

# 电极偏斜对高强钢电阻点焊的影响机理研究\*

闫德俊<sup>1,3</sup>, 夏裕俊<sup>2,4</sup>, 宁付星<sup>3</sup>, 饶宇中<sup>3</sup>, 宋强<sup>2</sup>, 李永兵<sup>2</sup>

(1. 佛山大学, 广东省舰船先进焊接技术重点实验室, 佛山 528051;

2. 上海交通大学, 上海市复杂薄板结构数字化制造重点实验室, 上海 200240;

3. 中船黄埔文冲船舶有限公司, 广东省舰船先进焊接技术重点实验室, 广州 510715;

4. 上海智能制造功能平台有限公司, 上海 201306)

**[摘要]** 汽车车身轻量化技术的发展使高强钢广泛应用于汽车工业中, 也为车身焊装制造中的电阻点焊工艺带来新的挑战。电极偏斜等常见异常工况的产生, 会对焊接过程的一致性产生负面影响。本文通过对比标准工况与电极偏斜工况下的多传感信号、焊点表面形貌、熔核尺寸及接头形成过程, 揭示了电极偏斜对电阻点焊过程的影响机制。结果表明, 与标准工况相比, 电极偏斜增加了板间界面的初始接触面积, 导致板材升温减慢, 电阻信号峰值后移, 形核时间滞后。在焊接过程中, 板间和电极-板材间界面的接触面积均增加, 导致动态电阻信号减弱和产热量减小, 因此熔核尺寸和电极位移信号低于标准工况。此外, 沿长度方向的接触面积更大导致热输入比例更高, 因此在该方向上熔核和压痕的尺寸更大。本研究可为实际生产环境中高强钢电阻点焊工艺优化和复杂工况下的点焊在线质量监控提供理论支撑。

**关键词:** 电阻点焊; 高强钢; 电极偏斜; 影响机制

## Research on Influence Mechanism of Electrode off Normal on Resistance Spot Welding Process of High Strength Steel

Yan Dejun<sup>1,3</sup>, Xia Yujun<sup>2,4</sup>, Ning Fuxing<sup>3</sup>, Rao Yuzhong<sup>3</sup>, Song Qiang<sup>2</sup> & Li Yongbing<sup>2</sup>

1. Foshan University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology for Ships, Foshan 528051;

2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai Key Laboratory of Digital Manufacture for Thin-walled Structures, Shanghai 200240;

3. CSSC Huangpu Wenchong Shipbuilding Co., Ltd., Guangdong Provincial Key Laboratory of Advanced Welding Technology for Ships, Guangzhou 510705;

4. Shanghai Spaceflight Manufacture Co., Ltd., Shanghai 201306

**[Abstract]** The development of lightweight car body technology has led to widespread usage of high-strength steel in automotive industry, which brings new challenges to the resistance spot welding (RSW) process in car body welding and manufacturing. The occurrence of common abnormal working conditions, such as electrode axis off normal (ON) can negatively impact the consistency of RSW process. In this paper, the influence mechanism of ON condition on spot welding process is revealed by comparing multi-sensor process signals, weld surface morphology, nugget size and joint formation process under standard and ON conditions. The results indicate that compared with the standard condition, the ON condition increases the initial contact area of the sheet-sheet interface, which leads to a slower temperature rise of sheets, a later peak in resistance signal and a delayed nucleation time. In the welding process, the contact area of sheet-sheet and electrode-sheet interface increases, which leads to the decrease of dynamic resistance signal and heat generation, so the nugget size and electrode displacement signal are

\* 中国科协青年人才托举工程项目(YESS20220612)、上海市“科技创新行动计划”启明星项目(23QB1405700)和广东省舰船先进焊接技术企业重点实验室基金(2023B1212070026)资助。

原稿收到日期为2024年07月01日,修改稿收到日期为2024年08月30日。

通信作者: 夏裕俊, 助理教授, E-mail: xyjdbgt6509@sjtu.edu.cn。

smaller than the standard condition. Furthermore, the larger contact area along the length direction leads to more heat generation, ultimately resulting in a larger nugget dimension and indentation size in this particular direction. This study can provide theoretical support for the optimization of high-strength steel resistance spot welding process in actual production environment and online quality monitoring of spot welding under complex working conditions.

