动力电池负极集流体的焊接参数响应面优化方法

胡晓雄[1] 王军[2] 刘丽荣[2]

（1.孚能科技（镇江）有限公司，镇江 212000 2.孚能科技（赣州）股份有限公司，赣州 341000）

摘要：锂离子电池的正极焊接质量直接影响电池的内阻、安全性与循环寿命，为解决当前生产中因焊接参数（振幅、能量、压力）窗口宽泛导致的强度不足、过焊及一致性差等问题，引入试验设计（DOE）方法进行工艺优化。首先通过三因子两水平全因子试验，发现初始参数范围（振幅30~60 μm，能量40~100 J，压力30~60 MPa）已普遍处于过焊状态，振幅为最关键的影响因素。基于此，采用Box-Behnken响应面设计，在缩小的参数空间内构建了拉力、撕力与焊接效果的量化模型。结果表明，在较低参数区间内，能量与振幅对焊接质量的贡献由负转正。通过多响应变量优化，确定了最佳工艺参数组合为振幅36 μm、能量50 J、压力40 MPa。验证试验表明，该参数组合下的焊接接头力学性能优异、粘箔率理想且工艺稳定性显著提升，为实现负极集流体焊接的精细化控制与量产一致性提供了可靠依据。

关键词：锂离子电池 正极焊接 试验设计 响应面法 参数优化

中图分类号：U466 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250293

A Response Surface Approach to Optimizing Welding Parameters for Power Battery Anodes

Hu Xiaoxiong[1], Wang Jun[2], Liu Lirong[2]

(1. Farasis Technology (Zhenjiang) Co., Ltd., Zhenjiang 212000; 2. Farasis Technology (Ganzhou) Co., Ltd., Ganzhou 341000)

Abstract: The welding quality of the positive electrode in lithium-ion batteries directly affects internal resistance, safety, and cycle life. To address issues such as insufficient strength, overwelding, and poor consistency caused by overly broad welding parameter windows (amplitude, energy, pressure) in current production, a Design of Experiments (DOE) method is introduced for process optimization. Initially, through a full factorial experiment with three factors and two levels, it is found that the initial parameter range (amplitude 30~60 μm, energy 40~100 J, pressure 30~60 MPa) is generally in an "over-welded" state, with amplitude identified amplitude identified as the most critical influencing factor. Based on this, the study further adopts the Box-Behnken response surface design to construct quantitative models for tensile force, peel force, and welding effectiveness within a narrowed parameter space. The results indicate that within lower parameter intervals, the contribution of energy and amplitude to welding quality shifts from negative to positive. Through multi-response variable optimization, the optimal process parameter combination is determined as amplitude 36 μm, energy 50 J, and pressure 40 MPa. Verification experiments confirms that under this parameter combination, the welded joints exhibit excellent mechanical properties, ideal foil adhesion rates, and significantly improved process stability. This provides a reliable basis for achieving refined control and mass production consistency in positive electrode welding.

Key words: Lithium-ion battery, Positive electrode welding, Design of Experiment, Response surface methodology, Parameter optimization

作者简介：胡晓雄（1988—），男，高级工程师，硕士学位，研究方向为新能源动力电池系统设计与研发。

基金项目：镇江市科技计划项目（JC2025011）。

参考文献引用格式：

胡晓雄，王军，刘丽荣. 动力电池负极集流体的焊接参数响应面优化方法[J]. 汽车工艺与材料，2026(6): 31-39.

HU X X, WANG J, LIU L R. A Response Surface Approach to Optimizing Welding Parameters for Power Battery Anodes[J]. Automobile Technology & Material, 2026(6): 31-39.

1 前言

锂离子动力电池作为现代储能与电动汽车的核心部件[1-3]，其制造工艺的精确性与稳定性直接影响电池的综合性能与安全可靠性[4-5]。在众多生产工艺环节中，正极集流体焊接是连接活性物质涂层与金属集流体的关键步骤，其焊接质量直接影响电池的内阻、倍率性能、循环寿命及安全边界[6-8]。

当前，生产实践中，正极集流体焊接所采用的工艺参数（如振幅、能量、压力）设置区间通常较为宽泛，缺乏基于系统试验数据的精细化指导[9-10]。粗放式的参数窗口易导致焊接强度不足、过焊以及一致性不足等问题，不仅增加了极片脱落的风险，影响导电性能和结构完整性，还导致产品质量波动大，降低了批量生产的一致性与良品率[11]。

为解决上述问题，提升焊接工艺的可靠性与产品整体性能，本文采用试验设计（Design of Experiments，DOE）方法研究超声波焊接过程中振幅、能量与压力3个关键参数对焊接接头拉力、撕力及综合焊接效果的影响，识别关键影响因素并明确影响趋势，在此基础上采用Box-Behnken响应面设计，建立参数与响应之间的量化模型，并通过多响应变量优化确定最佳工艺参数组合，最终对所获参数进行试验验证。

2 试验设计与方案

本文采用DOE方法，依次开展全因子试验与Box-Behnken响应面试验，优化焊接工艺参数。试验选取振幅、能量与压力作为关键因子，并以拉力、撕力、导电率与焊接效果作为响应变量，构建参数与性能之间的量化关系。各因子的水平设置及响应变量定义如表1所示。

