doi:10.3969/j.issn.1001-4837.2026.03.003

试验研究

Ⅳ型气瓶单侧焊珠塑料内胆热熔焊接工艺及力学性能研究

乔石磊[1],顾付伟[2]

(1.中船恒宇能源(上海)有限公司,上海 200090;2.江苏理工学院 机械工程学院,江苏常州 213001)

摘　要:针对大直径、大长径比Ⅳ型储氢瓶塑料内胆的成型难题,基于具有独特的低成本优势的热熔焊接工艺,解决其焊缝质量综合优化问题。以焊缝强度与焊缝形貌作为核心优化目标,系统探究了内胆坡口尺寸、加热温度、焊接进给速度及焊接进给量等关键工艺参数对焊接质量的耦合影响规律。通过开展系统的焊接试验,制备焊管试样,测试其拉伸应力-应变曲线以评估力学性能,并结合焊缝截面宏观形貌观察与断口微观结构分析,揭示了各工艺参数对焊接成形质量及失效机制的影响。在此基础上,运用极差分析法对多目标进行综合权衡与优化,确定了最优工艺参数组合:坡口尺寸2.88 mm、加热温度252.56 ℃、焊接进给速度1 mm/s、焊接进给量1.5 mm。研究为大直径、大长径比圆筒形塑料内胆的热熔焊接工艺效果评价与质量提升提供了可靠的方法依据和直接的工艺指导。

关键词:储氢气瓶;热熔焊接;塑料内胆

中图分类号:TH49;TG442　　**文献标志码**:A

Study on hot melt welding process and mechanical properties of plastic liner with single-side weld bead for type Ⅳ cylinder

QIAO Shilei[1],GU Fuwei[2]

(1.CSSC Hengyu Energy (Shanghai) Co.,Ltd,Shanghai 200090,China;
2.School of Mechanical Engineering,Jiangsu University of Technology,Changzhou 213001,China)

Abstract: To address the forming challenges of plastic liners for type Ⅳ hydrogen storage cylinders with large diameter and large length-to-diameter ratio, a hot melt welding process with unique low-cost advantages is adopted to solve the comprehensive optimization problem of weld quality.Taking weld strength and weld morphology as the core optimization objectives, the coupled influence of key process parameters including liner groove size, heating temperature, welding feed speed, and welding feed amount on welding quality is systematically investigated.Through systematic welding experiments, welded pipe specimens are prepared, and their tensile stress-strain curves are tested to evaluate mechanical properties. Combined with macroscopic observation of weld cross-section morphology and microscopic analysis of fracture structure, the effects of various process parameters on welding forming quality and failure mechanism are revealed.On this basis, the range analysis method is used to comprehensively balance and optimize multiple objectives, and the optimal combination of process parameters is determined: groove size 2.88 mm, heating temperature 252.56 ℃, welding feed speed 1 mm/s, welding feed amount 1.5 mm.This study provides a reliable methodological basis and direct process guidance for the evaluation of hot melt welding process effects and quality improvement of cylindrical plastic liners with large diameter and large length-to-diameter ratio.

Key words:hydrogen storage cylinder;hot melt welding;plastic liner

收稿日期:2025-12-31　**修回日期**:2026-01-24

基金项目:常州市科技计划(CJ20240029);常州市D类领军人才计划(CQ20240098);船用LNH3燃料撬装加注系统的工艺设计与开发(校企合作项目)

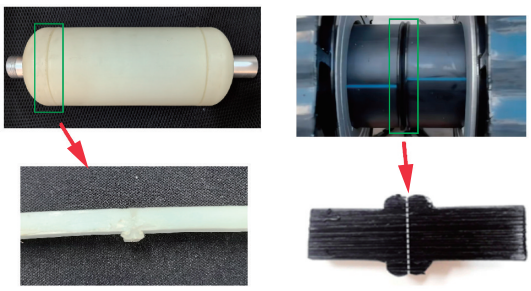
0 引言

高压气态储氢是当前氢能汽车等领域的主流技术[1-4]。为提升储氢密度，车载储氢压力已提高至70 MPa，对储氢瓶可靠性提出了更高要求[5]。复合材料全缠绕气瓶（特别是Ⅲ型与Ⅳ型）因轻质高强、耐疲劳性能好，成为发展重点[6-7]。其中，Ⅳ型气瓶（塑料内胆全缠绕）具有更高的储氢密度，是近年来的研究热点[8]。

当前研究多集中于Ⅳ型瓶整体性能或纤维缠绕工艺[9-13]，对其塑料内胆制造工艺的关注度相对不足。大容积内胆常需通过焊接（如封头与筒身）成型[14-18]。在聚合物焊接中，热板焊接作为一种低成本热熔焊接方式，通过分子扩散形成接头，其强度取决于工艺参数[19]。

研究表明，焊接温度、压力、时间等参数显著影响焊缝质量，加热不足或压力不当会导致分子链缠结不充分，强度下降[20-22]。焊接过程中形成的“卷边”易引发应力集中，加速裂纹扩展，降低接头耐久性[23-27]。此外，界面几何形状（如坡口）也是关键因素[28-29]。

在文中所述的应用场景中，Ⅳ型储氢瓶塑料内胆的结构如图1（a）所示，内胆由两个封头和筒身构成，封头与筒身焊接连接。为了在内胆外侧缠绕碳纤维，需要将卷边车削去除；而内侧的卷边也可能造成应力集中。图1（b）示出常规塑料热熔焊接产生的焊缝，其内外侧焊珠的存在不影响使用。因此，本文引入坡口这一焊接结构，以尼龙管代替真实内胆以降低试验成本，对Ⅳ型高压气态储氢瓶塑料内胆的热熔焊接成型工艺开展深入研究，以期为高质量塑料内胆焊缝的成型工艺提供理论支撑与方法指导。



（a）Ⅳ型储氢瓶塑料内胆　（b）常规塑料热熔焊接

图1 塑料内胆结构与焊缝

Fig.1 Plastic liner structure and weld

1 PA6尼龙管热熔焊接实验

1.1 焊接原理与工艺

1.1.1 焊接原理

聚酰胺6（PA6）是制造Ⅳ型储氢瓶塑料内胆的常用半结晶热塑性材料[30]，其力学性能具有显著的温敏特性[31-34]。如图2所示，PA6在不同温度下呈现三种典型力学状态：玻璃态、高弹态与黏流态，其转变关键点为玻璃化转变温度（T_g，约50 ℃）与黏流温度（T_f）。在室温下，材料处于刚性玻璃态；在热熔焊接过程中，通过加热使材料进入从高弹态到黏流态的转变区间，促使分子链充分运动以实现熔合。该过程为物理变化，不涉及化学交联[35-36]。对PA6热机械特性的理解是优化焊接工艺、实现可靠焊缝成形的重要理论基础。

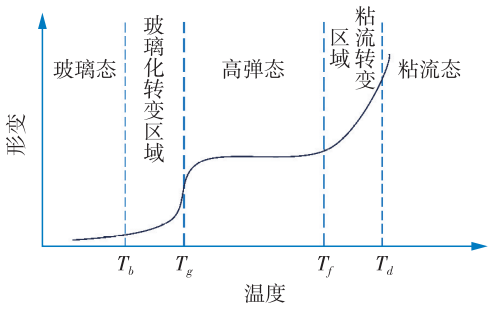


图2 PA6温度-形变曲线

Fig.2 PA6 temperature-deformation curve

在焊接过程中，PA6管道端面经加热达到熔融状态。随后施加压力使两端面紧密接触，促使熔融分子链相互迁移、渗透与重组。卸压冷却后，焊接区域通过分子链的物理缠结形成稳定接头。

1.1.2 焊接工艺

热熔对接焊接主要分为4个阶段：预热、加热、切换和冷却，如图3所示。在采用热熔对接焊对PA6尼龙管进行焊接时，通过热板加热使管端达到熔融状态并形成一定熔深。随后在压力作用下，两端熔体接触并发生流动、扩散与分子间渗透，形成物理结合后冷却固化。此过程中，焊接时间与速度等参数直接影响熔体行为，进而影响由熔体挤出形成的卷边形貌。该卷边结构常导致应力集中，从而削弱焊接接头的拉伸性能。

1.2 试验方案设计

为系统研究热熔焊接参数对焊接质量的影响并优化工艺，文中采用正交试验法设计试验。该方法能以较少试验次数高效分析多因素、多水平问题，是工艺优化的常用统计方法。

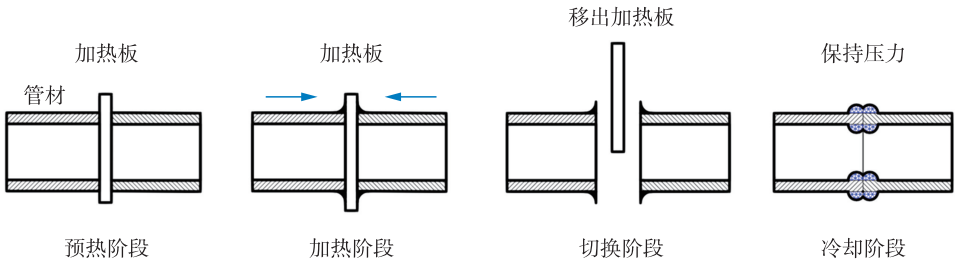


图3 热熔对接焊接基本工艺

Fig.3 Basic process of hot melt butt welding

参考已有研究及经验[37-39]，选定加热温度、焊接压力、坡口尺寸及加热时间为关键影响因素。试验所用焊接设备通过步进电机驱动丝杠施压，因此实际以焊接进给速度与进给量来表征焊接压力。为控制变量，加热时间统一设定为80 s，热板切换时间为6 s，保压时间为10 min。最终确定四因素三水平的试验方案，各因素水平值依据尼龙管生产厂家提供的焊接参数数据库，并经过初步试验确定，如表1所示。

表1 焊接参数及其水平

Tab.1 Welding parameters and their levels

项目	坡口尺寸 A/mm	加热温度 B/℃	焊接进给速度 C/(mm·s^{-1})	焊接进给量 D/mm
水平1	0	230	0.2	1.5
水平2	1.5	250	0.6	2.0
水平3	3.0	270	1.0	2.5

