

液压管件扩口工艺参数优化的数据实验与技术改进

沈佳欢 刘成江 杨俊超 顾鑫磊 黄江远

浙江迈思特液压管件股份有限公司，浙江省嘉兴市，314000；

摘要：液压管件扩口工艺是管件生产中的关键步骤，直接影响其质量与使用性能。通过实验数据分析与工艺参数优化，提出了一套基于多目标优化算法的液压管件扩口工艺优化方案。优化内容包括扩口力、扩口速度和温控参数的合理配置。实验结果表明，优化后的工艺能显著提高扩口质量，减少裂纹和变形，提升生产效率。进一步应用表明，扩口力控制精度提高至 $\pm 2\%$ ，生产效率提升了 18%，裂纹率降低了 20%，生产成本有效降低。优化后的工艺对液压管件制造行业的生产过程改进具有重要技术意义。

关键词：液压管件；扩口工艺；工艺优化

DOI：10.69979/3029-2727.24.07.026

引言

液压管件在工程机械、航空航天及汽车工业中有着广泛应用，扩口工艺作为液压管件生产的重要环节，直接影响到管件的强度与密封性。为了提升扩口工艺的性能，必须通过优化工艺参数来提高生产效率及质量。本文通过实验数据分析，探讨了液压管件扩口工艺的关键参数，并提出相应的技术改进措施，旨在为实际生产提供有效的技术支持。

1 液压管件扩口工艺分析

1.1 扩口工艺流程及其关键技术

液压管件扩口工艺主要通过液压压力使管件端部的外径扩大，以满足连接要求。工艺流程通常包括以下几个步骤：选择合适的管件材料，并进行预热处理，以提高其塑性和减少应力集中，使用专用扩口工具，通过液压作用对管件端部进行扩张，扩口的过程要精确控制扩口力和扩口速度，以避免管件变形或裂纹产生，进行质量检测，确保扩口尺寸符合设计标准，并无明显缺陷。关键技术包括液压系统压力控制、扩口工具的设计与选型、以及扩口过程中的温控管理。压力控制技术要求精确调节液压系统的压力，以避免管件的过度变形或接头密封性能的下降。扩口工具的设计必须根据不同管件的材质、壁厚等特性进行优化，确保扩口过程的稳定性和高效性。温控管理则有助于在扩口过程中维持管件的均匀温度，减少局部过热导致的材料性能下降^[1]。通过合理的工艺控制和技术手段，液压管件的扩口工艺能够有效提高管件的质量与使用寿命，同时降低生产过程中的废品率。

1.2 影响扩口质量的主要因素

液压管件扩口质量受多种因素的影响，关键因素包括扩口力、扩口速度、管件材料的力学性能、工具设计及温度控制等。扩口力是影响扩口质量的主要因素。过低的扩口力可能导致扩口不足，无法达到所需的连接尺寸，而过高的扩口力则容易引起管件的过度变形或裂纹，降低管件的强度与密封性。精确控制扩口力是保证质量的关键。扩口速度的控制同样至关重要。扩口速度过快会导致材料的塑性流动不均匀，可能引起管件表面产生裂纹或不规则变形；而扩口速度过慢则可能导致生产效率低下，增加能耗和生产成本。通常，通过优化扩口速度与压力的匹配关系，可以实现更为理想的扩口效果。

管件的材料特性也是决定扩口质量的重要因素。不同材质的管件在扩口过程中具有不同的应力-应变表现，高强度材料通常需要较高的扩口力和温控措施。管壁厚度不均、内外表面粗糙度等因素，也可能对扩口质量产生影响，材料的均匀性和表面处理对扩口质量的影响不容忽视^[2]。温度控制在扩口过程中的作用不容忽视。适当的预热和过程中的温度管理有助于提高材料的延展性，减少扩口过程中产生的裂纹和硬化现象，从而提升扩口的质量与一致性。

1.3 现有工艺的不足与瓶颈

尽管现有的液压管件扩口工艺已得到广泛应用，但在实际生产过程中仍存在若干不足与瓶颈，限制了工艺的进一步提升与优化。扩口力控制的精度仍不足。由于液压系统的压强波动，扩口力难以保持稳定，导致扩口质量不一致。当前大多数液压系统使用的是常规的压力调节设备，无法精确调整压力的变化速率，从而影响扩口过程中的均匀性和精度，进而影响管件的强度与密封性。扩口速度的调节范围较为狭窄。在现有的扩口设备中，大多数都依赖固定的扩口速度进行操作，缺乏动态

调整功能。这使得在面对不同管件材料、壁厚和尺寸的情况下，难以实现最佳的扩口速度，导致某些管件出现裂纹或变形问题。进一步优化扩口速度与压力的配合，增强其可调性，是当前技术的一个瓶颈。

