双层热成形钢凸焊工艺参数正交试验优化

吕海波　于晓丰　刘春鹏　姜峰

（吉林化工大学机电工程学院，吉林 132022）

摘要：采用电储能凸焊将双层高强热成形钢与螺母进行凸焊连接。利用正交试验法研究不同工艺参数对热成形钢凸焊接头熔核尺寸与扭矩等性能的影响，根据试验结果进行极差分析与综合加权评分，得出最优凸焊工艺参数。结果表明，凸焊最优工艺参数为电极压力0.3 MPa，焊接时间1.1 s，焊接电压320 V，冷却时间0.5 s。此工艺条件下焊接接头螺母侧热影响区分为粗晶区和细晶区，组织以等轴铁素体为主；热成形钢侧热影响区主要为完全淬火区、不完全淬火区和回火区，其中完全淬火区的组织为粗大的板条马氏体，不完全淬火区为马氏体、铁素体和贝氏体混合组织，回火区组织主要为回火马氏体。通过对接头断口三维形貌分析得出，上侧螺母与热成形钢间凸焊接头断裂模式为韧脆混合断裂，下侧热成形钢间凸焊接头断裂模式以脆性断裂为主。

关键词：热成形钢　凸焊　正交试验

中图分类号：TG441　　**文献标志码：**B　　**DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20250347

Orthogonal Experiment Optimization of Resistance Projection Welding Process Parameters for Double-Layer Hot-Formed Steel

Lü Haibo, Yu Xiaofeng, Liu Chunpeng, Jiang Feng

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Jilin University of Chemical Technology, Jilin 132022)

Abstract: Capacitor Discharge Welding (CDW) was utilized to perform projection welding between double-layer high-strength hot-formed steel and nuts. An orthogonal experimental design was adopted to systematically investigate the influence of various process parameters on the performance of the projection welding joints, with particular emphasis on nugget size and torque strength. Based on the experimental results, optimal welding parameters were identified through range analysis and comprehensive weighted scoring. The optimal conditions were determined as follows: electrode pressure of 0.3 MPa, welding time of 1.1 s, welding voltage of 320 V, and cooling time of 0.5 s. Under these parameters, the heat-affected zone (HAZ) on the nut side is subdivided into coarse-grain and fine-grain regions, with a microstructure primarily composed of equiaxed ferrite. On the hot-formed steel side, the HAZ consists of a fully quenched zone, a partially quenched zone, and a tempered zone. The fully quenched zone exhibits a coarse lamellar martensitic microstructure, whereas the partially quenched zone features a mixed microstructure comprising martensite, ferrite, and bainite. The tempered zone is predominantly constituted by tempered martensite. Three-dimensional fracture morphology analysis reveals that the fracture mode of the projection welding joint between the upper nut and the hot-formed steel is characterized by a ductile-brittle mixed fracture, while the fracture mode in the lower-layer hot-formed steel joints is primarily brittle in nature.

Key words: Hot-formed steel, Projection welding, Orthogonal experiment

1　前言

焊接作为汽车制造中金属构件连接的核心工艺，其技术水平直接关系到车身结构强度、动力系统的可靠性以及关键部件的使用寿命。据统计，在汽车制造过程中，焊接环节约占整体能耗的

作者简介：吕海波（1981—），男，硕士学位，高级工程师，研究方向为焊接工艺设计与合金制备。

基金项目：吉林省教育厅科学技术研究项目（JJKH20240319CY）。

参考文献引用格式：

吕海波，于晓丰，刘春鹏，等. 双层热成形钢凸焊工艺参数正交试验优化[J]. 汽车工艺与材料，2026(8): 14-21.

LÜ H B, YU X F, LIU C P, et al. Orthogonal Experiment Optimization of Resistance Projection Welding Process Parameters for Double-Layer Hot-Formed Steel[J]. Automobile Technology & Material, 2026(8): 14-21.

