文章编号：1003-1480（2026）01-0066-09

面向带药封装的微小型火工品超短脉冲激光智能焊接系统

袁长宏[1]，李永哲[2]，袁玉红[1]，谭玉明[1]，翟小平[1]，方海登[1]

（1. 安徽红星机电科技股份有限公司，安徽 合肥，230011；2. 东南大学，江苏 南京，210096）

摘　要：为突破微小型火工品在带药封装过程中的安全性与一致性瓶颈，本文构建了一种基于超短脉冲激光的智能焊接控制系统，实现了低热输入、高精度、高可靠性的焊接封装。通过设计超薄板低热输入焊接接头结构，结合飞秒激光多点同步焊接与定向冷却技术，有效控制药板界面温度在 100 ℃以下，确保焊接过程的本质安全。针对异形焊缝定位难题，提出了基于三线结构激光的三维形貌识别方法，并引入卷积神经网络实现焊接参数的自适应迭代优化。进一步，融合声、光、形多模态信号，建立了焊缝成形质量的在线评估模型，实现了焊接缺陷的实时识别与闭环反馈控制。实验结果表明：焊接接头强度系数提升至 0.95 以上，单件焊接时间缩短至 1.2 min，焊接合格率达 99%，检测误判率低于 5‰。该系统为微小型火工品的自动化、智能化封装提供了可行技术路径。

关键词：微小型火工品；激光焊接；智能控制；质量评估

中图分类号：TJ450.3+1；TQ560.5　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2026.01.011

Intelligent Ultrashort Pulse Laser Welding System for Micro-Small Pyrotechnic Devices in Live-Charge Encapsulation

YUNG Chang-hong[1]，LI Yong-zhe[2]，YUAN Yu-hong，TAN Yu-ming[1]，ZHAI Xiao-ping[1]，FANG Hai-deng[1]

(1.Anhui Hongxing Electromechanical Technology Co., Ltd.，Hefei，230011；2.Southeast University，Nanjing，210096）

Abstract：To address the safety and consistency challenges in the encapsulation of micro-scale pyrotechnic devices with embedded energetic materials, this paper presents an intelligent welding control system based on ultrashort pulse laser technology, enabling low heat input, high precision, and high reliability. A low-heat-input welding joint structure was designed, combined with femtosecond laser multi-point synchronous welding and directional cooling technology, to maintain the interface temperature below 100 ℃, ensuring intrinsic safety during welding. To tackle the positioning difficulty of irregular seams, a 3D morphology recognition method using three-line structured laser was proposed, and a convolutional neural network was introduced for adaptive parameter optimization. Furthermore, a multimodal sensing system integrating acoustic, optical, and visual signals was developed to enable real-time weld quality evaluation and closed-loop feedback control. Experimental results show that the joint strength coefficient exceeds 0.95, the single-piece welding time is reduced to 1.2 min, the welding qualification rate reaches 99%, and the detection error rate is less than 5‰. This system provides a viable technical pathway for automated and intelligent encapsulation of micro-scale pyrotechnic devices.

Key words：Micro and small initiating explosive device；Laser welding；Intelligent control technology；Quality evaluation

现代武器系统向轻量化、智能化方向快速发展，微小型火工品因其体积小、作用灵敏、集成度高等优势，逐渐成为弹药起爆、姿态控制等关键环节的核心元件[1]。作为武器系统的敏感元件，火工品需在长期

收稿日期：2025-10-06
作者简介：袁长宏（1972-），男，正高级工程师，从事军用火工品及含能材料应用技术研究。
引用本文：袁长宏，李永哲，谭玉明，等.面向带药封装的微小型火工品超短脉冲激光智能焊接系统[J]. 火工品, 2026(1): 66-74.

贮存（通常超过 15 a）及复杂力学、气候环境下保持极高的密封性与可靠性，这对制造工艺提出了近乎苛刻的要求。传统封装技术如收平口灌胶、螺纹连接涂胶等，虽能实现基本密封[2]，但其工艺稳定性不足，长期贮存中胶体易老化失效，导致密封性能下降，严重制约了火工品的长贮可靠性与武器系统的战备完好性。

激光焊接技术在火工品生产制造领域是一门发展极快的新制造技术，具有焊接速度快、热影响区小、变形小、焊缝窄、焊缝组织均匀的特点。激光焊接以其高能束的聚焦方式，在焊接过程中能实现深熔焊、快速焊等焊接形式，其机械性能、抗蚀性能优于常规焊接方法，非常适合于对焊接要求严格的场合[3]，具备替代传统火工品收平口灌胶、螺纹连接涂胶等封装工序，能够在火工品的封装中发挥一定的优势，使火工品的密封性能、工作性能得到较大的提升。经过十多年的发展，激光焊接技术在传统大尺寸火工品的封装应用方面已较为成熟，采用激光焊接工艺生产的火工品已大量应用到型号武器系统并已通过鉴定试验考核。通过查阅国内外文献可知，关于火工品激光焊接技术研究内容很多，却没有针对微小型火工品激光焊接的研究文献，因此目前针对微小型火工品带药焊接尚无成熟的解决方案。