在全因子试验阶段，采用三因子两水平设计，共进行12组试验（含4个中心点），试验顺序随机以消除系统误差。随后，基于全因子试验结果，将参数范围收窄，采用Box-Behnken设计进行15组试验，以建立二阶响应模型，实现多目标参数优化。为明确焊接区域结构与试验对象，图1展示了铜箔负极集流体焊接的结构示意。

表1 试验因子与响应变量

类别	名称	说明
试验因子	振幅	低水平30 μm、高水平60 μm（初始阶段），低水平20 μm、高水平40 μm（优化阶段）
	能量	低水平40 J、高水平100 J（初始阶段），低水平30 J、高水平50 J（优化阶段）
	压力	低水平30 N、高水平60 N（初始阶段），低水平20 N、高水平40 N（优化阶段）
响应变量	拉力	表征焊接接头抗拉强度
	撕力	表征焊接接头抗剥离能力
	焊接效果	1分（不合格）、2分（一般）、3分（合格）
	电导率	衡量焊接接头导电性能，反映电气连接的可靠性，是决定电池内阻和功率特性的关键指标

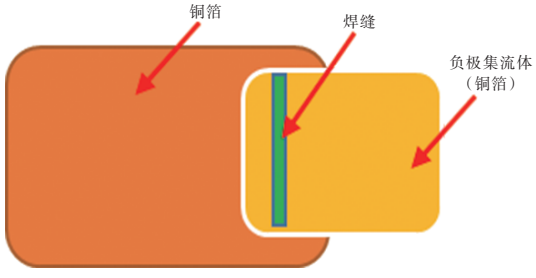


图1 铜箔负极集流体焊接的结构示意

3 试验结果与讨论

试验所得原始数据如表2所示，每组试验方案的拉力和撕力均为3个平行样品的平均值。焊接效果采用等级评分法进行综合评价。每组方案的拉力和撕力分别测试3个样品，取平均值。焊接效果根据粘箔率以及是否焊裂定义，1表示不合格，2表示一般，3表示合格。

3.1 拉力结果分析

通过三因子两水平全因子试验分析了振幅、能量和压力对焊接拉力的影响。主效应分析（表3）表明，在试验参数范围（振幅30~60 μm，能量40~100 J，压力30~60 MPa）内，3个参数均对拉力产生显著负面影响。

振幅由30 μm增至60 μm，拉力显著下降，影响最为敏感；能量增加导致拉力降低，过高能量易造成焊点脆化；压力升高导致拉力轻微下降，影响程度较前两者稍弱。交互作用分析（图2）显

表2　全因子试验方案与结果

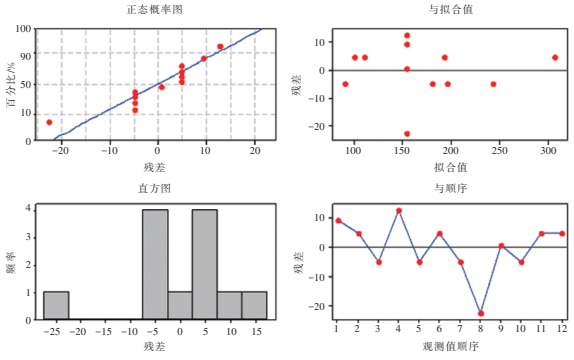
标准序	运行序	中心点	区组	振幅/μm	能量/J	压力/MPa	拉力/N	撕力/N	焊接效果
12	1	0	1	45	70	45	163.7	78.2	2
4	2	1	1	60	100	30	104.4	74.5	1
8	3	1	1	60	100	60	85.7	58.2	1
10	4	0	1	45	70	45	167.1	69.4	2
5	5	1	1	30	40	60	237.9	96.8	3
1	6	1	1	30	40	30	310.9	83.9	3
3	7	1	1	30	100	30	191.1	152	3
9	8	0	1	45	70	45	131.7	82.4	1
11	9	0	1	45	70	45	154.9	83.1	2
2	10	1	1	60	40	30	174.8	74.4	3
6	11	1	1	60	40	60	115.2	57.9	2
7	12	1	1	30	100	60	197.6	152.6	3

示,各参数间无明显交互效应,对拉力的影响基本独立。试验数据显示,当振幅为30 μm、能量为40 J、压力为30 MPa时,拉力最大,达到310.9 N,当振幅为60 μm、能量为100 J、压力为60 MPa时,拉力最低,为85.7 N,进一步验证了高参数导致过焊的趋势。

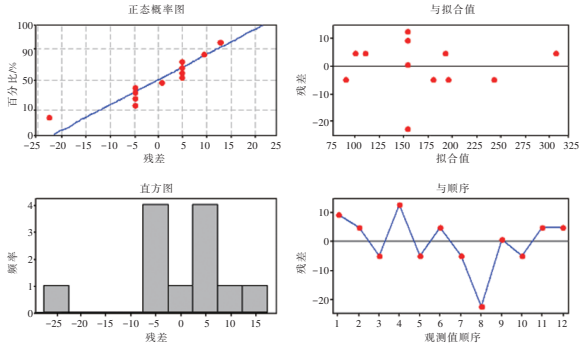
表3　各工艺参数对焊接拉力的主效应

工艺参数	数值	平均拉力/N	变化趋势
振幅	30 μm	234.4	显著下降
	60 μm	120.1	
能量	40 J	209.7	下降
	100 J	144.7	
压力	30 MPa	197.9	轻微下降
	60 MPa	173.6	