**Keywords: resistance spot welding; high strength steel; electrode misalignment; influence mechanism**

## 前言

为响应国家节能减排的政策,车身轻量化技术的开发已成为了汽车工业的研究热点<sup>[1-2]</sup>。目前,轻质高强材料已广泛应用于交通运输领域的薄壁车体制造,它可以在保证安全性能的前提下,减小板材厚度和整车质量<sup>[3]</sup>。

电阻点焊(resistance spot welding, RSW)技术是一种实现薄板结构点连接的常用工艺<sup>[4-5]</sup>。其原理是由一对电极对金属板加压,利用焊接电流和工件之间的接触电阻产生的焦耳热,使金属于工件界面处熔化形成熔核,实现工件之间的连接。因此,电极间的总电阻决定了熔核生长,也影响着焊接质量<sup>[6]</sup>。然而,高强钢材料弹性模量高,导致成型回弹大,装配偏差难以控制,使生产线中的焊接过程不稳定<sup>[7]</sup>。当异常工况产生时,电阻点焊过程中的初始电阻受到影响,将导致焊接质量波动,甚至出现焊接缺陷<sup>[8-9]</sup>。

电极偏斜工况(off normal, ON)是指两电极中轴线与待焊板材表面不垂直。已有学者针对这种异常工况开展了一些研究,Cho等<sup>[10]</sup>和Xing等<sup>[11]</sup>发现电极偏斜工况会引起点焊的工艺窗口右移,表明在相同工艺参数下熔核直径将减小。Nielsen等<sup>[12]</sup>建立了三维有限元模型,表明电极偏斜工况影响板材内部温度场分布,导致熔核形状不对称。Lee等<sup>[13]</sup>设计了不同倾角的电极偏斜工况实验,并研究了偏斜角度对过程信号的影响:电极偏斜会增大电极/工件(E/S)界面的接触面积,减小焊接电流密度并增大散热面积,使加热程度减弱、动态电阻信号的特征峰滞后,从而导致熔核直径减小。

为解决上述问题,须建立电极偏斜工况下的焊点质量监测和智能控制方法。研究表明,可以通过过程信号来间接描述熔核生长过程。对能反映熔核生长过程的动态电阻<sup>[14]</sup>、功率因数<sup>[15]</sup>、电极压力<sup>[16]</sup>、电极位移<sup>[17]</sup>、声发射<sup>[18]</sup>等过程信号进行实时测量;建立被测过程信号与熔核尺寸、压痕深度等焊点关键

质量指标的关联数学模型,进而对焊点质量进行在线评价和智能控制<sup>[19]</sup>。厘清异常工况对电阻点焊工艺的影响机制,是在实际生产中实现点焊质量在线监测和智能控制的基础。然而,现有研究对电极偏斜工况影响机制的分析仍不够清楚,缺乏对点焊形核过程、接头形貌演化和电极位移等传感信号之间关联影响机制的充分认识,导致面向电极倾斜工况的异常诊断与工艺优化缺乏理论依据,亟须进一步研究。

本文使用高强钢DP590研究电极偏斜对电阻点焊过程的影响。首先在不同的电极偏斜角度条件下进行一系列焊接实验,利用多传感器检测系统分析不同过程信号的演变情况,并通过扫描表面和观察金相,对比标准工况下的焊点表面形貌与熔核尺寸变化。最后对电极/板材(electrode-to-sheet, E/S)和板材/板材(sheet-to-sheet, S/S)界面的能量输入和接触状态进行关联分析,系统研究了电极偏斜工况对接头形貌分布、熔核生长特征和多元过程信号演化的关联影响机制。