25%[1-3]。在各类焊接方法中,凸焊技术能够具备多点同步焊接的高效性、能量集中的稳定性、良好的成本优势,是支撑汽车产业高质量发展的重要工艺支柱[4-6]。在全球“双碳”目标与汽车工业智能化转型的双重驱动下,轻量化与高安全性已成为汽车制造技术发展的核心方向,高强热成形钢则凭借其高抗拉强度、优异的碰撞能量吸收能力以及显著的轻量化潜力,在汽车制造领域得到广泛应用。车身结构设计中,热成形钢双层板结构由于兼具轻量化效果与结构承载能力,常被用于车身立柱、底盘、车门框架等关键部位,而这些部件通常通过凸焊工艺与其他零部件连接,因此双层板凸焊接头的质量直接影响整车的安全性与耐久性[7-9]。然而,高强钢因其高碳当量和淬硬性特点,在传统工频或中频凸焊工艺中面临一系列技术瓶颈,传统凸焊工艺因热输入时间较长,易导致热影响区(Heat Affected Zone,HAZ)软化、涂层汽化飞溅、螺纹损伤等问题,不仅降低了生产效率,也增加了制造成本[10-11]。

相比于传统工频或中频凸焊,储能凸焊为解决上述难题提供了新思路。该工艺在充电阶段预先储存电能,施焊时瞬时释放,避免了传统焊接设备长时间连续工作带来的能量浪费,同时,由于其焊接脉冲能量集中、作用时间短,可使焊接接头金属快速、均匀熔化,有效减少焊接变形与裂纹等缺陷,从而提升焊接质量[12]。

现有研究多聚焦于焊接电流、焊接时间等单一工艺参数对焊接性能的影响,缺乏对多参数协同作用的系统探究,而针对双层板凸焊工艺的研究更是鲜有报道[13-15]。然而,在凸焊实际施焊过程中,焊接时间、焊接压力、冷却时间等参数均对焊接接头质量存在显著影响,若采用全因子试验法对各参数组合进行全面验证,将面临试验量大、时间成本与经济成本过高的问题,而正交试验法作为一种高效的试验设计方法,可在保障试验精度的前提下大幅减少试验数量,显著提升工艺参数优化效率[16-17]。

基于以上研究背景及当前研究中的不足,本文以铝镇静钢焊接螺母与双层高强热成形钢Usibor13000凸焊为研究对象,采用电容储能式凸焊机进行凸焊连接,通过正交试验法设计工艺参数,结合对接头组织与性能的分析,探究了高强钢Usibor13000螺母凸焊的储能工艺特性。

2　材料、设备及方法

2.1　材料、设备

试验所选中凸焊材料为Usibor1300热成形钢板,厚度为1.5 mm。凸焊螺母采用铝镇静钢标准件,材质牌号为SWRCH15A,热成形高强钢板和凸焊螺母的化学成分如表1所示。

表1　热成形钢和焊接螺母的化学成分(质量分数)　%

材料	元素							
	Al	C	Si	Mn	P	S	Cr	B
Usibor1300		0.25	0.35	1.4			0.3	0.005
凸焊螺母	0.05	0.16	0.06	0.5	0.010	0.015		

焊接设备为DR-30000 J型储能电阻凸焊机,设备如图1所示,主要包括加压系统、冷却系统、焊接电极等。

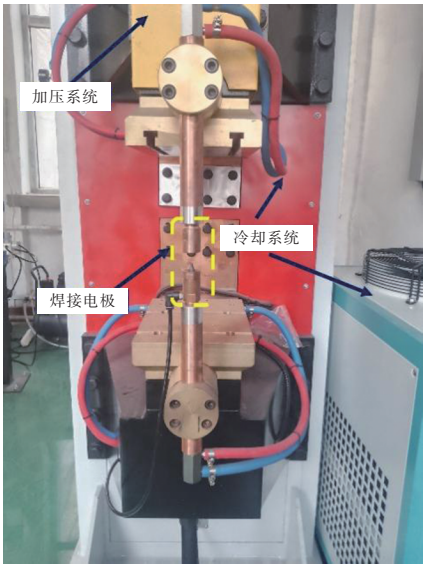


图1　DR-30000 J型储能电阻凸焊机

2.2　工艺方案

采用正交试验方法,研究不同工艺参数对焊接接头的熔核直径与抗扭强度的影响。选取电极压力(*A*)、焊接时间(*B*)、焊接电压(*C*)、冷却时间(*D*)4种工艺参数作为试验因素,每个因素取4个水平展开试验,最终试验因素水平如表2所示。