基于$L_9(4^3)$正交表安排试验，利用Minitab软件生成9组试验方案，如表2所示。该设计可系统分析各因素对焊接性能的影响，并识别最优工艺参数组合。

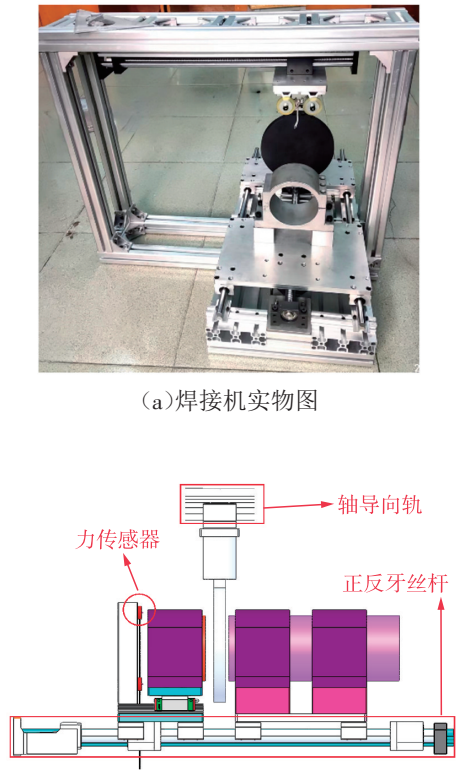
表2 正交试验表

Tab.2 Orthogonal experiment table

项目	坡口尺寸 A/mm	加热温度 B/℃	焊接进给速度 C/(mm·s^{-1})	焊接进给量 D/mm
试验1	0	230	0.2	1.5
试验2	0	250	0.6	2.0
试验3	0	270	1.0	2.5
试验4	1.5	230	0.6	2.5
试验5	1.5	250	1.0	1.5
试验6	1.5	270	0.2	2.0
试验7	3.0	230	1.0	2.0
试验8	3.0	250	0.2	2.5
试验9	3.0	270	0.6	1.5

1.3 试验过程

采用实验室自主搭建的焊接设备进行焊接，如图4所示。设备由底部工作台、上部框架以及相应PLC自动控制设备构成，采用压力传感器反馈焊接过程中的力大小，传感器精度为0.3% FS。底部电机可在0~3 mm/s的速度范围内运行。



(a)焊接机实物图

(b)焊接机主要结构示意

图4 自动化焊接设备主要结构

Fig.4 Main structure of automated welding equipment

本次焊接试验在室内进行，严格控制室内环境条件。室内温度保持在27 ℃，确保空气保持静止，以避免外界因素对焊接过程的影响。焊接操作依据HG/T 4281—2011《塑料焊接工艺规程》进行，按照该标准制备热熔焊接接头，以确保焊接质量及工艺的规范性与一致性。通过这种精确控制的环境和规范的操作步骤，确保焊接试验的可靠性和再现性。

焊接材料为PA6尼龙管（见图5）。该材料购自保定皓石橡胶制品销售有限公司，其拉伸强度

为62.25 MPa，压缩强度为69.5 MPa，热变形温度≥150 ℃。使用酒精对焊接区域进行彻底清洁，确保该区域无杂质、油脂和水分，且保持清洁干燥。焊接过程如图6所示。依据试验参数设计完成9组试验后，得到的焊接接头如图7所示。

2 PA6尼龙管热熔焊接接头力学性能试验

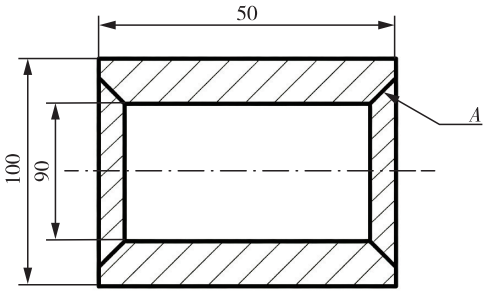
拉伸试验设备为深圳三思纵横科技有限公司的UTM5105X电子万能试验机，其主要参数如表3所示。

为了降低试样制备成本，文中选择了矩形试样。试样尺寸由PA6尼龙管的公称外径DN和壁厚a决定，具体尺寸、平行长度部分宽度B、原始标距L_o及试样总长度L见表4。根据标准并结合实际情况，文中试样尺寸为长100 mm、宽15 mm，取样位置如图8所示。

为减少卷边对试验结果的影响，取样前先对外壁卷边进行车削处理（见图9），沿管段周边以焊缝为中心均匀切取样条，确保样条纵向与管轴平行。制备过程中避免样条被压平，并喷洒冷却液以防止热影响，每组试验取3个样条（见图10），以保证数据的可靠性与重复性。



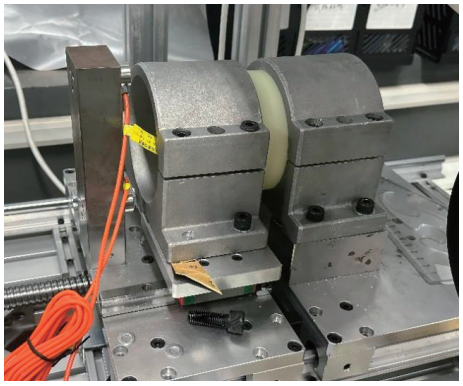
（a）实物图



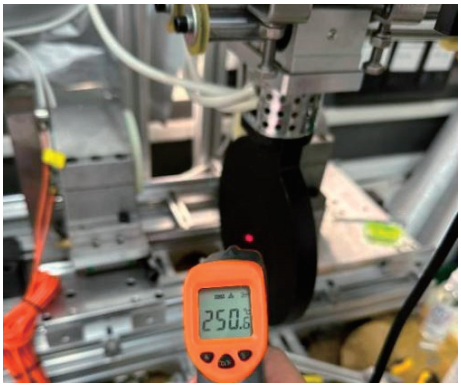
（b）尺寸（A为坡口大小）

图5 PA6尼龙管

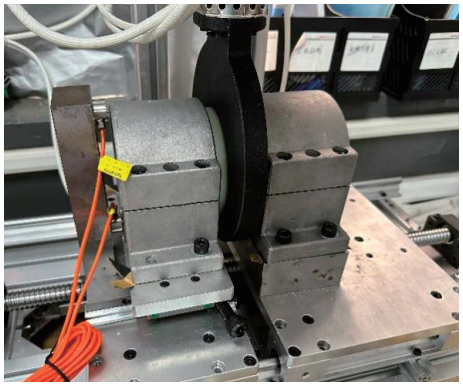
Fig.5 PA6 nylon tube



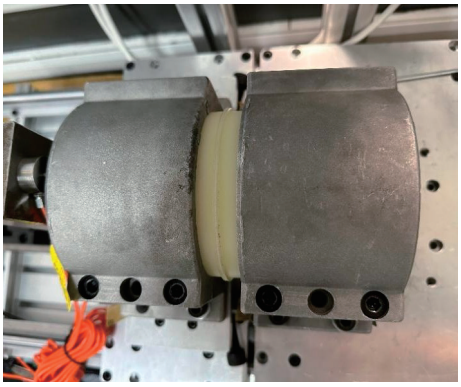
（a）装夹阶段



（b）热板加热



（c）加热阶段



（d）保压冷却阶段

图6 焊接过程示意

Fig.6 Schematic diagram of welding process


（a）单个接头


（b）9组接头

图7 焊接接头

Fig.7 Welded joint

表3 电子万能试验机技术参数

Tab.3 Technical parameters of electronic universal testing machine

参数	最大试验力/kN	精度等级	试验力精度/%	位移精度/μm	调速范围/（mm·min^{-1}）
数值	100	0.5	±0.5	0.004	0.001~500

表4 矩形试样尺寸

Tab.4 Rectangular specimen dimensions

项目	尺寸/mm	B/mm	L_o/mm	L/mm
管材	20≤DN<50	a+0.1DN	80	≥120
	5≤DN<100	a+0.1DN	120	≥170
	DN≥100	与相同厚度板材的试样尺寸相同		
板材	a≤10	15	120	≥170
	10<a≤20	30	120	≥300
	a>20	1.5a	200	≥400

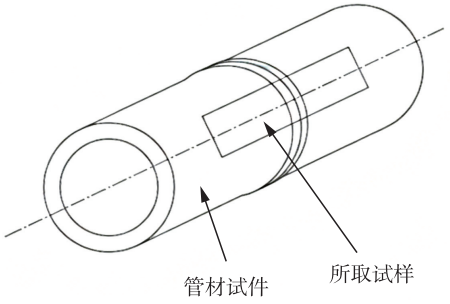
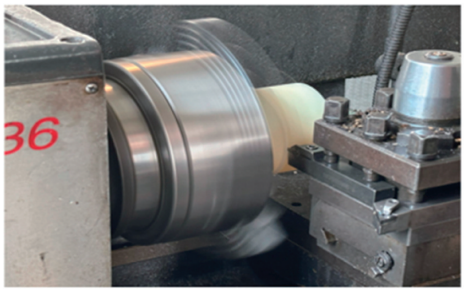


图8 管材取样示意

Fig.8 Schematic diagram of tube sampling

将试样安装在拉伸试验机的夹具中，确保试样轴线与拉伸方向一致。调整夹具位置，使试样处于拉直状态且无预应力，并在27 ℃温度下开展试验。为了更加精确地记录焊缝的拉伸强度，并减少拉伸速度对结果的影响[40]，采用准静态拉伸[41]，拉伸速度设为2 mm/min。记录最大拉伸力，并与初始截面积结合计算试样的拉伸强度。

此外，由于拉伸试验时存在装夹和样件尺寸误差等问题，在进行拉伸试验的同时，采用数字图像相关（digital image correlation，DIC）法进行三维位移应变分析。拉伸结束后，所有试样均在焊缝处被拉断，如图11所示。



