

车身轻量化金属焊接技术及服役性能研究

赵坤民^{1,2} 任大鑫² 赵德望²

合众新能源汽车公司

大连理工大学汽车工程学院



1

轻量化金属连接工艺概述

2

超声波焊接工艺及焊点性能

3

环状电极电阻焊接工艺特点

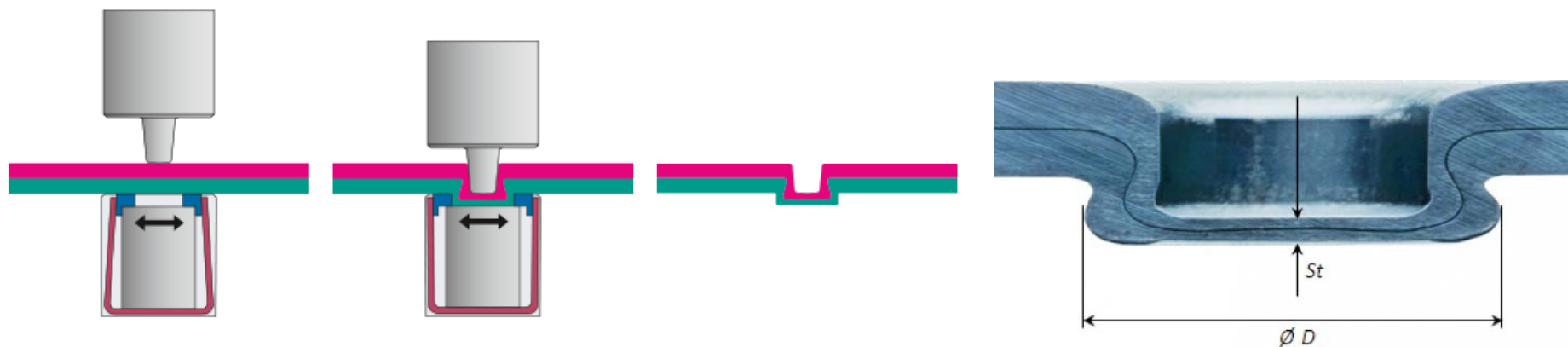
4

结论与讨论

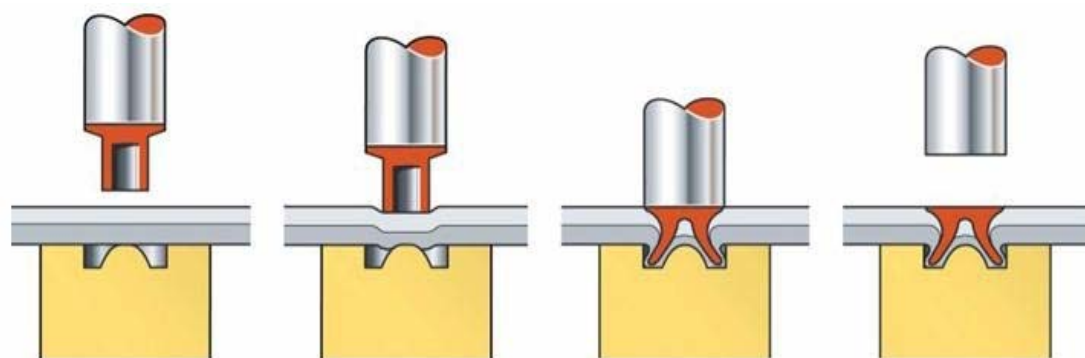


轻量化金属连接工艺概述

■ 铆接



(a) 无铆钉铆接示意图



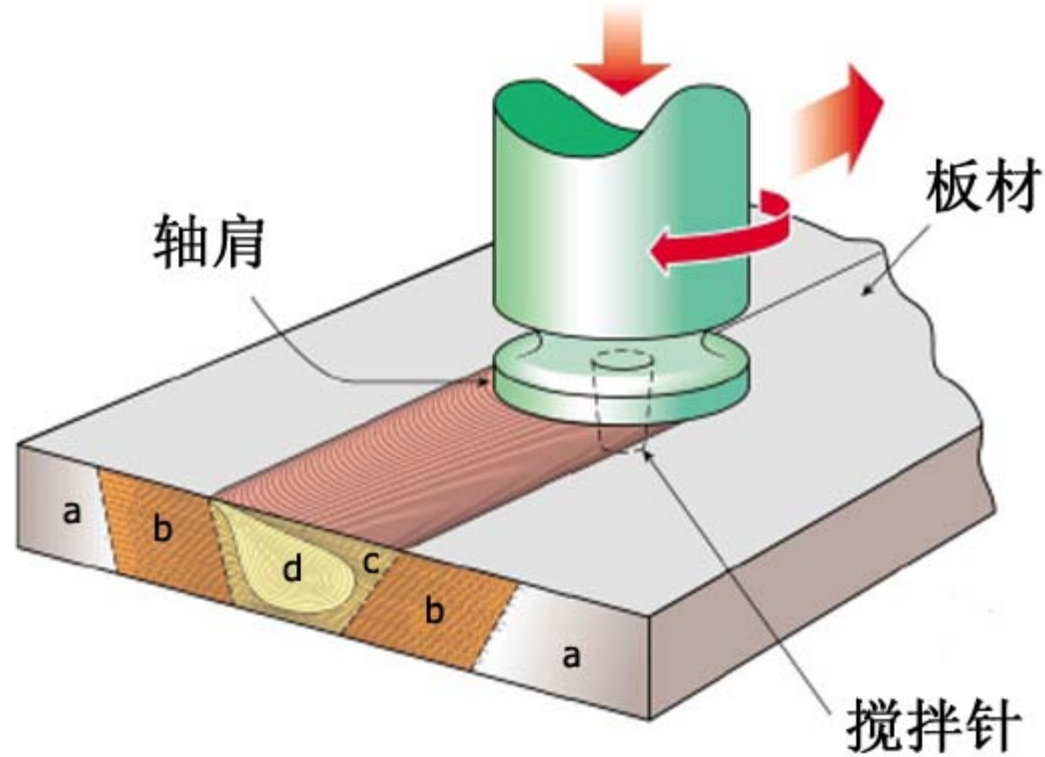
(b) 自冲铆接示意图



优点：不需要预留冲孔便可以实现板材的连接，同时具有高自动化和低敏感度等特点。

缺点：针对特殊材料的连接，例如高强钢，容易造成铆穿缺陷，另外铆钉也容易因强度不足而发生开裂。

■ 搅拌摩擦焊

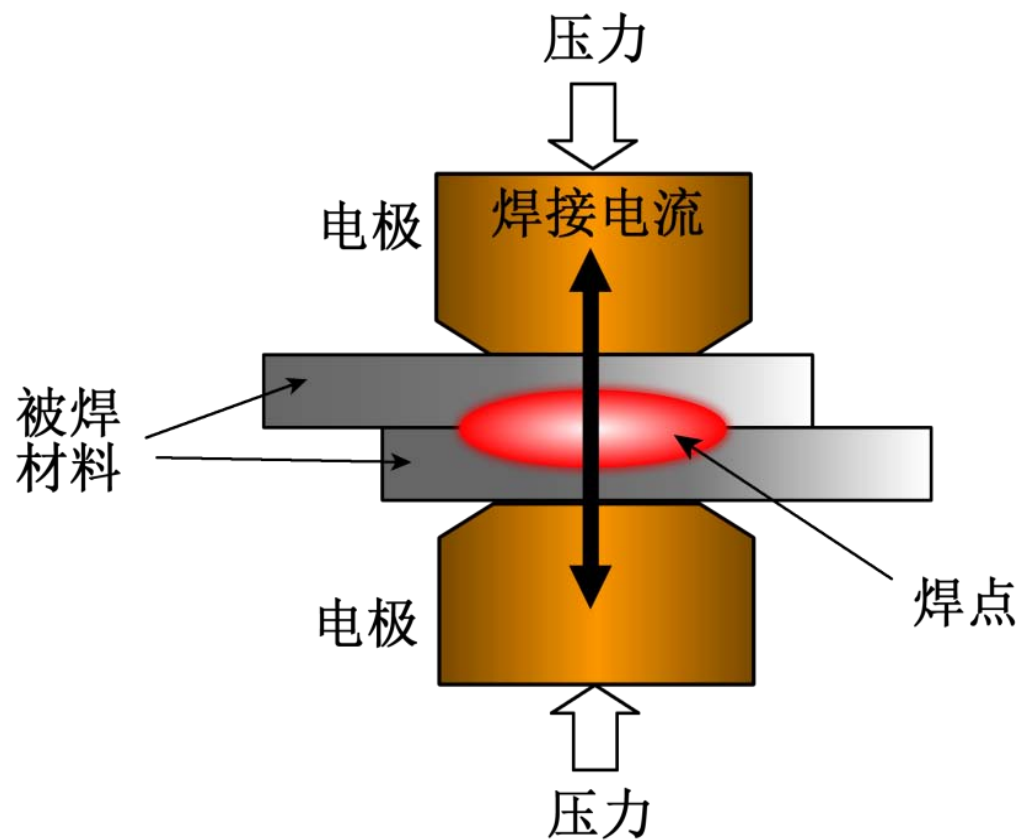


搅拌摩擦焊示意图

优点：新型固相焊接技术，热输入低，有效控制金属间化合物生成，残余应力低，焊接变形小

