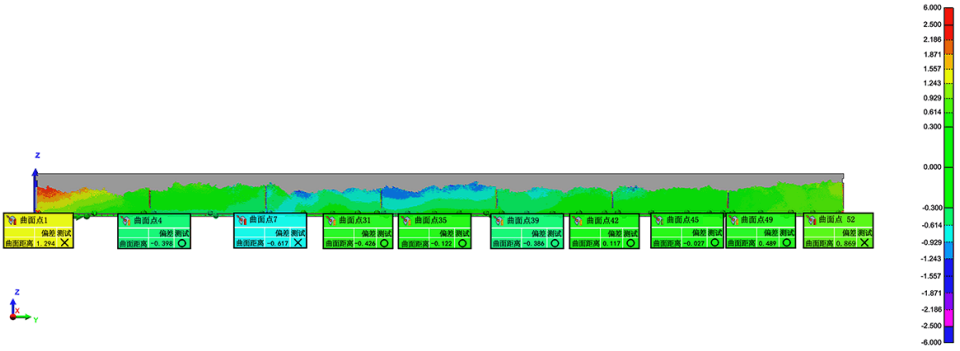

图 1 滑块受力状态变形分析

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

响折弯精度的重要因素。油缸的精确控制能力可以确保折弯角度的一致性和重复性，从而提高折弯精度。

1.3 加凸补偿系统

折弯时，滑块和工作台会产生变形，造成上模进入下模的深度在全长上不一致，这是影响折弯精度的重要因素。因此，加凸补偿装置可以补偿滑块和工作台的变形，从而提高折弯精度。加凸补偿装置能够提高制件折弯角度的精度。通过控制加凸量，可以更精确地控制折弯角度，减少因滑块和工作台变形导致的精度损失。

2 模具因素

模具分为上模与下模，其在折弯过程中直接与板料接触，其精度是直接影响折弯精度的因素。折弯之前首先要保证上下模的中心重合，否则会出现工件的直线度及角度出现偏差。对于大型折弯机来说，上模一般是分段设计，结构形式有快换式与固定式。快换式可以增加换模速度，提高生效效率。但由于其具备一定的自由度，特别是模具使用一段时间有一定磨损后，各上模在折弯时角度有微小差异，工件长度方向方向受力各不相同，折弯后长度方向各角度均不一致，导致折弯后角度差异，且可能出现局部上拱现象。故需要定期对模柄、上模头及下模的对中情况进行检验，要求模柄全长≤1mm，每个模柄连接处不能有明显错层，高低差≤0.5mm，下模相邻两根无痕圆棒错位要求≤0.5mm。

检测方法如下：

①选择合适的折弯样板折弯成 U 型。

②样板两端对称划线。

③在 Y1、Y2 及两个下模相邻处，共 4 个位置，人工对线，进行 90 度折弯，要求 90±0.5° 。在小样上记录好第几刀，折弯位置。4 个位置示意如下图 2 所示：

