

# 光器件封帽技术研究

庄 园

中国电子科技集团公司第二研究所, 山西 太原

收稿日期: 2025年3月30日; 录用日期: 2025年4月23日; 发布日期: 2025年4月30日

## 摘 要

针对全自动封帽机封焊产品工艺的关键质量问题, 本文采用试验设计(DOE)技术研究了不同焊接工艺参数对焊接质量的影响, 从而确定了最佳参数组合。优化后的工艺参数已在生产实践中进行了验证, 显著提高了TO产品焊接过程中的焊接质量, 对实际生产中工艺参数的选择具有一定的指导意义。

## 关键词

封帽机, 焊接质量, DOE, 参数优化

# Research on Optical Device Cap Technology

Yuan Zhuang

The 2nd Research Institute of CETC, Taiyuan Shanxi

Received: Mar. 30<sup>th</sup>, 2025; accepted: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2025; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

In this paper, regarding the key quality issues in the welding process of fully automatic cap sealing machine products, the influence of different welding process parameters on welding quality was studied using Design of Experiment (DOE) technology, and the optimal combination of parameters was determined. The optimized process parameters have been verified through practical experience, which can significantly improve the welding quality during the sealing process of TO products. It has a certain guiding significance for the selection of process parameters in actual production.

## Keywords

Capping Machine, Welding Quality, DOE, Parameter Optimization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着光通讯行业的迅猛发展,用于高速传输信号的 TO 光器件产品的要求也越来越高。TO 光器件的工艺流程主要有管壳原材料、PD 贴片、LD 贴片、金丝键合、封帽,其中封帽是工艺流程的最后一道工序,也是生产线上的核心工序,其封装质量直接影响产品的性能和可靠性[1]。影响焊接质量的主要技术为帽座封装后的同心度、帽座熔接可靠性,同时产品需求日益增加,需要封焊效率进一步提高满足市场需求,因此本文对如何高速、高精度、高质量帽座封装进行系统分析。

在全自动封帽机的焊接过程中,主要有三个重要的工艺参数,即焊接压力、焊接电流和焊接时间。适当的焊接压力能确保底座与管帽在焊接时有充分的接触,而恰当的焊接电流和焊接时间则能保证焊接过程顺利进行,这三个参数都是封帽质量良好的保障。如果在焊接过程中电极压力过小,底座和管帽无法紧密贴合,会导致焊接时出现飞溅、鼓包和开裂等缺陷。当电流过高,焊料溢出过多且不均匀,有飞溅的迹象,可能会损坏底座上的芯片。如果放电时间过长,焊料溢出过多,导致热损失更大,外观不理想,且底座焊料边缘严重氧化,影响产品性能。因此,对全自动封帽机封焊产品工艺参数的研究成为一项重要的研究课题。

## 2. 封帽工艺介绍

封帽是把 TO 帽通过加压通电封装在 TO 座上的同轴焊接工艺,产品封帽工艺完成后,通过座引脚通电来传输光信号,其中座贴装有 LD 芯片(Laser Diode 激光二极管、电转换光的器件、发射激光信号),LD 芯片发光中心发射的光信号会通过帽透镜传输,因此封帽同心度影响最终光电转化效率。封帽产品与同轴示意图如下图 1、图 2 所示。