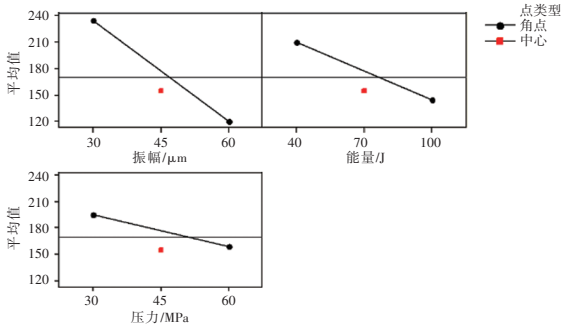
综上,振幅是影响拉力的最关键因素,能量与压力也需严格控制上限。



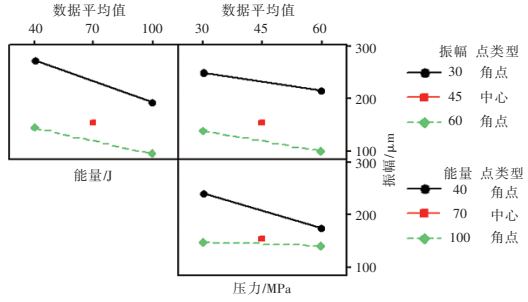
(a)振幅与能量



(b)振幅与压力



(c)能量与压力



(d)压力与能量对焊接拉力

图2　各工艺参数对焊接拉力的交互作用

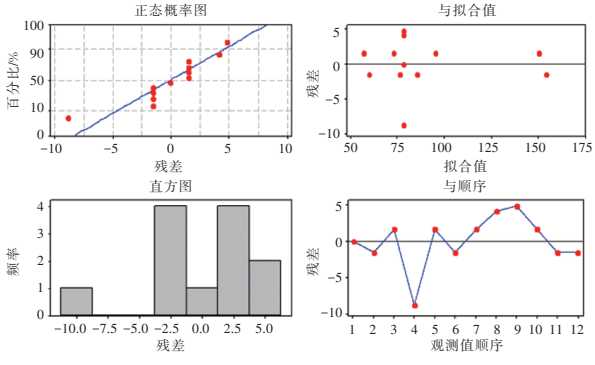
3.2 撕力结果分析

通过全因子试验分析振幅、能量和压力对撕力的影响，主效应分析（表4）显示，在初始参数范围（振幅30~60 μm，能量40~100 J，压力30~60 MPa）内，3个参数均对撕力产生显著负面影响：振幅由30 μm升至60 μm，撕力明显降低，表明界面结合对振幅的变化最敏感；能量增加削弱撕力，过高能量易诱发焊点脆化或烧蚀；压力升高使撕力轻微降低，影响程度低于振幅与能量。交互作用分析（图3）表明，各参数之间不存在显著交互效应，对撕力的影响基本独立。试验数据表明，当振幅为30 μm、能量为40 J、压力为30 MPa时，撕力较高，达到83.9 N，当振幅为60 μm、能量为100 J、压力为60 MPa时撕力最低，为58.2 N，进一步证实了高参数区间普遍存在过焊现象。

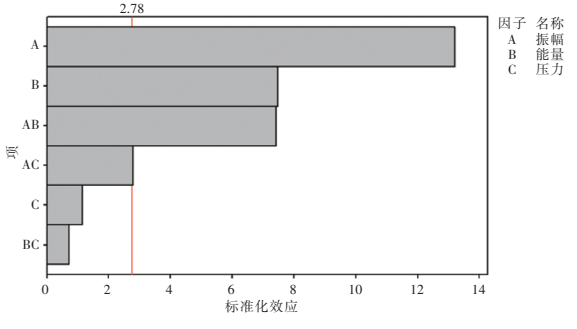
综上，振幅对撕力的影响最大，能量与压力也需谨慎控制。

表4 各工艺参数对焊接撕力的主效应

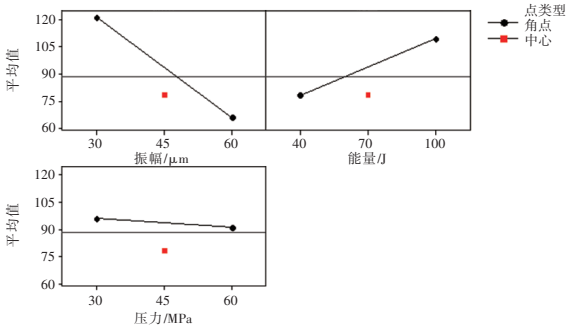
工艺参数	水平	平均撕力/N	变化趋势
振幅	30 μm	121.3	显著下降
	60 μm	66.3	
能量	40 J	78.3	下降
	100 J	109.3	
压力	30 MPa	96.2	轻微下降
	60 MPa	91.4	