近年来，激光焊接技术及其基础科学领域取得了显著进展。特别是通过将激光焊接技术与人工智能技术的有效整合，显著提升了激光焊接技术的性能，为微小型火工品领域实现自动化智能焊接技术的突破提供了可行性。安徽红星机电科技股份有限公司作为国内火工品研制生产单位，为解决微小型火工品激光焊接安全管控与批量生产问题，联合东南大学先进焊接与增材制造团队开展相关课题研究，取得一定成果。

1　研究背景与核心挑战

1.1　微小型火工品封装的技术瓶颈

随着火工品技术向小型化、高安全性、高可靠性发展，微小型火工品在型号产品中应用愈发广泛，后续将成为武器系统配套的主流。同时，这也对火工品未来制造技术提出更高要求。而在微小型火工品激光焊接方面，原有焊接设备辅助人工的方式难以满足生产安全、产品质量和工作可靠性控制要求，微小型火工品焊接部位典型结构见图 1。

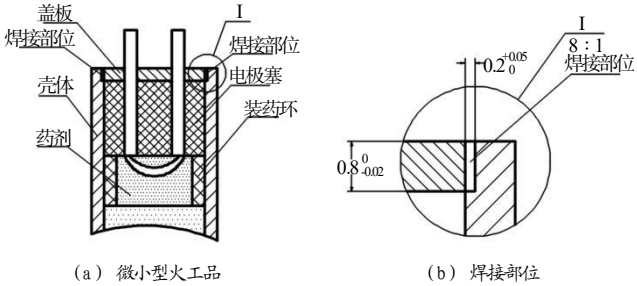


图 1　微小型火工品典型焊接结构示意图

Fig.1　Schematic of typical welding structure in micro-small pyrotechnic devices

微小型火工品激光焊接存在以下 4 大核心问题。

（1）本质安全控制存在难题，微小型火工品在焊接过程中的安全管控难度较高。微小型火工品在制造环节需携带药剂进行焊接封装，在激光焊接期间，其药剂接触面与焊接面间距较小，焊接过程产生的热积累会造成火工品意外发火，进而可能引发安全事故。

（2）精密焊接工艺存在瓶颈，微小型火工品于激光焊接过程中，焊接部位尺寸过小（≤0.5 mm），对精度要求较高且控制难度较大。焊接过程产生的热变形会对产品的外观质量和尺寸要求产生影响，热变形控制精度需达到 ± 5 μm，导致产品的焊接质量难以保证。

（3）受批量生产效率限制，微小型火工品种类多、数量大。当前以激光焊接设备辅助人工焊接，单件生产耗时久，致生产效率低、周期长，难满足大批量装备需求。

（4）传统激光焊接过程需通过人工开展焊接质量检测，检测结果受限于操作人员的工作经验与责任心，检测结果的客观性难以保证；并且人工检测过程效率较低，难以满足大规模生产的要求。因此，亟待开展新的激光智能焊接控制技术研究，以满足多种类、多状态、大批量微小型火工品的研制生产需求。

1.2　智能焊接的关键需求与目标

本研究的核心目的在于构建一套微小型火工品

智能装焊系统及其工艺库，以达成微小型火工品带药焊接封装过程的高质量、高效率与本质安全。为实现这一研究目的，需从以下 3 个维度展开研究。

首先，针对低热输入工艺技术，将着重开展微小型火工品的低热输入激光焊接技术研究，并通过应用验证形成相应的工艺规范。以此满足微小型火工品带药焊接封装过程中对本质安全的迫切需求，同时确保焊接质量控制标准得到满足，即接头强度系数需达到或超过 0.95。

其次，自适应调控技术的研究将涵盖多线束识别与焊接自适应控制技术、机器人焊接自适应调控技术的研发。实现单元级智能化无人生产，进而全面提升火工品焊装的质量、效率与可靠性。研究目标为确保产品焊接合格率不低于 99%，同时使产品焊接封装的总体效率（单发焊接时间 1.2 min）相较于传统的人机协同加工方式（单发焊接时间 2.0 min）提高 65%以上。

最后，开展在线智能检测技术研究，包括激光焊接质量的在线实时智能检测技术研究，以及激光焊接质量在线融合传感与综合质量评估技术。研究目标是将误判率控制在 5‰以内（检测样本量 $n = 100$）。

2　智能焊接系统总体架构

2.1　系统设计思路与技术路线

为达成研究目标，需攻克以下关键技术：（1）超薄板超短脉冲激光低热焊接接头设计及药板界面焊接温度精确控制工艺方法，构建分束激光焊接与柔性抓夹控温子系统；（2）微小异形焊缝激光焊接参数推理与智能迭代优化技术，搭建多线束焊缝传感子系统；（3）基于超短脉冲激光焊多模态信号的成形质量评估技术，建立焊接质量诊断反馈子系统。

集成上述软硬件系统与焊接工艺，研发微小型火工品智能装焊装备，所建立的智能焊接技术体系架构如图 2 所示。智能装焊设备示意图如图 3 所示。构建与之对应的工艺知识库，并基于此制定智能装焊装备系统的性能评估指标。在综合权衡安全性、生产效率、成本等多方面因素后，对所研发的智能装焊装备开展迭代优化。最终确定微小型火工品高质量本质安全带药焊接装配工艺规范，切实解决微小型火工品大规模自动化焊接的技术难题。