（a）车削过程


（b）车削完成后

图9 外壁卷边切除

Fig.9 External wall flash removal

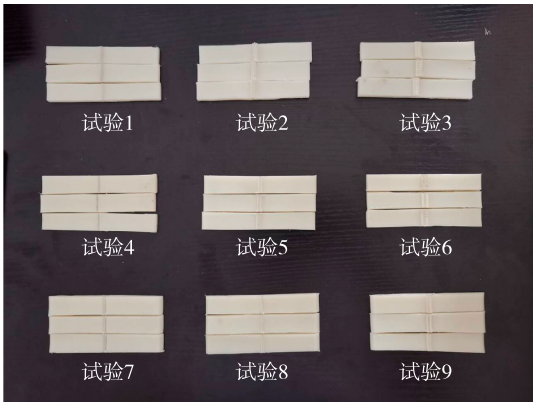


图10 9组拉伸试样

Fig.10 Nine sets of tensile specimens

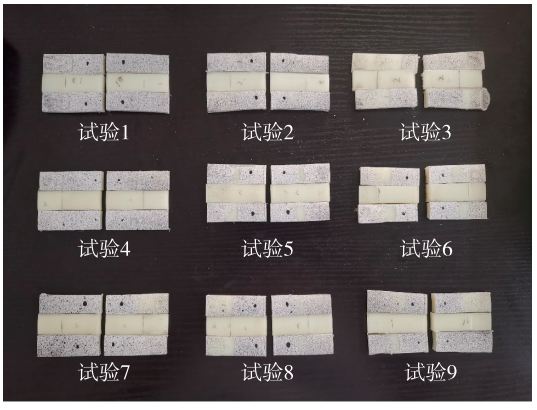


图11 试样断裂后照片

Fig.11 Photograph of specimen after fracture

3 试验结果及分析

3.1 宏观分析

3.1.1 力-位移曲线

通过对拉伸试验获得的原始数据进行处理，剔除明显偏差较大的曲线后，在每组试验中选择一条具有典型趋势的曲线，绘制力-位移曲线图，如图12所示。

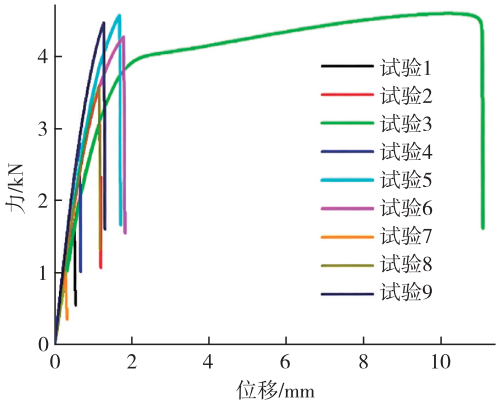


图12 力-位移曲线

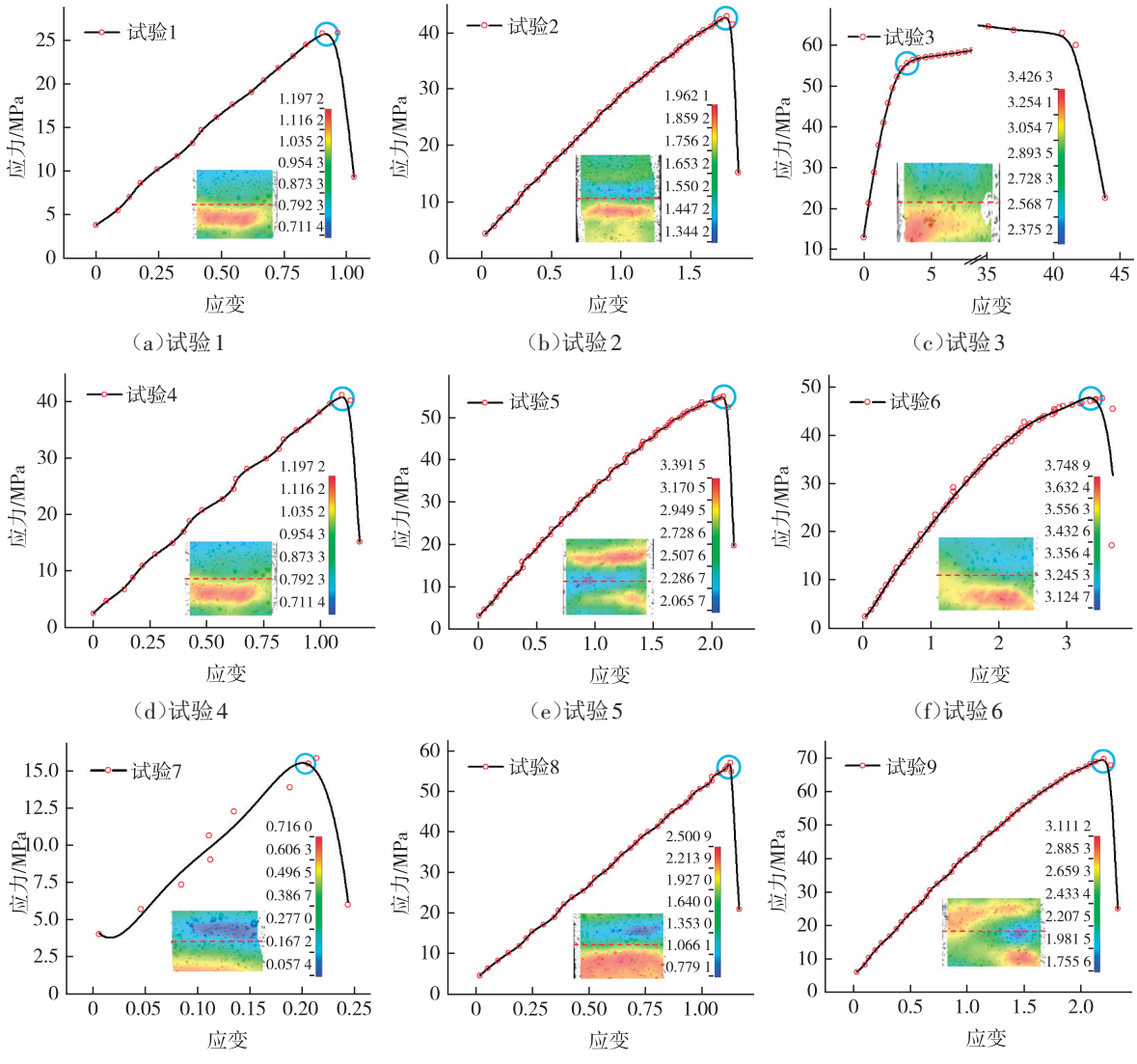
Fig.12 Force-displacement curve

3.1.2 DIC应变云图

根据DIC应力云图（见图13，云图上的红色虚线代表焊缝中心线）及表5中拉伸强度与最大弹性应变的数据，可初步得出以下结论。

（1）坡口尺寸对焊接强度的影响趋势不显著。其中，试验7因焊料未填满坡口导致有效焊接面积减小，因此最大应变较低。

（2）焊接温度升高有助于降低焊缝弹性模量、增大弹性变形能力，有利于提升储氢瓶在高压下的承载与形变适应能力。



（a）试验1 （b）试验2 （c）试验3

（d）试验4 （e）试验5 （f）试验6

（g）试验7 （h）试验8 （i）试验9

图13 9组拉伸试验的应力-应变曲线与最大弹性应变处的DIC云图

Fig.13 Stress-strain curves of nine tensile tests and DIC contour plots at maximum elastic strain

（3）试验3表现出明显塑性阶段，表明其焊接接头具有更高的韧性，这可能与分子链更充分地相互交融有关。部分试样应变分布异常可能与装夹偏差或试样制备过程中外部焊珠未彻底切除有关。

表5 拉伸强度与最大弹性应变数据

Tab.5 Tensile strength and maximum elastic strain data

项目	拉伸强度/MPa	最大弹性应变
试验1	13.62	0.929 4
试验2	33.19	1.755 4
试验3	48.01	3.705 6
试验4	32.42	1.085 1
试验5	45.55	2.092 5
试验6	50.45	3.499 8
试验7	16.90	0.211 6
试验8	40.43	1.119 1
试验9	45.83	2.191 1

3.1.3 焊接性能评估

文中通过拉伸强度与焊缝形貌综合评价焊接性能。其中，焊缝形貌以焊缝宽度及内壁焊缝高度表征（见图14）。使用游标卡尺对各组试样进行测量，沿圆周方向均匀选取3个位置，分别记录焊缝宽度与高度，并取平均值作为最终结果。需说明的是，因坡口结构影响，当焊缝填充不足时，内壁焊缝高度可能出现负值。

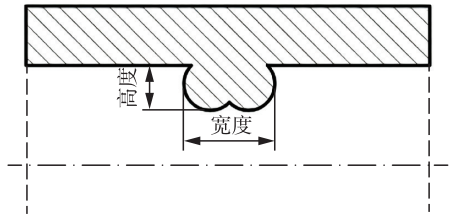


图14 焊缝尺寸示意

Fig.14 Schematic diagram of weld dimensions

文中对9组试样进行了拉伸试验，测得拉伸强度、焊缝宽度及内壁焊缝高度等数据（见表6）。结果表明，不同试验条件下的焊接性能变化趋势复杂，这主要源于各焊接参数间的交互作用。因此，有必要进一步研究各参数对焊接性能的具体影响机制，以指导工艺优化。

需要特别注意的是，试验7中的焊缝高度数据为−0.44 mm，这是由于存在坡口，而焊接过程中焊珠没有填满坡口，在实际焊接中应避免此问题。因此，在下文极差分析中将此值取绝对值。

3.1.4 极差分析

对试验结果进行极差分析，以评估各焊接参数对性能指标的影响程度。极差反映因素在不同水平下指标值的离散程度，其值越大表明该因素影响越显著。通过Minitab软件进行正交分析，得到均值响应表（见表7），并按极差大小对各因素进行排序（秩次1~4）。

表6 试样拉伸强度、焊缝宽度及高度

Tab.6 Tensile strength, weld width and weld height of specimens

项目	拉伸强度/MPa	焊缝宽度/mm	焊缝高度/mm
试验1	13.62	2.50	1.33
试验2	33.19	4.40	2.12
试验3	48.01	5.56	2.45
试验4	32.42	1.16	0.16
试验5	45.55	3.62	1.71
试验6	50.45	5.65	2.07
试验7	16.90	1.42	−0.44
试验8	40.43	2.31	0.49
试验9	45.83	4.16	1.65

根据极差分析结果（见表7），加热温度对各指标的影响均为最大，这可能掩盖了其他因素的相对影响。对于拉伸强度（越大越好），最优方案为$A_2B_3C_3D_3$；对于焊缝宽度与高度（越小越好），最优方案分别为$A_3B_1C_2D_3$与$A_3B_1C_1D_3$。

值得注意的是，在优化焊缝形貌时，焊接进给量需取最大值。此现象可能源于：较大进给量能在保压初期建立更高压力，减少后续持续进给需求，从而降低熔体挤出量；反之，较小进给量需持续补压，实际挤出量反而增加。