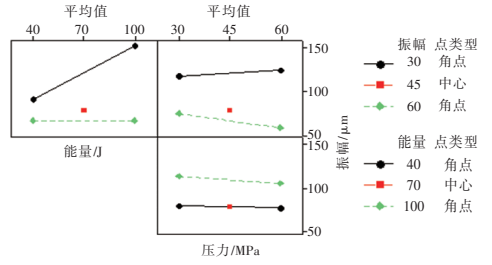
（a）振幅与能量



（b）振幅与压力/MPa



（c）能量与压力



（d）压力与能量对焊接撕力

图3 各工艺参数对焊接撕力的交互作用

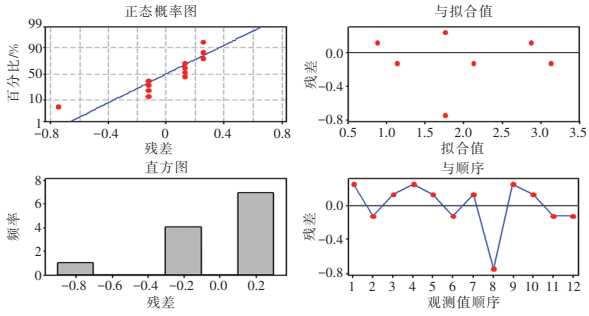
3.3 焊接效果分析

焊接效果是综合评价焊接接头质量的关键指标，涵盖粘箔率与焊裂状况。主效应分析（表5）表明，在试验参数范围（振幅30~60 μm，能量40~100 J，压力30~60 MPa）内，振幅、能量与压力对焊接效果均呈负相关：振幅影响最为显著，振幅增大易致能量集中，引发材料烧伤或界面结合不良；能量过高易造成焊点过热，形成脆性组织或微裂纹；压力提升亦对焊接效果不利，但影响程度较轻。交互作用分析（图4）显示，各参数间交互效应不显著，对焊接效果的影响基本独立。焊接效果评分随参数升高而下降，与拉力、撕力趋势一致，表明初始参数范围整体偏高，焊接处于过焊状态。

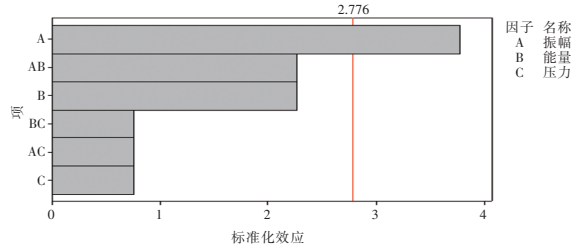
综上，振幅是影响焊接效果的首要因素，能量次之，压力影响最小，该结果进一步支持了参数范围需向下调整的结论。

表5 各工艺参数对综合焊接效果的主效应

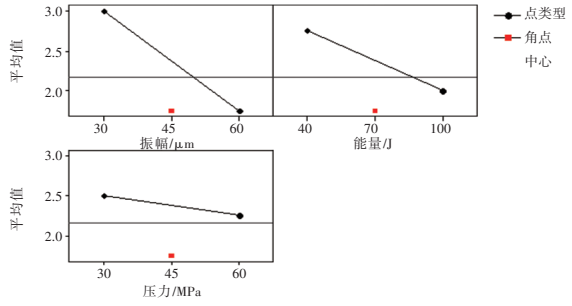
工艺参数	水平	平均焊接效果得分	变化趋势
振幅	30 μm	3.0	下降
	60 μm	1.75	
能量	40 J	2.0	下降
	100 J	2.5	
压力	30 MPa	2.5	轻微下降
	60 MPa	2.25	



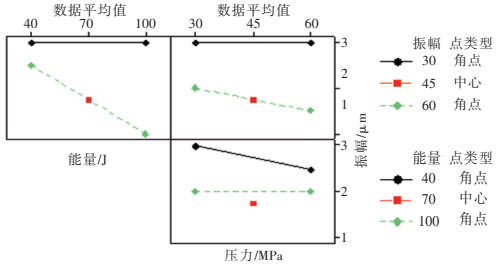
(a)振幅与能量



(b)振幅与压力



(c)能量与压力



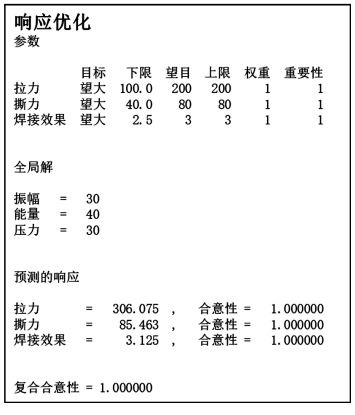
(d)压力与能量对综合焊接效果

图4　各工艺参数对综合焊接效果的交互作用

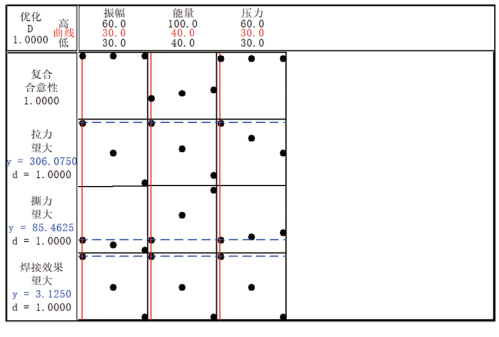
3.4　响应优化与试验方向研判

基于上述分析,本文利用统计软件进行了多响应变量(拉力、撕力、焊接效果)的联合优化,目标是寻找同时满足各项性能要求的最优参数区间。响应优化结果(图5)表明,系统推荐的最优解均落在或趋近于各因子的下限,说明初始全因子试验所设定的参数范围(30~60 μm,40~100 J,30~60 MPa)整体偏高,已进入过焊区域。在此区域内,过高的能量输入(尤其是通过高振幅实现)可能导致材料烧伤、粘箔率下降,从而损害焊接强度与质量。后续研究须重新设定更低的、围绕当前下限值展开的参数空间,并采用更适用于非线性关系拟合和参数寻优的试验设计方法(如Box-Behnken设计)进行探索。