温度控制方面的不足也制约了工艺的提升。虽然部分设备采用了加热装置，但由于加热均匀性差，温度分布不均，导致部分管件在扩口时出现过热或过冷的情况，影响扩口的塑性流动，容易产生表面裂纹或变形。提高温控系统的精度与均匀性，特别是在高强度材料的扩口过程中是解决这一瓶颈的关键^[3]。扩口工具的设计仍缺乏个性化和针对性，未能充分考虑不同管件的材质、壁厚及使用环境对扩口过程的影响。优化工具设计、提高其适应性，将是未来改进的重点方向。

2 实验设计与数据分析

2.1 实验设备与材料选择

在液压管件扩口工艺优化的实验中，实验设备的选择至关重要，直接决定了数据的可靠性与实验的精度。实验采用的液压设备为全自动液压机，能够精确控制扩口过程中施加的压力与速度。该液压机配备压力传感器，能够实时监控和调整施加的压力，确保每次扩口力的精确性，避免因压力波动带来的误差。液压机的压力范围为 0-5000kN，精度可达到±0.5%。为了模拟实际生产环境中的压力变化，实验中设置了不同的压力等级，以便评估其对扩口质量的影响。

在材料选择方面，实验选用了常见的液压管件材料，包括低碳钢（Q235）、不锈钢（304）、合金钢（42CrMo）等。这些材料具有代表性，能够涵盖不同材质对扩

口工艺的影响。每种材料的管壁厚度为 3mm、5mm、7mm，满足不同工业应用的需求。材料表面在实验前进行标准化处理，确保其表面粗糙度符合要求，避免表面缺陷对实验结果的干扰。为了保证实验的可重复性，所有材料均来自同一批次，且在每次实验前均进行严格的检验，确保材料性能的一致性。通过这些设备和材料的精确选择，能够确保实验结果的准确性与工艺优化的可行性。

2.2 实验数据采集与处理方法

在液压管件扩口工艺优化实验中，数据采集与处理方法是确保实验结果有效性和科学性的关键步骤。实验数据采集通过高精度传感器和数据记录系统实现，主要包括压力、扩口力、位移、温度等多项参数。压力由安装在液压系统中的压强传感器实时监测，精度达到 0.5% FS；扩口力通过力传感器检测，最大可测量 5000N，精度为±1%；管件表面的温度由红外温度计和热电偶共同监控，温度范围为 30-800℃，误差不超过±2℃。

在每次实验过程中，数据采集系统实时记录各项数据，并通过数据采集卡传输至计算机进行处理。数据处理软件采用 MATLAB，进行数据的实时监控与后期分析。采集的数据包括扩口过程中各阶段的压力变化、力学响应、扩口速度及管件的温度变化曲线。为了确保数据的代表性，每种工艺参数下的实验进行三次重复，每次实验间隔保持一致，保证环境条件的稳定性。数据处理过程中，首先进行噪声过滤和异常值剔除，采用中值滤波法去除测量误差。通过回归分析方法对各工艺参数的影响进行量化，得出压力、扩口力与扩口质量之间的关系。通过对比不同实验条件下的结果，进一步优化工艺参数组合，并为工艺改进提供科学依据。

表 1 实验数据表格

实验编号	扩口力 (N)	扩口速度 (mm/min)	温度 (℃)	压力 (MPa)	裂纹率 (%)	表面粗糙度 (μm)
1	3300	20	295	15	4	5.5
2	3400	22	300	16	2	4.8
3	3500	24	305	17	1	4.2

2.3 实验结果分析与对比

通过对液压管件扩口工艺的实验结果进行分析与对比，得出了不同工艺参数对扩口质量的影响规律。扩口力与扩口质量之间呈现出显著的非线性关系。在低于最佳扩口力范围时，管件无法达到理想的扩口尺寸，存在扩口不足的现象；而超过最佳扩口力后，管件表面出现了裂纹及形变，尤其是在高强度材料如合金钢（42CrMo）上，过高的扩口力导致材料的塑性流动不均匀，显著降低了管件的结构强度。实验数据显示，当扩口力控制在 3500N 左右时，扩口质量最佳，裂纹率最低。

扩口速度对扩口效果也有重要影响。在较低的扩口

速度下，管件表面较为光滑，变形均匀，但生产效率较低；而在较高的扩口速度下，虽然生产效率有所提升，但表面产生了明显的流痕和微裂纹。通过对比不同扩口速度下的扩口质量，发现最佳速度范围为 15-25mm/min，此范围内，管件的扩口尺寸和表面质量达到最佳平衡。温控系统的引入也在实验中表现出重要作用。在温度控制在 300℃时，管件的塑性得到了有效提升，扩口过程中的裂纹和变形大幅减少^[4]。未加温处理的管件在扩口过程中表现出明显的脆性断裂，表明温控技术是优化扩口质量的关键因素之一。通过实验对比，可以明确提出在实际生产中，扩口力、扩口速度与温控参数的综合优化是提高液压管件扩口质量的关键技术。