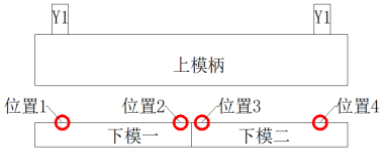

图 2 上下模检测方法示意

④将折弯小件置于平台上检测两侧高度差值，同一个折弯小样高度≤0.5mm 且 4 个折弯小样同侧高度差≤1mm 判定合格，否则需对设备进行上下模对中调整。

确认完对中误差后，上下模对中调整方法如下：

①将模柄压进下模槽内，以模柄为基准，使用钢直尺测量下模边缘至模柄的距离 D，全长范围内最大读数-最小读数值≤1mm。示意图如下图 3 所示：

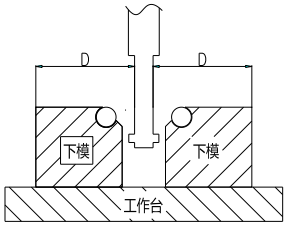

图 3 上下模对中示意

②对中后应检查所有紧固螺栓，确保全部拧紧。

3 原材料因素

3.1 回弹

板材折弯成型的三个阶段包括：弹性弯曲阶段、弹塑性弯曲阶段和纯塑性弯曲阶段。

弹性弯曲阶段：在这一阶段，外力作用下材料发生弹性变形，卸载后可恢复原状。

弹塑性弯曲阶段：随着外力的增大，材料内部出现局部塑性变形，部分区域进入屈服状态，但仍存在弹性区域。随着变形的进一步增大，塑性变形由表面向中心逐步扩展。

纯塑性弯曲阶段：在这一阶段，整个变形区的材料完全处于塑性变形状态，弹性变形可忽略，变形不可逆。

从以上分析可以得出材料在折弯过程中，板材内层受压应力，而外层受拉应力。这两种应力使材料产生塑性弯曲变形，从拉应力过渡到压应力的过程中总会有一个弹性段。由于弹性必然引起向原来位置伸直的趋向，故卸载后材料产生回弹。回弹是金属材料固有的特性，其与材料的抗拉强度、延伸率等材料特性有直接关系。一般在自由折弯过程中通过调节下模开口宽度及折弯机滑块行程，可抵消材料的回弹特性。

3.2 材料厚度

材料的厚度不均也会影响折弯精度。即使采用同一折弯模进行折弯，所得到的工件尺寸与形状也有所差异。厚度大的部分折弯时阻力大，回弹小；厚度薄的部分回弹大，形状及尺寸均不准确，影响了工件的精度，并且易产生翘曲及扭弯现象。对于热轧金属材料来说，一般纵向厚度一致性高，故在一般将折弯线设计成平行于板材的纵向（板材轧制方向）。

3.3 应力应变状态

在板料折弯分析中，通过 ABAQUS 有限元软件模拟发现，应力和塑性变形的集中位置在板料的上下边缘，而靠近中性层的部位应力变化很小。在折弯过程中，上模下压量越大，板料的应力沿左右两边有往回收缩的趋势，这直接影响折弯精度，示意图如图 4 所示。

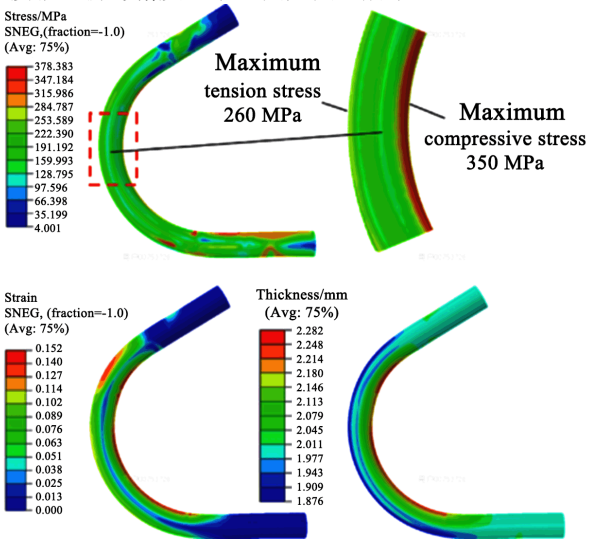

图 4 材料应力有限元分析

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

3.4 工件来料精度

臂架筒体板的折弯精度主要受三大来料因素影响：板材平面度、长直边直线度以及宽度尺寸精度。其中，板材平面度取决于校平加工的质量控制，而工件宽度的一致性和全长直线度则直接受铣边加工精度的制约。这些关键尺寸的公差控制将最终决定成品的折弯精度。在同一批原材料中选取不同状态的工件进行跟踪，情况如下所示：