通过本次系统的全因子试验分析,识别了各关键工艺参数对焊接质量的影响方向与相对重要性,诊断出当前生产参数窗口存在的问题,并精准定位了下一步工艺优化的核心区域,为实现焊接过程的精准控制与质量提升奠定了基础。在振幅30 μm、能量40 J、压力30 MPa的条件下,导电率达到最高值42.5×10^6 S/m,而在振幅60 μm、能量100 J、压力60 MPa时导电率显著下降至18.1×10^6 S/m,进一步印证了高参数区间存在过焊导致的电气性能劣化。



(a)各参数对综合合意度的主效应



(b)最优参数解与合意性函数

图5　多响应变量合意性优化

4　基于响应面法的参数优化与试验验证

初步试验表明,初始参数窗口整体偏高,导致焊接质量不佳。为精准定位最优工艺区间,本文采用Box-Behnken设计,在更低的参数水平下构建响应面模型,并对优化结果进行试验验证,以获得稳定、优良的焊接质量。

4.1 响应面试验设计

根据前期试验结论，初始参数窗口整体偏高，导致焊接处于过焊状态。为此，本研究将参数范围收窄，即振幅20~40 μm，能量30~50 J，压力20~40 MPa），并采用Box-Behnken响应面设计进行第二轮试验。该设计能以较少试验高效评估二次效应与交互作用，为精准建模与参数寻优奠定基础。试验设计结构和试验参数配置如表6、表7所示。

表6 Box-Behnken试验设计结构

参数	数值
因子数/个	3
基础次数/次	15
基础区组/组	1
仿行数/行	15
合计区组数/组	1
中心点数/个	3

表7 Box-Behnken试验参数配置

标准序	运行序	点类型	区组	振幅/μm	能量/J	压力/MPa
1	1	2	1	20	30	30
2	2	2	1	40	30	30
3	3	2	1	20	50	30
4	4	2	1	40	50	30
5	5	2	1	20	40	20
6	6	2	1	40	40	20
7	7	2	1	20	40	40
8	8	2	1	40	40	40
9	9	2	1	30	30	20
10	10	2	1	30	50	20
11	11	2	1	30	30	40
12	12	2	1	30	50	40
13	13	0	1	30	40	30
14	14	0	1	30	40	30
15	15	0	1	30	40	30

4.2 焊接性能响应模型构建

经过Box-Behnken设计试验，获得了新的试验数据如表8所示。焊接效果的评价标准在此轮优化中将更为严格和细致。每组方案的拉力和撕力分别测试3个样品，取平均值。焊接效果根据粘箔率以及是否焊裂定义，1表示拉力、撕力以及粘箔率不合格；2表示拉力、撕力合格但粘箔率不合格；3表示拉力、撕力合格，但粘箔率不合格；4表示拉力、撕力和粘箔率均合格。

表8 Box-Behnken试验结果汇总

标准序	运行序	点类型	区组	振幅/μm	能量/J	压力MPa	拉力/N	撕力/N	焊接效果
1	1	2	1	20	30	30	13.1	0.0	1
2	2	2	1	40	30	30	187.0	47.9	2
3	3	2	1	20	50	30	36.7	21.1	1
4	4	2	1	40	50	30	250.1	95.9	4
5	5	2	1	20	40	20	28.5	16.6	1
6	6	2	1	40	40	20	48.0	12.6	1
7	7	2	1	20	40	40	26.3	9.2	1
8	8	2	1	40	40	40	242.4	86.2	3
9	9	2	1	30	30	20	84.3	21.2	1
10	10	2	1	30	50	20	305.7	75.6	2
11	11	2	1	30	30	40	90.6	26.1	1
12	12	2	1	30	50	40	315.3	78.8	3
13	13	0	1	30	40	30	287.6	56.3	2
14	14	0	1	30	40	30	282.3	58.5	2
15	15	0	1	30	40	30	285.3	55.1	2

4.3 多目标优化与参数确定

4.3.1 拉力响应模型分析

基于Box-Behnken试验数据，建立了拉力与各工艺参数的二次回归模型。主效应分析（图6）表明，在优化参数范围内（振幅20~40 μm，能量30~50 J，压力20~40 MPa），能量与拉力呈正相关，与全

因子试验中普遍出现的负相关形成鲜明对比,表明在较低参数区间内,能量输入对焊接结合具有促进作用。响应曲面(图7)进一步显示,在低振幅与低压条件下,适度提高能量可显著提升拉力。此外,振幅与能量之间存在显著交互作用,二者协同变化对拉力影响明显。综上,优化后的参数区间有效扭转了能量对拉力的作用方向,凸显了参数协同调控在提升焊接强度方面的关键作用。