缺点：工艺凹孔的回填增加了工艺难度和时间，造价高，对工装要求高，适用结构形式简单。

■ 电阻焊

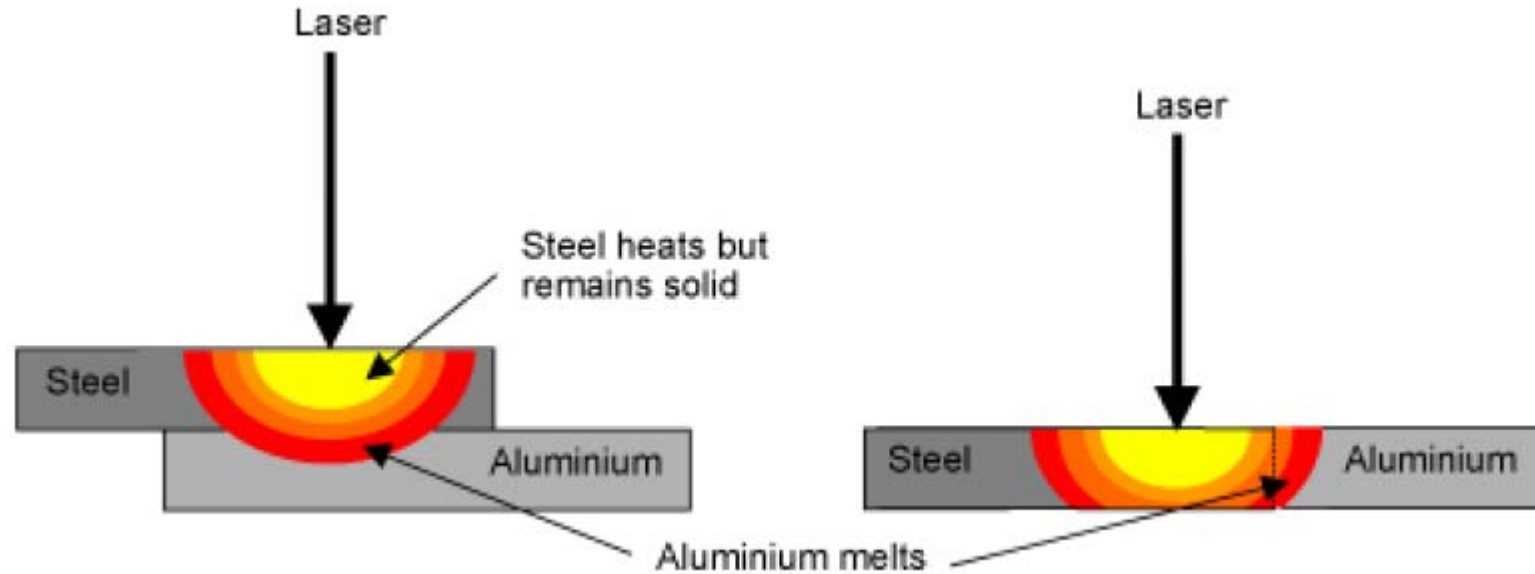


电阻点焊及应用示意图

优点：热影响区、焊后变形以及残余应力均较小，成本低，操作简单。

缺点：针对新一代轻合金应用瓶颈显著。

■ 激光焊

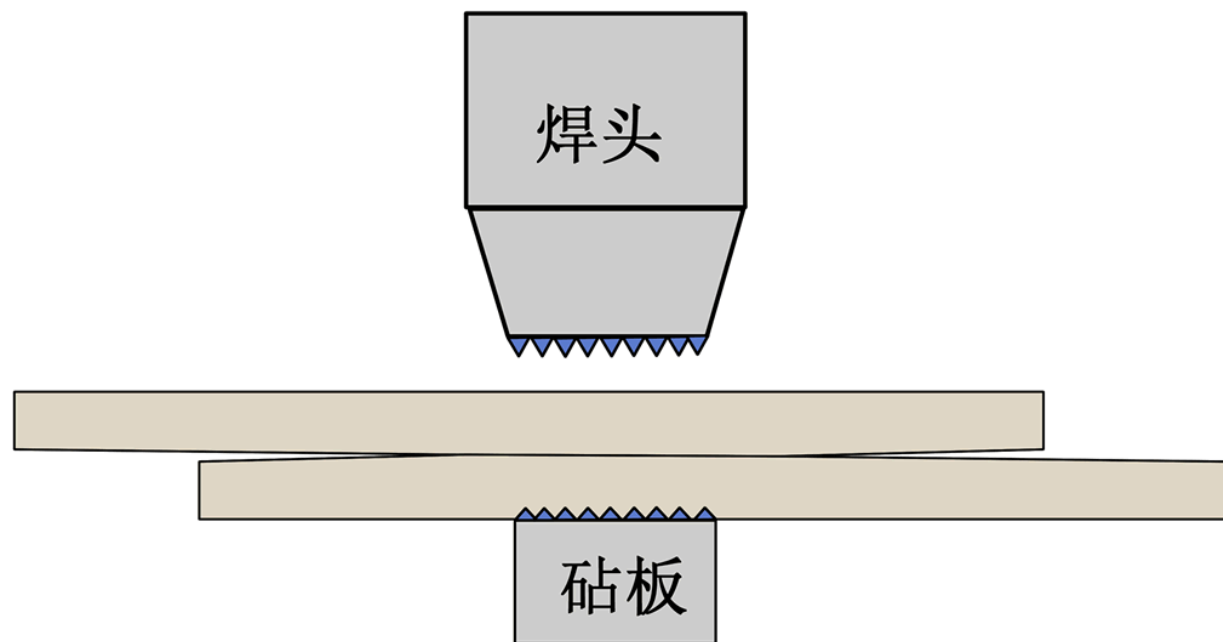


激光焊及应用示意图（搭接、对接）

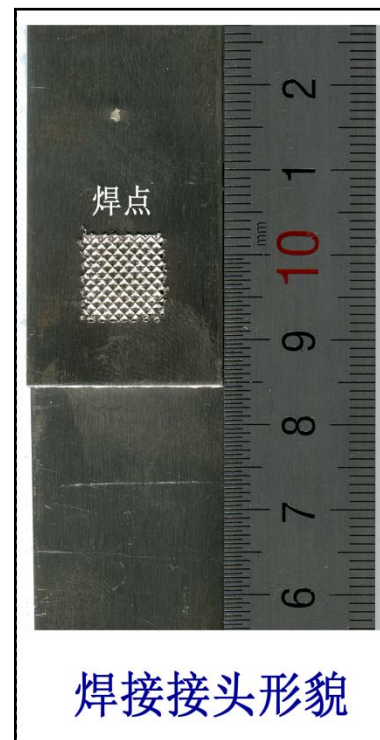
优点：焊接效率高、熔深大，焊接变形小，工艺灵活

缺点：异质金属焊接金属间化合物有控制困难，同质轻合金易产生气孔等缺陷

■ 超声波焊接



超声波焊接示意图



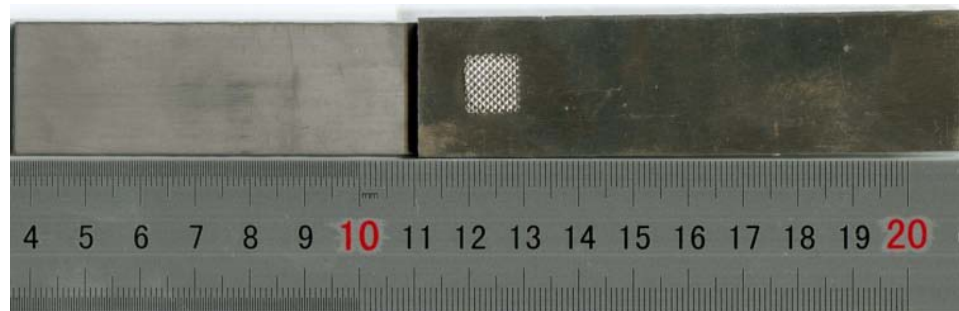
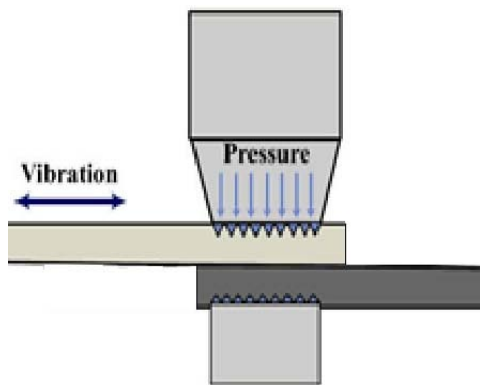
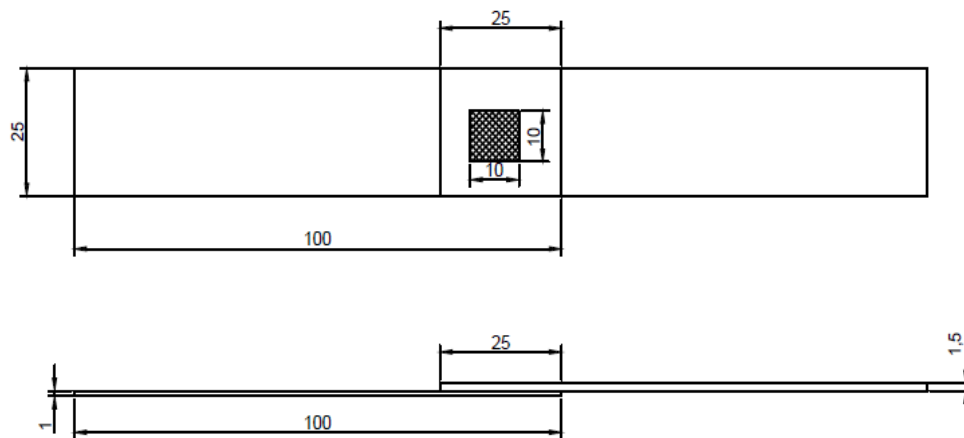
优点：固相焊接，异质金属焊接强度高，轻合金焊点力学性能好