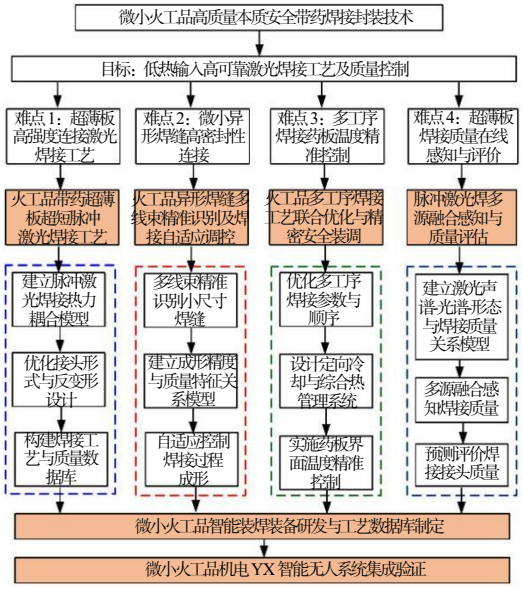


图 2　微小型火工品智能焊接技术体系架构

Fig.2　Architecture of intelligent welding technology system for micro-small pyrotechnic devices

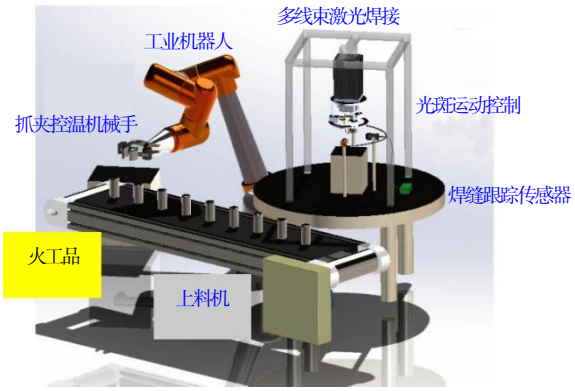


图 3　微小型火工品智能装焊设备示意图

Fig.3　Schematic of intelligent assembly-welding equipment for micro-small pyrotechnic devices

2.2　3 大核心技术模块

2.2.1　低热输入超短脉冲激光焊接工艺

微小型火工品激光焊接的安全性问题是亟待解决的关键问题。鉴于微小型火工品焊接位置与药剂间距极小（仅零点几毫米），在焊接进程中，局部热输入会致使产品热敏感区域温度过高，极易引发微小型火工品内部敏感药剂意外发火。因此，精准控制温度对于保障药板安全焊接制造至关重要。通过查阅相关文献并开展相关验证试验可知，一般将药板接触面温

度控制在 100 ℃以下，可确保焊接过程中火工药剂的安全性[4-5]。

针对所提出的两个研究方向，本研究将实施以下策略：

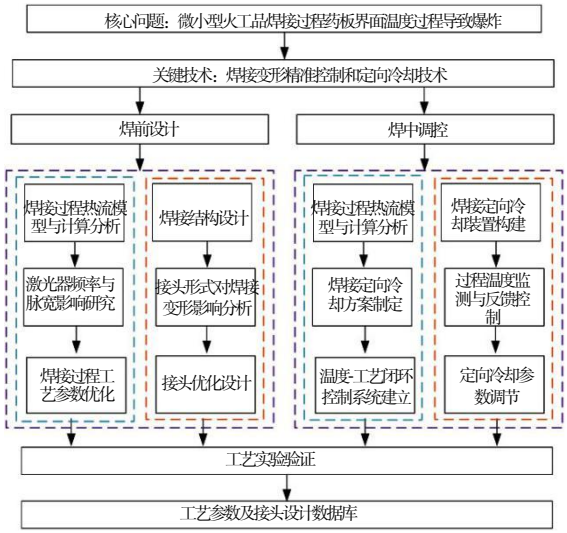
（1）深入探究超薄板材在低热量超快脉冲激光焊接中的接头设计与工艺方法。研究核心在于在低热输入条件下，实现对超薄板材的高精度焊接。鉴于超薄板材具备极小的厚度与良好的热传导特性，传统焊接技术易致使热影响区过大，进而引发焊接变形、屈曲及烧穿等状况。

（2）掌握微小型火工品药板界面焊接温度的精确控制技术。通过优化焊前设计与焊中调控，构建焊接热流模型并开展分析计算，运用定向冷却技术对焊接过程实施精确的温度调控。同时，引入实时温度监测与反馈控制技术，对焊接参数进行动态调节，以确保焊接界面温度始终维持在预定区间，从而保障药板焊接过程的安全性、可靠性以及产品质量。

焊接接头设计在控制焊接过程中的变形问题方面具有关键意义。在微型结构药板的焊接进程中，接头形式直接关乎焊缝的强度与稳定性，且不同的接头形式对焊接时的应力集中和热传导会产生不同的影响[6]。通过对接头形式的研究，能够筛选出在焊接时可更有效分散应力、减少变形的设计方案。对于薄壁药板结构，需选取适宜的接头形式，以降低局部热应力、缓解应力集中，进而在焊接过程中避免焊缝出现开裂或失效现象。同时，在接头设计中可运用反变形技术，即在焊接前通过精准计算预变形量，确保焊接时的热膨胀和收缩能够被反向抵消，最终达成减少焊接后残余应力和变形的目标。