（1）工件一、平面度不良，过程数据如下表 1，图 5：

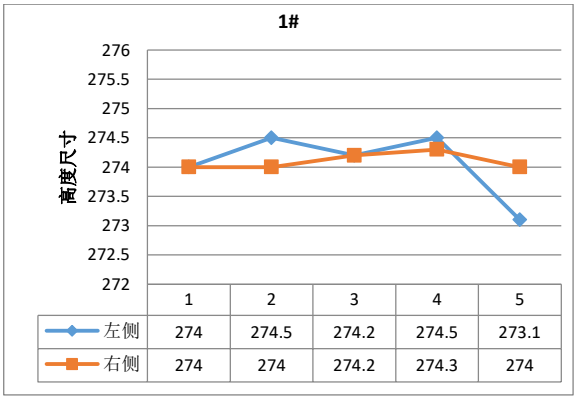

图 5 来料平面度不良工件高度数据统计

（2）工件二、工件铣边后宽度尺寸不良，过程数据如下表 2，图 6：

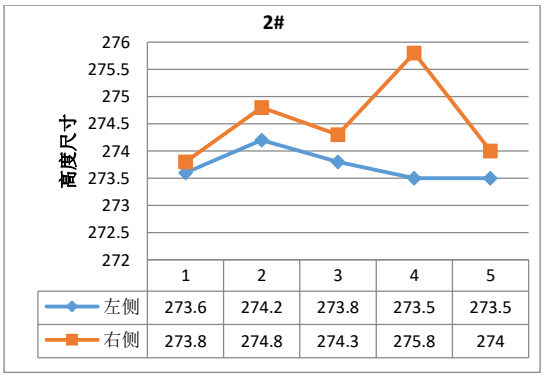

图 6 来料宽度不良工件高度数据统计

（3）工件三、平面度、宽度尺寸均符合要求，跟进数据如下表 3，图 7：

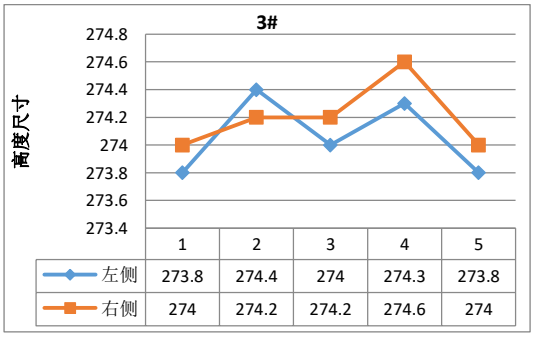

图 7 来料合格工件高度数据统计

表 1 来料平面度不良工件过程数据跟踪表

工件全工序跟踪记录表						钢卷编号					下料图号				
						炉批号					下料件名称				
校平前	平面度分区测量					厚度测量					来料异常说明与描述				
	2	1.8	1.5	1.7	1.8	5.94	5.92	5.94	5.96	5.96					
校平后	平面度分区测量					厚度测量					异常说明与描述				
	0.5	0.5	0.5	0.5	1	5.94	5.92	5.96	5.96	5.94					
铣边	宽度测量（加工前）					宽度测量（加工后）					直线度测量（加工后）				
	846	846.1	845.9	845.5	845.9	840.4	840.8	840	840.2	840.4	6.5	6.8	7	7	6.5
折弯（中间切割线在北侧）	上下模是否清理		上下模是否对中			紧固螺栓拧紧		上模直线度检测（单批检测一次）							
	是□ 否□		是□ 否□			是□ 否□									
	下模圆棒是否对齐（折弯前）					划线尺寸偏差确认（折弯前）					对线尺寸偏差确认（折弯前）				
	是□ 否□					≤0.5 是□ 否□					≤0.5 是□ 否□				
	钢板宽度测量（折弯前）					钢板直线度测量（折弯前）					钢板平面度分区测量（折弯前）				
	840.4	840.8	840	840.2	840.4	6.5	6.8	7	7	6.5	0.5	0	0	0	0
	垂直度测量（折弯后左侧）					高度测量（折弯后左侧）					宽度测量（折弯后开档）				
	0	0	0	0	0	274	274.5	274.2	274.5	273.1	321.8	321.9	322.8	322.6	322.2
	垂直度测量（折弯后右侧）					高度测量（折弯后右侧）					宽度测量（折弯后根部）				
	0	0	0	0	0	274	274	274.2	274.3	274					
	直线度测量（折弯后左侧）					直线度测量（折弯后右侧）									
	6.5	6.4	6.6	6.8	6.5	6.5	6.5	6.8	6.8	6.5					