表2 正交实验因素水平表

水平	参数			
	电极压力/MPa	焊接时间/s	焊接电压/V	冷却时间/s
1	0.20	1.0	300	0.4
2	0.25	1.1	310	0.5
3	0.30	1.2	320	0.6
4	0.35	1.3	330	0.7

2.3 性能测试

焊接后的试样分别进行了熔核直径的测量以及扭矩的测试。扭矩的测试选用TWD-200型号的专用扭矩扳手，量程范围为20~200 N·m，分辨率为0.1 N·m，测量精度为1%。

3 试验结果与分析

表3为正交试验的试验结果，对每组试样分别进行了接头熔核尺寸的测量和扭矩的测试，表中D_1为上侧螺母与热成形板间接头的熔核直径，D_2为下侧热成形板间接头的熔核直径，N_1为上侧螺母与热成形板间接头的抗扭强度，N_2为下侧热成形板间接头的抗扭强度。

表3 正交试验结果

编号	A	B	C	D	D_1/mm	D_2/mm	N_1/N·m	N_2/N·m
1	1	1	1	1	2.95	1.01	110.2	41.5
2	1	2	2	2	3.67	1.56	129.8	50.2
3	1	3	3	3	4.19	1.64	132.6	53.6
4	1	4	4	4	3.88	1.48	125.9	48.8
5	2	1	2	3	4.01	1.25	123.2	47.7
6	2	2	1	4	3.08	1.13	129.1	43.1
7	2	3	4	1	3.09	1.21	122.5	46.5
8	2	4	3	2	4.33	1.76	144.9	55.9
9	3	1	3	4	4.95	2.03	130.8	51.1
10	3	2	4	3	4.32	1.76	135.6	54.1
11	3	3	1	2	3.81	1.37	122.8	46.7
12	3	4	2	1	3.99	1.33	145.1	55.6
13	4	1	4	2	3.99	1.68	149.5	51.2
14	4	2	3	1	4.85	1.60	155.9	60.8
15	4	3	2	4	4.06	1.52	126.8	45.6
16	4	4	1	3	3.95	1.37	108.9	40.8

表4~表7所示为熔核直径与抗扭强度的极差分析结果。其中K_1、K_2、K_3和K_4分别代表因素A、B、C、D对应的水平1、2、3、4之和，k_1、k_2、k_3、k_4分别为K_1、K_2、K_3、K_4的算术平均值，R为极差[18]。

表4 熔核直径D_1极差分析 m

因素	A	B	C	D
K_1	14.69	15.9	13.79	14.88
K_2	14.51	15.92	15.73	15.8
K_3	17.07	15.15	18.32	16.47
K_4	16.85	16.15	15.28	15.97
k_1	3.67	3.98	3.45	3.72
k_2	3.63	3.98	3.93	3.95
k_3	4.27	3.79	4.58	4.12
k_4	4.21	4.04	3.82	3.99
R	0.64	0.25	1.13	0.40

表5 熔核直径D_2极差分析 m

因素	A	B	C	D
K_1	5.694	5.967	4.875	5.148
K_2	5.343	6.045	5.655	6.357
K_3	6.474	5.733	7.02	6.006
K_4	6.162	5.928	6.123	6.162
k_1	1.42	1.49	1.22	1.29
k_2	1.34	1.51	1.41	1.59
k_3	1.62	1.43	1.76	1.50
k_4	1.54	1.48	1.53	1.54
R	0.28	0.08	0.54	0.30

表6 抗扭强度N_1极差分析 N·m

因素	A	B	C	D
K_1	498.5	513.7	471	533.7
K_2	519.7	550.4	524.9	547
K_3	534.3	504.7	564.2	500.3
K_4	541.1	524.8	533.5	512.6
k_1	124.63	128.43	117.75	133.43
k_2	129.93	137.60	131.23	136.75
k_3	133.58	126.18	141.05	125.08
k_4	135.28	131.20	133.38	128.15
R	10.65	11.43	23.30	11.68

表7　抗扭强度N_2极差分析　　N·m

因素	A	B	C	D
K_1	194.1	191.5	172.1	204.4
K_2	193.2	208.2	199.1	204
K_3	207.5	192.4	221.4	196.2
K_4	198.4	201.1	200.6	188.6
k_1	48.53	47.88	43.03	51.10
k_2	48.30	52.05	49.78	51.00
k_3	51.88	48.10	55.35	49.05
k_4	49.60	50.28	50.15	47.15
R	3.58	4.18	12.33	3.95

