

# 光伏支架冷弯成型工艺优化及精度控制研究

庄 然<sup>1</sup> 年天林<sup>2</sup>

天津意华智能制造有限公司 天津 300409

**【摘要】**：光伏支架作为光伏发电系统的重要支撑组件，其制造精度直接影响到光伏电池板的安装效果及系统性能。针对传统冷弯成型工艺中存在的精度偏差和生产效率低的问题，研究通过优化工艺参数、改进成型设备、强化精度控制措施，提升了成型工艺的稳定性 and 生产过程的可控性。优化后的工艺不仅提高了支架的成型精度，减少了材料浪费，还降低了生产成本，提升了生产效率。研究表明，合理调整成型参数、采用先进控制技术对于提高光伏支架生产的精度和质量具有显著效果。该研究为光伏支架的规模化生产提供了有效的工艺改进方案。

**【关键词】**：光伏支架；冷弯成型；工艺优化；精度控制；生产效率

DOI:10.12417/2705-0998.26.08.082

## 引言

光伏支架在光伏发电系统中作为核心结构件，承载着支撑太阳能电池板的功能，其精度和稳定性直接关系到光伏系统的发电效率和使用寿命。在传统的冷弯成型工艺中，支架的生产精度常常受到材料变形、设备误差等因素的影响，导致成型过程中出现不必要的质量波动。随着光伏产业的快速发展，如何提高光伏支架的生产精度、降低制造成本已成为行业亟待解决的关键问题。针对冷弯成型工艺的优化与精度控制，不仅能够提升产品质量，还能在激烈的市场竞争中占据有利位置。通过合理优化工艺参数和技术手段，不仅能提高产品的精度和性能，还能有效提高生产效率，推动光伏产业的可持续发展。

## 1 冷弯成型工艺现状及问题分析

### 1.1 冷弯成型的基本原理

冷弯成型是利用材料的塑性变形原理，在常温下对金属板材或型材进行加工的一种成型方法。在此过程中，材料通过连续的弯曲作用改变其形状。冷弯成型不需要加热工件，依靠机器的压力和刀具的作用将金属材料塑造成预定的形状。此工艺通常应用于金属薄板、型材的加工，具有较高的成型精度。其基本过程包括材料的进料、定位、弯曲、定型和成品输出。由于冷弯成型的高效性，广泛应用于各类行业，特别是在光伏支架制造中，能够满足大规模生产的要求。

### 1.2 现有工艺的优缺点

当前的冷弯成型工艺虽然具有一定优势，如节能、精度高、生产效率快、操作简便等特点，但也存在着诸多问题。优点包括材料变形时不需要高温加热，生产过程能够大幅度降低能耗，且生产周期较短，能有效提高生产效率<sup>[1]</sup>。缺点也十分明显。在实际应用中，冷弯成型容易受到设备精度、材料性能以及操作工艺等多方面因素的影响，导致成型过程中产生误差，进而影响产品的质量与稳定性。

### 1.3 主要问题及挑战

冷弯成型工艺中的主要问题之一是成型过程中产生的精

度偏差，尤其是在批量生产中，由于设备磨损、材料不均匀等问题，导致最终成型的产品精度较低。成型过程中的温度变化、材料的弹性恢复等因素也会影响成型效果，造成形状不符或尺寸不准确。另一个挑战是生产过程中材料的浪费与资源消耗，尤其在精度控制不佳的情况下，可能会增加不良品的产生和返工的需要。如何在保证成型精度的同时，提高生产效率并降低成本，成为当前冷弯成型工艺亟待解决的关键问题。