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

表 2 来料宽度不良工件过程数据跟踪表

工件全工序跟踪记录表						钢卷编号					下料图号				
						炉批号					下料件名称				
校平前	平面度分区测量					厚度测量					来料异常说明与描述				
	2.1	2.1	1.3	1.8	1.5	5.98	5.98	5.96	5.94	6					
校平后	平面度分区测量					厚度测量					异常说明与描述				
	1	0.5	0.5	0.5	0.5	5.96	5.94	5.94	5.96	5.98					
铣边	宽度测量（加工前）					宽度测量（加工后）					直线度测量（加工后）				
	845.9	846	846.7	846.2	845.9	839.6	839.6	839.5	840.5	840.1	6.5	7.2	7	6.5	6.5
折弯（中间切割线在北侧）	上下模是否清理			上下模是否对中		紧固螺栓拧紧			上模直线度检测（单批检测一次）						
	是□ 否□			是□ 否□		是□ 否□									
	下模圆棒是否对齐（折弯前）			划线尺寸偏差确认（折弯前）					对线尺寸偏差确认（折弯前）						
	是□ 否□			≤0.5 是□ 否□					≤0.5 是□ 否□						
	钢板宽度测量（折弯前）			钢板直线度测量（折弯前）					钢板平面度分区测量（折弯前）						
	839.6	839.6	839.5	840.5	840.1	6.5	7.2	7	6.5	6.5	0	0.5	0	0	0.5
	垂直度测量（折弯后左侧）			高度测量（折弯后左侧）					宽度测量（折弯后开档）						
	0	0	0	0	0	273.6	274.2	273.8	273.5	273.5	322.3	322.8	323	323	322
	垂直度测量（折弯后右侧）			高度测量（折弯后右侧）					宽度测量（折弯后根部）						
	0	0	0	0	0	273.8	274.8	274.3	275.8	274					
	直线度测量（折弯后左侧）			直线度测量（折弯后右侧）											
	6.5	7	7	6.8	6.5	6.5	6	6	6	6.5					

表 3 来料合格工件过程数据跟踪表

工件全工序跟踪记录表						钢卷编号					下料图号				
						炉批号					下料件名称				
校平前	平面度分区测量					厚度测量					来料异常说明与描述				
	1.2	1.5	1.5	1.5	1.7	5.98	6	5.94	5.94	6					
校平后	平面度分区测量					厚度测量					异常说明与描述				
	0.5	0.5	0.5	0.5	1	5.96	5.96	5.94	5.96	6					
铣边	宽度测量（加工前）					宽度测量（加工后）					直线度测量（加工后）				
	845.9	846	846.5	846.2	846	839.8	839.6	839.6	840.1	840	6.5	7.2	7	6.9	6.5
折弯	上下模是否清理			上下模是否对中		紧固螺栓拧紧			上模直线度检测（单批检测一次）						
	是□ 否□			是□ 否□		是□ 否□									
	下模圆棒是否对齐（折弯前）			划线尺寸偏差确认（折弯前）					对线尺寸偏差确认（折弯前）						
	是□ 否□			≤0.5 是□ 否□					≤0.5 是□ 否□						
	钢板宽度测量（折弯前）			钢板直线度测量（折弯前）					钢板平面度分区测量（折弯前）						
	839.8	839.6	839.6	840.1	840	6.5	7.2	7	6.9	6.5	0	0	0	0	0
	垂直度测量（折弯后左侧）			高度测量（折弯后左侧）					宽度测量（折弯后开档）						
	0	0	0	0	0	273.8	274.4	274	274.3	273.8	322.6	321.8	322	322.1	322
	垂直度测量（折弯后右侧）			高度测量（折弯后右侧）					宽度测量（折弯后根部）						
	0	0	0	0	0	274	274.2	274.2	274.6	274					
	直线度测量（折弯后左侧）			直线度测量（折弯后右侧）											
	6.5	6.8	7	7	6.5	6.5	6	6.5	6.5	6.5					

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

4 工艺因素

4.1 中性层

确定折弯的中性层位置是钣金折弯工艺中的一个重要步骤，中性层是指在材料折弯过程中，既不受到拉伸也不受到压缩的过渡层。在中性层的位置上，材料的长度在折弯前后保持不变，它是计算折弯件展开长度的基准。中性层的位置与变形程度有关。当弯曲半径较大、折弯角度较小时，中性层位置靠近板料厚度的中心处。而当弯曲半径变小、折弯角度增大时，中性层位置逐渐向弯曲中心的内侧移动。不同厂家生产的板材因其生产工艺各不相同，中性层均不相同，因此需要在折弯加工过程通过大量数据去摸索，得到不同的中性层因子。根据不同的中性层因子得到准确的工件展开尺寸，从而得到准确的工件折弯尺寸精度。