图15示出拉伸强度主效应图，其中加热温度曲线最陡且单调，表明其对拉伸强度影响最为显著。这是由于温度越高，熔融越充分，焊接界面分子链交织融合更彻底，利于强度提升。

图16、图17可直观看出各影响因素对焊缝宽度与焊缝高度的影响规律。

3.1.5 响应曲面分析

为完善模型并降低试验成本，采用BP神经网络对试验结果进行模拟。网络以坡口尺寸、加热温度、焊接进给速度与进给量作为输入，以拉伸强度、焊缝宽度和高度作为输出。从9组正交试验数据中选取试验2、试验7作为测试集，其余作为训练集。网络结构设置如下：输入层4节点，输出层1节点，隐含层9节点；学习率0.035，动量因子0.02，迭代50次，误差目标0.000 1。

表7 各因素均值响应表

Tab.7 Mean response table for each factor

指标	水平	坡口尺寸/mm	加热温度/℃	焊接进给速度/(mm·s^{-1})	焊接进给量/mm
拉伸强度	K_1	31.607	20.980	34.833	35.000
	K_2	42.807	39.723	37.147	33.513
	K_3	34.387	48.097	36.820	40.287
	极差	11.200	27.117	2.313	6.773
	排秩	2	1	4	3
	优选方案	A_2	B_3	C_3	D_3
焊缝宽度	K_1	4.153	1.693	3.484	3.427
	K_2	3.476	3.442	3.240	3.822
	K_3	2.629	5.122	3.533	3.009
	极差	1.524	3.429	0.293	0.813
	排秩	2	1	4	3
	优选方案	A_3	B_1	C_2	D_3
焊缝高度	K_1	1.964	0.649	1.296	1.562
	K_2	1.316	1.440	1.309	1.551
	K_3	0.864	2.056	1.540	1.031
	极差	1.100	1.407	0.244	0.531
	排秩	2	1	4	3
	优选方案	A_3	B_1	C_1	D_3

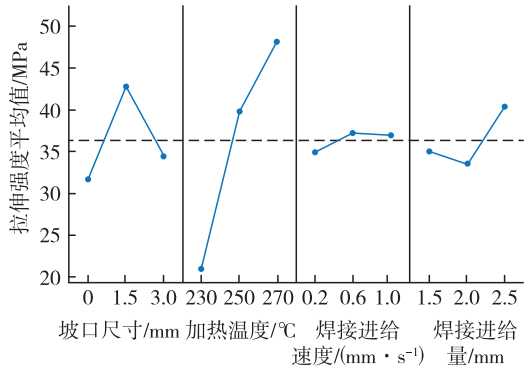


图15 拉伸强度主效应图

Fig.15 Main effects plot for tensile strength

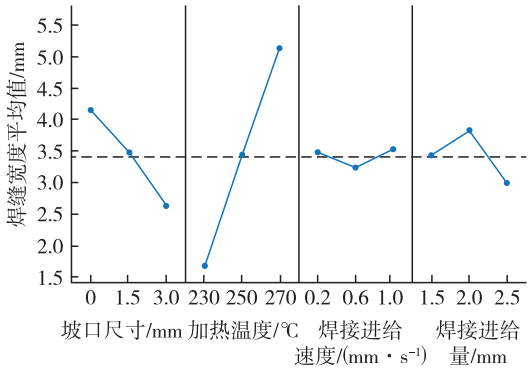


图16 焊缝宽度主效应图

Fig.16 Main effects plot for weld width

从表8中可以看出，测试集的2组数据与试验值较为接近，测试集的相对误差最大为4.95%，可见训练集建立的模型稳定、预测精度高，因此认为可用于响应面分析。

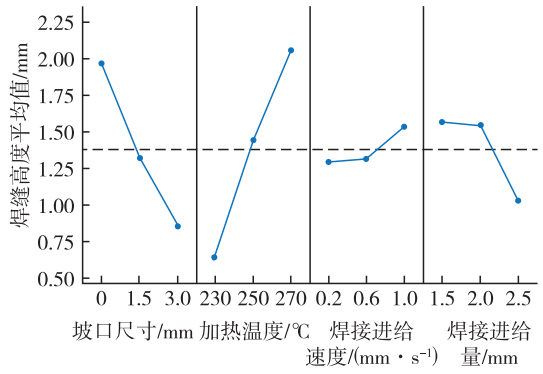


图17 焊缝高度主效应图

Fig.17 Main effects plot for weld height

表9示出基于中心复合试验设计，并通过神经网络模拟得到3个输出变量的预测值。根据表9中的数据样本，通过Design-Expert 13软件得到拉伸强度(Y_1)、焊缝宽度(Y_2)和焊缝高度(Y_3)的二次多项式回归模型：

$$\begin{aligned}Y_1 = {} & 45.89 + 0.47A + 15.18B - 0.73C + 2.71D \\ & -1.39AB - 0.43AC - 12.24AD - 1.03BC \\ & -3.37BD - 9.41CD - 7.8A^2 - 6.12B^2 \\ & -3.61C^2 - 4.58D^2 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned}Y_2 = {} & 2.56 - 0.62A + 1.6B - 0.23C - 0.91D \\ & -0.31AB - 1.19AC + 0.29AD - 0.4BC \\ & -0.37BD + 0.54CD + 0.53A^2 + 0.12B^2 \\ & +0.78C^2 - 0.12D^2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$Y_3 = 2.08 - 0.97A + 0.83B - 0.19C - 0.03D - 0.09AB - 0.17AC + 0.23AD - 0.02BC + 0.02BD - 0.03CD - 0.7A^2 - 0.63B^2 - 0.23C^2 - 0.08D^2 \quad (3)$$

从表10~12中可以看出，3个回归模型的p值均小于0.0001，模型高度显著；失拟项p值均大于0.05，表明失拟不显著，模型拟合良好。各因素对指标的影响程度依次为：拉伸强度受加热温度影响最大，其次为焊接进给量、焊接进给速度和坡口尺寸；焊缝宽度主要受加热温度影响，随后是焊接进给量、坡口尺寸和焊接进给速度；焊缝高度则受坡口尺寸影响最显著，其次是加热温度、焊接进给速度和焊接进给量。

表8 BP神经网络模拟值与试验值对比

Tab.8 Comparison of BP neural network simulated values and experimental values

项目	拉伸强度			焊缝宽度			焊缝高度		
	试验值/MPa	模拟值/MPa	误差/%	试验值/mm	模拟值/mm	误差/%	试验值/mm	模拟值/mm	误差/%
试验2	33.19	32.18	3.14	4.40	4.50	2.22	2.12	2.02	4.95
试验7	16.90	16.94	0.24	1.42	1.44	1.39	−0.46	−0.45	2.22

表9 中心复合试验设计及结果

Tab.9 Central composite experimental design and results

试验序号	坡口尺寸/mm	加热温度/℃	焊接进给速度/（mm·s^{-1}）	焊接进给量/mm	拉伸强度/MPa	焊缝宽度/mm	焊缝高度/mm
1	1.5	270	0.6	2.5	50.155 8	3.236 0	2.039 9
2	0	250	0.6	2.5	41.707 7	2.379 5	2.244 5
3	1.5	230	0.6	2.5	32.219 4	1.162 5	0.157 3
4	1.5	250	0.6	2	47.227 8	2.154 7	2.008 6
5	1.5	250	0.6	2	46.756 8	2.782 6	2.008 6
6	3.0	250	0.2	2	37.689 7	5.136 9	0.440 8
7	1.5	230	1.0	2	19.071 3	2.185 9	0.192 8
8	1.5	250	1.0	2.5	31.565 3	2.229 1	1.487 0
9	0	250	0.6	1.5	13.968 1	4.988 6	2.290 5
10	1.5	230	0.6	1.5	17.330 4	1.444 0	0.630 0
11	3.0	270	0.6	2.0	48.442 8	3.866 6	0.644 9
12	0	250	1.0	2.0	35.963 0	5.234 0	2.086 5
13	1.5	270	0.6	1.5	48.734 0	4.879 4	2.413 8
14	1.5	270	0.2	2.0	50.430 5	5.631 4	2.070 9
15	0	250	0.2	2.0	41.590 2	4.165 3	2.184 5
16	3.0	230	0.6	2.0	17.611 7	1.283 6	−0.435 6
17	1.5	250	0.6	2.0	43.578 6	2.912 3	2.008 6
18	1.5	250	0.6	2.0	49.782 5	2.412 4	2.008 6
19	3.0	250	0.6	2.5	23.712 5	1.611 8	0.580 0
20	0	270	0.6	2.0	50.141 9	5.436 2	2.442 5
21	1.5	250	1.0	1.5	45.542 8	3.616 2	1.702 8
22	1.5	250	0.6	2.0	45.123 6	2.567 5	2.008 6
23	1.5	230	0.2	2.0	15.592 5	1.199 6	0.163 8
24	1.5	250	0.2	1.5	26.043 4	4.953 8	2.342 8
25	1.5	250	0.2	2.5	49.720 2	1.416 6	2.239 6
26	3.0	250	0.6	1.5	44.915 9	3.046 8	−0.297 5
27	1.5	270	1.0	2.0	49.803 8	5.016 3	2.030 5
28	1.5	250	0.6	2.0	42.875 7	2.534 8	2.008 6
29	3.0	250	1.0	2.0	30.349 2	1.431 8	−0.331 6
30	0	230	0.6	2.0	13.734 2	1.607 9	1.019 2

注：此中心复合试验各因素的中心点、立方点和轴向点的取值范围都在训练神经网络初始数据范围之内。

表10 拉伸强度二次多项式模型的方差分析

Tab.10 Analysis of variance for the quadratic polynomial model of tensile strength

项目	平方和	d_f	均方差	p值
模型	4 541.11	14	324.37	<0.000 1
A	2.63	1	2.63	0.709 9
B	2 764.86	1	2 764.86	<0.000 1
C	6.41	1	6.41	0.562 6
D	88.27	1	88.27	0.044 1
AB	7.77	1	7.77	0.524 2
AC	0.73	1	0.73	0.843 9
AD	598.86	1	598.86	<0.000 1
BC	4.21	1	4.21	0.638 1
BD	45.34	1	45.34	0.136 2
CD	354.46	1	354.46	0.000 5
A^2	417.39	1	417.39	0.000 2
B^2	256.97	1	256.97	0.001 9
C^2	89.36	1	89.36	0.043 0
D^2	143.73	1	143.73	0.013 4
残差	274.28	15	18.29	—
失拟误差	241.57	10	24.16	0.081 1
纯误差	32.71	5	6.54	—
总离差	4 815.39	29	—	—