缺点：振动、噪声



超声波焊接工艺及焊点性能

一、超声波焊接参数对接头强度影响权重研究



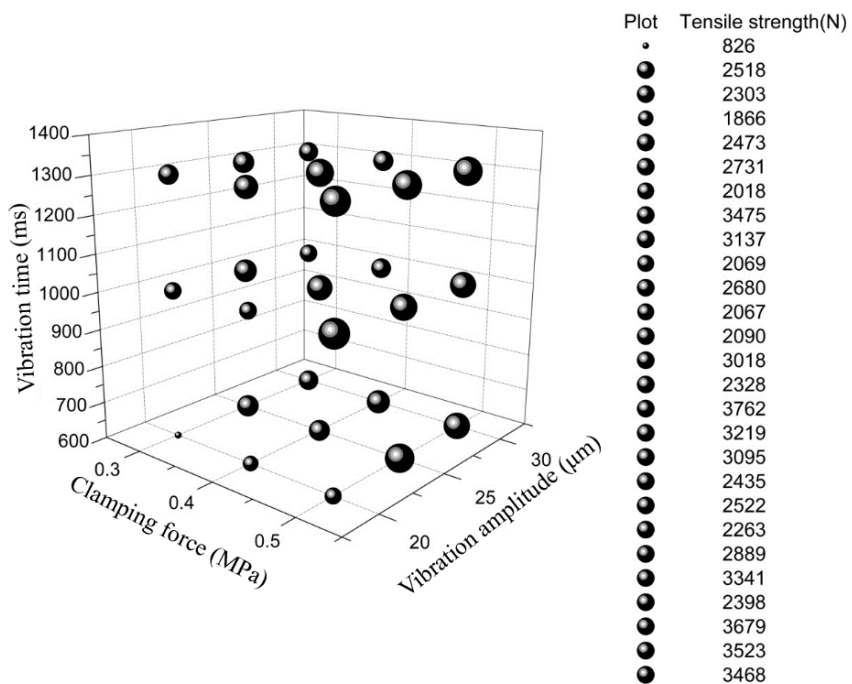
超声波焊接设备及原理示意图

试件尺寸示意图及拉伸实验标准试件

■ 镁/钛异质金属超声波焊接实验

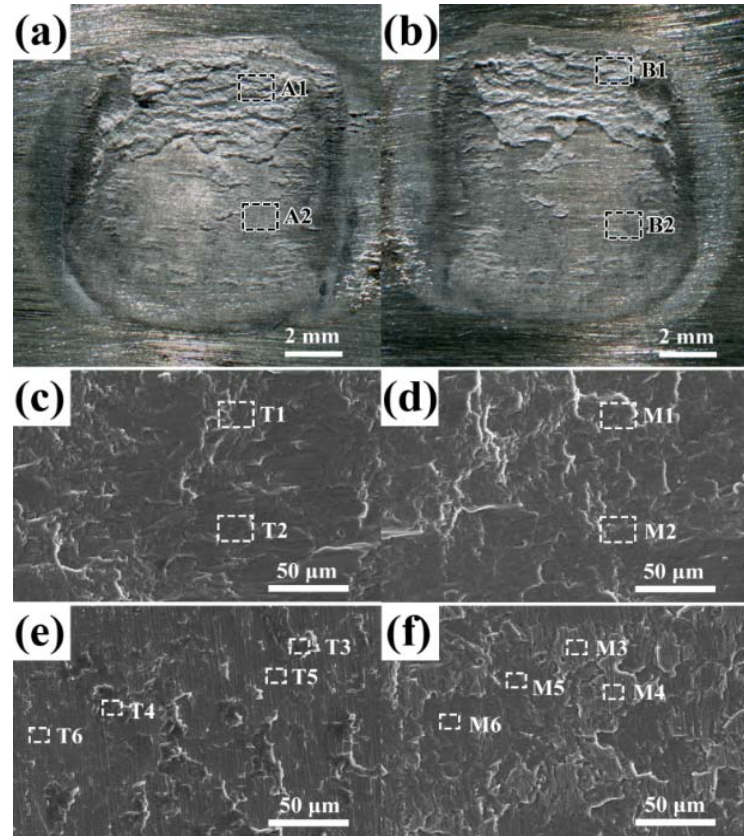
镁/钛超声波焊接实验参数

试验参数	水平值		
焊接振幅 (um)	20	25	30
焊接时间 (ms)	600	1000	1300
焊接压力 (MPa)	0.3	0.4	0.5



镁/钛超声波焊接强度随焊接参数变化的3D图
 其中X轴表示焊接压力
 Y轴表示焊接振幅
 Z轴表示焊接时间
 黑色圆球代表强度值

■ 镁/钛超声波焊接-接头断口分析



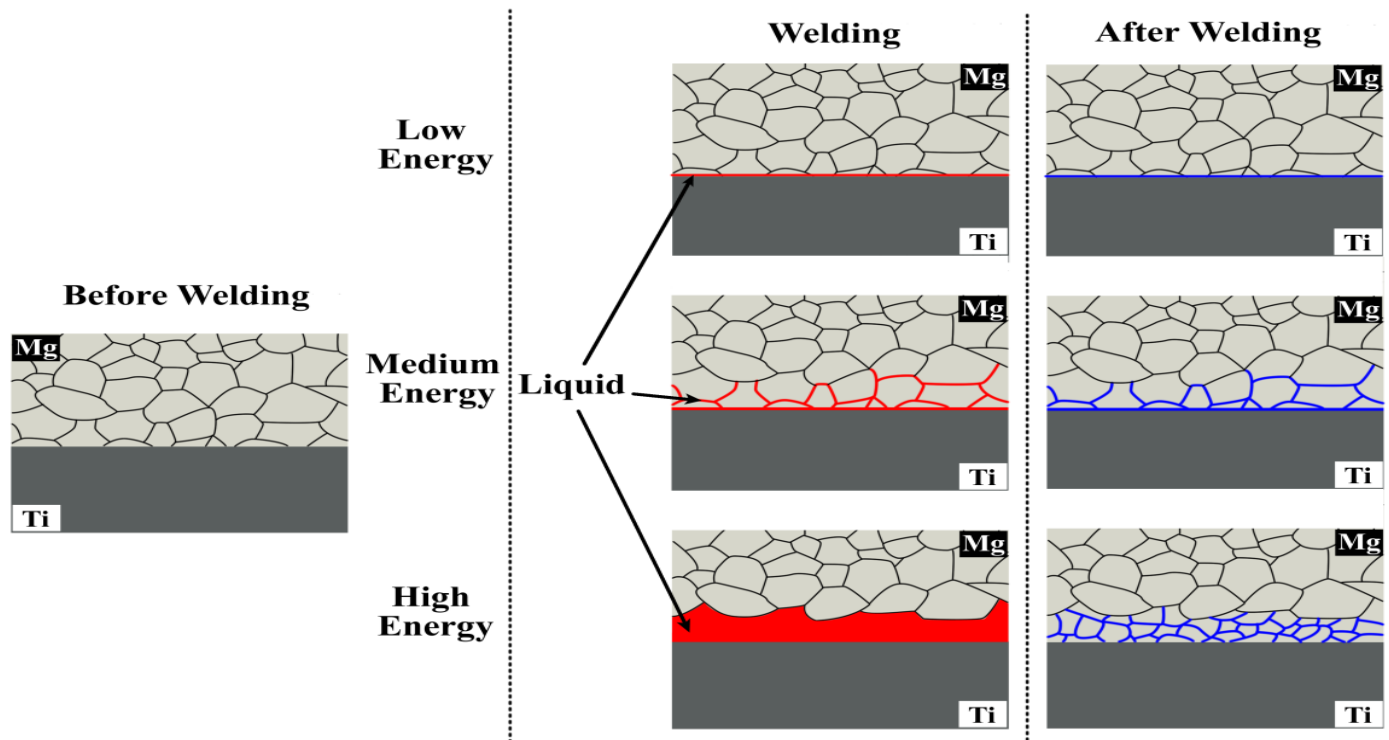
断口典型区域元素成分

区域	化学成分 (质量%)		
	Mg	Al	Ti
T1	96.82	2.96	0.22
T2	97.57	1.96	0.47
T3	78.88	1.96	19.16
T4	74.91	4.44	20.65
T5	9.56	7.97	82.47
T6	4.19	7.68	88.13
M1	95.88	4.12	0
M2	97.23	2.77	0
M3	97.31	2.69	0
M4	98.04	1.96	0
M5	95.82	4.18	0
M6	96.38	3.62	0

镁/钛超声波焊接接头断口形貌

其中(a)是钛合金侧宏观断口；(b)是镁合金侧宏观断口；(c)是钛合金侧起始断裂区域微观形貌；(d)是镁合金侧起始断裂区域微观形貌；(e)是钛合金侧扩展断裂区域微观形貌；(f)是镁合金侧扩展断裂区域微观形貌。

■ 镁/钛超声波焊接-结合机制分析



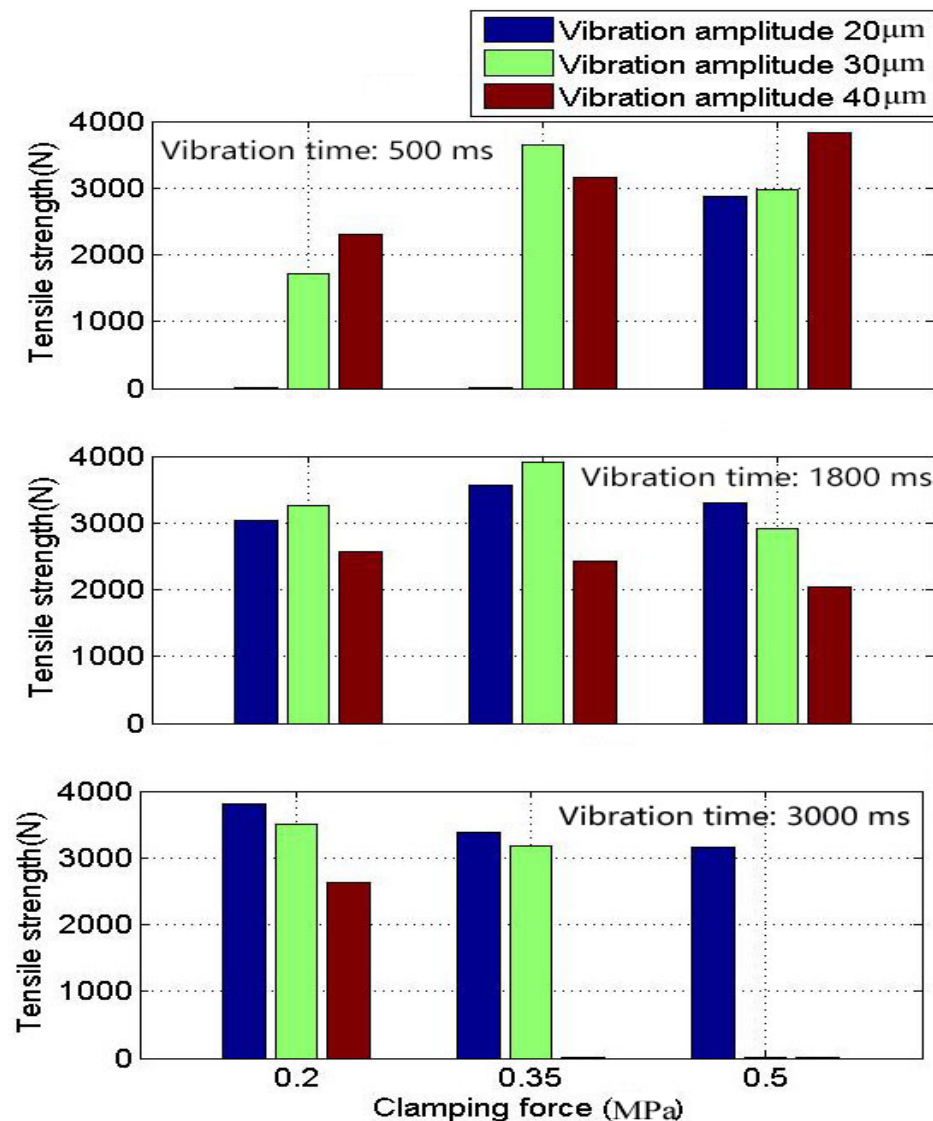
镁/钛合金超声波连接机制图

镁合金与钛合金异质金属超声波焊接过程中，是合金中的Al元素促进并且实现了镁合金与钛合金异质金属的连接，Al元素在镁合金晶界的存在，不仅降低了晶界液化的温度，并且其同时可以与Mg和Ti发生反应，从而实现了镁合金与钛合金的冶金结合。

■ 铝/钢异质金属超声波焊接实验

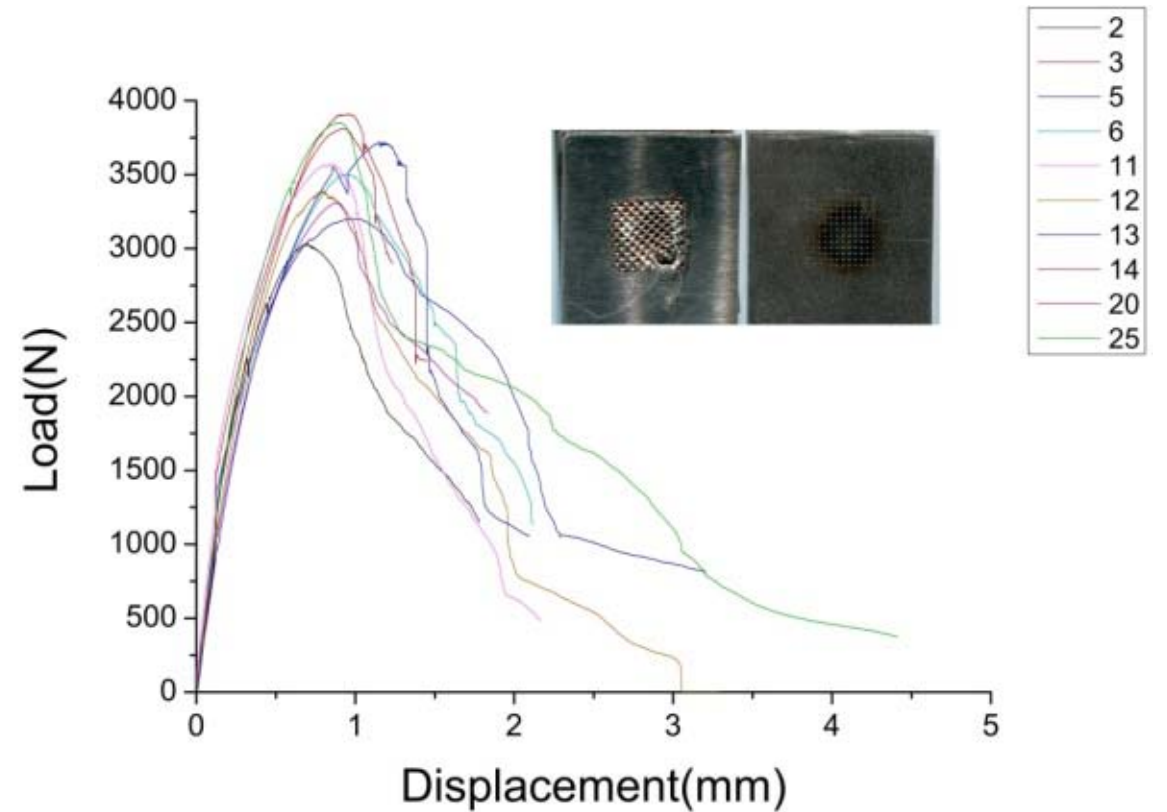
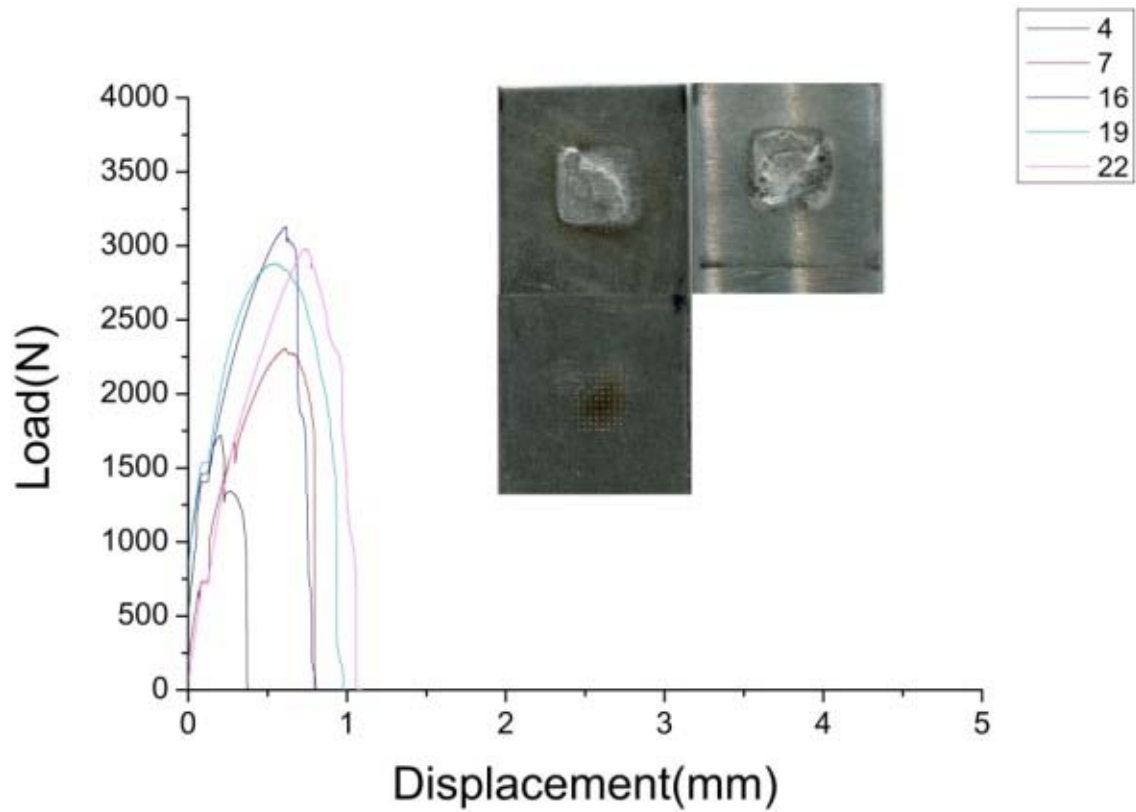
铝/钢超声波焊接实验参数