## 1 实验设计与平台搭建

### 1.1 电阻点焊系统

本研究的焊接实验均在机器人伺服电阻点焊系统上完成,该系统由FANUC R2000iB型六轴点焊机器人、FANUC R-30iB型机器人控制柜、OBARA C型伺服电驱点焊钳(枪)、MEDAR 6000S中频直流(MFDC)焊接控制器和自研夹具平台组成,逆变频率为1 kHz。针对0.8 mm+0.8 mm DP590裸钢板进行焊接实验。焊接规范选用端面直径6 mm的圆顶球面电极帽,电极压力设定为2.6 kN,焊接电流分别选用4、5、6、7、8和9 kA,焊接时间为150 ms,预压时间和保压时间均为200 ms。在每种焊接规范组合下进行多次焊接实验,采集并记录每个焊点的过程信号以供后续分析。实验中的电极材料为C15000铜钨合金,为了避免电极磨损带来的干扰,保证焊接过

程的一致性,每焊接 20 点后采用 CENTERLINE K4 自动修磨器对电极帽进行修磨,确保电极端面直径保持在 6 mm 且电极表面始终平整光滑。

### 1.2 电极偏斜工况设计

电极偏斜工况是指两电极与待焊板材表面不垂直,电极中轴线与板材的法线呈一定的倾角,其实现方式如图 1 所示。在模拟电极偏斜工况时,先将焊接工况调整为标准状态(standard,ST),然后将焊钳沿工件摆放的长度方向偏斜一定的角度,同时在待焊板材两侧施加夹紧力,避免焊接时板材整体旋转。夹紧力大小约为 5 kN,夹紧位置间距离为 80 mm。焊接位置仍旧位于两板搭接区域的正中心。本文中,电极倾角分别选用为 3° 和 6°,对应两种不同剧烈程度的偏斜工况,简记为“偏斜 3°”(ON3)和“偏斜 6°”(ON6)。

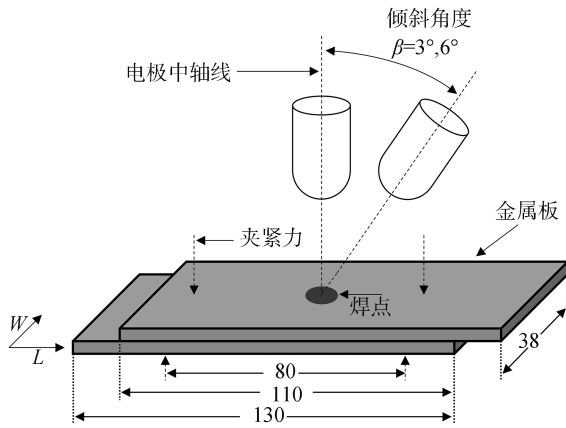


图1 电极偏斜工况试样尺寸(单位:mm)

### 1.3 多传感器监测系统

在伺服焊钳上安装多传感器监测系统,进行点焊过程中的信号采集,如图 2 所示。在静电极握杆上安装精度为 0.5% 的 MEATROL FCT-350 柔性罗氏线圈,测量焊接电流。在电极上、下端安装两个探头,实现对次级电压的测量,根据欧姆定律计算动态电阻。将 KISTLER 9232A 型表面应变传感器沿纵向安装在静电极机臂的外表面,间接测量电极力。选用分辨率为 32 768 个脉冲/圈的 PEPPERL+FUCHS RHI58N 型增量式旋转编码器,测量动电极的位移。最后信号采集装置以 500 KSPS 的采样率(采样数/秒)收集传感器输出信号,每 125 个原始数据进行平均处理以减少信号噪声,随后实时传输到个人电脑。