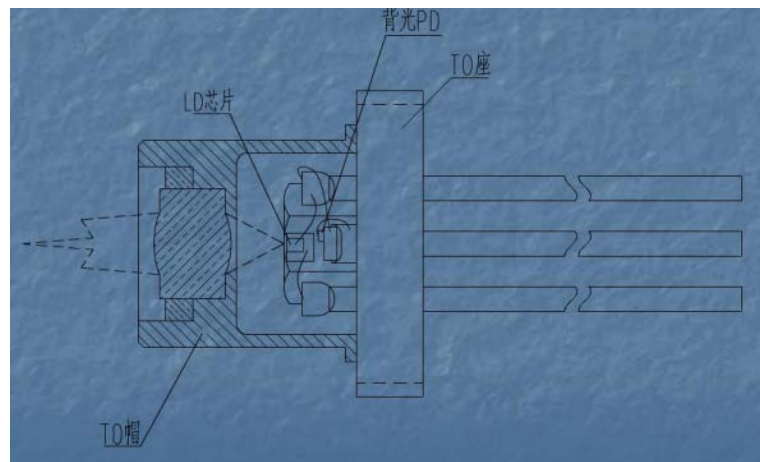


Figure 1. Product after capping  
图 1. 封帽后产品

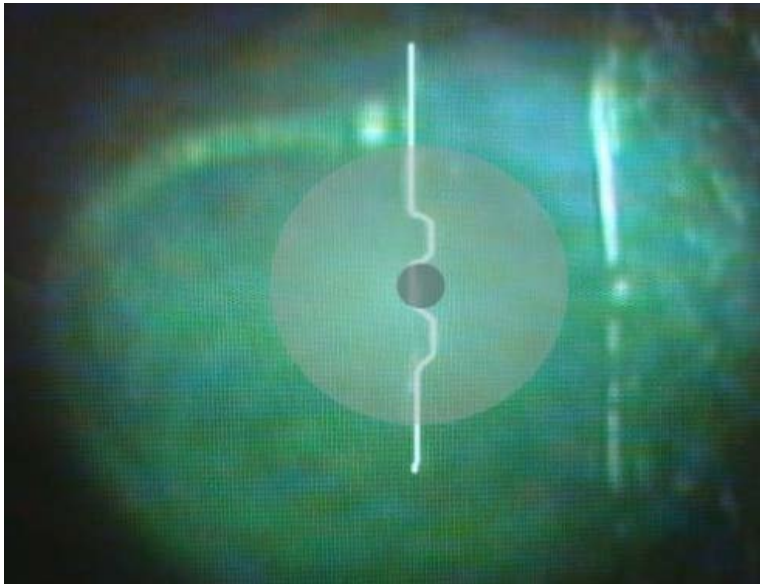
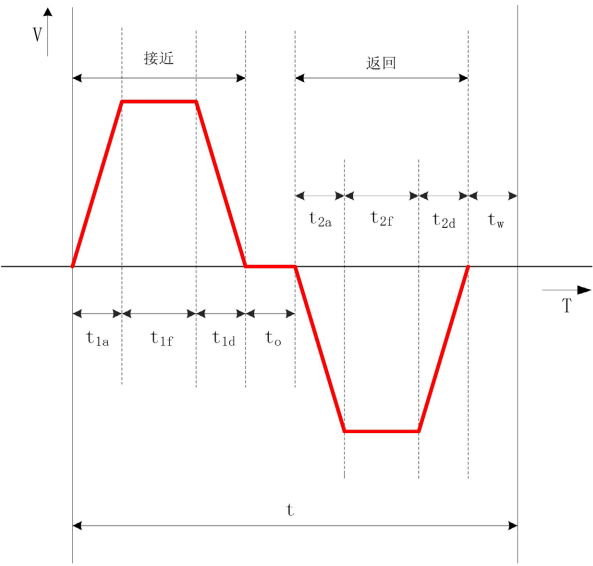


Figure 2. Alignment of the light spot with the lens  
图 2. 发光点与透镜对准

3. 封帽关键技术

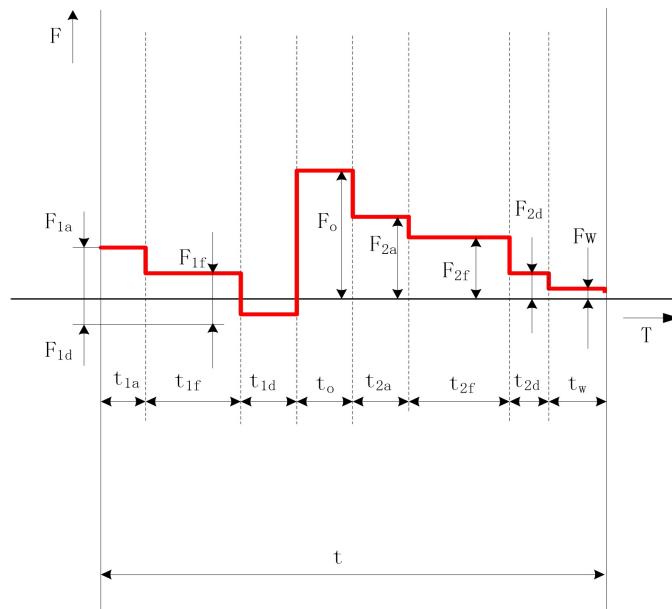
3.1. 帽座加压结构稳定性技术

帽与座的精密封装，需要加压结构稳定的压力输出，为保障输出力的稳定，加压结构采用伺服电机导轨导向与压力传感器闭环反馈控制。导轨选择滚柱型加强径向负荷，压力传感器选择±0.5% F.S.的高精度负荷控制，电机速度与时间的关系如图 3 所示，电机推力与时间的关系如图 4 所示。