试验参数	水平值		
焊接振幅 (μm)	20	30	40
焊接时间 (ms)	500	1800	3000
焊接压力 (MPa)	0.2	0.35	0.5



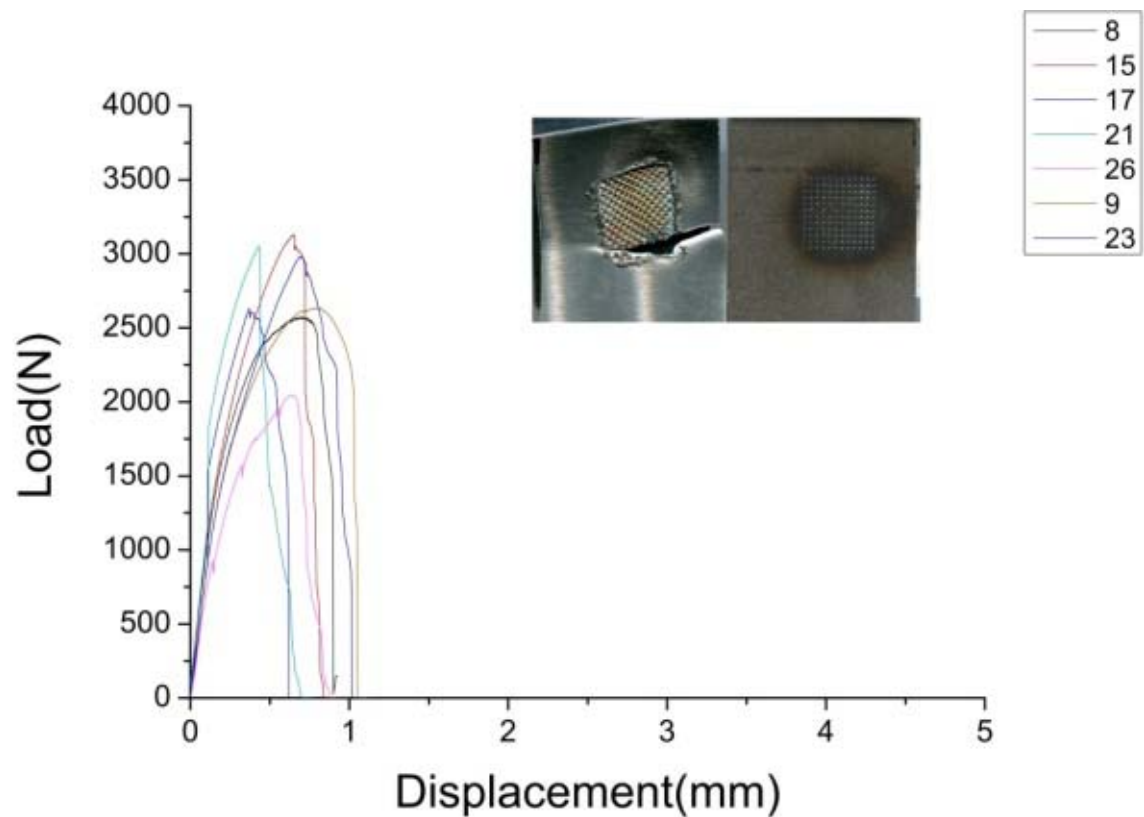
铝/钢超声波焊接接头强度分布直方图

■ 铝/钢异质金属超声波焊接实验

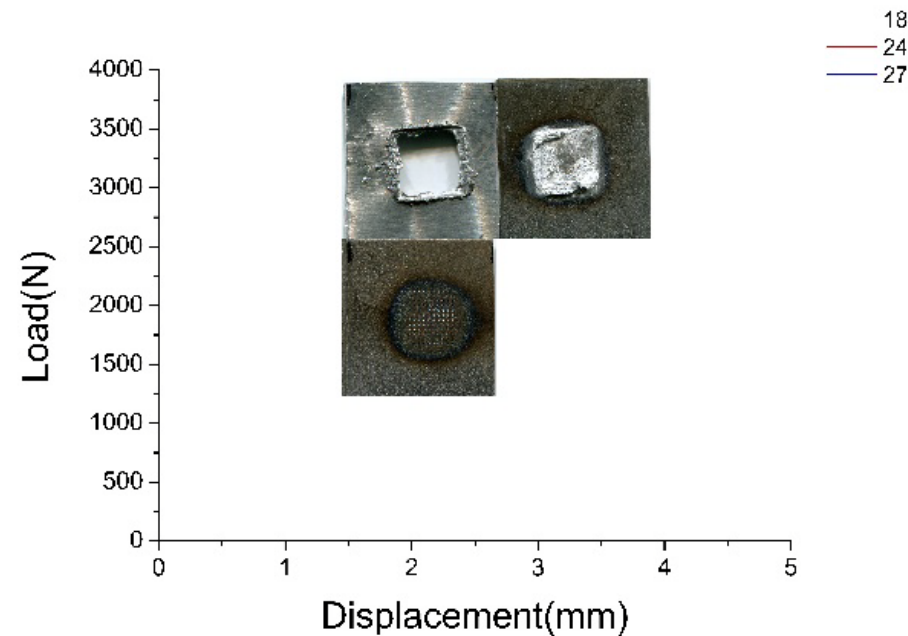
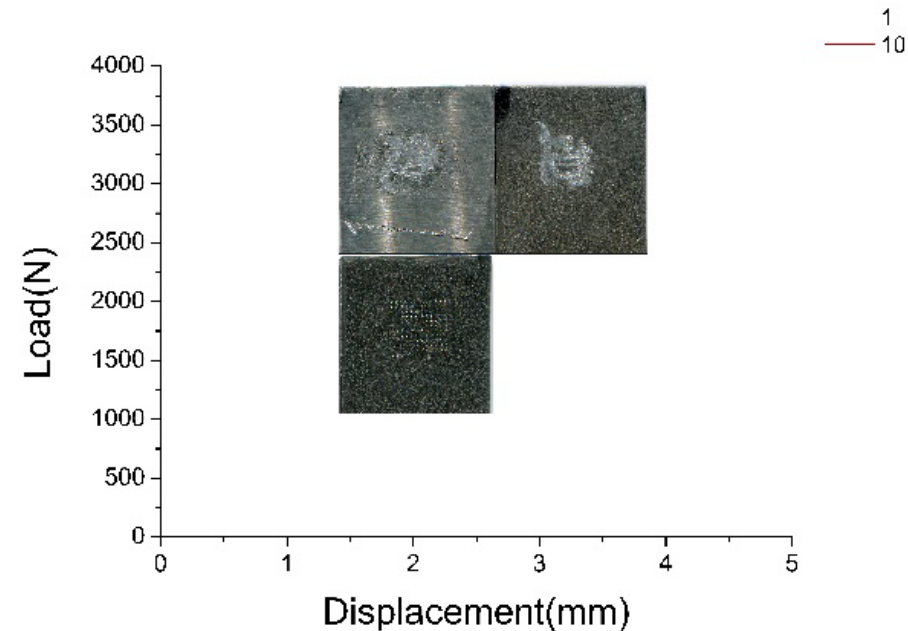


界面失效模式分类及其荷载-位移关系曲线

铝/钢异质金属超声波焊接实验



界面失效模式分类及其荷载-位移关系曲线



■ 铝/钢异质金属超声波焊接实验

铝/钢超声波焊接实验结果方差分析

Source	df	SS	MS	F
焊接压力MPa	2	292251.6	146125.8	0.45
焊接时间s	2	3614216.2	1807108.1	5.57
焊接振幅 μm	2	2175281.6	1087640.8	3.35
压力MPa \times 时间s	4	13188518.2	3297129.6	10.16
压力 MPa \times 振幅 μm	4	5661571.6	1415392.9	4.36
振幅 $\mu\text{m}\times$ 时间 s	4	17679188.2	4419797.1	13.62
Error	8	2595553.3	324444.2	
Total	26		212534589	

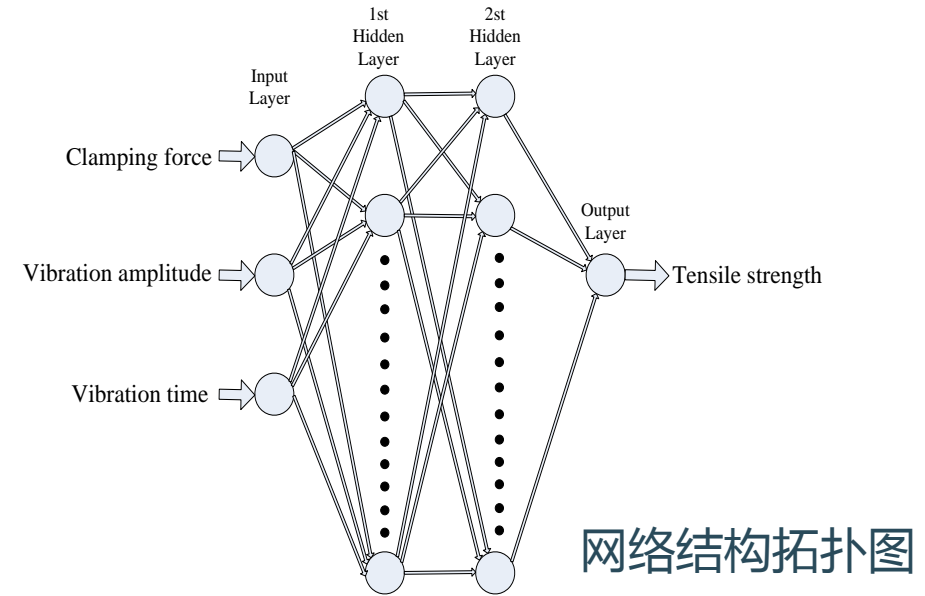
显著性水平 $\alpha = 0.05$ F检验:

2自由度因素的F检验临界值为 $F_{0.95;2,8}=4.46$;

4自由度因素的F检验临界值为 $F_{0.95;4,8}=3.84$ 。

■ 人工神经网络技术背景

BP神经网络是一种多层前馈神经网络，该网络的主要特点是信号向前传递，误差反向传播,如果输出层得不到期望输出，则转入反向传播，根据预测误差调整网络权值和阈值，从而使BP神经网络预测输出不断逼近期望输出。



网络结构拓扑图

1. 隐含层输出计算。
$$H_j = f \left(\sum_{i=1}^n \omega_{ij} x_j - a_j \right) j = 1, 2, \dots, l \quad (1)$$

$f(x)$ 为隐含层激励函数，该函数有多种表达形式，本研究中采用函数为：

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-2x}} \quad (2)$$

$$f(x) = \frac{2}{1+e^{-2x}} - 1 \quad (3)$$

2. 输出层输出计算。
$$O_k = \sum_{j=1}^l H_j \omega_{jk} - b_k k = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

3. 误差计算。
$$e_k = Y_k - O_k k = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

■ 铝/钢超声波焊接计算模型验证

序号	焊接压力 (MPa)	振幅(um)	焊接时间 (ms)	试验值 (N)	计算值 (N)	误差
1	0.3	30	1000	2888	2977	-89
2	0.5	30	1000	3181	3082	99
3	0.5	30	2500	0	151	-151
4	0.3	30	2500	3458	3551	-93
5	0.3	20	2500	3579	3649	-70
6	0.3	30	3000	3085	3114	-29
7	0.2	30	2500	3325	3175	150
8	0.2	25	2000	3508	3604	-96
9	0.4	25	1000	3094	2944	150
10	0.4	35	1500	3698	3751	-53

■ 铝/钢超声波焊接计算结果分析

	最优参数区间			最差参数区间		
压力 (ms)	时间 (s)	振幅 (μm)	载荷 (N)	时间 (s)	振幅 (μm)	载荷 (N)
0.2	1.6-3.0	20-30	3810	0.5-1.1	20-28	0
0.3	1.4-3.0	20-32	3866	0.5-1.1	20-28	0
	0.7-2.0	32-40		2.1-3.0	36-40	
0.4	0.5-2.1	25-40	3894	0.5-1.0	20-23	0
				1.7-3.0	26-40	
0.5	0.5-1.6	29-40	3839	1.8-3.0	23-40	0