根据表4~表7极差分析结果可以看出,各因素对熔核直径D_1的影响大小顺序为$C>A>D>B$(焊接电压>电极压力>冷却时间>焊接时间),最佳组合为$A_3B_4C_3D_3$,即电极压力为0.3 MPa,焊接时间为1.3 s,焊接电压为320 V,冷却时间为0.6 s;各因素对熔核直径D_2的影响大小顺序为$C>D>A>B$(焊接电压>冷却时间>电极压力>焊接时间),最佳组合为$A_3B_2C_3D_2$,即电极压力为0.30 MPa,焊接时间为1.1 s,焊接电压为320 V,冷却时间为0.5 s;各因素对抗扭强度N_1的影响大小顺序为$C>D>B>A$(焊接电压>冷却时间>焊接时间>电极压力),最佳组合为$A_4B_2C_3D_2$,即电极压力为0.35 MPa,焊接时间为1.1 s,焊接电压为320 V,冷却时间为0.5 s;各因素对抗扭强度N_2的影响大小顺序为$C>B>D>A$(焊接电压>焊接时间>冷却时间>电极压力),最佳组合为$A_3B_2C_3D_1$,即电极压力为0.3 MPa,焊接时间为1.1 s,焊接电压为320 V,冷却时间为0.4 s。

在凸焊工艺中,熔核直径直接决定着接头的力学性能,而接头强度则是熔核直径达到工艺要求的综合体现,因此,需将二者结合分析,才能对焊接质量进行全面评价。若熔核直径过小,易导致未熔合、冷焊等缺陷,反之,若熔核直径过大,则可能引发飞溅、烧穿或热影响区过大等缺陷[19]。因而本试验采用综合加权平均法进一步优化参数[20],将熔核直径$D_1(Y_1)$与熔核直径$D_2(Y_2)$评分权重设为0.2,抗扭强度$N_1(Y_3)$与抗扭强度$N_2(Y_4)$指标评分权重设为0.3。由此可得,指标综合评分$Y_Z=(Y_1-Y_{1min})\times100\times0.2/(Y_{1max}-Y_{1min})+(Y_2-Y_{2min})\times100\times0.2/(Y_{2max}-Y_{2min})+(Y_3-Y_{3min})\times100\times0.3/(Y_{3max}-Y_{3min})+(Y_4-Y_{4min})\times100\times0.3/(Y_{4max}-Y_{4min})$。最终正交试验结果分析如表8、表9所示。由表可知,综合熔核尺寸与扭矩4个指标,各因素对接头性能影响的大小顺序为$C>A>B>D$(焊接电压>电极压力>焊接时间>冷却时间),最佳工艺参数为$A_3B_2C_3D_2$,即电极压力为0.3 MPa,焊接时间为1.1 s,焊接电压为320 V,冷却时间为0.5 s。

表8　综合评分正交试验结果

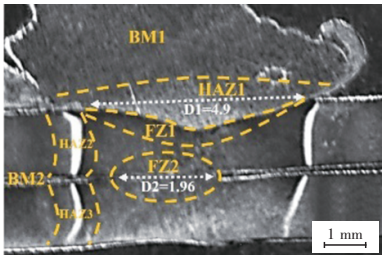
编号	A	B	C	D	D_1/mm	D_2/mm	N_1/N·m	N_2/N·m	综合评分
1	1	1	1	1	2.95	1.01	110.2	41.5	2.95
2	1	2	2	2	3.67	1.56	129.8	50.2	3.67
3	1	3	3	3	4.19	1.64	132.6	53.6	4.19
4	1	4	4	4	3.88	1.48	125.9	48.8	3.88
5	2	1	2	3	4.01	1.25	123.2	47.7	4.01
6	2	2	1	4	3.08	1.13	129.1	43.1	3.08
7	2	3	4	1	3.09	1.21	122.5	46.5	3.09
8	2	4	3	2	4.33	1.76	144.9	55.9	4.33
9	3	1	3	4	4.95	2.03	130.8	51.1	4.95
10	3	2	4	3	4.32	1.76	135.6	54.1	4.32
11	3	3	1	2	3.81	1.37	122.8	46.7	3.81
12	3	4	2	1	3.99	1.33	145.1	55.6	3.99
13	4	1	4	2	3.99	1.68	149.5	51.2	3.99
14	4	2	3	1	4.85	1.60	155.9	60.8	4.85
15	4	3	2	4	4.06	1.52	126.8	45.6	4.06
16	4	4	1	3	3.95	1.37	108.9	40.8	3.95