采用飞秒激光多点同步焊接方法，能够实现激光焊接进程中的低热量输入。飞秒激光具备热影响范围较小的属性，多点同步焊接可使热过程呈现对称性，单激光分光拥有良好的同步性，振镜独立调控能够实现自适应控制功能。因此，超短脉宽、低热输入脉冲激光焊接技术，借助精准把控激光功率、脉宽、频率以及焊接速度等参数，可在局部区域达成快速热输入与冷却，缩小热影响区，降低焊缝熔池扩展程度，并有效管控焊接变形。

为解决超薄板低热量超快脉冲激光焊接接头的设计及工艺方法问题，通过构建精准的热源模型，结合数值模拟与实验验证，可深入探究不同工艺参数对焊接变形的影响，进而优化工艺窗口，降低焊接缺陷的出现概率。具体实施途径见图 4。



注：虚线框内为温度精准控制模块，需与焊接工艺参数协同优化

图 4　低热输入激光焊接工艺技术路线

Fig.4　Technical route for low heat input laser welding process

建立起高斯热源模型如公式（1）所示。

$$q(x,y,z)=\frac{2P}{\pi r^2}\exp\left[-2\frac{(x^2+y^2}{r^2}\right] \qquad (1)$$

式（1）中：P 为激光功率，W；r 为光斑半径，mm；x，y，z 为工件表面坐标。

时变控制（脉冲焊接）如公式（2）所示：

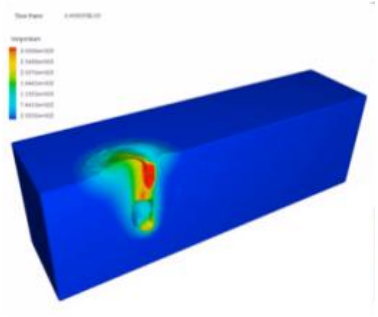
$$q(t)=q(x,y)\cdot \mathrm{Pulse}(t) \qquad (2)$$

式（2）中：脉冲函数 Pulse(t)由频率 f（Hz）和脉宽 t_p（s）决定，占空比 $D=t_p{\cdot}f$，占空比 D 是指脉冲宽度 t_p 占整个脉冲周期 T 的比例。

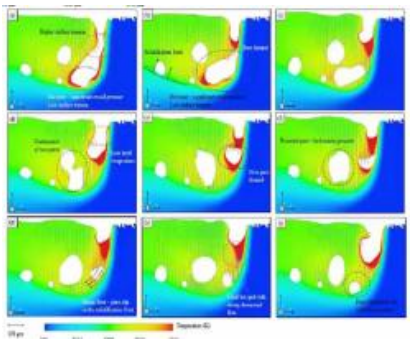
通过精确控制激光功率 P 为 500~3 000 W、脉宽 1~10 ms、频率 20~500 Hz 和焊接速度 1~10 mm・s^{-1} 等参数，并在焊接过程中进行适当调整。

采用预设参数对激光焊接过程中的熔池形成进行仿真分析，并借助红外摄像技术记录焊接熔池影像，如图 5 所示。仿真分析结果显示，通过模拟与优化焊接工艺、设计接头结构以及实施反变形策略，同时结合工艺数据库的构建与运用，能够显著降低微型薄壁

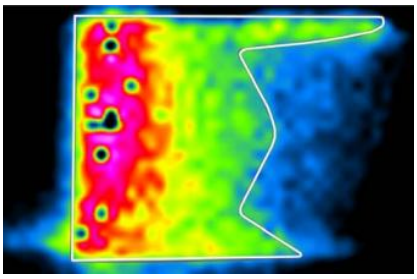
药板产品在焊接过程中产生的变形问题。通过调节焊接参数，增强熔池稳定性并减少瑕疵，接头强度系数可从 0.90 提升至 0.95 以上。



（a） 激光焊接熔池模拟（CFD）



（b） 激光焊接熔池模拟（红外相机）



（c） 激光焊接熔池红外拍摄照

图 5 激光焊接熔池形貌仿真与红外成像结果

Fig.5 Simulated and infrared-captured morphology of laser weld pool

为精确控制微小型火工品药板界面焊接温度，建立了焊接过程的傅立叶热传导控制方程，具体如公式（3）所示。

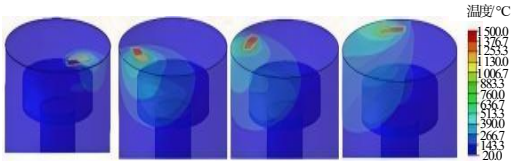
$$\rho(T)c_p(T)\frac{\partial T}{\partial t}=\nabla\cdot[k(T)\nabla T]+Q(r,t) \qquad (3)$$

式（3）中：$\rho(T)$为材料密度（可能随温度变化）；$c_p(T)$为比热容；$k(T)$为热导率；$Q(r,t)$为激光热源项，W · m^{-3}。$T(r,t)$为温度场；$r=(x,y,z)$为空间坐标；t 为时间。