表11 焊缝宽度二次多项式模型的方差分析

Tab.11 Analysis of variance for the quadratic polynomial model of weld width

项目	平方和	d_f	均方差	p值
模型	60.49	14	4.32	<0.000 1
A	4.60	1	4.61	0.000 5
B	30.66	1	30.66	<0.000 1
C	0.65	1	0.65	0.121 0
D	9.89	1	9.89	<0.000 1
AB	0.39	1	0.39	0.223 2
AC	5.70	1	5.70	0.000 2
AD	0.34	1	0.34	0.249 5
BC	0.64	1	0.64	0.123 1
BD	0.46	1	0.46	0.184 9
CD	1.16	1	1.16	0.044 4
A^2	1.91	1	1.91	0.012 8
B^2	0.10	1	0.10	0.519 8
C^2	4.19	1	4.19	0.000 8
D^2	0.11	1	0.11	0.514 9
残差	3.60	15	0.24	—
失拟误差	3.24	10	0.32	0.055 4
纯误差	0.36	5	0.07	—
总离差	64.10	29	—	—

表12 焊缝高度二次多项式模型的方差分析

Tab.12 Analysis of variance for the quadratic polynomial model of weld height

项目	平方和	d_f	均方差	p值
模型	25.77	14	1.84	<0.000 1
A	11.34	1	113.19	<0.000 1
B	8.19	1	81.75	<0.000 1
C	0.43	1	4.30	0.055 7
D	0.01	1	0.09	0.764 7
AB	0.03	1	0.29	0.596 1
AC	0.11	1	1.13	0.303 6
AD	0.21	1	2.13	0.165 3
BC	0.001	1	0.01	0.914 3
BD	0.002	1	0.02	0.878 0
CD	0.003	1	0.03	0.861 1
A^2	3.33	1	3.33	<0.000 1
B^2	2.76	1	2.76	<0.000 1
C^2	0.36	1	0.36	0.077 2
D^2	0.04	1	0.04	0.534 7
残差	1.50	15	0.10	—
失拟误差	1.34	10	0.13	0.062 0
纯误差	0.16	5	0.03	—
总离差	27.27	29	—	—

从回归模型的3D响应曲面图（见图18）可以看出，当坡口尺寸为1.5 mm且与焊接进给量成反比关系时，可获得最大拉伸强度。在各因素中，加热温度对拉伸强度的正向影响最为显著，而焊接进给速度与进给量的影响相对较小。

从图19可以看出，坡口尺寸越大、加热温度越高，焊缝宽度越大；坡口尺寸与焊接进给速度在中间范围时焊缝宽度较小；焊接进给量越大，焊缝宽度反而越小。这些现象的原因已在前文给出。

从图20可以看出，坡口尺寸越小、加热温度越高，焊缝高度越高；与坡口尺寸和加热温度相比，焊接进给速度和焊接进给量对焊缝高度的影响不显著。

3.1.6 焊接工艺最优解

通过Design-Expert软件的Optimization模块，在保持自变量取值范围与试验一致的前提下，以拉伸强度最大、焊缝宽度和焊缝高度最小（高度下限为0）为目标进行多目标优化。优化结果（见表13）表明，最优工艺参数为坡口尺寸2.88 mm、加热温度252.56 ℃、焊接进给速度1 mm/s及焊接进给量1.5 mm。

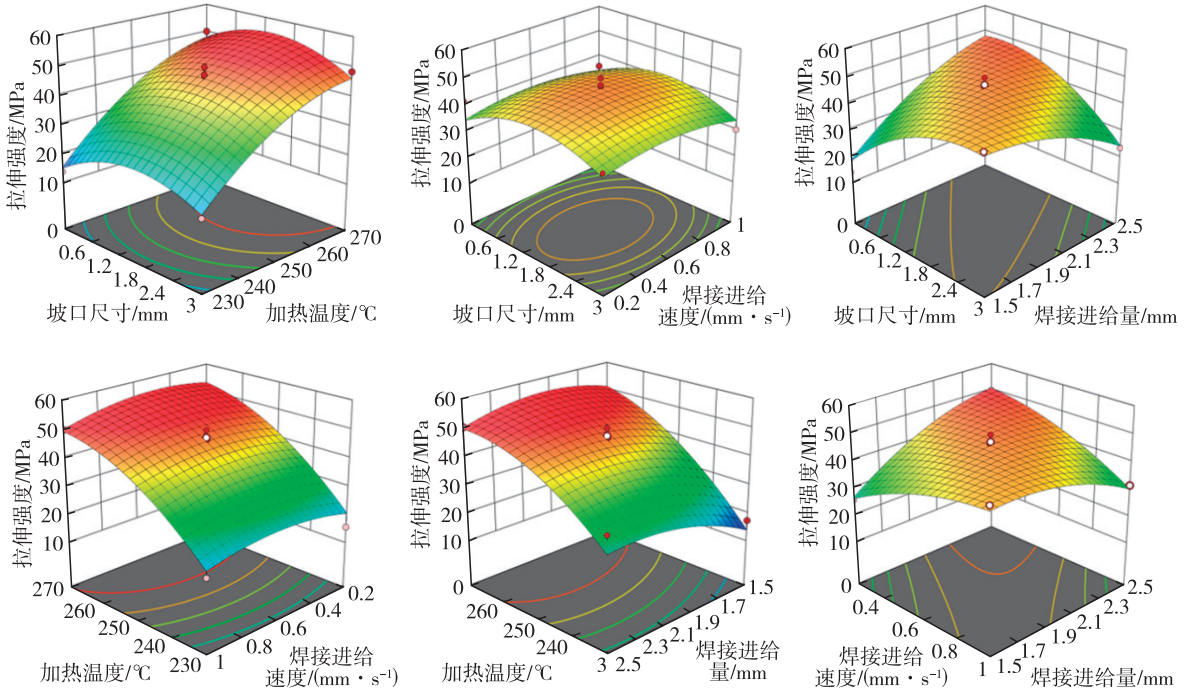


图18 拉伸强度交互效应响应曲面

Fig.18 Response surface of interaction effects for tensile strength

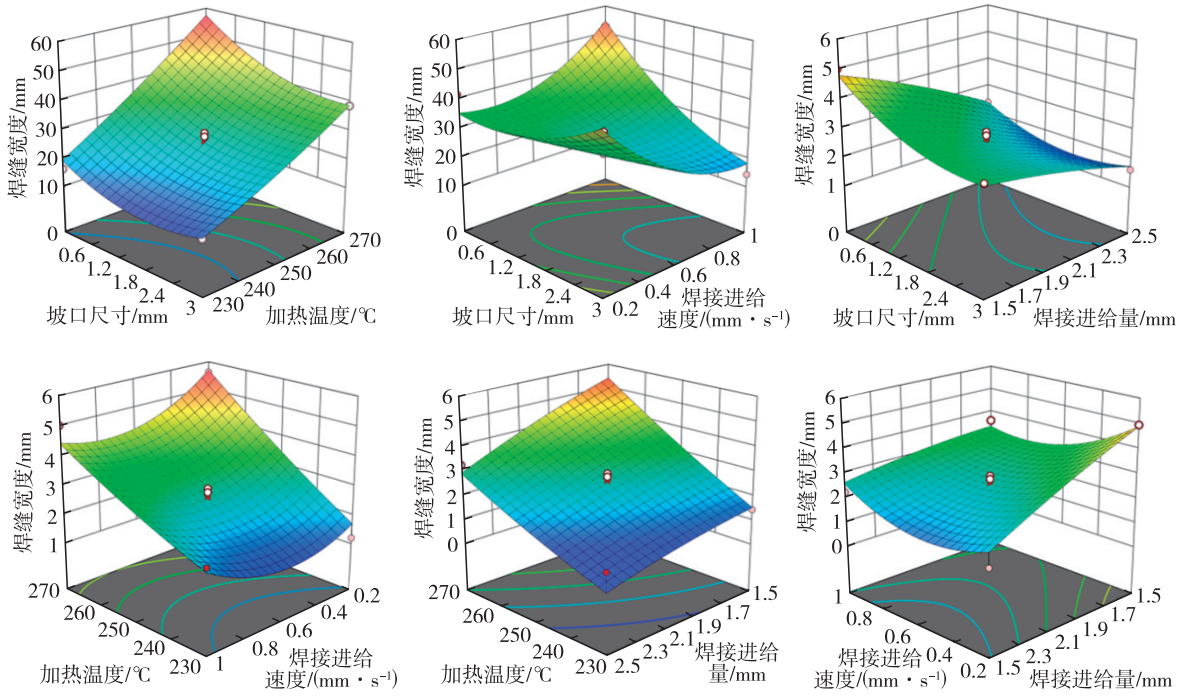


图19 焊缝宽度交互效应响应曲面

Fig.19 Response surface of interaction effects for weld width

3.2 微观分析

使用光学显微镜对断面进行观测，试样摆放方位与观察区域如图21所示。其中，区域1为断面中部，区域2为断面边缘，区域3为焊珠。

使用高清测量金相显微镜对断面进行观察，如图22所示。9组试验的断面分析显示，中部区域熔体流动紊乱且坑洼较多，而边缘区域则较为平坦且流动轨迹清晰[42]。这主要是由于中部熔体受挤压向两侧流动，带动边缘熔体向外移动所致。在坡口尺寸为3 mm的试样中，由于坡口较大、熔体填充不足，断面边缘出现明显高低起伏，暴露出本应处于观测区之外的焊珠结构。该现