响应曲面回归:拉力 与 振幅，能量，压力

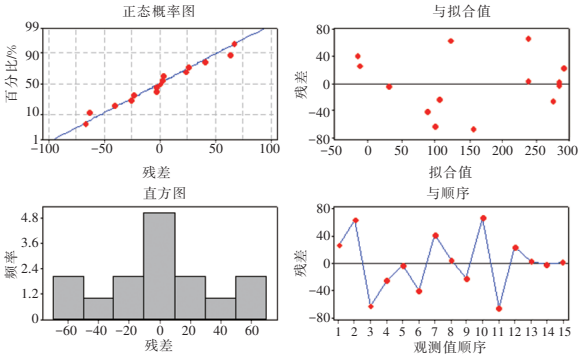
分析是使用已编码单位进行的。

拉力 的估计回归系数

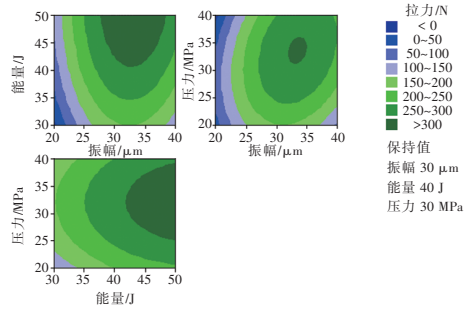
项	系数	系数标准误	T	P
常量	285.078	39.10	7.290	0.001
振幅	77.879	23.95	3.252	0.023
能量	66.613	23.95	2.782	0.039
压力	26.017	23.95	1.086	0.327
振幅*振幅	-138.026	35.25	-3.916	0.011
能量*能量	-25.326	35.25	-0.719	0.505
压力*压力	-60.768	35.25	-1.724	0.145
振幅*能量	9.858	33.86	0.291	0.783
振幅*压力	49.167	33.86	1.452	0.206
能量*压力	0.833	33.86	0.025	0.981

S = 67.7280　PRESS = 366772
R-Sq = 88.68%　R-Sq(预测) = 0.00%　R-Sq(调整) = 68.30%

图6　拉力对各因子的主效应



(a)振幅与能量对拉力的交互作用曲面



(b)振幅与能量对拉力的交互作用等高线

图7　拉力响应曲面与等高线

4.3.2　撕力响应模型分析

基于Box-Behnken试验数据,建立了撕力关于振幅、能量与压力的二次回归模型。主效应分析(图8)显示,在优化参数区间(振幅20~40 μm,能量30~50 J,压力20~40 MPa)内,振幅和能量对撕力均呈现显著正向影响,而压力的作用相对较弱:振幅由20 μm增至40 μm,撕力显著上升,说明适当提高振幅有助于增强界面结合;能量增加同样促进撕力提升,适量能量输入有助于形成良好冶金结合;压力对撕力影响较小,主效应曲线较为平缓。响应曲面分析(图9)进一步表明,振幅与能量之间存在显著的交互作用,二者协同提高可显著增强撕力。模型预测与试验数据吻合良好,如在振幅40 μm、能量50 J、压力30 MPa时撕力达95.9 N,而在振幅20 μm、能量30 J时撕力几乎为0,说明能量严重不足,无法形成有效结合。通过Box-Behnken试验数据建立了导电率的二次回归模型。结果表明,在优化参数区间内,导电率随振幅与能量的提高而上升,表明适中的参数配合有助于形成低阻、连续的导电通路。综上,在优化参数范围内,振幅与能量对撕力具有明显的正向协同效应,为实现高抗剥离性能提供了明确调控路径。

响应曲面回归:撕力 与 振幅，能量，压力

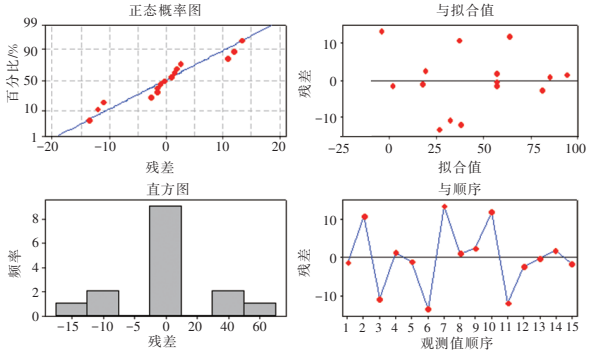
分析是使用已编码单位进行的。

撕力 的估计回归系数

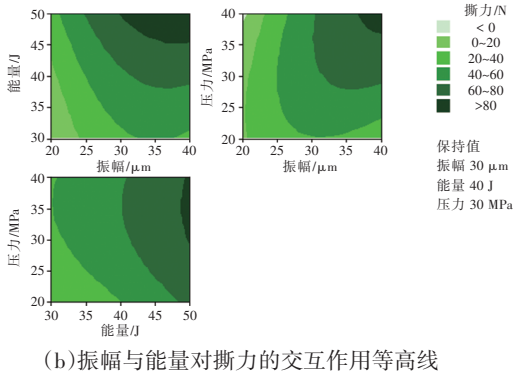
项	系数	系数标准误	T	P
常量	56.6333	7.813	7.248	0.001
振幅	24.4583	4.785	5.112	0.004
能量	22.0250	4.785	4.603	0.006
压力	9.2833	4.785	1.940	0.110
振幅*振幅	-17.3500	7.043	-2.464	0.057
能量*能量	1.9167	7.043	0.272	0.796
压力*压力	-8.1333	7.043	-1.155	0.300
振幅*能量	6.7333	6.766	0.995	0.365
振幅*压力	20.2667	6.766	2.995	0.030
能量*压力	-0.4000	6.766	-0.059	0.955