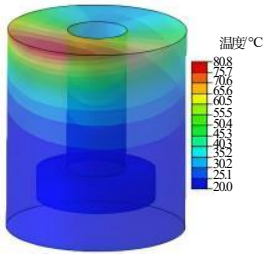
在研究激光焊接过程时，必须充分考虑激光热流输入边界、对流换热边界以及辐射换热边界等边界条件。通过数值模拟分析不同焊接工艺参数（包括激光功率、焊接速度、脉冲频率等）对温度场分布的影响，可以精确地辨识出焊接过程中的热敏感区域，并确定药板界面可能出现的温度峰值位置。

针对超薄板脉冲激光焊接工艺温度场的仿真计算研究已经完成，其结果如图 6 所示。本研究首先利用 ABAQUS 软件对火工品盖板焊接过程进行了热分析模拟。在模拟工况中，焊接速度设定为 20 mm · s^{-1}，确保焊接过程中的熔池温度维持在 1 500 ℃，熔池宽度为 0.4 mm。焊接长度为圆周的一半，环境温度为 20 ℃，空气对流传热系数为 20 W·m^{-2}。

从计算结果可以看出，在焊接速度为 20 mm · s^{-1} 的情况下，采用飞秒脉冲激光焊接 1/4 圆周后，焊线下端 3 mm 处的温度达到 75 ℃。进一步分析表明，在焊接过程中，随着焊接长度的增加，热量逐渐从盖板传递至下端，导致盖板下方整体温度逐渐上升。当完成 1/2 圆周焊接时，盖板下 3 mm 截面的温度分布如图 6（b）所示，最高温度达到 81℃，这初步验证了所提出方案的有效性。



（a） 激光焊接温度演变过程



（b） 激光焊接温度场仿真结果

图 6 超薄板脉冲激光焊接温度场演化仿真结果

Fig.6 Simulated temperature field evolution in pulsed laser welding of ultra-thin plates

在执行精确控制药板界面温度的过程中，冷却技术扮演着至关重要的角色。通过精心设计的冷却装置，可以实现冷却介质对药板界面及其邻近区域的定向喷射，从而迅速移除焊接过程中产生的过剩热量。冷却系统需具备基于实时温度数据进行动态调节的能力，以增强焊接过程的安全性。在本研究提出的温度控制与定向冷却系统方案中，冷却介质选定为去离子水，其流量控制范围设定为 1~10 L · min^{-1}。系统采用

多喷嘴阵列布局，并通过 PID 控制参数（比例系数 Kp=1.2，积分时间 T_i=3 s，微分时间 T_d=0.05 s）实现精确的定向冷却。

2.2.2　异形焊缝自适应识别与参数优化

针对微小型火工品激光焊接精准高效作业难题，本研究关注异形焊缝三维形貌精确识别与焊接参数自适应控制[7]。因机械加工精度有限，微小型火工品盖板变形及公差变动会使离焦量波动，影响焊缝成型质量。所以，需研发多线束、多域图像处理算法，结合多线束系统识别数据获取表面三维形貌。本研究核心是对微小火工品盖板变形后的不规则结构进行精确检测。由于微小火工品盖板易变形，导致离焦量改变，显著影响焊缝成型质量[8]。因此，急需研发薄板结构变形自动检测技术，并依检测结果调整工艺参数，保障焊接质量。整体技术路线如图 7 所示。

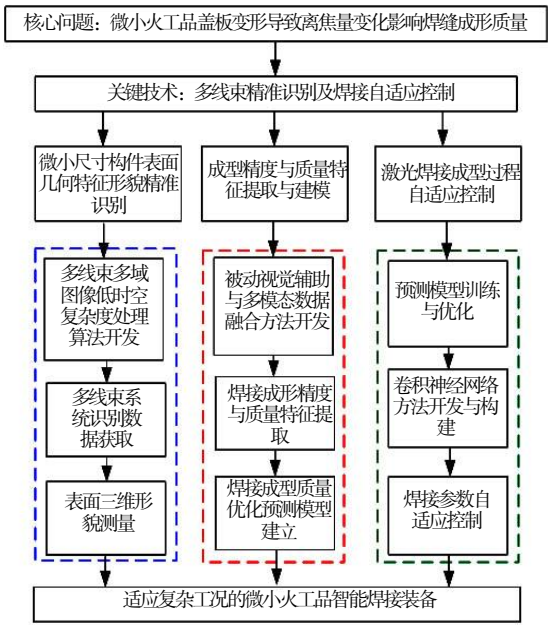


图 7　微小异形焊缝自适应焊接参数优化技术路线

Fig.7　Technical route for adaptive parameter optimization in micro irregular seam laser welding

针对超薄盖板在加工和装配过程中由于误差导致的同轴性问题，本研究采用了一种基于三束线型结构激光的特征识别方法，通过多角度光学三角测量，实现了对超薄材料焊接区域的全自由度位姿感知（$X/Y/Z+R_X/R_Y$），可从根本上解决因装配误差导致的激光焊缝不同轴问题。该方法通过单次传感操作即可求解外筒圆与盖板外圆的方程，进而获得对中焊接路径的参数方程。为适应不同结构、尺寸、材料以及偏差工况，构建机器学习模型，并通过迭代优化策略实现了工艺参数的精确规划。此外，采用多线束多域图像处理算法以降低处理过程中的时空复杂度，并利用图像融合技术提高三维形貌重建的精度。在核心算法方面，采用了立体匹配算法中的深度学习方法，其中特征提取的卷积神经网络（CNN）结构采用了特征金字塔网络（FPN）。该算法的基本原理如图 8 所示。