## 2 成型精度影响因素及控制方法

### 2.1 材料性能对精度的影响

材料的性能在冷弯成型中起着至关重要的作用。金属材料的强度、延展性、硬度以及表面光洁度等物理性质直接决定了成型过程中材料的变形能力。当材料的强度较高时，弯曲过程中的形变会较为困难，容易导致材料出现裂纹或变形不均匀。材料的延展性也对精度影响显著，过低的延展性会导致材料无法在冷弯过程中实现精确成型，出现尺寸偏差。硬度过高的材料在成型时容易产生较大反弹，导致成型后的尺寸不稳定。材料的表面光滑度也直接影响模具与材料之间的摩擦力，进而影响成型的均匀性和精度。在冷弯成型过程中，合理选择与工艺匹配的材料，并对材料的质量进行严格把控，是确保产品精度的前提。

### 2.2 设备精度对成型效果的影响

设备精度在冷弯成型过程中具有决定性作用。成型设备的加工精度与模具的配合度直接影响到成型件的外观和尺寸控制。设备的稳定性和精度要求高，尤其在大规模生产时，设备磨损、偏差会对产品造成显著影响。成型机床的精度不足，可能导致刀具与工件间的偏移，形成形状误差<sup>[2]</sup>。同时，压力控制系统的精度也至关重要，压力的波动会影响材料的均匀变形，导致成型件不合格。设备的刚性与操作精度直接影响成型过程中的振动与反弹，若设备的刚性不足，可能会引发振动效应，从而导致成型误差。对设备的精度进行定期维护和校正，能够最大限度地减少生产过程中的误差，确保光伏支架等关键

部件的精度要求得到满足。

### 2.3 控制技术的应用与优化

精度控制技术的有效应用对冷弯成型质量的提升起着至关重要的作用。在冷弯成型过程中，精确控制工艺参数，如压力、速度和温度，能够有效避免成型误差。现代的闭环控制技术在工艺中得到广泛应用，通过实时监测和反馈调节，能够确保每一工序的精度保持在理想范围内。传感器技术、自动化控制系统与数控技术的结合，提供了对成型过程的精确调控。通过安装力传感器、位置传感器和温度传感器，实时监控成型过程中的各项参数，保证成型过程中设备和材料状态始终在设定的范围内。工艺优化方法如模拟仿真技术的应用，也为精度控制提供了新的突破口。通过计算机模拟，可以提前预测成型过程中可能出现的问题，从而在生产前进行参数优化与调整，进一步提高产品精度，减少返工与废品率。

## 3 优化工艺参数的关键策略

### 3.1 成型速度与压力的优化

在冷弯成型过程中，成型速度和压力是影响产品精度和质量的关键工艺参数。成型速度过快时，材料在受到压力作用时未能充分塑性变形，导致成型精度下降，产生不均匀的弯曲效果。若成型速度过慢，尽管可以避免部分问题，但可能导致生产效率的显著下降，增加了整体成本。合理选择适宜的成型速度，有助于保证材料在较短时间内完成变形，避免过度加工造成的不必要浪费。压力的控制同样至关重要。过高的压力可能会引发材料的裂纹、过度变形或模具的损坏，而过低的压力则会导致材料无法达到所需的弯曲角度或精度要求。优化压力控制可以通过调节模具与材料之间的接触力来精确实现成型，确保各部分材料的受力均匀，进而提升成型件的精度和质量。

### 3.2 材料厚度与形状的适应性调整

材料厚度是影响冷弯成型精度的关键因素之一，尤其是在处理大厚度材料时，适当的调整成型工艺参数显得尤为重要。较厚的材料由于其较强的抗变形能力，往往需要更高的压力和更长的加工时间，这对成型设备和工艺控制提出了更高要求。薄板材料在冷弯成型中具有较强的延展性，但其变形控制难度较大，容易出现不均匀的变形或产生褶皱等缺陷。根据不同厚度的材料调整成型压力和速度，是确保成型精度的重要手段<sup>[3]</sup>。除了厚度，材料形状的适应性调整同样不可忽视。在对不同形状的材料进行冷弯成型时，模具的设计应考虑到材料的几何特征，通过优化模具与材料的接触面，使得每个部分的受力更加均匀，避免因局部过度弯曲导致的变形缺陷。