S = 13.5329　PRESS = 14572.6
R-Sq = 93.18%　R-Sq(预测) = 0.00%　R-Sq(调整) = 80.91%

图8　撕力(N)对各因子的主效应



(a)振幅与能量对撕力的交互作用曲面



(b)振幅与能量对撕力的交互作用等高线

图9　撕力响应曲面与等高线

4.3.3 焊接效果响应模型分析

基于Box-Behnken试验数据，建立了拉力与各工艺参数的二次回归模型。主效应分析（图10）显示，在优化后的参数区间内，能量对拉力呈现显著的正面影响，与全因子试验发现的负面作用形成鲜明对比，表明在较低的参数范围内，适当的能量输入有利于增强焊接结合强度。

响应曲面回归：焊接效果 与 振幅，能量，压力

分析是使用已编码单位进行的。

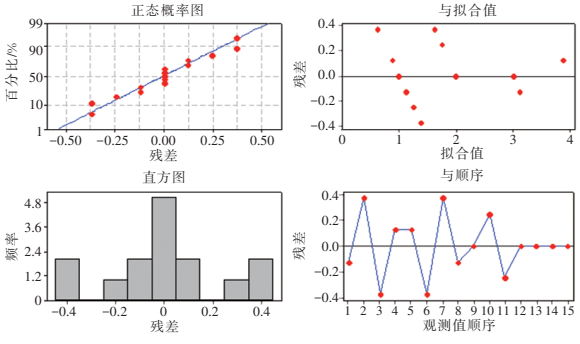
焊接效果 的估计回归系数

项	系数	系数标准误	T	P
常量	2.0000	0.2236	8.944	0.000
振幅	0.7500	0.1369	5.477	0.003
能量	0.6250	0.1369	4.564	0.006
压力	0.3750	0.1369	2.739	0.041
振幅*振幅	-0.1250	0.2016	-0.620	0.562
能量*能量	0.1250	0.2016	0.620	0.562
压力*压力	-0.3750	0.2016	-1.861	0.122
振幅*能量	0.5000	0.1936	2.582	0.049
振幅*压力	0.5000	0.1936	2.582	0.049
能量*压力	0.2500	0.1936	1.291	0.253

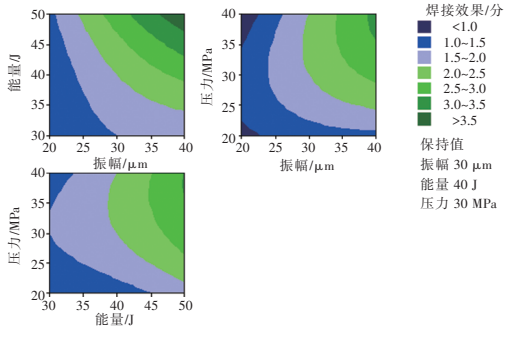
S = 0.387298 PRESS = 12
R-Sq = 93.95% R-Sq（预测） = 3.23% R-Sq（调整） = 83.06%

图10 焊接效果对各因子的主效应

响应面图（图11）表明，在低振幅与低压条件下，适度增加能量可有效提升拉力。此外，振幅与能量之间存在显著的交互作用，二者协同变化对拉力分布产生了重要影响。验证试验结果表明，在振幅40 μm、能量50 J、压力30 MPa条件下，拉力实测值（250.1 N）与模型预测值（245.6 N）吻合良好，相对误差小于2%，证明所建立的响应面模型具有较高的预测精度和工程适用性。



（a）振幅与能量对焊接效果的交互作用曲面



（b）振幅与能量对焊接效果的交互作用等高线

图11 焊接效果响应曲面与等高线

4.4 多响应优化与最优参数确定

在分别建立拉力、撕力与焊接效果的二次回归模型基础上，采用多响应变量联合优化方法，以寻求同时满足多项性能指标的全局最优参数组合。优化结果表明，存在可使3个响应变量均达到理想状态的参数区域（图12）。系统推荐的最终参数为振幅36 μm、能量50 J、压力40 MPa，其理论预测合意性最高（图13），因此，将该组合确定为最优工艺参数，用于后续验证试验。

响应优化

参数

	目标	下限	望目	上限	权重	重要性
拉力	望大	100	200	200	1	1
撕力	望大	40	80	80	1	1
焊接效果	望大	3	4	4	1	1

全局解

振幅 = 36.1616
能量 = 50
压力 = 40

预测的响应

拉力 = 324.398 , 合意性 = 1.000000
撕力 = 106.445 , 合意性 = 1.000000
焊接效果 = 4.031 , 合意性 = 1.000000