表9　综合评分极差分析

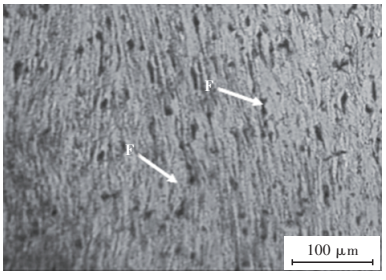
因素	A	B	C	D
K_1	147.75	171.01	72.14	176.86
K_2	151.33	221.29	181.82	217.74
K_3	229.88	154.60	293.02	176.05
K_4	212.25	194.31	194.23	170.56
k_1	36.94	42.75	18.03	44.22
k_2	37.83	55.32	45.45	54.43
k_3	57.47	38.65	73.25	44.01
k_4	53.06	48.58	48.56	42.64
R	20.53	16.67	55.22	11.80

依据正交试验结果,采用电极压力为0.3 MPa,焊接时间为1.1 s,焊接电压为320 V,冷却时间为0.5 s最佳工艺方案进行施焊,焊接接头的组织形貌如图2所示。由图2a接头宏观组织形

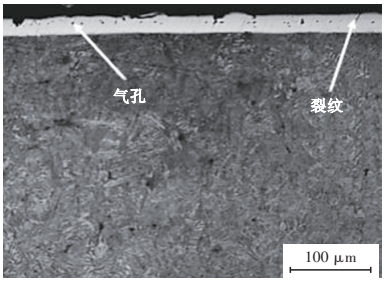
貌可以看出，焊接接头熔核直径和熔核深度分别为 4.9 mm、1.96mm，焊接熔核无裂纹、气孔等缺陷。凸焊接头受焊接热循环温度影响主要分为熔核区（Fusion Zone，FZ）、螺母侧热影响区（HAZ_1）和热成形板侧热影响区（HAZ_2）。图 2b~图 2c 为凸焊螺母和热成形钢母材微观形貌，由图 2b 可以看出螺母母材组织主要由长条状的铁素体和珠光体组成；热成形钢母材微观形貌如图 2c 所示，组织主要由马氏体组成，为防止钢板在热成形过程中发生氧化，在板材表面涂有一层 Al-Si 涂层，该涂层主要通过热浸镀工艺成形，典型 Al-Si 涂层的铝含量为 90%，硅含量为 10%[21-22]；在焊接过程中，由于涂层直接受到螺母凸点的挤压作用，且其熔点较低，会先发生熔化，部分涂层在高温条件下气化，另一部分熔化后在电极压力作用下被挤向凸点两侧，形成内部飞溅，仅极少量的铝、硅元素扩散进入焊接接头，因此该涂层对接头的显微组织及力学性能影响较小[23]，由图可以看出涂层内部存有一定量的气孔和裂纹。图 2d 所示为凸焊接头上侧螺母侧热影响区组织形貌，热影响区主要由粗晶区（Coarse Grained HAZ，CGHAZ）、细晶区（Fine Grained HAZ，FGHAZ）组成；粗晶区位于 AC_3 以上过热区，奥氏体长大较充分，由于凸焊螺母为不易淬火钢，因而过热奥氏体冷却过程后条状铁素体重结晶为粗大等轴铁素体；细晶区温度位于 AC_3 以上的螺母材质的正火区域，温度相对较低，因而冷却后形成的组织主要为细小的等轴铁素体。图 2e 为凸焊接头上侧螺母与热成形板间熔核区组织形貌图，组织主要为板条马氏体组织，在熔核边界形成联生结晶，出现了柱状晶形貌。图 2f 为下侧热成形板间熔核区组织形貌，由图可以看出，该区的组织同样以板条马氏体组织为主，熔核区出现了缩孔。上、下侧热成形钢热影响区组织形貌如图 2g、图 2h)所示，两者组织相差不大，其主要由完全淬火区（Ultva-Critcal，UCHAZ）、不完全淬火区（Inter-Critical HAZ，ICHAZ）和回火区（Srb-Critical HAZ，SCHAZ）组成；完全淬火区域靠近熔核区，温度较高，奥氏体处于过热状态，而热成形钢为易淬火钢，冷却后形成的组织以粗大马氏体为主；不完全淬火区温度位于 AC_1~ AC_3 之间，为部分淬火区域，冷却过程后形成的组织主要由细小的马氏体、贝氏体和铁素体组成[24-25]；回火区靠近母材附近，该区域对应马氏体组织回火区域，冷却过程中形成的组织主要为回火马氏体[26]。