### 3.3 工艺参数优化对精度的影响

优化工艺参数对成型精度的影响不容忽视。在冷弯成型中，多个参数如成型速度、压力、温度和材料的相互作用决定

了最终成型件的尺寸和外观。通过调整这些参数，不仅可以提高生产效率，还能够大幅度提高产品的精度。调整成型速度和压力可以有效减少材料的反弹和弹性变形，保持产品尺寸的稳定性。在调整工艺参数时，还需要考虑材料的加工硬化效应与设备的响应特性。合理的工艺参数组合能够使材料在成型过程中保持良好的流动性，从而减少表面缺陷及内部应力，保证成型件的均匀性和精度。温度的变化对材料的塑性和硬度有着显著影响，适当的温度控制能够有效降低材料的内应力和加工硬化，提高成型的精度与稳定性。通过系统地优化这些工艺参数，冷弯成型工艺的整体性能可以得到显著提升，从而确保生产出的光伏支架等产品符合严格的精度要求。见下图：

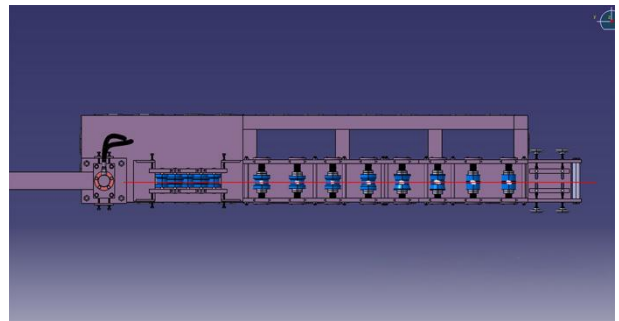


图1 冷弯成型机结构图

## 4 精度控制技术的创新应用

### 4.1 传感器与自动化控制系统的结合

传感器技术与自动化控制系统的结合为冷弯成型工艺的精度控制提供了新的解决方案。通过在成型设备上安装力传感器、压力传感器和位置传感器，可以实时监控成型过程中的各项参数，确保设备与材料之间的互动达到预定标准。传感器能够精确捕捉到材料的变化与设备的状态，从而为自动化控制系统提供实时反馈。这种实时数据的采集和分析，可以帮助系统根据变化及时调整操作参数，优化成型过程，减少人为误差并提高成型精度。传感器与自动化系统的联动有效地缩短了反馈与调整的时间，提升了整体生产效率和产品一致性。

### 4.2 实时反馈机制在精度控制中的作用

实时反馈机制在精度控制中的作用不容忽视。通过集成实时数据监控系统，能够对每个生产环节进行动态跟踪。该机制利用传感器获得的数据，实时传输至控制中心，反馈到设备调节系统<sup>[4]</sup>。设备通过自动调整成型参数，保证在整个生产过程中材料的应力、压力、温度等保持在设定的范围内。实时反馈机制减少了因参数变化而引发的误差，提高了精度控制的稳定性。当生产过程中出现偏差时，系统能够立即响应并调整，避免不良品的产生，确保每个产品都能达到预定的质量标准。

### 4.3 闭环控制系统的优化与实践

闭环控制系统在精度控制中具有重要意义。该系统通过反馈调节机制，确保每个成型过程中的参数能够始终保持在理想

状态,最大限度地减少误差。闭环控制系统通过实时监测工艺参数,将偏差信息反馈至控制系统,再根据反馈信息自动调整参数,持续优化生产过程。在实践中,闭环控制系统的应用使得成型过程中的各项工艺参数得以精准调节,有效避免了设备磨损或材料不均匀性所带来的精度问题。通过持续优化控制策略,闭环系统不仅提升了成型精度,还增强了生产的可重复性和一致性,为高质量产品的批量生产奠定了基础。