注：t：1 次动作循环的动作时间(s)；t<sub>1a</sub>：加速时间 1；t<sub>1f</sub>：匀速移动时间 1a；t<sub>1d</sub>：减速时间 1；t<sub>1o</sub>：推压动作时间；t<sub>2a</sub>：加速时间 2；t<sub>2f</sub>：匀速运动时间 2；t<sub>2d</sub>：减速时间 2；t<sub>w</sub>：待机时间。

Figure 3. Diagram of relationship between motor speed and time  
图 3. 电机速度与时间关系图



注：F<sub>1a</sub>：加速需要的推力 1；F<sub>1f</sub>：匀速移动需要的推力 1；F<sub>1d</sub>：减速需要的推力 1；F<sub>0</sub>：推压动作需要的推力；F<sub>2a</sub>：加速需要的推力 2；F<sub>2f</sub>：匀速运动需要的推力 2；F<sub>2d</sub>：减速需要的推力 2；F<sub>w</sub>：待机需要的推力。

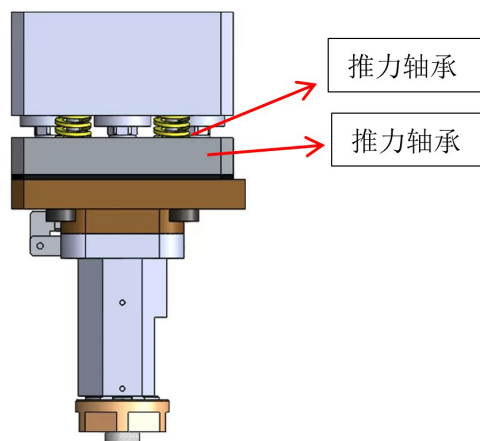
**Figure 4.** Diagram of relationship between motor thrust and time

**图 4.** 电机推力与时间关系图

计算 1 次循环动作的连续运行推力 F<sub>t</sub>：

$$F_t = \sqrt{\frac{F_{1a}^2 \times t_{1a} + F_{1f}^2 \times t_{1f} + F_{1d}^2 \times t_{1d} + F_0^2 \times t_0 + F_{2a}^2 \times t_{2a} + F_{2f}^2 \times t_{2f} + F_{2d}^2 \times t_{2d} + F_w^2 \times t_w}{t}}$$

伺服电机驱动整体结构加压的过程中，因刚性结构压力控制容易压力过冲，需应用二级弹簧缓冲结构来改变电机特性，增加弹簧后，为保证弹簧的反作用力不形成分力影响同轴精度，需在弹簧下安装推力轴承，消除多弹簧径向分力，造成精度不稳定。二级缓冲结构如图 5 所示，弹簧负载按 100 kg 计算，数量 4 根，根据反作用计算公式 F = KX，确定弹性系数选择合适弹簧。



**Figure 5.** Secondary buffer structure

**图 5.** 二级缓冲结构

### 3.2. 高精度、高效率帽座定位技术

封帽高精度需应用机器视觉系统，视觉对位系统运用高分辨率相机对管帽透镜中心与管座 LD 芯片的发光点的图像进行采集，基于图像处理获取管帽透镜中心与管座 LD 芯片的发光点的位置，然后把分析计算的偏差数据结果发送给控制系统 PLC，由 PLC 控制驱动平台对 LD 芯片进行 X、Y 方向上的位置补偿，完成高精度对位[2]。视觉布局简图如下图 6 所示。

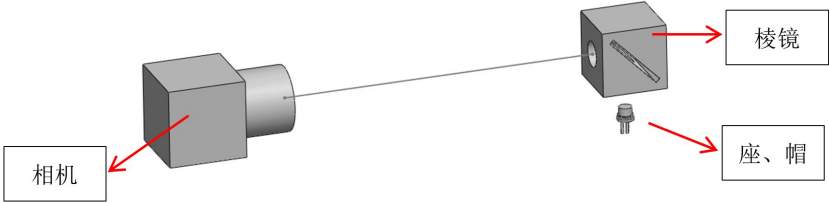


Figure 6. Schematic diagram of visual layout  
图 6. 视觉布局简图

机器视觉系统采用棱镜与相机镜头分开安装方式，棱镜的大小需要根据棱镜与镜头的距离及相机视野大小确定，且分开布置需要校准棱镜的偏航角(Yaw)和俯仰角(Pitch)，通过校准筒与校准件消除夹角，减小硬件配置误差，提升产品精度与效率。