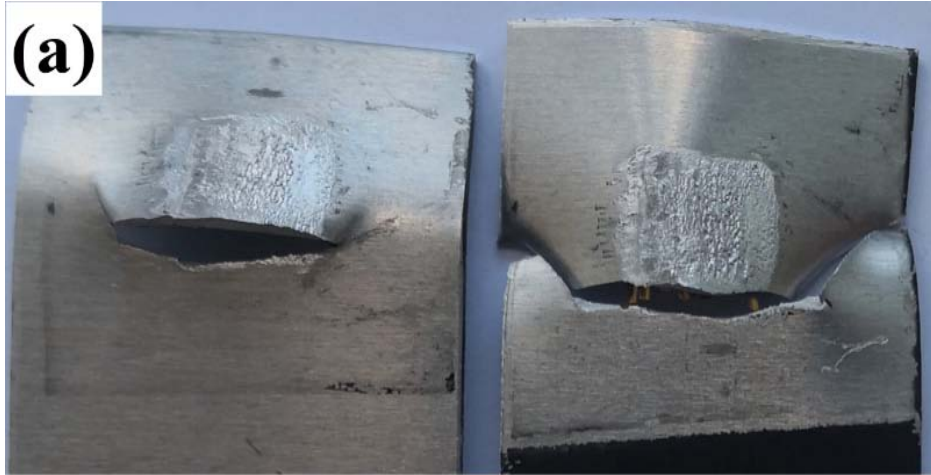
随焊接压力的增加，所有参数组合下焊接接头的最高拉伸强度和最低强度变化不大，但是能够达到最高拉伸强度的参数范围显著提高；最优焊接参数变化规律是，随着焊接压力的提高，最优焊接参数的范围，从低焊接振幅和高焊接时间区域，逐渐向高焊接振幅和低焊接时间区域进行转移；当焊接压力在0.3 Mpa时，焊接振幅和焊接时间对接头强度的影响并不显著。

二、超声波焊接接头疲劳性能研究（同质铝合金）

序号	压力(Mpa)	振幅(um)	时间(ms)	P (N)	P _{max} (N)	次数
1	0.5	30	500	2969	1781 (0.6P)	5000
2	0.5	30	500	2969	1188 (0.4P)	51265
3	0.5	30	500	2969	891 (0.3P)	53680
4	0.5	30	1000	4298	2579 (0.6P)	3128
5	0.5	30	1000	4298	1719 (0.4P)	12339
6	0.5	30	1000	4298	1289 (0.3P)	50605
7	0.5	30	1500	4278	2567 (0.6P)	3338
8	0.5	30	1500	4278	1711 (0.4P)	13347
9	0.5	30	1500	4278	1283 (0.3P)	41613

采用MTS810液压伺服试验机对焊件进行疲劳试验，试验频率为20Hz

■ 铝/铝超声波焊接疲劳性能实验结果



疲劳破坏主要有两种破坏形式：

(1) 疲劳裂纹扩展沿焊接接头表面（界面破坏）

(2) 裂纹沿母材顶部或底部扩展（弯折裂纹）



在铝合金同质金属的超声波焊接接头疲劳试验中，大部分试件的失效模式都是弯折形破坏，焊接能量对接头在高周期下的疲劳寿命有着显著的影响，焊接能量越大，接头的疲劳寿命越低。

铝合金超声波焊接接头疲劳断口宏观形貌

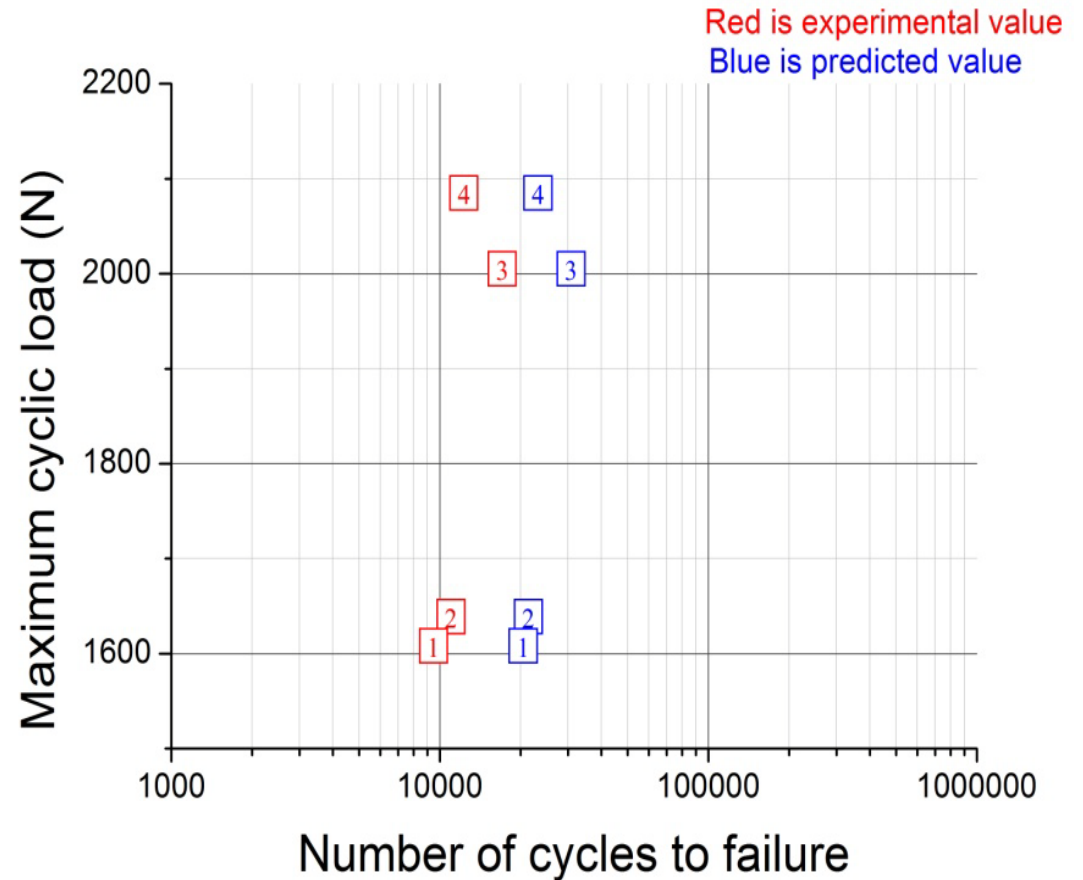
■ 铝/铝超声波焊接疲劳性能理论分析

采用Paris公式做为疲劳裂纹扩展模型，进行疲劳寿命预测，具体公式如下：

$$N_{total} = \frac{t}{C \sin \alpha k_{eq}} \left[\frac{(1-R)^{1-\gamma}}{eq} \right]^m$$

为等效应力强度因子，其具体表达式为：

$$k_{eq} = \sqrt{k_1^2 + \beta(k_2)^2}$$

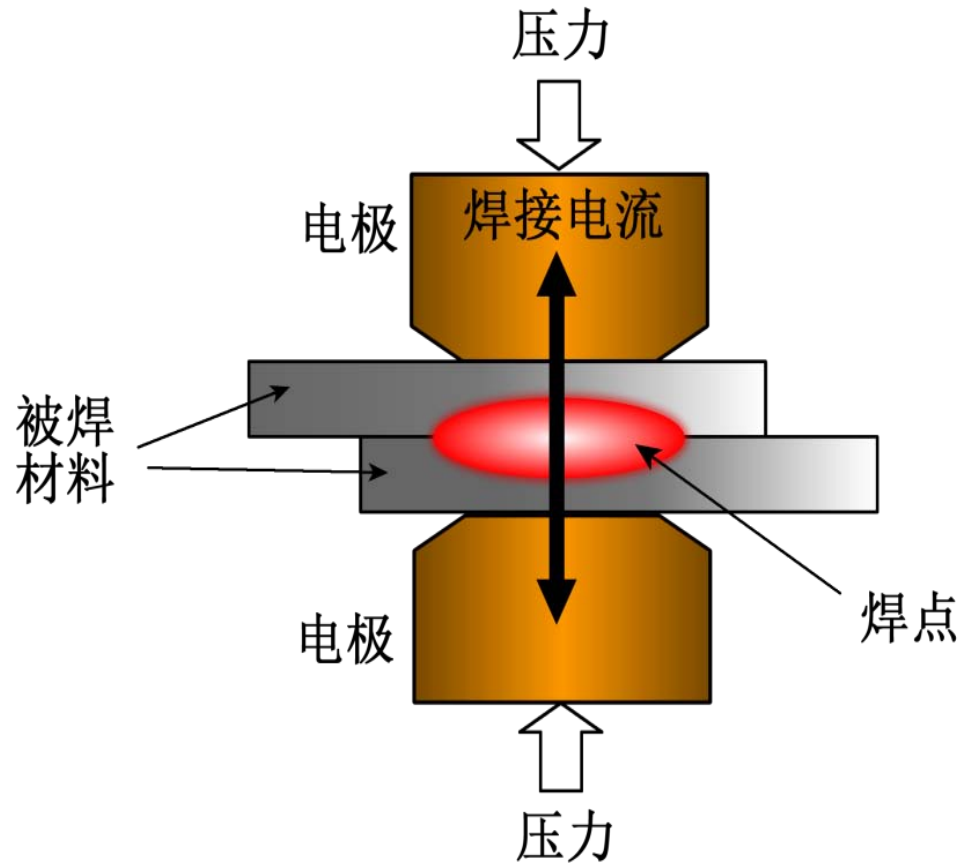


疲劳试验值与计算值对比图



环状电极电阻焊接工艺

■ 常规电阻点焊



焊接参数:

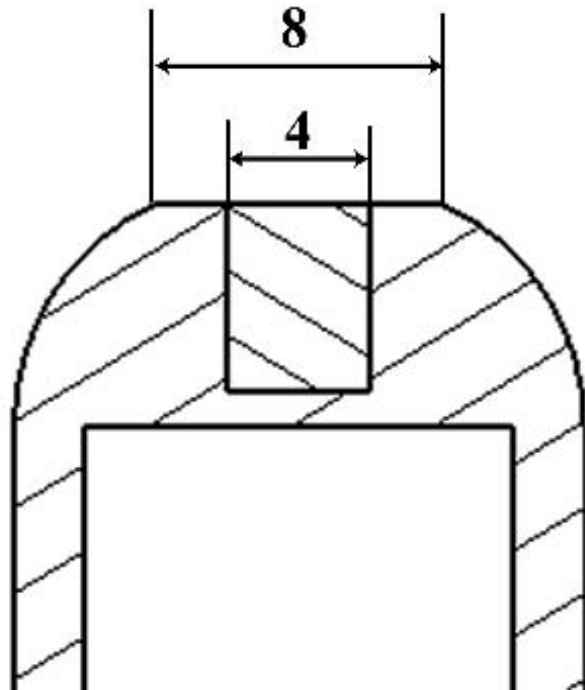
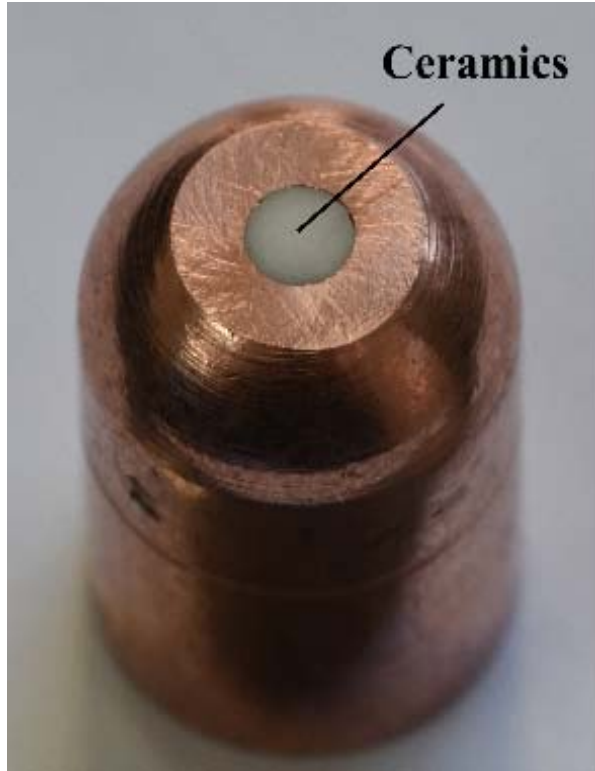
- 电极直径
- 电极压力
- 焊接电流
- 焊接时间

常见缺陷:

- 导致飞溅产生
- 焊核内部缺陷
- 焊核表面压痕

目标: 高焊核强度、较大的工艺窗口以及良好的焊核成形

■ 环形电极电阻焊



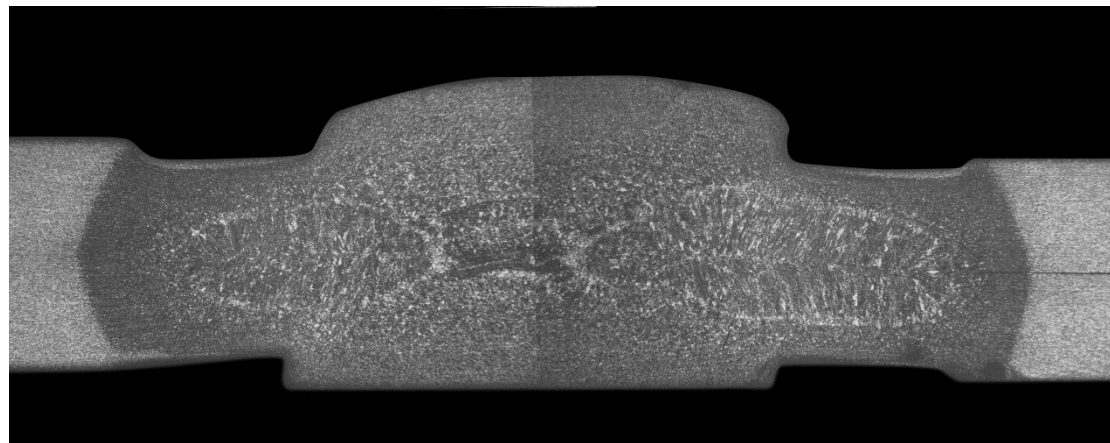
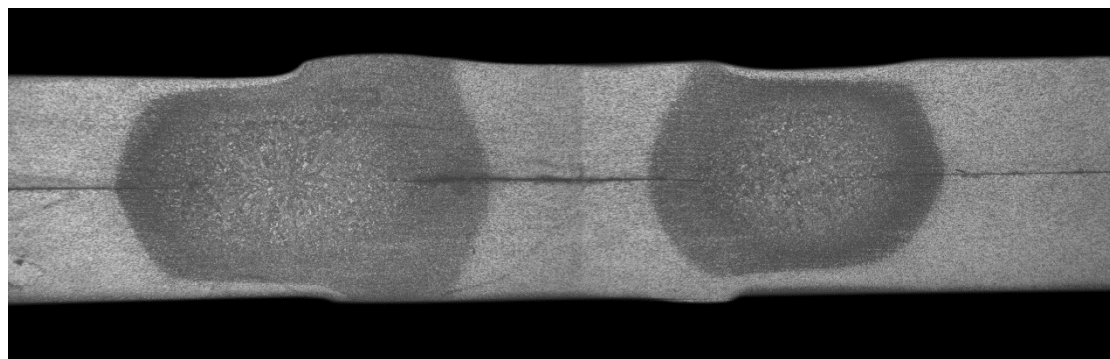
设计思路:

- 控制电流能量分布
- 改变焊核生长方式

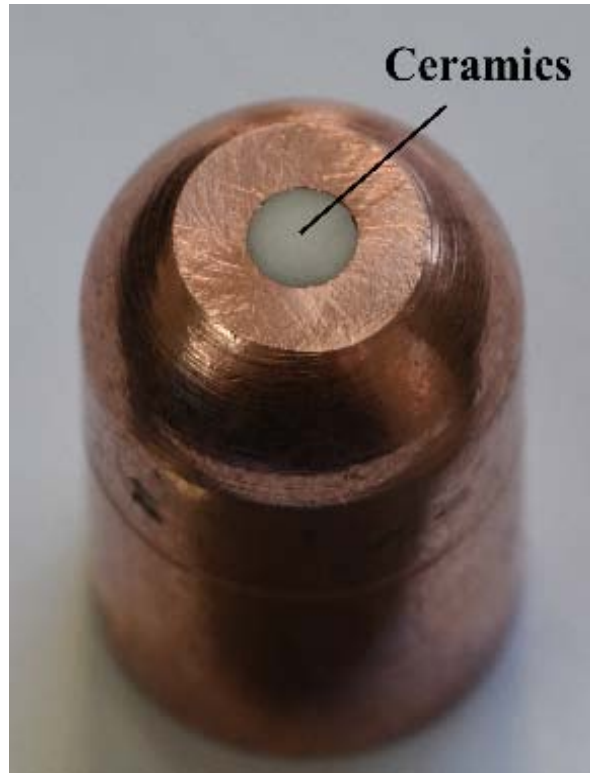
在能量密度控制方面，环形导电区域可以使能量更为分散，避免了能量在焊核中心集中产生。

在焊核生长方式方面，首先形成环形焊核，随后焊核同时向内和向外长大，可以形成更大的连接面积。

■ 中空环形电极电阻焊



■ 陶瓷芯环形电极电阻焊



Welding Parameters

Parameters	Value
Welding current (40kA*%)	12~28
Welding time (ms)	40~210
Electrode Force (kg)	150

材料	Yield Strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
DP980 1.2-mm	1010	980	11

■ 实心圆形电极焊接结果

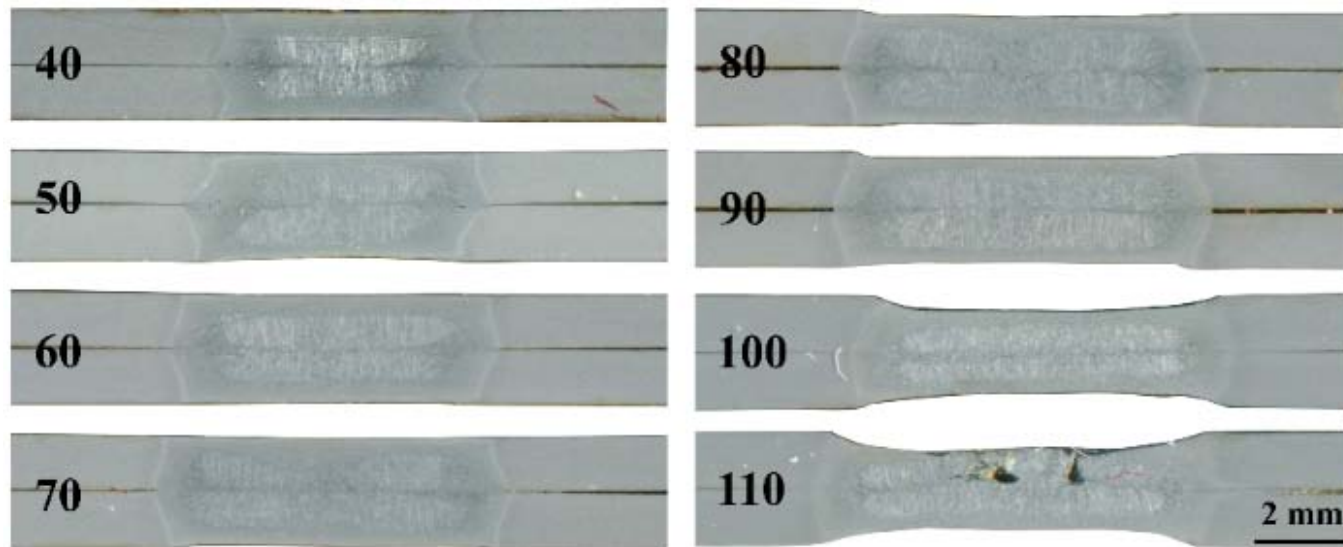


实心圆形电极焊点表面形貌

焊接电流 (8kA)

电极压力 (150kg)

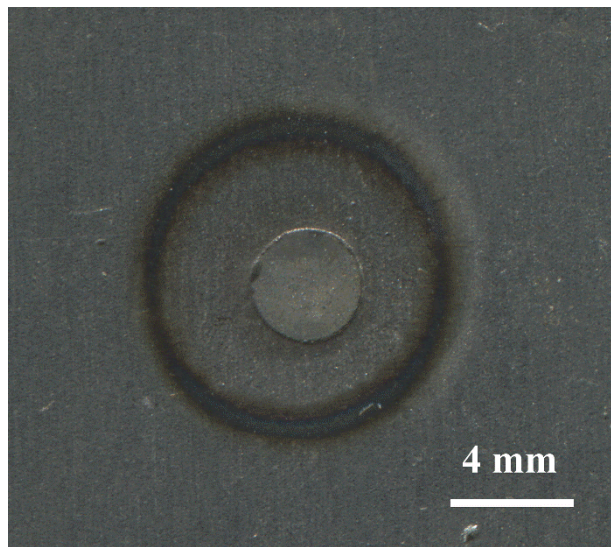
焊接时间 (40-210ms)



不同焊接时间焊点横截面

焊接时间: 40-110ms

■ 陶瓷芯环形电极焊接结果



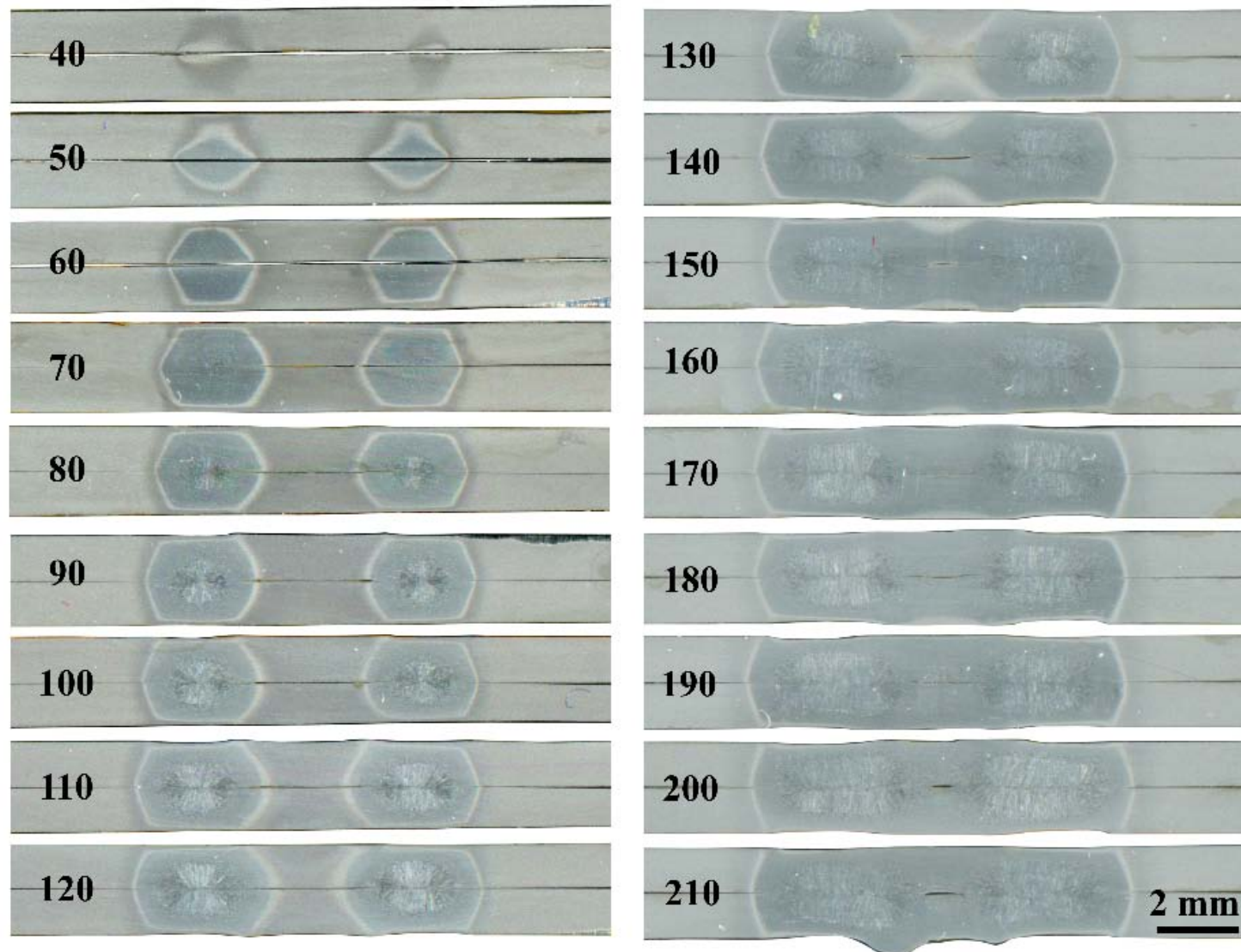
焊核表面形貌

焊接电流 (8kA)