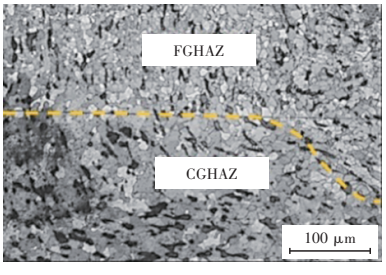
(a)宏观组织形貌



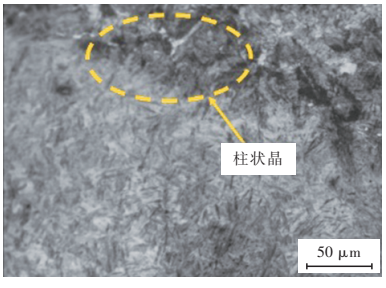
(b)螺母母材



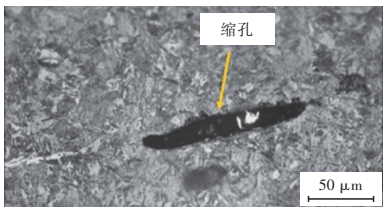
(c)热成形钢母材



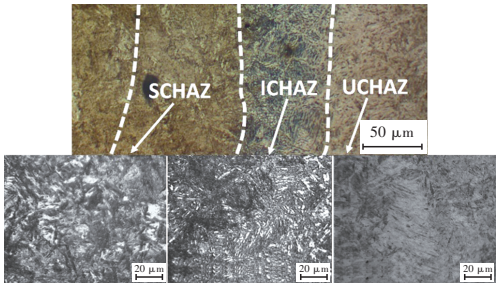
(d)螺母侧热影响区



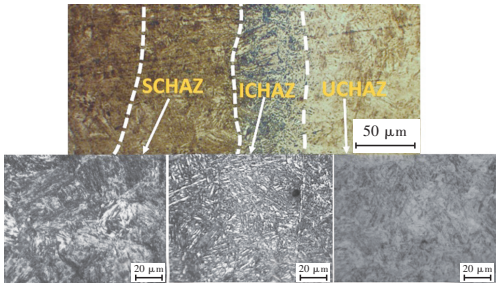
(e)上侧熔核区



(f)下侧熔核区



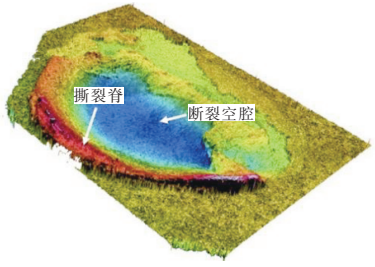
(g)上侧热成形钢热影响区



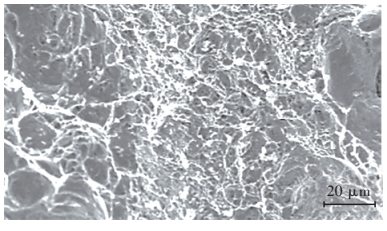
(h)下侧热成形钢热影响区

图2　焊接接头组织形貌

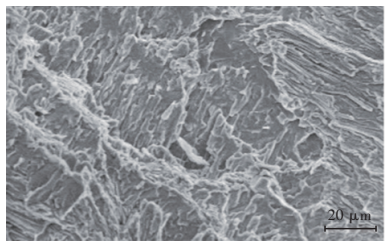
图3所示为上侧螺母与热成形板间接头断口形貌。由图可以看出,断口主要由断裂空腔和撕裂脊两部分组成,断裂空腔界面处有大量解理面与河流纹,以脆性断裂为主,而撕裂脊部位存有大量韧窝,断裂模式为韧性断裂为主。由此可知,此区域接头断裂模式为韧脆混合断裂。