### 3.3. 高质量熔接可靠技术

焊接压力、焊接电流和焊接时间是重要焊接条件，要得到好的焊接质量，良好的工艺参数是必不可少的。而在封帽过程中，焊接压力增大时电阻变小，焊接强度不够，电流过小，焊接不充分，电流过大，焊料飞溅，影响产品性能，焊接时间也是影响焊接质量的重要因素，焊接时间太短会使焊料融化不充分，无法达到足够的焊接强度，焊接时间过长则会影响产品质量、电极寿命以及生产效率因此，通过实验，来选取最优的工艺参数对于产品的封焊质量具有非常大的实际意义。

本文运用 DOE 的原理方法、因子主效应及交互效应原理、数据模型构建等技术，内容包括正交实验设计、参数设计、多变异分析方法等，对 TO 产品封焊过程中焊接压力、焊接电流、焊接时间等关键参数进行因子效应分析，检验各因素的主效应和交互效应，以确定最佳工艺组合参数。

## 4. DOE 及因子选择

DOE 主要运用数理统计的基本知识合理安排试验，收集数据，然后进行全面的科学分析，以迅速找到最优组合方案[3]。在产品设计中，运用试验设计能够以最低的试验成本和最短的时间进行有效的设计和产品性能验证。在制造过程中，试验设计能够从众多影响因素中迅速识别出对输出指标有显著影响的工艺参数并对其进行优化。

在 DOE 试验设计中，因素是指可能影响试验指标的潜在原因，通常用 A、B、C……表示，在正交试验中，只选择可控因素进行试验。水平是指试验中因素的状态或条件，对于定量因素，每个选定的值就是一个水平，水平也称为等级，通常用 1、2、3……表示。当在试验中需要考察一个因素的多个状态时，称为多水平因素。

在 TO 产品的焊接过程中，影响焊接质量的主要工艺参数包括焊接压力(A)、焊接电流(B)和焊接时间(C)。因此，选择这三个因素作为研究对象，以焊接推力作为响应。每个因素设置为 2 个水平，构成一个 3 因素 2 水平的 DOE。选择  $2^3 \times 2$  正交表为设计试验方案，总共需要进行 16 次数值模拟试验。正交试验设计中的因素水平如表 1 所示。

**Table 1.** Factors and levels table  
**表 1.** 因素水平表

水平	因素		
	焊接压力(N)	焊接电流(A)	焊接时间(s)
1	1000	6.5	21
2	1100	6.6	22

## 5. DOE 分析

本文将采用基于正交表的方法建立数据分析模型。正交表的种类繁多，表 2 是一张 8 行 3 列的正交表，可表示为  $L_8(2^3)$ 。其中，“L”代表正交表的符号，L 下标“8”表示表中的行数，“3”表示设计了 3 个分析因素，括号内的基数“2”表示在数据分析过程中应取两个不同的水平。