## 5 工艺优化结果与生产效益分析

### 5.1 优化工艺后的成型精度提升

优化后的冷弯成型工艺显著提升了光伏支架的成型精度。通过合理调整成型参数,如速度、压力和材料厚度的适配,减少了成型过程中的误差。优化后,材料的均匀变形性得到增强,成型件的尺寸公差控制更为精准,产品的表面质量也有了明显改善。设备的精度控制得到了加强,自动化控制系统与实时反馈机制的结合,使得每个环节的精度都能被动态监控和及时调整。经过工艺优化,成型精度达到了行业要求的标准,能够有效满足光伏支架对高精度和高稳定性的需求,减少了不良品的产生和返工率,提升了整体产品的一致性和可靠性。见下表:

表1 工艺优化前后光伏支架成型质量指标对比

指标项目	优化前工艺	优化后工艺
产品整体不良率	6.85%	1.92%
尺寸超差缺陷率	4.12%	0.75%
扭曲翘曲缺陷率	1.86%	0.58%
生产返工率	5.30%	1.65%

### 5.2 生产成本与效率的改善

工艺优化带来了显著的生产成本降低和效率提升。通过精

确控制成型过程中的每一个参数,材料的利用率得到了提升,减少了因精度不高而导致材料浪费。生产过程中减少了不必要的返工与维修,大大缩短了生产周期,提升了设备的使用效率<sup>[5]</sup>。优化后的工艺使得每个生产环节更加流畅,工人操作的复杂度降低,自动化水平提高,从而减少了人工成本和操作失误。提高生产效率的同时,工艺优化减少了能耗,降低了能源消耗,对环保和经济效益产生了积极影响。优化后的工艺不仅提升了生产效率,还降低了单位产品的生产成本,增强了企业在市场中的竞争力。

### 5.3 技术改进的市场应用前景

工艺优化后的技术改进为光伏行业的未来发展开辟了广阔的应用前景。随着光伏市场需求的持续增长,对支架制造的精度和生产效率提出了更高的要求。优化后的冷弯成型技术能够更好地适应这一需求,提升产品的质量与一致性,满足大型光伏项目对高质量支架的需求。技术改进带来的成本下降和生产效率提升,将使光伏支架的市场价格更具竞争力,推动光伏产业的快速扩展。在全球倡导可再生能源的大背景下,光伏支架的技术进步不仅推动了光伏产业链的优化,也为其他相关行业提供了技术参考。优化后的工艺技术具有较高的市场应用潜力,预计将在未来几年内得到更广泛的推广和应用。

## 6 结语

在冷弯成型工艺优化与精度控制的研究中,提出的各项优化策略显著提升了光伏支架的生产精度与效率。材料性能、设备精度及控制技术的创新应用,有效解决了精度偏差和生产成本高的问题,为光伏支架的大规模生产提供了可靠的技术支持。工艺优化的成果不仅推动了光伏支架行业的进步,也为相关行业的制造工艺改进提供了宝贵的参考,具有广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 吾塔,赵亮,雷洪.基于微合金化与控制轧工艺的 Q350 光伏支架钢成分设计与性能优化[J].新疆钢铁,2025(4):11-12.
- [2] 吕富强,卢峰,孙乾.高性能光伏支架用热轧钢带的优化与制备[J].山东冶金,2025,47(1):18-22.
- [3] 裴中凯.冷弯薄壁高强度合金钢光伏支架柱脚承载性能试验与设计分析[J].中国科技期刊数据库工业 A,2024(10):0013-0016.
- [4] 果超,成生伟,刘西峰,林瑞民,贾思贤,张丹,王彦文,杜晓建.Ti 微合金化 400 MPa 级光伏支架用钢的开发[J].山西冶金,2024,47(2):21-22.
- [5] 陈希聪.热轧卷板在冷弯成型中的稳定性研究[J].冶金与材料,2025,45(4):133-135.