(a)断口三维形貌



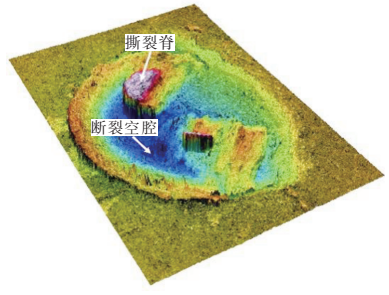
(b)撕裂脊SEM图



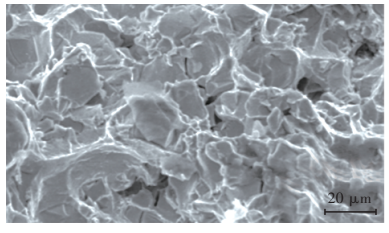
(c)断裂空腔SEM图

图3　上侧螺母与热成形板间接头断口形貌

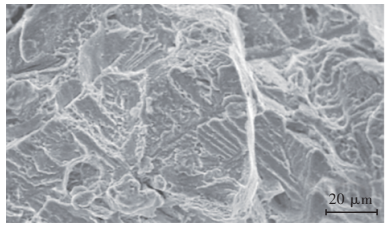
图4为下热成形板间接头断口形貌。由图可以看出,断口存有断裂空腔和撕裂脊,断裂空腔与撕裂脊有大量解理面与河流纹,几乎看不到韧窝,为典型脆性断裂特征,因此下侧热成形板间接头断裂模式主要为脆性断裂。



(a)断口三维形貌



(b)撕裂脊SEM图



(c)断裂空腔SEM图

图4　下侧热成形板间接头断口形貌

4　结束语

本文通过正交试验研究了电极压力、焊接时间、焊接电压与冷却时间对热成形钢凸焊接头组织和性能的影响,得出如下主要结论。

a. 单因素指标下,不同的工艺参数对凸焊接头熔核尺寸和抗扭强度的影响不同。上侧螺母与

热成形板间接头熔核直径的最优工艺参数为电极压力0.3 MPa、焊接时间1.3 s、焊接电压320 V、冷却时间0.6 s；下侧热成形板间接头熔核直径的最优工艺参数为电极压力0.30 MPa、焊接时间1.1 s、焊接电压320 V、冷却时间0.5 s；上侧螺母与热成形板间接头抗扭强度的最优工艺参数为电极压力0.35 MPa、焊接时间1.1 s、焊接电压320 V、冷却时间0.5 s；下侧热成形板间接头抗扭强度的最优工艺参数为电极压力0.3 MPa、焊接时间1.1 s、焊接电压320 V、冷却时间0.4 s。

b. 通过对各指标综合加权评分得出，最优工艺参数为电极压力0.3 MPa、焊接时间为1.1 s、焊接电压320 V、冷却时间0.5 s。此工艺条件下接头螺母侧热影响区分为粗晶区和细晶区，组织以等轴铁素体为主。热成形钢侧热影响区主要为完全淬火区、不完全淬火区和回火区，其中完全淬火区的组织为粗大的板条马氏体，不完全淬火区为马氏体、铁素体和贝氏体混合组织，回火区组织主要为回火马氏体。

c. 上侧螺母与热成形板间接头断裂模式为韧脆混合断裂，下侧热成形板间凸焊接头断裂模式为脆性断裂。

参考文献：

[1] DUMITRASCU D I, RUSU A N, DUMITRASCU A E. Efficiency and Precision of Welding Process for the Automotive Parts[C]// E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2025, 601: 34.

[2] 陈志平, 林森. 汽车用电阻点焊技术及复合电阻点焊技术研究现状[J]. 汽车工艺与材料, 2025(3): 20-29.

[3] CUNHA C F A, DE OLIVEIRA GOMES J, DE CARVALHO H M B. A New Approach to Reduce the Carbon Footprint in Resistance Spot Welding by Energy Efficiency Evaluation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(9): 6503-6520.