### 1.4 焊接性能测试

焊接后,采用 LEICA 体视光学显微镜与

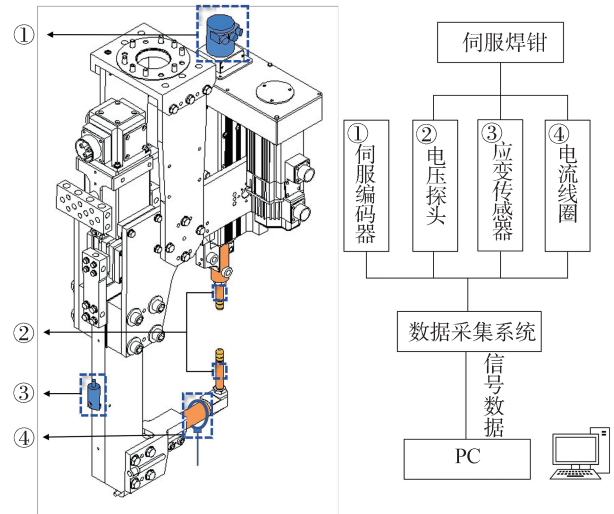


图2 电阻点焊过程多传感器监测系统

KEYENCE 激光共聚焦显微镜观测焊点表面的宏观形貌,并采用圆顶螺旋测微仪测量双侧表面压痕的总深度。为观察焊缝的宏观结构,分别沿板材长度和宽度方向剖开焊点,并通过镶嵌制成金相试样,如图 3 所示。之后,采用 320、800、1 200 和 2 400 号砂纸进行表面打磨,经 0.05 μm 氧化铝悬浮液抛光至镜面后,使用 4% 硝酸酒精试剂对金相试样腐蚀 4 s,随后在 LEICA DM6M 光学显微镜下观测其截面宏观形貌。

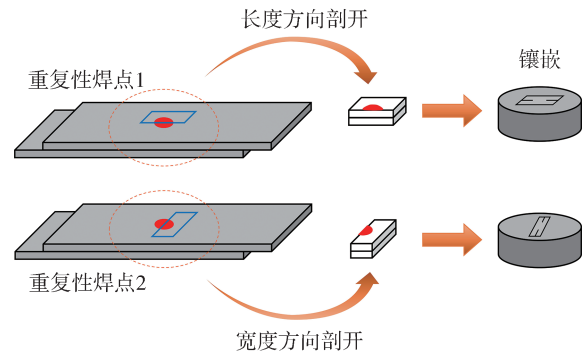


图3 金相标本的制备

### 1.5 接触压力测量

本文采用具有精确压力感应范围的 FUJIFILM 感压纸来测量接触压力分布并研究异常工况下的接触状态差异。这是一种具有自着色功能的薄膜压敏纸,其构成包括 PET 基材、成色材料与显色材料。其中,成色材料被放置于薄膜微胶囊中,再将微胶囊和显色材料一前一后涂在 PET 基材上。施加压力时,微胶囊被破碎,显色材料吸收成色材料并发生反应

变为红色,薄膜上出现红色斑点,斑点的颜色亮度与压力水平有关。实验中使用了MS级(10~50 MPa)、HS级(50~130 MPa)和HHS级(130~300 MPa)3种不同等级的感压纸,分别将其放置在上层板上方和两层板材中间,以同时测量S/S界面和E/S界面的接触压力及分布情况,如图4所示。