复合合意性 = 1.000000

图12 多响应变量合意性优化

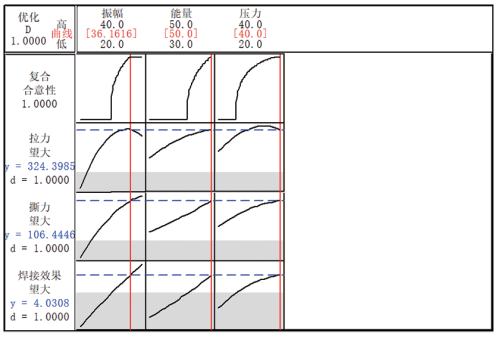


图13 最优参数解与合意性函数

4.5 最优参数验证试验

如表9所示，为验证优化结果的可靠性，在系统推荐的最优参数组合（振幅36 μm、能量50 J、压力40 MPa）下开展了多组重复验证试验。结果表明：所有验证样本的拉力与撕力实测值均符合预设指标要求；实测值与模型预测值高度吻合，最大相对误差小于2%，证明响应面模型具备良好的预测精度；多次试验结果波动小，表明最优参数具备良好的工艺稳定性和重复性。在优化参数区间内，适当的振幅与能量有助于维持较高的电导率，而过高的参数则可能因材料损伤而导致电导率下降。在最优参数组合振幅36 μm、能量50 J、压力30 MPa

的条件下,导电率达40.2×10^6 S/m,优于多数其他条件组合。电导率保持在较高水平,说明焊接接头具有良好的电气连通性,有助于降低电池内阻。

表9　最优参数验证试验结果

拉力/N	拉力粘箔率/%	撕力/N	撕力粘箔率/%
248.5	100	116.7	100
180.9	100	108.8	80
262.3	100	99.5	100
294.3	100	105.8	90
227.5	100	93.3	80

综上,优化参数在实际焊接中表现优异,验证了响应面方法的有效性与工程实用性。

5　结束语

本研究针对锂离子电池正极焊接过程中存在的工艺参数窗口宽泛、焊接质量不稳定等问题,采用试验设计方法系统开展了焊接参数优化,得出以下结论:

a. 全因子试验表明,在初始参数范围(振幅30~60 μm,能量40~100 J,压力30~60 MPa)内,振幅、能量和压力均与焊接拉力、撕力及综合焊接效果呈负相关,表明该区间已普遍处于过焊状态。

b. 振幅是影响焊接质量的最关键因素,基于Box-Behnken设计的响应面模型有效刻画了参数与焊接质量间的定量关系。

c. 通过多响应优化得到最佳工艺参数组合:振幅36 μm,能量50 J,压力40 MPa。验证试验表明,该组合下的焊接接头在拉力、撕力及粘箔率方面均表现优异,满足高质量焊接要求。

d. 优化参数在多组验证试验中表现出良好的重复性和稳定性,有效解决了原工艺窗口下的焊接强度不足与过焊问题。

综上,本研究通过系统试验与建模分析,实现了正极焊接工艺从“粗放调节”向“精细控制”的转变,为实际生产的质量一致性提供了可靠工艺依据。

参考文献:

[1] 余曼, 张凯, 刘建峰, 等. 基于DBO-BP神经网络增强EKF算法的锂电池荷电状态估计[J/OL]. 汽车工程学报, 1-12(2025-10-13)[2025-10-27]. https://link.cnki.net/urlid/50.1206.u.20251013.0946.002.

[2] 胡静. 锂动力电池热失控热点事件及专利分析[J/OL]. 电池工业, 1-8(2025-09-01)[2025-10-27]. https://link.cnki.net/urlid/32.1448.TM.20250901.1353.004.

[3] 王方, 吴泽昊, 苗秀娟, 等. 老化锂离子电池机械滥用安全性研究综述[J]. 中国科学:技术科学, 2025, 55(7): 1077-1104.

[4] 陶虎森. 锂离子电池储能优化与控制研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2025.

[5] DING L, LI D D, LIU L Y, et al. Dependence of Lithium Metal Battery Performances on Inherent Separator Porous Structure Regulation[J]. Journal of Energy Chemistry, 2023, 84: 436-447.

[6] WANG W W, WANG J, TIAN J P, et al. Application of Digital Twin in Smart Battery Management Systems[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(4): 12-30.

[7] 余抒阳, 罗文雷, 解晶莹, 等. 锂离子电池释热机理与模型及安全改性技术研究综述[J]. 化学进展, 2023, 35(4): 620-642.

[8] 宋岚, 熊若愚, 宋华雄, 等. 锂离子电池多尺度非均匀性概述[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(2): 487-502.

[9] LUIGI N, GIULIO M, MARIO V. Deep Neural Networks for Defects Detection in Gas Metal Arc Welding[J]. Applied Sciences, 2022, 12(7): 3615-3615.

[10] 赵伟, 杨瑞, 李玲玲, 等. 锂金属电池三维集流体的改性研究[J]. 电源技术, 2024, 48(8): 1546-1553.

[11] 时培成, 单子贤, 朱海龙, 等. 新能源汽车动力电池系统的集成化设计技术[J]. 中国机械工程, 2025, 36(7): 1611-1623.

AT&M