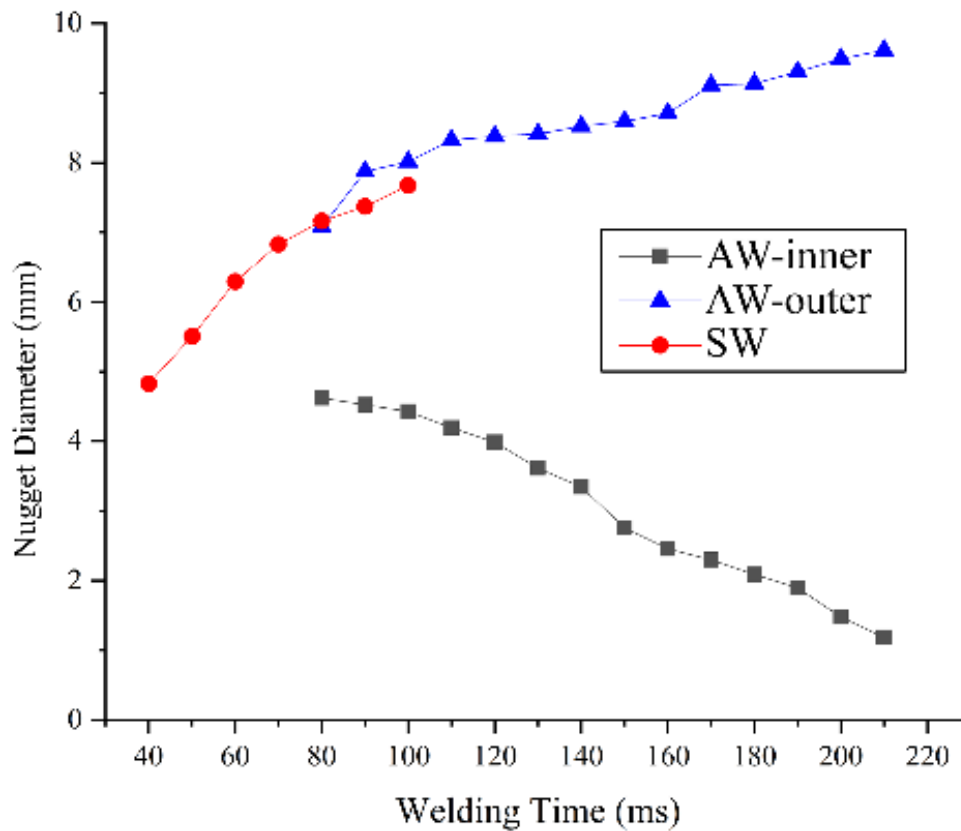
电极压力 (150kg)

焊接时间 (40-

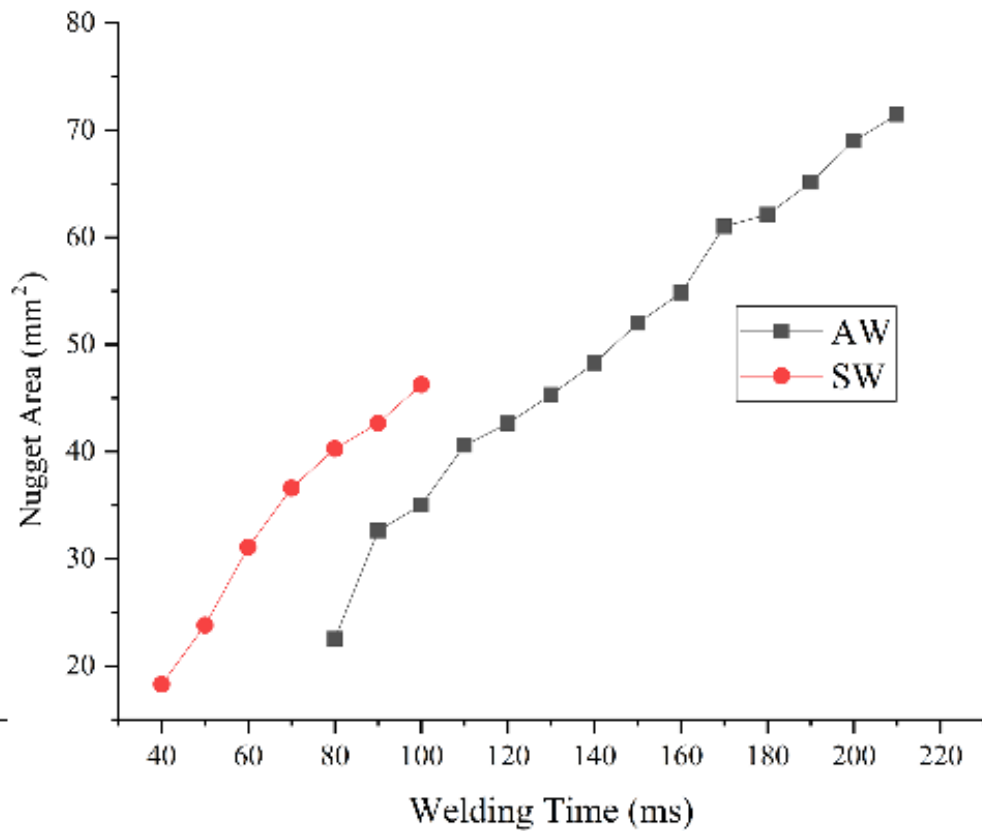
210ms)



■ 环形焊核与圆形焊核对比



焊点直径对比

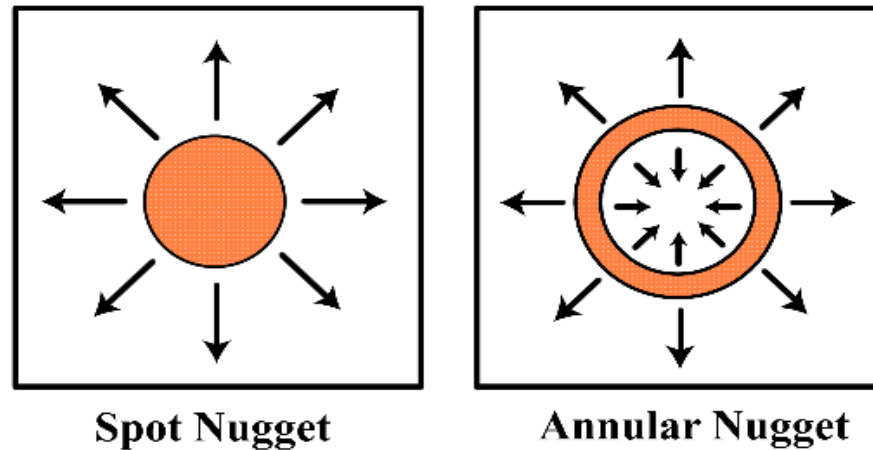


焊点结合面积对比

圆形焊核和环形焊核焊核尺寸对比

■ 环形焊核与圆形焊核对比

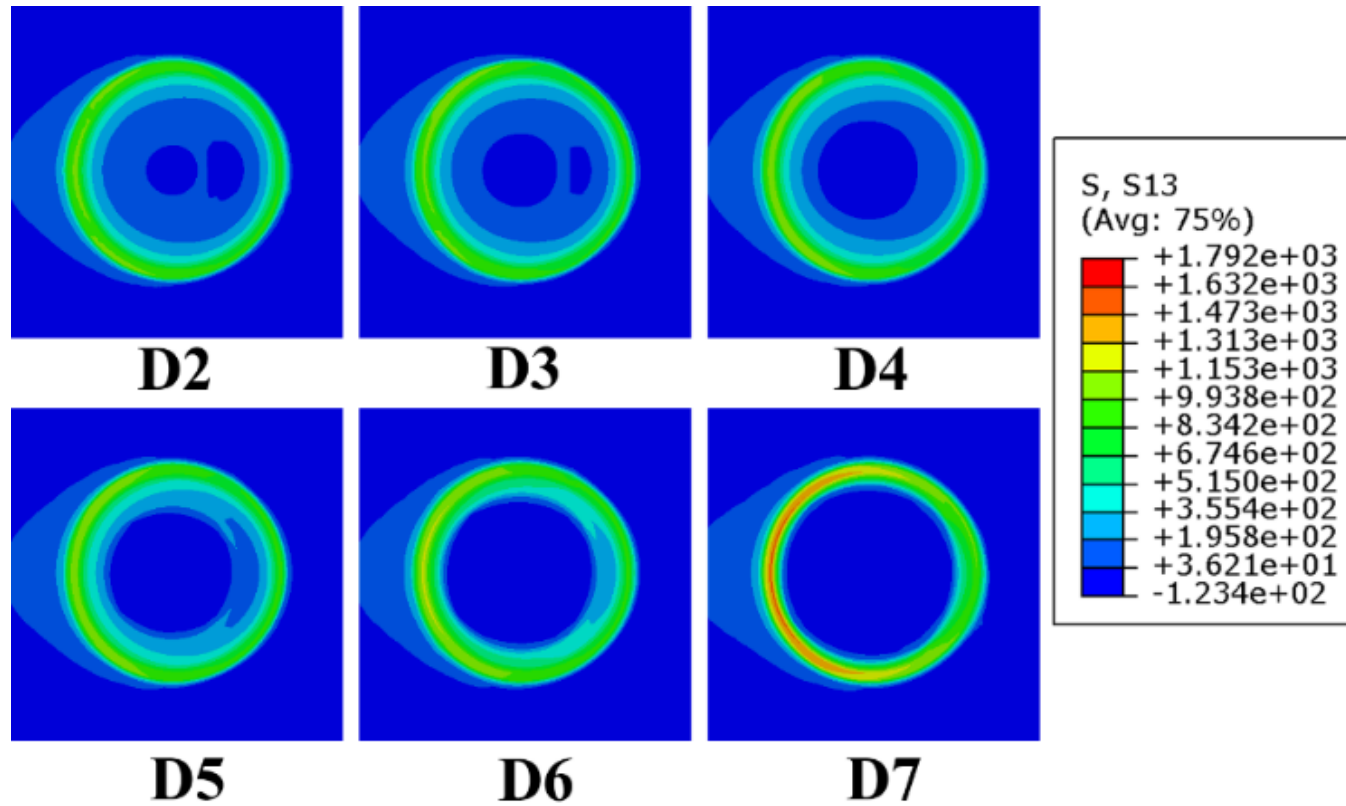
1. 可形成冶金结合的工艺窗口更宽：80-200ms：50-100ms
2. 更小的表面压痕深度：200ms (0.12mm)：100ms (0.35mm)
3. 更大的焊核连接面积：200ms (69mm²)：100ms (46.2mm²)



中心未熔合对性能的影响？焊点的力学性能需要评估。

■ 环形焊点的力学性能分析

采用数值模拟的方法对焊核受到载荷时的应力分布进行了分析，设置环形焊核外径8mm，内径从7mm到2mm(D7-D2)逐渐递减。

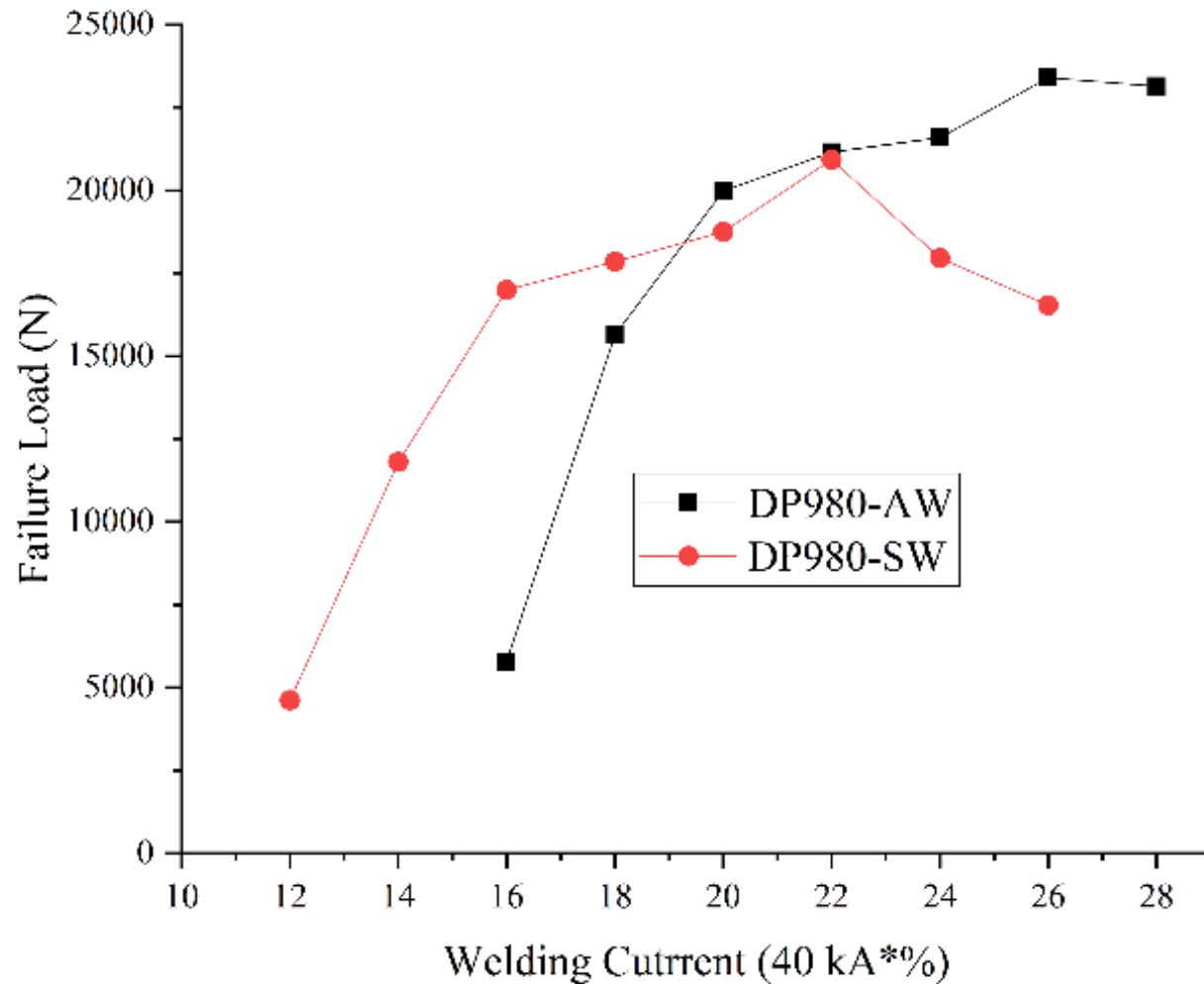


剪切应力分布云图

1. 无论内径尺寸大小，高剪切应力主要分布在焊核边缘环宽1.5mm的区域内；
2. 不同环形焊核内径的条件下，应力分布均位于焊核边缘，焊核中心区域应力值较低；
3. 当焊核环宽大于2mm后，熔合区域内可以给应力分布的下降提供了足够的空间；
4. 在确保整体连接面积的基础上，环形焊核中心未熔合区域不会对力学性能产生影响。