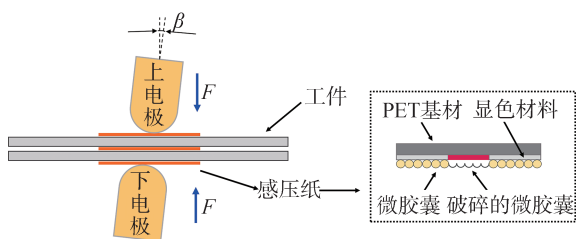


图4 使用感压纸进行压力测量示意图

## 2 异常工况对过程信号的影响

### 2.1 动态电阻信号

图5显示了在标准(ST)、偏斜3°(ON3)和偏斜

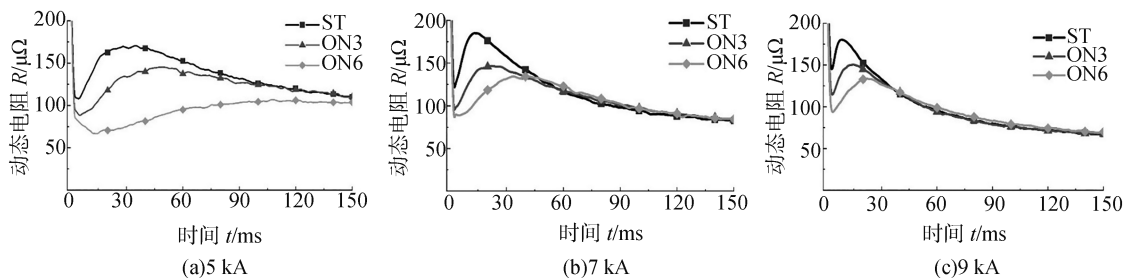


图5 标准与偏斜工况下不同焊接电流的动态电阻信号对比

### 2.2 电极位移信号

图6显示了在标准、偏斜3°和偏斜6°工况下电极位移信号的对比。在标准工况下,电极位移信号均呈现出先增大后减小的变化规律。这一现象主要是板材受热膨胀和变形压缩的综合叠加造成的。板材受热升温并发生热膨胀,引起电极位移信号增长;

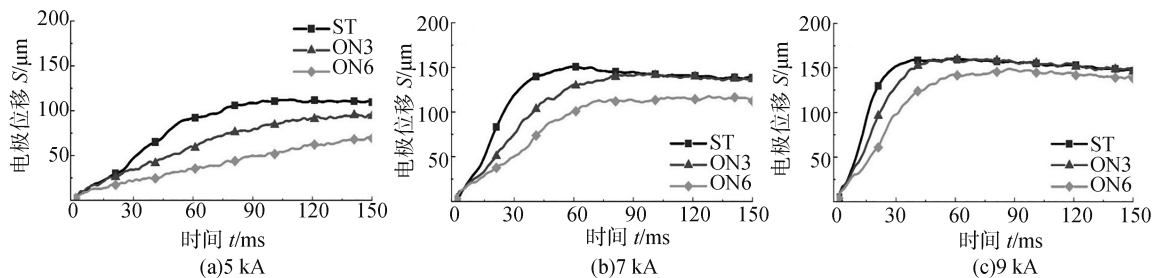


图6 标准与偏斜工况下不同焊接电流的电极位移信号对比

6°(ON6)工况下动态电阻信号的对比。在标准工况下,动态电阻信号在焊接初期快速降低,各界面的接触电阻占动态电阻的主要部分,接触界面产热使界面软化,引起接触电阻急剧减小。同时,板材受热升温使板材的电阻迅速增大,引起动态电阻信号在达到局部谷值后快速增长。随后,板材温度达到熔点后发生形核,接着熔核逐渐长大,导致电流导通面积不断扩大,动态电阻的增长趋势逐渐减小并达到局部峰值。随着熔核直径的持续增大,导电面积也越来越大,动态电阻信号将逐渐降低<sup>[20]</sup>。

电极偏斜工况主要对峰值前的动态电阻信号产生影响,在峰值特征出现后动态电阻迅速恢复至与标准工况相同水平。焊接电流越小或者工况干扰越剧烈,电极偏斜工况引起的电阻峰值滞后程度越大,初期上升速率和电阻峰值均相应减小。此外,峰值前的动态电阻信号的降低使得平均电阻减小,且工况干扰越剧烈减小量越大。但是随着焊接电流的增加,电极偏斜工况对平均电阻的影响程度将迅速降低。

同时,板材表面受热软化,电极逐渐压入板材,使电极位移信号减小<sup>[21]</sup>。在焊接初期,板材本体温度快速增加而板材表面温度仍较低,受热膨胀行为占主导,此时电极位移信号迅速增加。随着焊接时间的增长,板材表面达到较高温度发生软化,在电极压力作用下产生的塑性变形量越来越大,使得电极位移