[4] XING L, YU T, ZHANG J, et al. Optimization and Improvement of the Projection Welding of Nut Based on Regression Analysis[J]. ISIJ International, 2023, 63(4): 694-702.

[5] 杨黄锐, 熊玮, 唐大庆, 等. M12环凸焊螺母凸焊质量改进[J]. 汽车工艺与材料, 2023(1): 24-27.

[6] 邢晓芳, 贲强, 周勇, 等. 基于回归分析的螺母凸焊工艺优化[J]. 焊接学报, 2020, 41(12): 91-96+102.

[7] 李彦云, 张东升, 李超. 基于2 000 MPa热成形钢的A柱轻量化设计[J]. 汽车工艺与材料, 2022(6): 55-58.

[8] 罗爱辉, 陈关龙, 来新民, 等. 轿车车门铰链的焊接变形Ⅱ. 凸焊焊后残余应力及变形分析[J]. 焊接学报, 2005, 26(5): 37-40+6.

[9] 肖毅, 王灵龙, 黄森, 等. 车身双层板隔声性能分析和计算研究[J]. 噪声与振动控制, 2020, 40(5): 175-179.

[10] 汪小培, 张永强, 鞠建斌, 等. 凸焊电流对高强钢螺母凸焊焊点质量的影响[J]. 焊接技术, 2017, 46(3): 72-76+98

[11] QIAO Z, LI H, LI L, et al. Microstructure and Properties of Spot Welded Joints of Hot-Stamped Ultra-High Strength Steel Used for Automotive Body Structures[J]. Metals, 2019, 9(3): 285.

[12] 徐永吉, 徐瑰瑰. 浅析电容储能凸焊机焊接热成形钢零件[J]. 金属加工(热加工), 2020(11): 35-37.

[13] LUO J, ZHOU Z, CAO X, et al. Microstructure and Failure Analysis of Resistance Projection Welding of Nuts to AHSS with Capacitor Discharge Welding[J]. ISIJ International, 2019, 59(2): 305-311.

[14] 曾庆华, 刘锡振. 镀锌板螺母电容储能凸焊工艺的分析[J]. 装备制造技术, 2020(08): 228-230.

[15] 曹小兵, 周照耀, 邹春华. 高强度钢储能螺母凸焊工艺非线性多元回归设计[J]. 焊接, 2018(1): 34-37+62-63.

[16] KANGQU Z, WENJIE H E, YANG L I. Optimization of Bolt Tightening Process Parameters for Transmission Housing Based on Orthogonal Experiment[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2025 (9): 177-184.

[17] 蒋磊, 王龙, 李十全, 等. 基于正交试验的侧围外板拉延成形工艺参数优化研究[J]. 汽车工艺与材料, 2021 (9): 42-50.

[18] 谢涛, 周全, 袁源平, 等. 镁合金机匣低压铸造工艺正交优化及模拟[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(4): 542-546.

[19] 邱小明, 王银雪, 姚汉伟, 等. 基于灰色关联的DP1180/DP590异质点焊接头工艺参数优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(4): 1147-1152.

[20] 李子健, 贾丽敏, 韩鹏彪, 等. 热处理工艺对40CrNiMoA合金组织及力学性能的影响[J]. 河北科技大学学报, 2024, 45(1): 67-73.

[21] 王滕, 赵云龙, 柴立涛, 等. 热浸镀工艺对热成形钢铝硅镀层的影响[J]. 中国冶金, 2016, 26(12): 20-25.

[22] 金学军, 龚煜, 韩先洪, 等. 先进热成形汽车钢制造与使用的研究现状与展望[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 411-428.

[23] 曹小兵. 高强度钢22MnB5螺母凸焊的储能焊工艺特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.

[24] JIA S, MA Q, HOU Y, et al. Changes in Microstructure and Properties of Weld Heat-Affected Zone of High-Strength Low-Alloy Steel[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2024, 31(8): 2041-2052.

[25] 李卫红, 高梦鸾, 袁超, 等. Usibor2000/DP780GI/DP780GI电阻点焊接头显微组织和力学性能研究[J]. 时代汽车, 2023(18): 136-138.

[26] 毛立忠, 田畅, 徐忠伟, 等. 热成形钢电阻点焊断裂模式与失效力预测研究[J]. 汽车工程, 2024, 46(11): 2133-2141.

AT&M