**Table 2.**  $L_8(2^3)$  orthogonal experiment table  
**表 2.**  $L_8(2^3)$  正交试验表

序号	A	B	C
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

本文将依据此正交表进行试验。对于表中的任何-1，试验将取低水平，对于任何 1，试验将取高水平。

### 5.1. 模型有效性分析

通过已经建立的试验数据模型，现场采集大量的生产工艺数据对试验模型进行分析和验证。

下面通过残差图对模型的有效性进行分析，如图 7 所示。

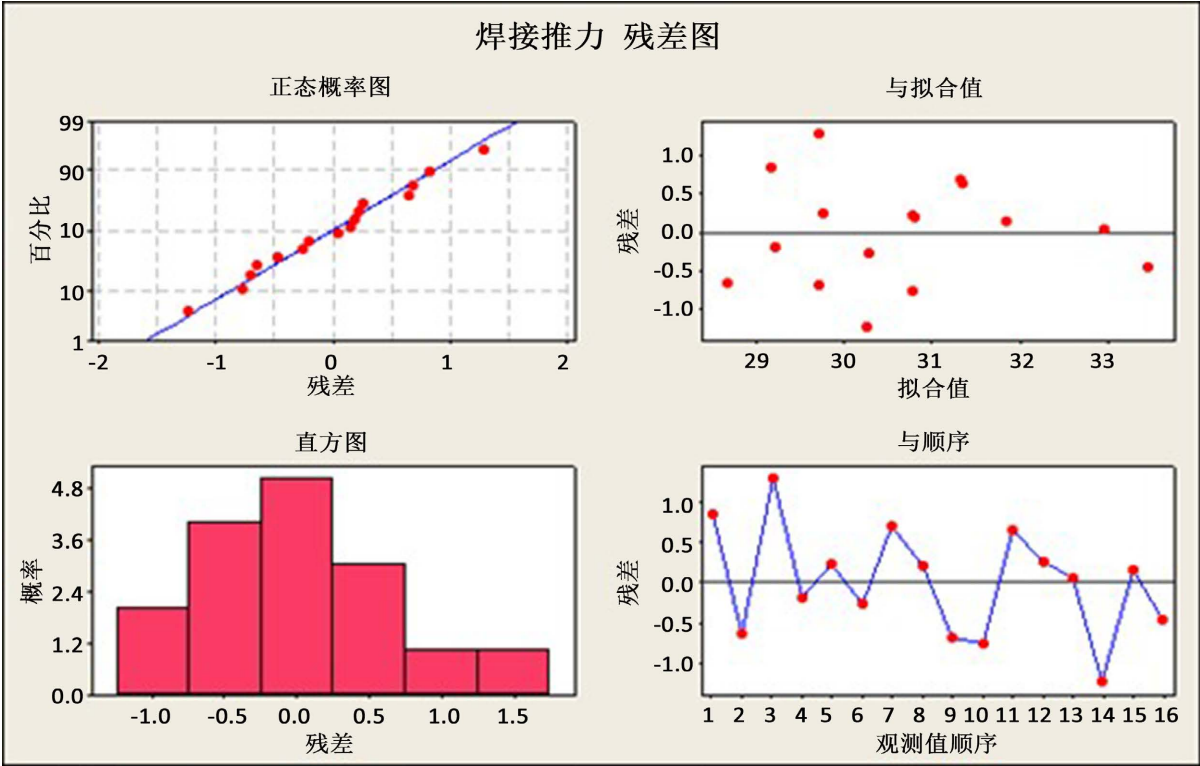
一个有效的试验模型其残差满足以下三个条件[4]：

- 1) 残差呈正态分布；
- 2) 残差和为零；
- 3) 残差没有明显的模式或趋势。

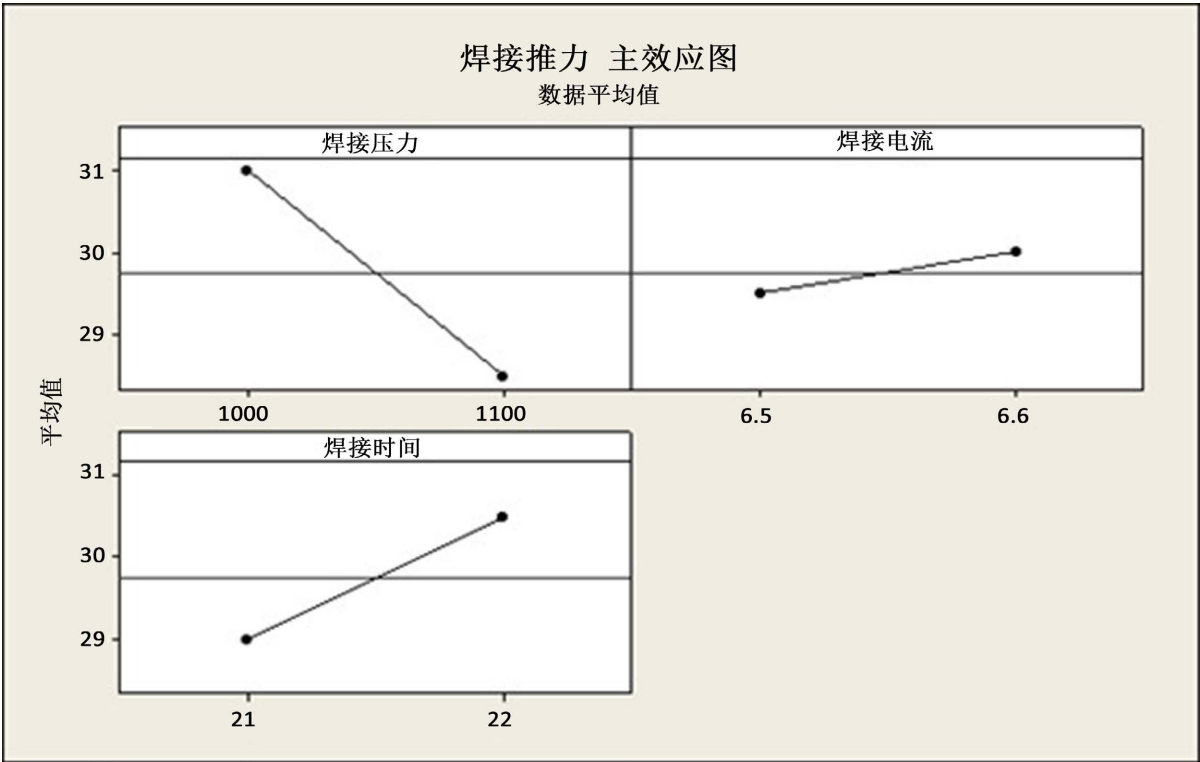
图 5 中焊接推力残差图满足以上三个条件，故所选模型是有效的。

### 5.2. 各因子主效应分析

图 8 为各因素水平对焊接质量的变化趋势图。图中显示，焊接推力随着焊接压力的增大而减小，随着焊接时间的增加而增大，而随着焊接电流的增大变化很小。因此，在实际生产过程中，最佳工艺参数确定及制定封焊工艺规范时，要着重考虑焊接压力、焊接电流和焊接时间的选取范围，以求效果达到最优。