4.2 折弯顺序

大型数控折弯机的折弯顺序不是一成不变的，要根据折弯的形状或工件上的障碍物适当调整加工顺序，确保前面的折弯不会对后面的折弯造成干涉，这样可以保证整体的加工精度和形状对于大型折弯件来说，一般从工件的外围开始向内折弯。

4.3 折弯力

折弯力的大小直接影响到材料的变形程度和应力分布。过大的折弯力可能导致材料变形过度或产生裂纹，而折弯力不足则可能使零件成型不充分或产生回弹现象。优化折弯力可以控制材料的变形程度和应力分布，提高零件的成型精度和稳定性。

4.4 折弯速度

折弯速度决定了材料在折弯过程中的变形速度。过快的折弯速度可能导致材料变形不充分或产生裂纹，而过慢的速度则可能导致材料过热或产生回弹现象。优化折弯速度可以平衡工艺质量和效率，提高钣金零件的成型精度和稳定性。

4.5 保压时间

过短的保压时间可能导致金属板材在折弯过程中无法充分塑性变形，造成成品尺寸偏差或者表面质量不佳。而过长的保压时间则可能导致加工周期延长，降低生产效率。适当设置保压时间可以提高折弯加工的质量。

4.6 下模开口的选择

压下量的大小会影响材料在折弯过程中的塑性变形程度。适当的压下量可以使材料充分变形，达到所需的折弯角度。下模开口的选择决定了压下量的大小，实验表明，在大型折弯件加工过程中，折弯成形尺寸与下模开口尺寸呈现正相关趋势。当下模开口尺寸在 10 到 12.5 倍板材厚度时，尺寸一般在允许公差范围内。如果下模开口尺寸过大或过小，尺寸一般会超出允许公差范围。

5 人为因素

操作人员对折弯精度保障至关重要。操作人员的技能和经验同样对折弯精度有重要影响。熟练的操作人员能够更好地调整机器，识别潜在问题，并进行必要的修正。如板材在折弯机上的位置应尽可能居中放置，若板材偏置，会导致加工过程中负载不均匀，长时间加工后容易导致设备出现挠曲变形，进而使得被加工板材在整个长度方向的角度不一致，通常是中间部位的角度比两端的大。而这种角度的不一致，直接影响到板材的成型尺寸精度。

6 结论

通过上述分析，可以看出，超长板折弯精度的提升需要综合考虑设备、模具、板材、工艺及操作人员等多个方面，通过对这些方面的控制和优化，可以显著提高折弯精度，满足高空作业车臂架折弯的高精度要求。

[参考文献]

[1]曹光荣,张子东,谈传明,等.超长超大折弯机液压系统的设计分析[J].锻压装备与制造技术,2011(4):4.
[2]刘岗岗,胡旭东,彭来湖.基于 ABAQUS 有限元的板料折弯分析[J].建模与仿真,2024,13(2):1353-1363.
[3]李炜新.金属材料与热处理[M].北京:机械工业出版社,2008.
[4]李亨.提高大型数控折弯成形精度的关键技术研究[D].安徽:合肥工业大学,2012.
[5]井溢涛.数控折弯机折弯精度改进措施分析[D].山东:齐鲁工业大学,2025.

作者简介：曾旭（1985.2—），男，本科毕业于湘潭大学材料成型及控制工程专业，现任湖南中联重科智能高空作业机械有限公司主管工艺工程师，任职 6 年，具有机械制造工艺与设备中级工程师职称；任创智（1996.12—），男，本科毕业于湖南师范大学机械工艺技术专业，现任同公司工艺工程师，任职 3 年，具有机械制造工艺与设备工程师职称；刘雄（1983.9—），研究生毕业于哈尔滨工业大学材料学专业，现任同公司工艺工程师，任职 3 年，具有机械制造工艺与设备工程师职称。

Copyright © 2025 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.