■ 环形焊点力学性能测试 (拉伸剪切)

焊接时间 (100ms), 焊接压力 (150kg), 不同焊接电流



1. 圆形电极，12-22%电流条件下，焊核强度增加，电流超过22%时开始产生飞溅，焊核强度开始下降；
2. 环形电极，随着电流增加环形焊核接头强度迅速提高，并且22%电流时超过圆形焊核强度，并且电流继续增加时可以保持继续增长的趋势；
3. 环形电极，飞溅在28%电流条件下开始产生，相对稳定的焊接过程使其可以获得随电流增加而持续提高的强度。

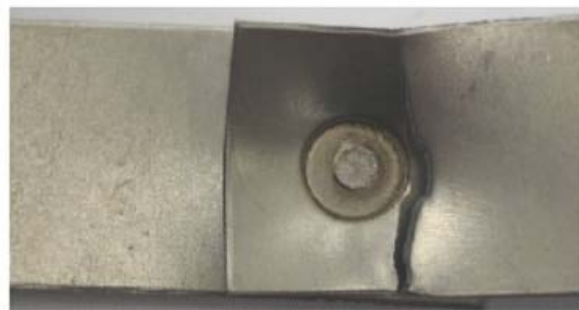
■ 环形焊点力学性能测试（拉伸剪切）



16%*40kA



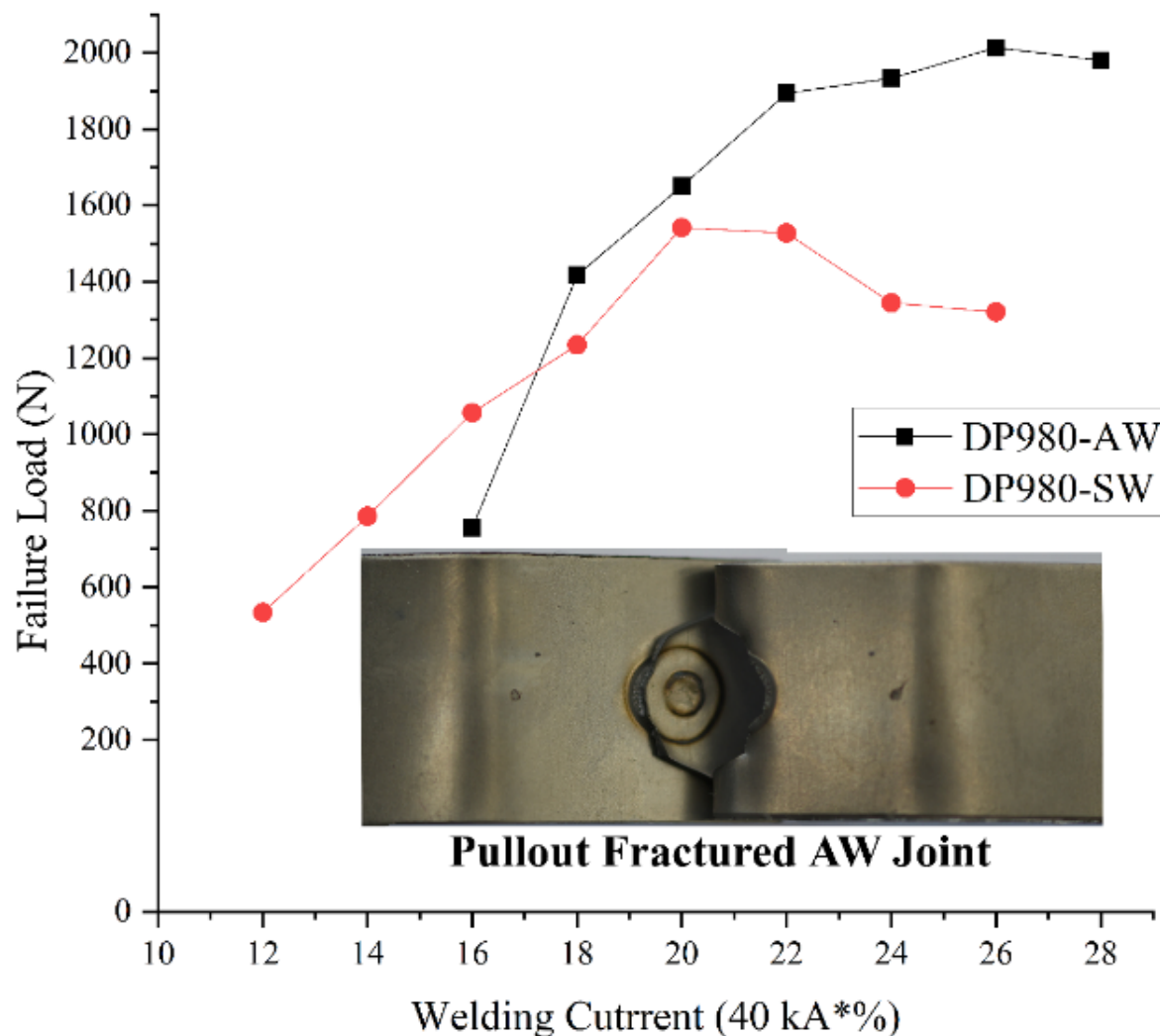
20%*40kA



24%*40kA

1. 电流为16%和18%条件下接头断裂方式为界面式断裂，断口形貌和焊核表面形貌相对应；
2. 达到20%电流时断裂模式转变为拔出式断裂模式，断裂起始位置位于焊核边缘；
3. 24%之后断裂起始位置转变为焊核外侧。

■ 环形焊点力学性能测试（剥离）

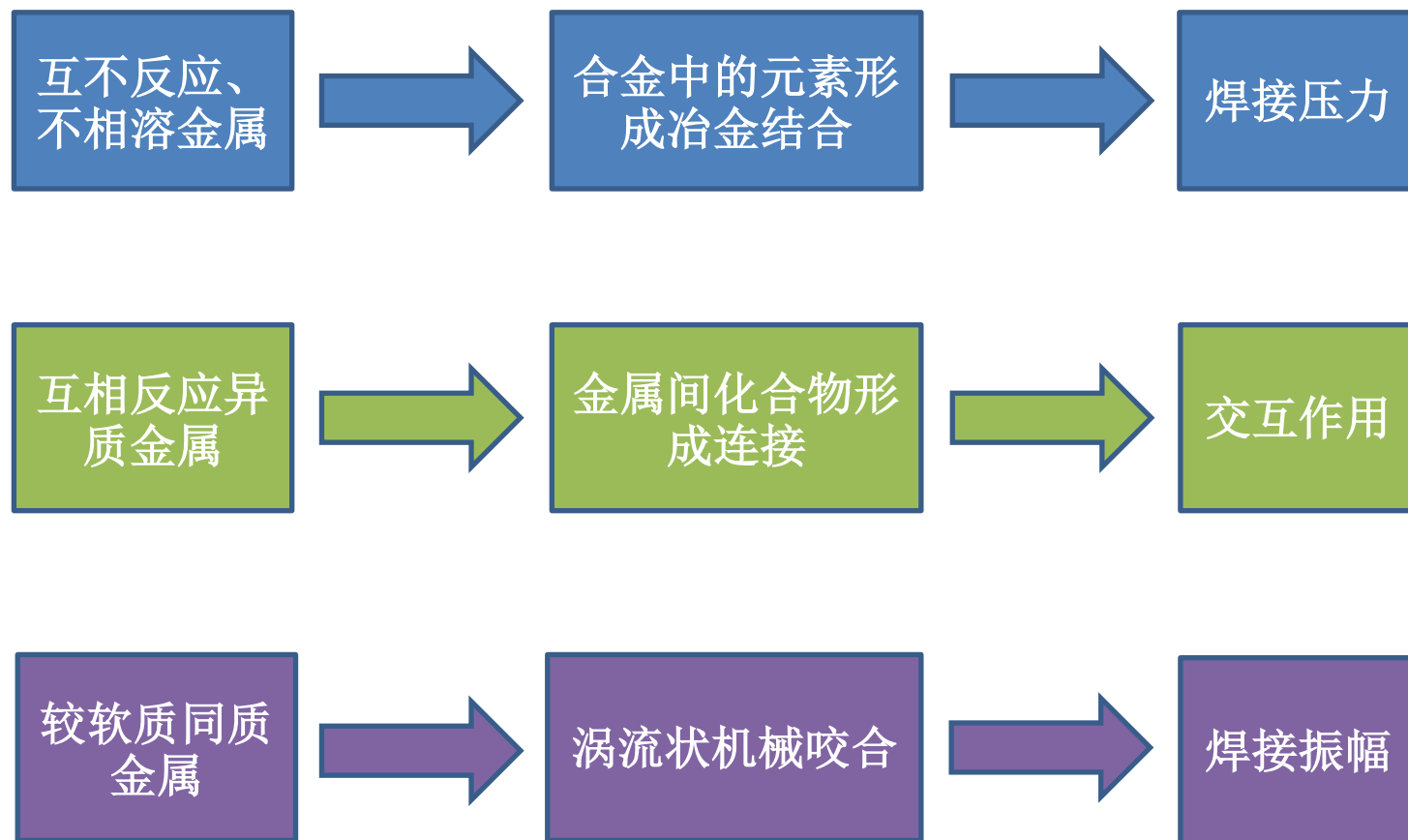


1. 圆形焊核剥离最高失效载荷呈现先增加后减小的趋势，在20%电流时达到峰值1542N；
2. 环形焊核失效载荷随焊接电流的提高而迅速增加，峰值为2013N；
3. 电流值在20-28%范围内均高于圆形焊核的最高失效载荷；
4. 接头断裂模式均为沿焊核边缘起始的拔出式断裂。



结论与讨论

一、超声波焊接接头连接机理、影响权重、疲劳性能



两种疲劳破坏形式：
(1) 疲劳裂纹扩展沿焊接接头表面（界面破坏）
(2) 裂纹沿母材顶部或底部扩展（弯折裂纹）

铝-铝接头的失效模式都是弯折形破坏，焊接能量对接头在高周期下的疲劳寿命有着显著的影响，焊接能量越大，接头的疲劳寿命越低。

二、陶瓷芯环形电阻焊电极

1. 采用环形电极焊后可以形成形状与之端面对应的环形焊核，并获得比传统电极更大的连接面积。
2. 采用环形电极时，板材界面首先在环形铜端面作用处产生较小宽度的环形液态焊核，随着时间的延长液态焊核同时向内和向外生长。
3. 陶瓷芯作用区域一方面可以为焊核的向内长大提供空间，另一方面避免了热量在局部集中。
4. 环形电极形成连接所需要的能量阈值高于圆形电极，但可以在更大的参数范围内获得很小的表面压痕深度，并避免飞溅的产生。
5. 环形焊核应力集中位于焊核边缘，中心未熔合界面处于低应力值区域，可以提供比圆形焊核更高的拉伸剪切强度和剥离强度。



Thanks

zhaokunmin@honzonauto.com