信号到达峰值甚至逐渐减小。

偏斜 $3^\circ$ 工况主要对峰值前的电极位移信号产生影响,使位移峰小幅度降低,峰值时间小幅度滞后,初期上升速率降低;在峰值之后电极位移信号基本恢复至标准工况相同水平,使得平均值较标准工况有所降低,峰值后跌落量小幅度减少。而对于偏斜 $6^\circ$ 工况,峰值时间发生大幅滞后,电极位移峰值和平均值也均发生了显著降低。可见,电极偏斜工况主要引起电极位移信号峰值时间增大,峰值后跌落量和平均值减小,且工况越剧烈影响越严重。焊接电流的增大可适当减弱电极偏斜工况的影响程度。

### 3 接头宏观形貌影响

#### 3.1 表面形貌分析

图7显示了标准、偏斜 $3^\circ$ 和偏斜 $6^\circ$ 下焊接电流为8 kA时的焊点表面形貌。焊点表面压痕在工件长度和宽度方向上的尺寸为5.639和5.565 mm,压痕近似为圆形。结合三维表面形貌观测,可以发现电极偏斜与板材扭曲对压痕偏斜程度的综合影响。以8 kA电流的焊点为例,利用压痕中心圆弧的切线与板材远端平面的夹角代表实测倾角,可测得板斜 $3^\circ$ 与板斜 $6^\circ$ 工况的实测表面倾角分别为 $2.2^\circ$ 与 $4.3^\circ$ ,约为电极倾角的 $2/3$ 左右。

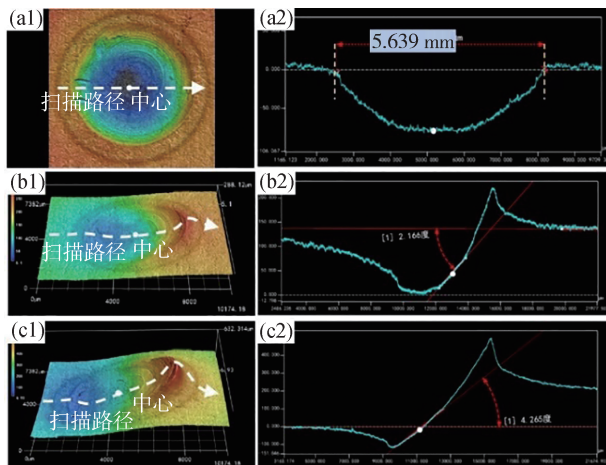


图7 标准和偏斜工况下焊点三维表面形貌:(a1)~(a2)标准,(b1)~(b2)偏斜 $3^\circ$ , (c1)~(c2)偏斜 $6^\circ$

图8显示了在标准、偏斜 $3^\circ$ 和偏斜 $6^\circ$ 工况下不同焊接电流对压痕几何参数的影响。其中 $d_{L}$ 和 $d_{W}$ 分别表示沿工件长度和宽度方向的表面压痕直径, $S_i$ 为压痕的水平投影面积, $\delta_i$ 表示双侧表面压痕的总

深度。在标准工况下,随着焊接电流增大,表面压痕的直径与深度同时增大。焊点表面压痕在工件长度和宽度方向上的尺寸基本相同,压痕周向轮廓呈现为圆形,说明在长度和宽度方向上的焊接生热与传热条件基本一致。