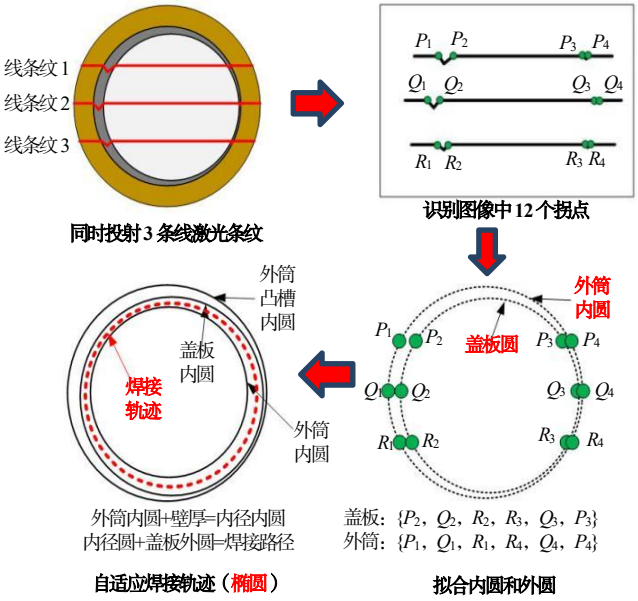


图 8　基于三线结构光的焊缝位姿识别原理

Fig.8　Principle of weld seam pose recognition using triple-line structured light

对于焊缝的三维形貌获取与质量特征提取，需要采用立体视觉方法，结合多线束数据，实现高精度三维形貌重建[8]。同时，应用机器学习方法提取焊缝成型精度和质量特征，建立特征数据库。在此基础上，建立微小火工品异形超薄板焊接的工艺参数-三维形貌-焊接质量联合优化模型建立虚拟焊接试验平台：ANSYS 激光热源模型、Python-ABAQUS 联合仿真、实时数据同化算法，使用多目标优化算法对工艺参数进行优化，确保焊接质量。

最终，设计并训练了一种卷积神经网络模型，用于实时监测焊接过程中的关键参数。基于该神经网络模型的输出结果，进一步调整短脉冲焊接参数，以实现焊接过程的自适应控制[9]。通过分析与验证，相较于传统单线整体扫描三维重构方法（合格率为 93%，

单件工时为 2 min），智能系统在焊接合格率上达到了 99%（n=100），且工时缩短至 1.2 min。研究发现，激光焊接过程中，焊接面定位过程是影响效率的关键因素。通过实施自适应控制焊接技术，显著提升了激光焊接的效率，并在很大程度上解决了批量生产过程中的难题。

2.2.3 多模态融合的在线质量评估方法

基于超短脉冲激光焊接过程中多模态信号的融合传感技术，开发了一种能够实时评估焊缝成形质量的方法。研究的核心问题在于微小型火工品焊接中焊缝尺寸较小导致检测过程难度较大。激光束光斑太小导致接头安装和对准工作面临挑战，任何光斑不对准的情况均可能引起焊接条件的较大变化，进而导致焊接缺陷的产生。同时，工件表面状况、母材与焊材的品质以及激光束性能的稳定性等因素，亦是导致焊接缺陷产生的潜在原因。为了实现微小型火工品的高效自动化焊接，需要建立一套基于在线多模态传感技术的综合质量评估体系，其具体技术路线详见图 9。

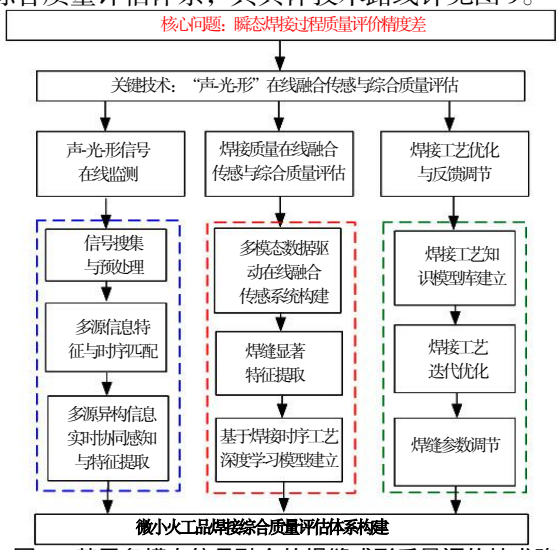


图 9 基于多模态信号融合的焊缝成形质量评价技术路线

Fig.9 Technical route for weld bead quality evaluation based on multimodal signal fusion

在超短脉冲激光焊接过程中，多模态信号（声发射、等离子体光谱、视觉形貌）的在线融合传感技术与综合质量评估方法，是基于激光深熔焊接过程中激光与材料相互作用产生的电信号或声信号，并与光学、视觉信号进行复合，结合数据处理平台及系统的学习优化，即可实现激光焊接过程质量实时监测[10]，原理如图 10 所示。