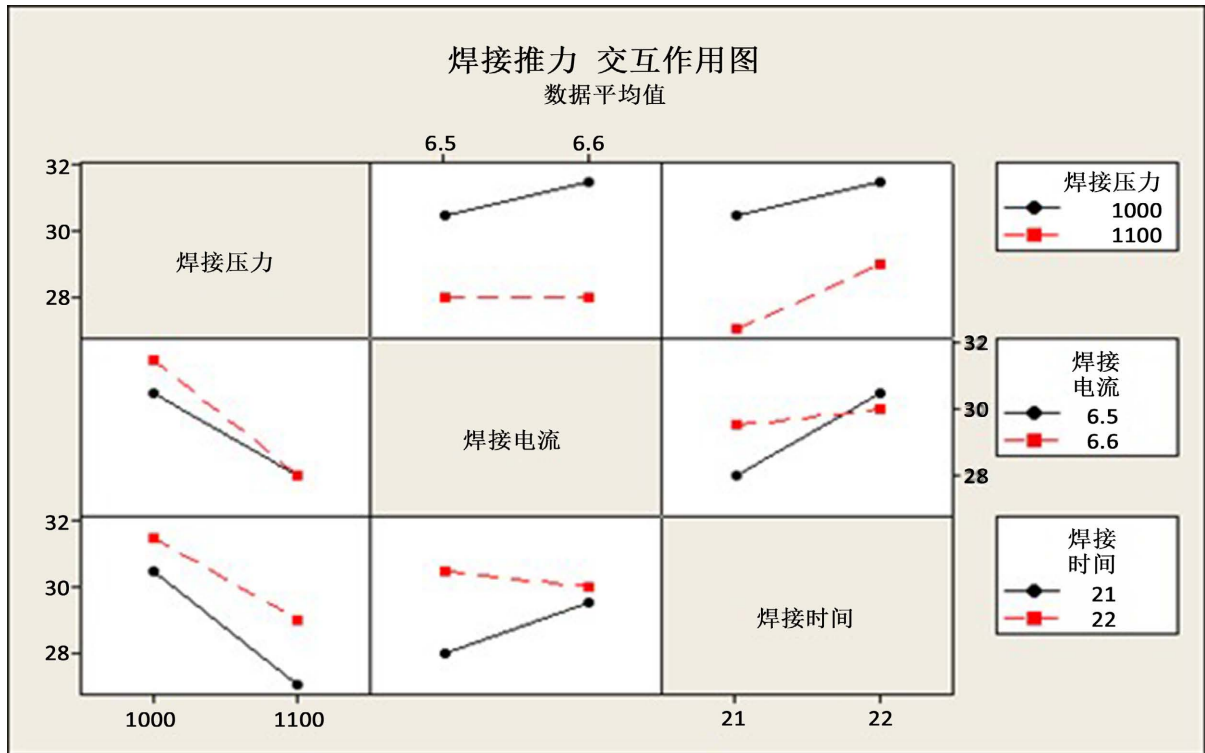


**Figure 7.** Welding thrust residual plot  
**图 7.** 焊接推力残差图



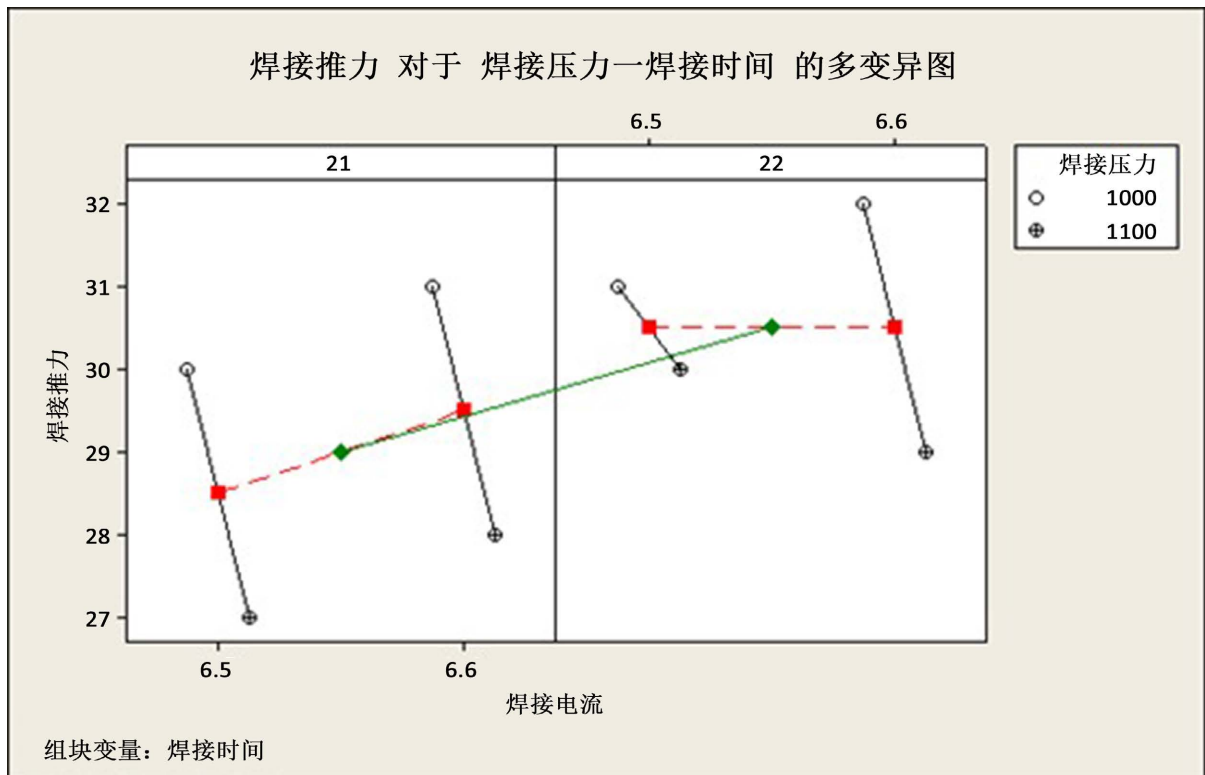
**Figure 8.** Main effect plot of welding quality  
**图 8.** 焊接质量的主效应图





**Figure 9.** Interaction plot of welding quality

**图 9.** 焊接质量交互作用图



**Figure 10.** Multi-variation chart of welding thrust for welding pressure-welding current-welding time

**图 10.** 焊接推力对于焊接压力 - 焊接电流 - 焊接时间的多变异图



5.3. 各因子交互作用分析

如图 9 所示，焊接电流和焊接时间的交互作用显著，焊接压力和焊接时间基本没有交互作用，焊接压力和焊接电流交互作用不显著，因此需要确定各参数的最佳组合。

5.4. 确定最佳工艺参数

如图 10 所示，当焊接压力为 1000 N，焊接电流为 6.6 A，焊接时间为 22 s 时，此时焊接推力最大，也就是焊接质量最好。

5.5. 生产过程验证

根据 DOE 试验的结果，将确定最优工艺参数。这一组工艺参数将在实际生产过程中应用。使用行业标准的氦气压力来测试焊接产品的气密性，检验方法如图 11 所示，用钳子夹住 TO 帽的 1/2 处，将 TO 帽压扁，TO 帽压扁处的宽度为 TO 帽直径 D 的一半，产品的气密性符合标准要求，焊接推力处于最优水平，如图 12 所示。焊接痕迹定义如图 13 所示，且在 15 倍显微镜下检查外观，显示焊料溢出均匀，外观良好，如图 14 所示，该产品的密封焊接质量得到了提升。