象减小了有效焊接面积，并导致拉伸强度轻微　　下降。

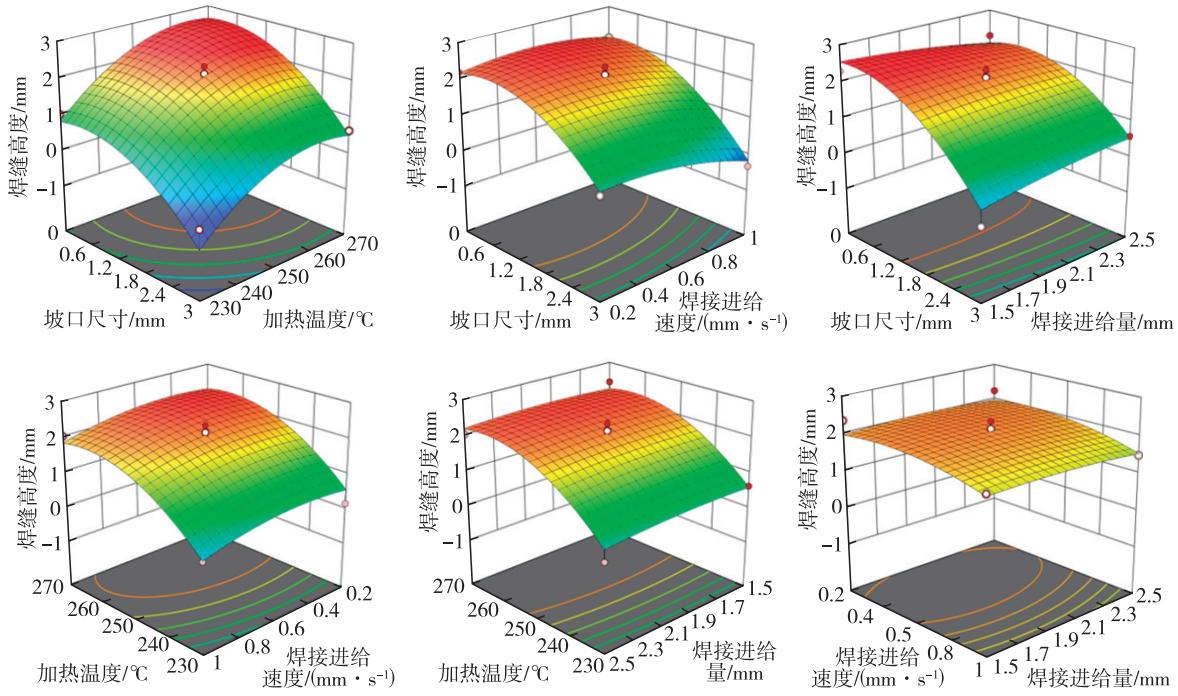


图20　焊缝高度交互效应响应曲面

Fig.20　Response surface of interaction effects for weld height

表13　最优试验方案

Tab.13　Optimal experimental scheme

项目	A	B	C	D	Y_1	Y_2	Y_3	期望值
1	2.81	252.56	1.00	1.50	50.43	2.09	0.00	0.959
2	2.81	252.58	1.00	1.50	50.43	2.09	0.00	0.959
3	2.82	252.62	0.99	1.50	50.43	2.09	0.00	0.959
4	2.83	252.71	0.98	1.50	50.45	2.09	0.00	0.958
5	2.84	252.71	0.98	1.50	50.43	2.09	0.00	0.958
6	2.85	252.75	0.97	1.50	50.43	2.10	0.00	0.958
7	2.82	252.95	0.99	1.51	50.43	2.10	0.00	0.958
8	2.86	252.82	0.96	1.50	50.43	2.11	0.00	0.958
9	2.83	253.06	1.00	1.52	50.43	2.11	0.00	0.958
10	2.86	252.87	0.95	1.50	50.43	2.11	0.00	0.957

结合9组试验的显微图像（见图23）与表5数据可知，随着温度的升高，断裂方式由脆性向塑性转变，分子链缠结更紧密，拉伸强度相应提高。试验6因焊接速度最慢、进给量最大，熔体流动层取向接近平行于焊缝面，故断面形貌表现平坦，呈现出一定特殊性[43]。

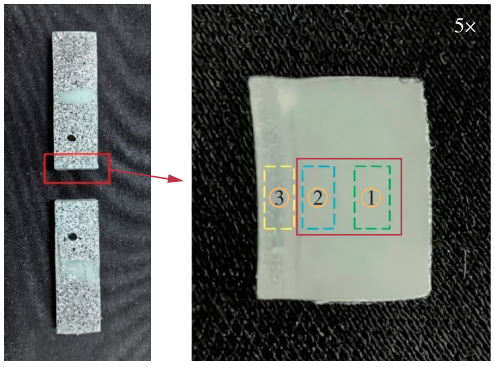
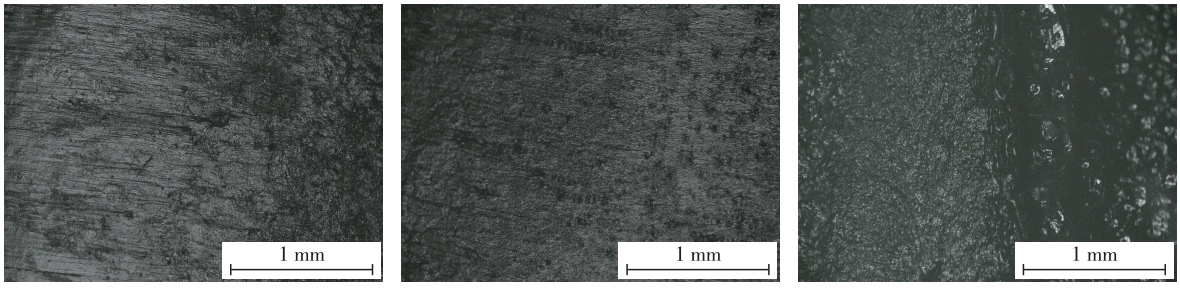
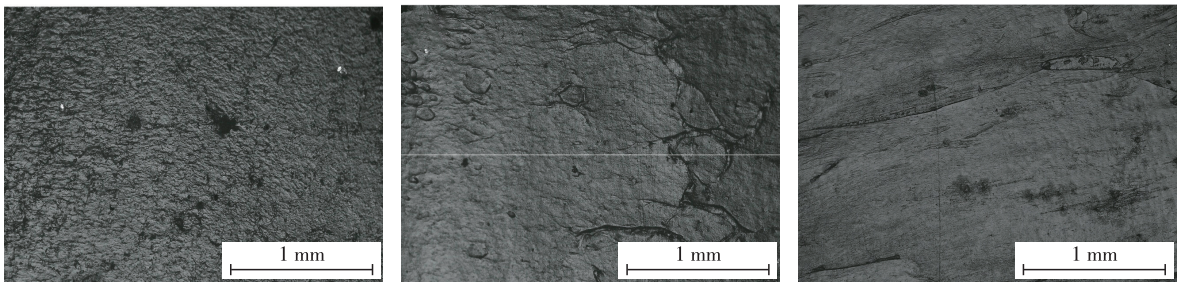


图21　显微区域示意

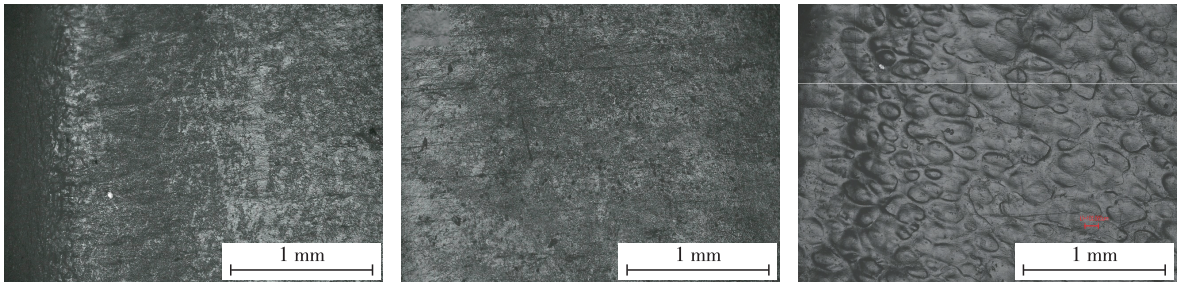
Fig.21　Schematic of microscopic region



（a）试验1　（b）试验2　（c）试验3



（d）试验4 （e）试验5 （f）试验6

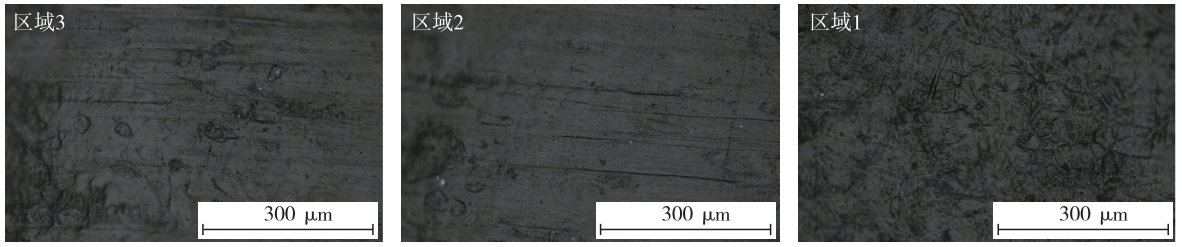


（g）试验7 （h）试验8 （i）试验9

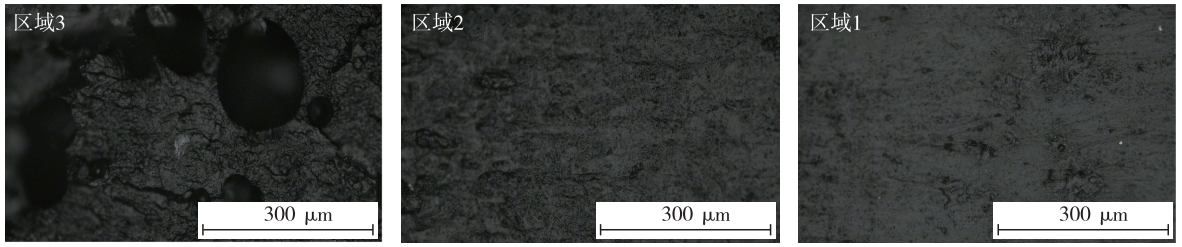
图22 焊缝断面微观结构 5×

Fig.22 Microstructure of weld cross-section 5×

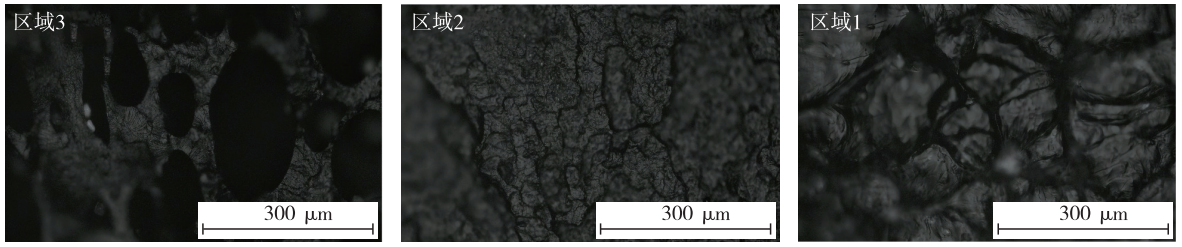
多数试验样品的焊珠都有较多气泡且外翻明显，说明焊珠与母材结合不紧密，导致拉伸强度下降。试验1和试验6中，焊珠宏观形式如图24所示，焊缝面延伸至焊珠边缘，且焊珠充分填补坡口，使得焊缝面积更大，从而增强了拉伸强度。