首先，采用滤波与去噪技术以确保声发射信号的清晰度，并通过时频分析法提取其特征。同时，利用 10 000 FPS 帧率的高速摄像机与近红外光谱仪（波段范围为 700~1 000 nm）进行实时同步采集，以获取等离子体形态和光谱信号等声光数据，从而确保多源信息的协同效应。针对焊缝的显著特征，开发了相应的算法进行自动提取，并运用机器学习技术筛选出最具代表性的特征。通过整合焊接数据，建立了深度学习模型，以实现焊接过程中的质量评估与缺陷预警，并形成闭环反馈机制。

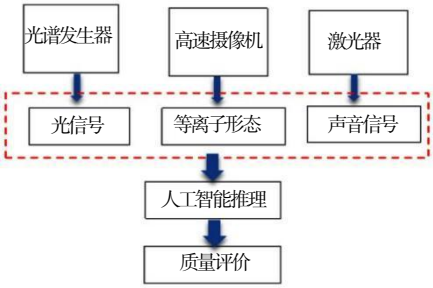


图 10 “声-光-形貌”多源信号同步采集原理

Fig.10 Synchronization scheme for acoustic-optical-morphological multimodal signal acquisition

最后，系统性地设计了涵盖广泛工艺参数的焊接实验方案，并从所获取的实验数据中提取关键特征，分析影响焊缝质量的关键因素。基于此，构建了焊接工艺知识模型库，存储了不同工艺参数下的焊缝质量数据及其相应特征，并通过反馈机制对焊接工艺进行迭代与优化，以提升焊接工艺的可靠性和稳定性。采用本方法进行质量评价，其误判率可控制在 5‰以内（检测样本量 n=100）。

3 实验验证与性能分析

3.1 焊接热控与力学性能测试

为探究激光焊接技术在薄壁构件中的应用潜力，本研究设计并构建了一台简易型激光焊接原理样机。在不装药的条件下，对薄壁构件进行了激光焊接实验，并利用红外测温仪对焊接界面的温度进行了精确测量。焊接过程结束后，对焊接接头的力学性能进行了评估。

在项目合作框架下，安徽红星机电科技有限公司

与东南大学的研究团队经过半年以上的共同努力，成功研制出一台微小型火工品激光焊接原理样机，如图 11 所示。该样机已初步实现了飞秒激光多点同步焊接的功能。

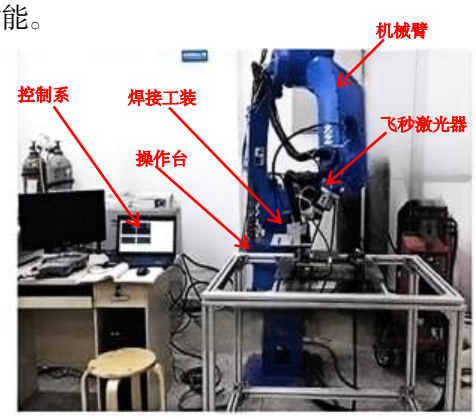


图 11　微小型火工品飞秒激光焊接原理样机

Fig.11　Prototype of femtosecond laser welding system for micro-small pyrotechnic devices

本次研究共进行了 10 次焊接试验，试验对象为 12Cr18Ni9 不锈钢薄壁件。在焊接过程中，利用红外热温仪对焊接件的 4 个不同区域进行了实时温度监测。监测结果显示，焊接区域的温度为 103~128 ℃。初步实验结果表明，在未采用定向冷却措施的情况下，采用飞秒激光同步焊接技术已能接近焊接界面温度控制在 100 ℃以内的要求。预计在后续研究中，通过实施辅助的定向冷却措施，能更有效地将焊接界面温度控制在 100 ℃以下。

焊接完成后，通过拉力试验机对焊接部位的抗拉强度进行了测试。测试结果表明，抗拉强度范围为 521~538 MPa，计算得出接头强度系数接近于母材 12Cr18Ni9 不锈钢（抗拉强度为 550 MPa）的 95%。初步实验结果表明，采用飞秒激光同步焊接技术焊接的接头强度能够满足焊接质量的要求。详细的检测数据见表 1。

表 1　薄壁不锈钢试件焊接界面温度与接头强度测试结果

Tab.1　Measured interface temperatures and joint strengths of thin-walled stainless steel specimens

试验件编号	焊接界面温度范围/℃	焊接接头抗拉强度/MPa	接头强度系数/%
1	112~125	525	≈95
2	103~115	521	≈95
3	115~128	528	≈95
4	106~120	536	≈95
5	104~116	529	≈95
6	111~124	538	≈95
7	103~118	524	≈95
8	114~127	531	≈95
9	123~124	526	≈95
10	118~126	522	≈95

3.2 在线质量检测系统实验

设计并研制了焊接质量诊断反馈子系统的原理样机，并成功将其与微小型激光焊接原理样机集成对接。系统调试完成后，开展了 100 次试验性焊接作业，以检验该子系统在焊接过程中实现自动检测功能的能力，并对其综合性能进行评估，进而计算检测误判率指标。焊接质量诊断反馈子系统的集成架构如图 12 所示。