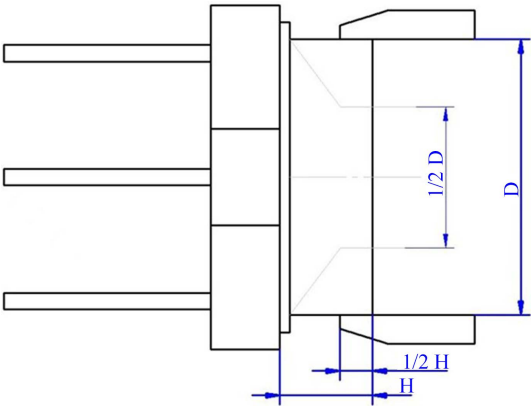
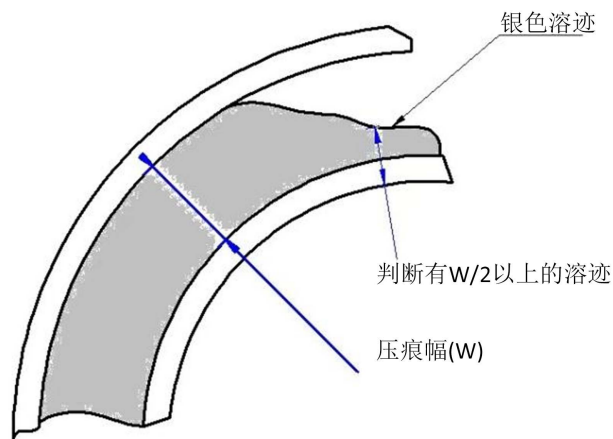


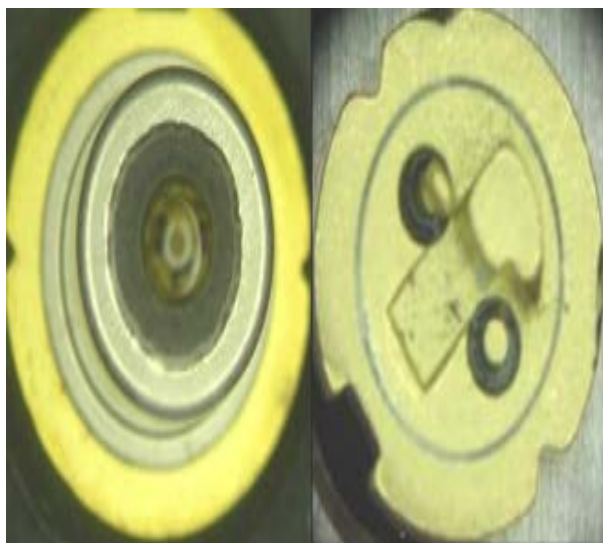
Figure 11. Inspection method  
图 11. 检验方法



Figure 12. Thrust test  
图 12. 推力测试



**Figure 13.** Definition of welding traces  
**图 13.** 焊接痕迹定义



**Figure 14.** Solder uniformity  
**图 14.** 焊料均匀

## 6. 结论

本文介绍了全自动封帽机封焊产品工艺，以及帽座稳定加压技术与高精度定位技术，并通过 DOE 分析，为重要焊接条件进行了参数选择，经生产验证，封焊合格率提高了 19.9%，提高了 TO 产品封焊过程质量和效率，减少了封焊缺陷和经济损失，保证了实际生产过程中设备运行的可靠性。

## 参考文献

- [1] 赵伟杰, 高勇. 机器视觉在光纤端面缺陷检测中的应用[J]. 现代电子技术, 2011, 34(19): 136-139.
- [2] 王瑞鹏, 郝鹏飞, 阴增光. 视觉对位系统在封帽机中的应用[J]. 山西电子技术, 2020(3): 22-24.
- [3] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [4] Wu Jeff, Hamada Michael. 试验设计及分析与参数优化[M]. 张润楚, 郑海涛, 兰燕, 等, 译. 北京: 中国统计出版社, 2003.