3 扩口工艺参数优化与技术改进

3.1 工艺参数的优化模型建立

为了提高液压管件扩口工艺的效率与质量，建立了基于实验数据的工艺参数优化模型。该模型的核心是利用多目标优化算法，在多个工艺参数（如扩口力、扩口速度、温度等）之间找到最佳组合，从而最大化扩口质量与生产效率。针对扩口力与扩口速度的优化，采用了响应面法（RSM）建立了数学模型。通过实验数据拟合得到扩口力和扩口速度对扩口尺寸精度和表面质量的影响曲线。实验数据显示，当扩口力在 3200N 至 3700N、扩口速度在 20mm/min 至 25mm/min 之间时，扩口质量最为稳定，裂纹和变形的发生概率降至最低。基于此数据，响应面法计算得到最佳工艺参数为：扩口力 3400N，扩口速度 22mm/min。

在温控方面，建立了温度与扩口质量之间的非线性回归模型。实验表明，管件在 300℃ 时的扩口质量最为优越。通过引入温度调节系统，并结合模型优化，能够在不同材料及管件尺寸条件下动态调整温度，从而提高扩口过程中的塑性流动性，减少脆性断裂和裂纹。综合考虑扩口力、速度和温度三者的相互影响，采用遗传算法（GA）对上述模型进行了优化，得出综合最优的工艺参数组合，成功提升了扩口过程的整体效率与质量，实验结果表明，优化后的工艺在生产效率和管件质量上均有显著提升。

3.2 技术改进措施的提出与验证

基于实验数据分析与工艺优化模型的建立，提出了以下几项技术改进措施，以进一步提高液压管件扩口工艺的质量和生产效率。

为了精确控制扩口力，改进了液压系统的压力控制技术。通过引入闭环反馈控制系统，实时监控并调节压力传感器数据，确保扩口力在稳定范围内波动，避免因压力不稳定导致的管件变形和裂纹。实验验证结果表明，改进后的系统能够将扩口力的误差控制在 $\pm 2\%$ ，显著减少了管件质量波动，尤其在高强度材料（如 42CrMo）扩口过程中，裂纹发生率降低了 15%。在扩口速度的调节上，采用了变速控制系统，通过调整液压机的驱动电机，实现扩口速度的动态调整。优化后，扩口速度在 15–25 mm/min 范围内运行时，确保了良好的表面质量与形变均匀性，同时提高了生产效率。实验数据表明，该改进使生产效率提高了 20%，而管件表面粗糙度降低了约 18%。

针对温控系统，采用了高效热管理装置，在管件扩口前进行精确预热，并在扩口过程中维持稳定的温度^[5]。

实验验证显示，在 300℃ 的温控下，管件的塑性得到充分发挥，裂纹率减少了 25%。综合改进后，工艺的稳定性与管件的可靠性均得到显著提高，整体工艺效率提升了约 30%。

3.3 优化结果的实际应用与评估

基于优化模型和技术改进措施的应用，液压管件扩口工艺在实际生产中取得了显著的成效。优化后的扩口力、速度和温控参数组合在实际生产中成功应用，生产效率提高了 18%，同时管件的扩口精度和表面质量得到显著改善。通过实时监控系统，扩口力误差控制在 $\pm 2\%$ ，扩口速度的可调范围扩展至 15–30mm/min，满足了不同材料和尺寸管件的生产需求。

优化后的技术措施在实际应用中显著提高了管件的可靠性。通过温控系统的精确调节，管件的裂纹率较改进前减少了 20%，特别是在高强度材料的扩口中，管件的破损率降低了 25%。在生产过程中，所有关键工艺参数得到了严格控制，确保了扩口质量的一致性。通过对优化后工艺的评估，发现生产周期缩短了 12%，同时能耗降低了 15%，使得生产成本进一步得到优化。这些改进措施不仅提升了液压管件扩口工艺的整体性能，也为相关制造领域的工艺改进提供了可借鉴的经验。

4 结论

通过实验数据分析与工艺参数优化，本文提出的液压管件扩口工艺优化措施有效提高了扩口质量与生产效率。优化后的扩口力、速度和温控参数组合在实际应用中实现了显著的质量提升，管件的裂纹率和破损率分别降低了 20% 和 25%。生产效率提高了 18%，能耗降低了 15%，有效降低了生产成本。优化后的工艺为液压管件制造提供了更加稳定且高效的技术路径，对行业的技术改进具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] 李育聪. 液压管件扩口折边机:CN202020505689.4 [P]. CN212419253U[2025-01-18].
- [2] 陈小丽. 工程机械液压管件在制品管理系统设计研究[D]. 长安大学[2025-01-18].
- [3] 陈国安, 傅香如, 范天锦. 高效节能环保液压管件酸洗装置[J]. 液压气动与密封, 2013, 33(008):77-78.
- [4] 王翔. 工程机械液压管件生产管理信息系统销售管理和质量管理分系统研究[D]. 长安大学[2025-01-18].
- [5] 蒋友荣. 液压管件加工工具的环形储油体结构:CN202121708704.6[P]. CN215596043U[2025-01-18].