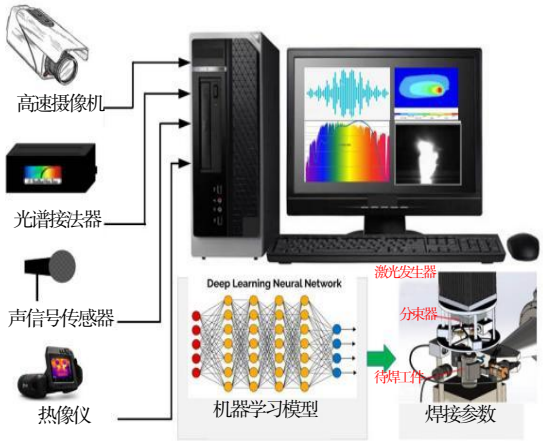


图 12　焊接质量在线诊断与反馈子系统集成架构

Fig.12　Integrated architecture of online weld quality diagnosis and feedback subsystem

实验结果表明，焊接质量诊断反馈子系统与微小型激光焊接原理样机具备良好的协同作业能力。在 100 次焊接试验中，该子系统成功实现了焊接过程的自动检测与综合质量评估。经人工复核，系统误判率为 4‰（样本量 n=100）。

3.3　技术可行性综合评述

本项目目前尚处于方案验证阶段，仅通过构建基础型激光自动焊接原理样机及配套的在线自动检测与质量诊断反馈子系统，初步验证了薄壁件焊接中的温度控制、接头强度以及在线质量诊断等关键技术的可行性。

受限于当前研发条件，药板界面温度的精准调控、异形焊缝三维形貌的高精度识别、焊接参数的自适应调节以及焊接过程的定向冷却等关键技术尚未开展充分的实验验证。然而，结合智能控制技术在工业领域的成熟应用现状，上述技术路径具备较高的工程实现可行性。后续研究仍需通过系统性实验进一步验证

其有效性与稳定性。

综合前述分析，通过理论推导、数值模拟以及实验测试，证实了相较于传统的人机协同焊接技术，智能焊接工艺在接头强度系数、焊接封装整体效率、合格率以及作业过程中人工干预程度等方面均实现了显著的提升。详细数据如表 2 所示。

表 2 传统人机协同焊接与智能焊接工艺性能对比

Tab.2 Performance comparison between conventional human-machine collaborative and intelligent laser welding processes

项目	接头强度系数	单发焊接时间/min	焊接合格率/%	作业过程人工参与度
传统人机协同焊接工艺	≥0.90	2.0	≥93	高
智能焊接工艺	≥0.95	1.2	≥99	低
提升百分比/%	≈5.56	66.67	6.45	-

4 结论与展望

在微小型火工品的焊接封装过程中，传统激光焊接设备配合人工操作的方式难以满足生产安全、产品质量以及工作可靠性的严格控制标准。为攻克微小型火工品的安全高效智能焊接技术难题，安徽红星机电科技股份有限公司与东南大学先进焊接与增材制造团队携手合作，针对微小火工品带药超薄板超短脉冲激光焊接工艺、异形焊缝多线束精准识别及焊接自适应调控、多工序焊接工艺联合优化与精密安全装调、超短脉冲激光焊“声-光-形”在线融合传感与综合质量评估、智能装焊装备开发及其与机电引信集成验证等关键技术进行了深入研究，并取得了一定的研究成果。目前，已完成微小火工品精密安全装焊装备样机设计方案，智能焊接原理样机以及在线检测及质量反馈子系统的样机试制。通过理论分析、仿真计算和实验验证，结果表明项目方案设计原理的可行性，关键技术问题均找到了有效的解决策略。从技术角度出发，解决微小型火工品激光焊接问题具有合理性和可行性，尽管相关设计参数和工艺路线仍在进一步的探索和验证阶段。

展望未来，通过微小型火工品自动化智能装备的工程化设计与应用，有望实现激光焊接的无人化操作，从而满足微小型火工品的大批量生产需求，实现高质量及本质安全的焊接控制。

参考文献：

[1] 王凯民,温玉全.军用火工品设计技术[M].北京:国防工业出版社,2006.

[2] 弓辉.激光焊接在火工品生产工艺中的应用[J].机电工程技术,2015,44(12):140-141

[3] 易乃绒,李红旗,吴瑞德,等.火工品激光焊接封装技术分析[J].火工品,2011(3):45-47.

[4] 张甜甜.几种典型的含能炸药热爆炸机理研究[D].合肥:安徽大学,2021.

[5] 楚士晋.炸药的热感度试验[J]爆破器材,1985(3):23-25.

[6] 陈玉龙,别渭毅,鲁军,杨盼盼.超薄板脉冲激光焊接工艺特性及成形质量控制[J].设计・工艺, 2024, 30(1) :39-40.

[7] 杜云峰, 陈敏慧, 郑挺军, 等. 火工品薄壁件的激光焊接[J]. 火工品, 2012(2):50-52.

[8] 温鹏, 张旭东, 陈武柱. 薄板激光焊时失稳变形及其控制[J]. 焊接学报, 2006,27(9):99-102.

[9] 刘钊江,马思乐,等.基于激光传感器的机器人自适应多层多道焊接[J].焊接试验研究,2020,36(8):26-28.

[10] 陈武柱,张旭东,任家烈.激光焊接时焊接模式转变规律及焊接过程稳定性的研究[J].中国激光,1996,23 (7): 657-659.