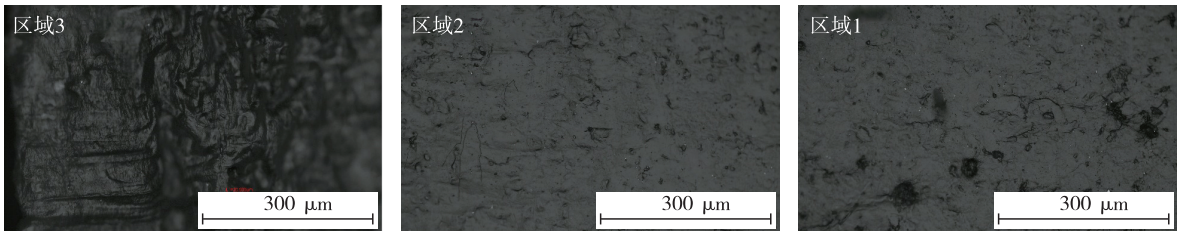
（a）试验1



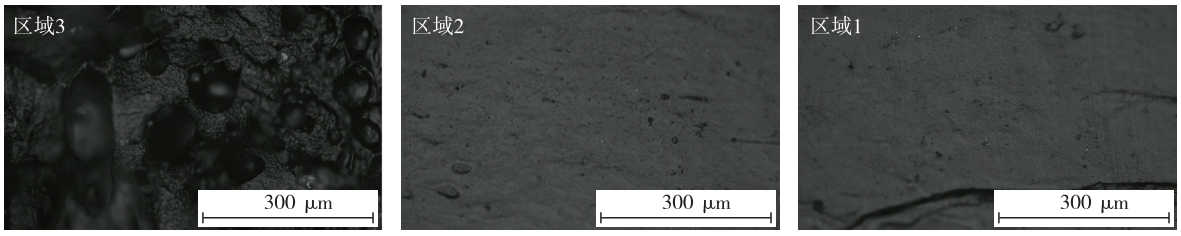
（b）试验2



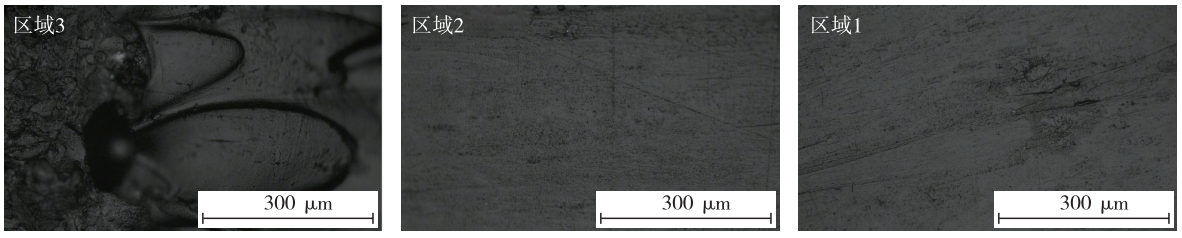
（c）试验3



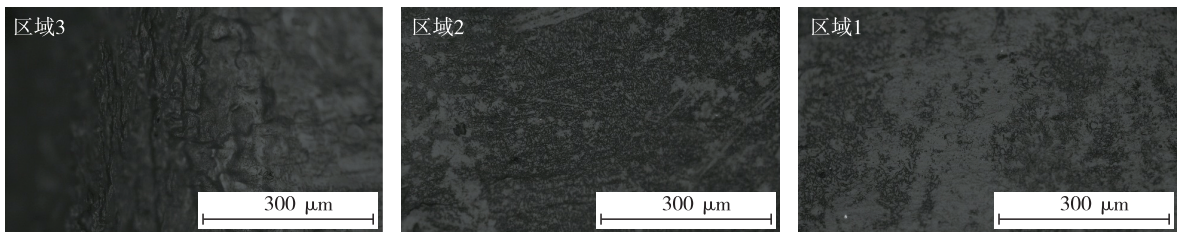
（d）试验4



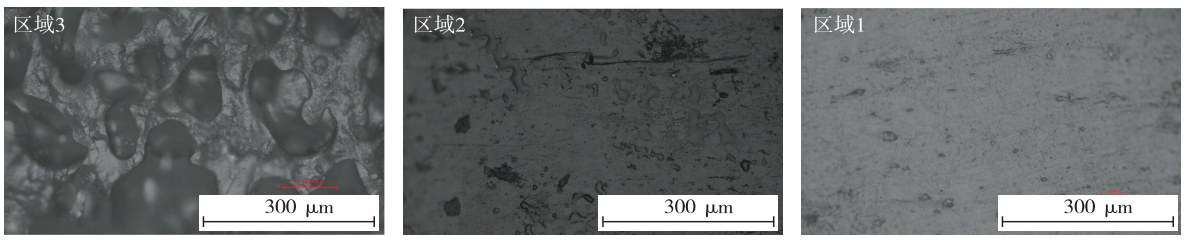
（e）试验5



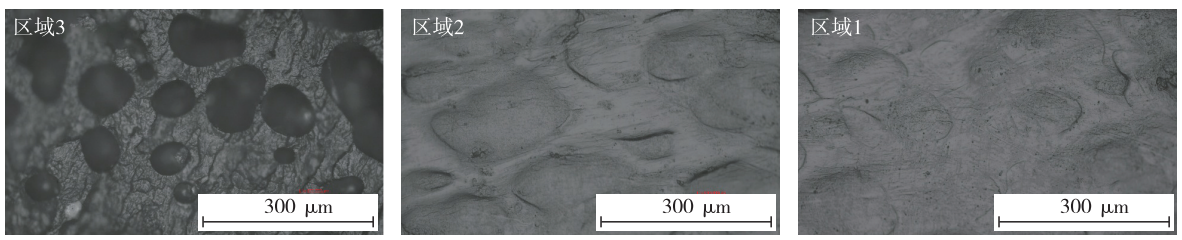
（f）试验6



（g）试验7



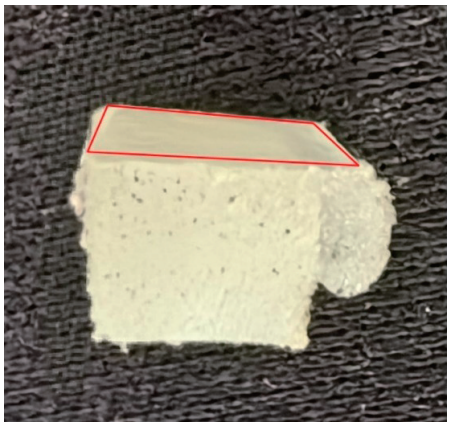
（h）试验8



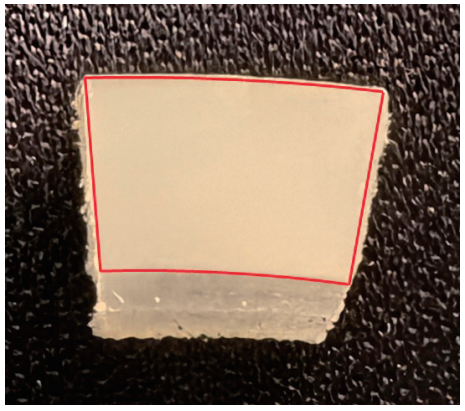
（i）试验9

图23　各样品不同位置微观结构　20×

Fig.23　Microstructure of different positions of each sample　20×



（a）截面



（b）断面

图24 样品断面与截面

Fig.24 Sample cross-section and longitudinal section

4 结论

文中围绕Ⅳ型储氢瓶塑料内胆的热熔焊接工艺，系统考察了坡口尺寸、加热温度、焊接进给速度与焊接进给量等关键工艺参数对焊缝力学性能与形貌特征的影响。通过正交试验、多指标分析与极差分析，结合宏观力学测试与微观结构观察，揭示了各参数对焊接质量的作用机制。主要结论如下。

（1）加热温度对焊接强度的影响最为显著，较高的温度有助于分子链扩散与缠结，从而提升接头强度与韧性。坡口尺寸影响熔体填充状态，尺寸过大会导致未焊透缺陷，降低有效结合面积。焊接进给量与焊接进给速度共同调控熔体流动与挤出行为，进而影响焊缝形貌与应力分布。

（2）通过建立响应面模型，确定了兼顾高强度与良好形貌的最优工艺参数组合：坡口尺寸2.88 mm、加热温度252.56 ℃、焊接进给速度1 mm/s、进给量1.5 mm。在此条件下，焊接接头拉伸强度约为50.43 MPa，焊缝形貌均匀且无明显应力集中。所建立的BP神经网络模型与二次多项式回归模型预测精度较高，为工艺优化提供了可靠工具。

（3）研究为大口径塑料内胆的热熔焊接工艺提供了系统的实验依据与理论指导，对提升Ⅳ型储氢瓶的制造质量与可靠性具有实际应用价值，并为后续开展焊接接头的疲劳性能与耐久性研究奠定了基础。

参考文献：

[1] 陈明和，胡正云，贾晓龙，等.Ⅳ型车载储氢气瓶关键技术研究进展[J].压力容器，2020，37（11）：39-50.
CHEN M H，HU Z Y，JIA X L，et al.Research progress on key technologies of type Ⅳ vehicle-mounted hydrogen storage vessel [J]. Pressure Vessel Technology，2020，37（11）：39-50.

[2] 刘雨薇，王修磊，查燕，等.Ⅳ型储氢瓶内胆滚塑成型设计尺寸一致性保持方法[J].压力容器，2023，40（11）：33-38.
LIU Y W，WANG X L，ZHA Y，et al. Method for maintaining the consistency of the design size of type Ⅳ hydrogen storage tank liner by rotational molding [J]. Pressure Vessel Technology，2023，40（11）：33-38.

[3] 王修磊，杨卫民，谢鹏程.高压大容量Ⅳ型储氢瓶内胆滚塑成型工艺及装备[J].压力容器，2022，39（12）：1-9.
WANG X L，YANG W M，XIE P C.Rotational molding process and equipment for high-pressure and large-capacity type Ⅳ hydrogen storage tank liner[J]. Pressure Vessel Technology，2022，39（12）：1-9.

[4] KIM M S，JEON H K，LEE K W，et al. Analysis of hydrogen filling of 175 liter tank for large-sized hydrogen vehicle [J]. Applied Sciences，2022，12（10）：4856.

[5] MURUGAN A，HUU M D，BACQUART T，et al. Measurement challenges for hydrogen vehicles [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2019，44（35）：19326-19333.

[6] HU D H，SHAO W D，LU D G，et al. Design and material optimization of carbon fiber composite winding reinforcement layer for vehicle Type-Ⅳ hydrogen storage vessels [J]. Journal of Energy Storage，2024，100（Part A）：113459.

[7] EKO A J，EPAARACHCHI J，JEWEWANTHA J，et al. A review of type Ⅳ composite overwrapped

pressure vessels[J].International Journal of Hydrogen Energy,2025,109:551-573.

[8] ABDALLA A M,HOSSAIN S,NISFINDY O B,et al. Hydrogen production,storage,transportation and key challenges with applications: A review [J]. Energy Conversion and Management,2018,165:602-627.

[9] ROHIT G,SANTOSH M S,KUMAR M N,et al. Numerical investigation on structural stability and explicit performance of high-pressure hydrogen storage cylinders [J]. International Journal of Hydrogen Energy,2023,48(14):5565-5575.

[10] 郑津洋,别海燕,徐平,等.车用纤维全缠绕高压储氢气瓶标准研究[J].压力容器,2007,24(11):48-56.
ZHENG J Y,BIE H Y,XU P,et al.Investigation on standards of fully-wrapped composite tanks for on-board storage of high pressure hydrogen [J]. Pressure Vessel Technology,2007,24(11):48-56.

[11] UEDA M,ICHIHARA N,YOKOZEKI T,et al. Continuum damage mechanics behavior of a carbon-fiber-reinforced epoxy composite fabricated by filament winding with different material and manufacturing conditions[J].Mechanics of Advanced Materials and Structures,2024,31(17):3959-3969.

[12] RAFIEE R,SALEHI A.Estimating the burst pressure of a filament wound composite pressure vessel using two-scale and multi-scale analyses[J].Mechanics of Advanced Materials and Structures,2023,30(13):2668-2683.

[13] ZHOU G,NIU Y K,ZHAO J L,et al.Multi-objective optimization design of NPR protection shell for hydrogen storage tank [J]. Mechanics of Advanced Materials & Structures,2025,32(11):1-14.

[14] DONG C F,LIU Y T,LI J P,et al. Hydrogen permeability of polyamide 6 used as liner material for type Ⅳ on-board hydrogen storage cylinders [J]. Polymers,2023,15(18):3715.

[15] RIVARD E,TRUDEAU M,ZAGHIB K. Hydrogen storage for mobility: A review [J]. Materials,2019,12(12):1973.

[16] 杨超,张来明,江一凡,等.Ⅳ型储氢气瓶塑料内胆材料厚度对渗透性能的影响及渗透参数计算方法研究[J].压力容器,2025,42(1):54-60.
YANG C,ZHANG L M,JIANG Y F,et al.Study on the effect of polymer liner thickness on hydrogen permeation performance and calculation methods for permeation parameters in type Ⅳ hydrogen storage cylinders [J]. Pressure Vessel Technology,2025,42(1):54-60.

[17] 李晋,赵小寇,梁建国,等.碳纤维复合材料Ⅳ型储氢气瓶结构设计及应力仿真研究[J].压力容器,2025,42(3):29-36.
LI J,ZHAO X K,LIANG J G,et al.Study on structural design and stress simulation of carbon fiber composite type Ⅳ hydrogen storage cylinder[J].Pressure Vessel Technology,2025,42(3):29-36.

[18] 王云峰,王哲,徐双庆,等.高压Ⅳ型储氢气瓶充氢工艺分析[J].流体机械,2024,52(10):24-32.
WANG Y F,WANG Z,XU S Q,et al. Numerical analysis of hydrogen charging process for the high-pressure type Ⅳ hydrogen storage cylinder[J]. Fluid Machinery,2024,52(10):24-32.

[19] 杜荣华,付锦锋,汤小辉.ABS材料的热板焊接性能及其影响因素研究[J].广州化工,2024,52(23):174-177.
DU R H,FU J F,TANG X H. Hot plate welding performance of ABS and its influence factors [J]. Guangzhou Chemical Industry,2024,52(23):174-177.

[20] ALKAKI S S,KAMAN M O.Mechanical properties of electro and butt fusion welded high-density polyethylene pipes [J]. Materials Testing,2019,61(4):337-343.

[21] MATHIYAZHAGAN K,SINGH K K,SIVABHARATHI V. Modeling the interrelationship between the parameters for improving weld strength in plastic hot plate welding: A dematel approach [J]. Journal of Elastomers & Plastics,2019,52(2):117-141.

[22] BUCKNALL C B,DRINKWATER I C,SMITH G R. Hot plate welding of plastics: Factors affecting weld strength[J].Polymer Engineering and Science,1980,20(6):432-440.

[23] DAI H B,PENG J. The effects of welded joint characteristics on its properties in HDPE thermal fusion welding[J].Modern Physics Letters B,2017,31(15):1750185.

[24] BERGSTROM G,NILSSON S,LINDQVIST L. The influence from pipe surface,weld beads and protective skins on long term failure times for PE butt fusion joints[M].Italy:Plastics Pipes,2004.

[25] MIKULA J,HUTAŘ P,NEZBEDOVÁ E,et al. On crack propagation in the welded polyolefin pipes with and without the presence of weld beads[J].Materials & Design,2015,87:95-104.

[26] CAI Z Q,DAI H B,FU X B.Investigation on the hot melting temperature field simulation of HDPE water supply pipeline in gymnasium pool [J]. Results in

Physics，2018，9：1050-1056.

[27] WAŁĘSA K，MALUJDA I，GÓRECKI J，et al. The temperature distribution during heating in hot plate welding process [J]. MATEC Web of Conferences，2019，254：02033.

[28] LIU S J，CHENG H F. The influence of interface geometry on the joint strengths of hot plate welded composites [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites，2010，29(4)：497-509.

[29] EL-BAGORY T M A A，SALLAM H E M，YOUNAN M Y A. Effect of strain rate，thickness，welding on the J-R curve for polyethylene pipe materials [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics，2014，74：164-180.

[30] 杨小涵，张浩，陈瑞，等. 聚酰胺6树脂及纤维多功能改性研究进展[J]. 中国塑料，2025，39(12)：151-155.
YANG X H，ZHANG H，CHEN R，et al. Research progress in modification of polyamide 6 resin and fibers[J].China Plastics，2025，39(12)：151-155.

[31] KIS D I，KÓKAI E. A review on the factors of liner collapse in type Ⅳ hydrogen storage vessels [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2024，50(Part A)：236-253.

[32] BARTHELEMY H，WEBER M，BARBIER F. Hydrogen storage：recent improvements and industrial perspectives [J]. International Journal of Hydrogen Energy，2017，42(11)：7254-7262.

[33] IRANI R S. Hydrogen storage：high-pressure gas containment [J]. MRS Bulletin，2002，27(9)：680-682.

[34] CHEN Z，GUAN M D，CHENG Y W，et al. Boehmite-enhanced poly(vinylidene fluoride - co - hexafluoropropylene)/polyacrylonitrile (PVDF-HFP/PAN) coaxial electrospun nanofiber hybrid membrane：a superior separator for lithium-ion batteries [J]. Advanced Composites and Hybrid Materials，2023，6(6)：219.

[35] SAHA S，BHOWMICK A K. Computer simulation of thermoplastic elastomers from rubber-plastic blends and comparison with experiments[J]. Polymer，2016，103：233-242.

[36] UNNIKRISHNAN V，ZABIHI O，LI Q X，et al. Multifunctional PA6 composites using waste glass fiber and green metal organic framework/graphene hybrids [J]. Polymer Composites，2022，43(9)：5877-5893.

[37] AWADI W，ZIDI M，CHIEKH M B. An experimental-based thermal prediction model for butt fusion welding of polymer pipes [J]. Polymer Engineering and Science，2024，64(8)：3560-3574.

[38] MATHKOOR M S，JASSIM R J，AL-SABUR R. Application of pattern search and genetic algorithms to optimize hdpe pipe joint profiles and strength in the butt fusion welding process [J]. Journal of Manufacturing and Materials Processing，2024，8(5)：187.

[39] NOVAKOVIC B，KASHKOUSH M，ELMARAGHY H. Thermal expansion of high-density polyethylene in hot plate welding applications [J]. Polymer Engineering and Science，2023，63(9)：3173-3183.

[40] BELAZIZ A，MOHAMED M. Experimental study of the weld bead zones of a high-density polyethylene pipe (HDPE) [J]. Journal of Failure Analysis and Prevention，2018，18(3)：667-676.

[41] 李翔宇，苏子涵，梁民族. 石墨烯改性水性聚氨酯胶体冲击响应与电磁波吸收特性[J]. 弹道学报，2025，37(3)：1-7.
LI X Y，SU Z H，LIANG M Z. Impact response and electromagnetic wave characteristics of graphene-modified water-based polyurethane colloids [J].Journal of Ballistics，2025，37(3)：1-7.

[42] YOO J H，CHOI S，NAM J，et al. Numerical analysis of the heat transfer and fluid flow in the butt-fusion welding process [J]. Korea-Australia Rheology Journal，2017，29(1)：37-49.

[43] POKHAREL P，KIM Y，CHOI S. Microstructure and mechanical properties of the butt joint in high density polyethylene pipe[J]. International Journal of Polymer Science，2016(6)：6483295.

作者简介：乔石磊(1984)，男，研究方向为轻量化设计与分析，通信地址：200090 上海市杨浦区河间路 1280 号 21 楼中船恒宇能源(上海)有限公司，E-mail：cssc_qiaosl@163.com。

通信作者：顾付伟(1991)，男，讲师，硕士研究生导师，主要从事化工过程装备结构强度分析与失效分析、先进轻量化储氢容器的线性-结构-工艺一体化分析设计与轻量化点阵夹层结构的分析、设计、制备及其等效理论等方面的工作，通信地址：213001 江苏省常州市武进区中吴大道 1801 号江苏理工学院，E-mail：gufuwei12321@163.com。

本文引用格式：
乔石磊，顾付伟. Ⅳ型气瓶单侧焊珠塑料内胆热熔焊接工艺及力学性能研究[J]. 压力容器，2026，43(3)：25-41.
QIAO Shilei，GU Fuwei. Study on hot melt welding process and mechanical properties of plastic liner with single-side weld bead for type Ⅳ cylinder[J]. Pressure Vessel Technology，2026，43(3)：25-41.