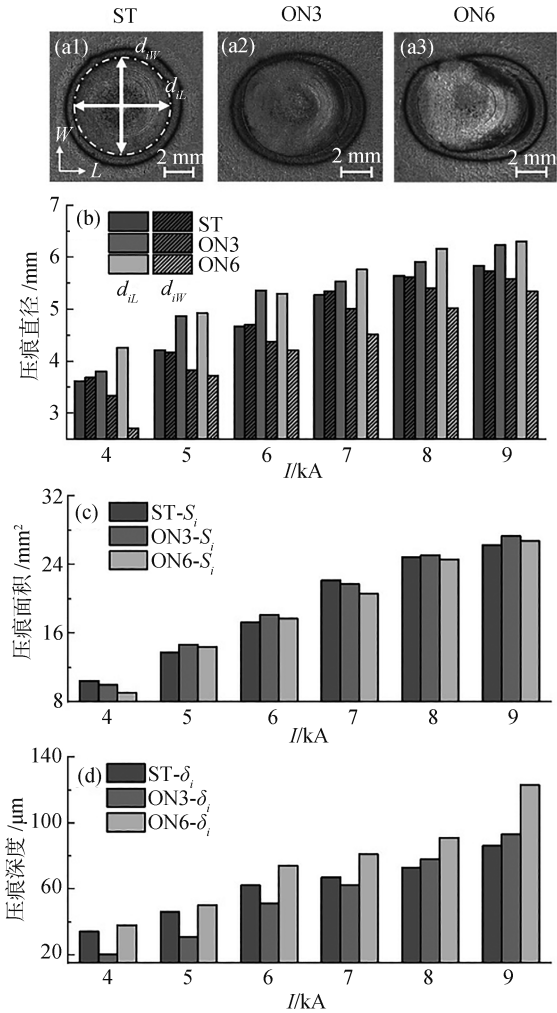


图8 标准、偏斜 $3^\circ$ 和偏斜 $6^\circ$ 工况下焊点压痕形貌和几何参数对比:(a1)~(a3)表面形貌,(b)沿长度和宽度方向的表面压痕直径,(c)压痕的水平投影面积,(d)表面两侧压痕总深度

与标准工况相比,偏斜工况下随着焊接电流增大,表面压痕的长宽与深度同时增大。由于电极向工件长度方向偏斜,表面压痕在长度方向的尺寸显著大于宽度方向,压痕周向轮廓接近椭圆形。偏斜角度越大,上述尺寸差异越大。这说明电极偏斜工况的存在使得长度和宽度方向上的生热与传热条件不一致。此外,与标准工况相比,偏斜 $3^\circ$ 工况下的压痕水平投影面积没有显著差异,而偏斜 $6^\circ$ 工况下的面积有所减小。

### 3.2 熔核尺寸分析

图9显示了标准工况下焊接电流为8 kA时的焊点截面形貌,熔核和热影响区分别用白色和红色虚线表示。在图9(a1~a2)中标准工况下,熔核在长度方向与宽度方向的尺寸基本一致,差值仅为0.15 mm,说明在标准工况下熔核的水平剖面形状接近圆形,没有显著的方向性差异。然而在偏斜工况下,由于电极沿工件长度方向偏斜,可在长度方向剖面上观察到显著的扭曲变形,如图9(b1~b2)和图9(c1~c2)所示,焊接条件的干扰越严重,熔核的方向差异越显著。

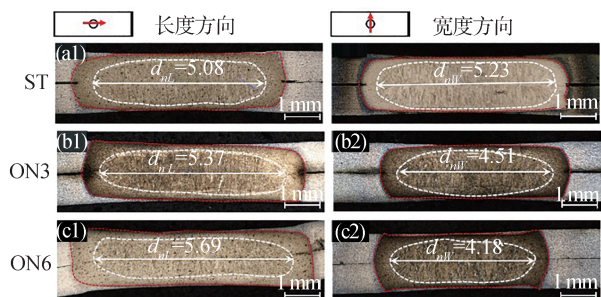


图9 偏斜工况下不同电流的焊点截面形貌:(a1)~(a2)标准工况,(b1)~(b2)偏斜3°, (c1)~(c2)偏斜6°

图10是焊接电流为4~9 kA时(焊接时间为150 ms)焊点截面形貌的统计。为了综合比较不同工况下的熔核宏观形貌,使用 $d_N$ 、 $d_H$ 和 $p_N$ 代表板间界面(水平剖面)的平均熔核直径、平均热影响区直径

和平均熔核厚度,它们的计算方法如下:

$$\begin{cases} d_N = \frac{1}{2}(d_{nL} + d_{nW}) \\ p_N = \frac{1}{2}(p_{nL} + p_{nW}) \\ d_H = \frac{1}{2}(d_{hL} + d_{hW}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $d_{nL}$ 、 $p_{nL}$ 和 $d_{hL}$ 分别代表长度方向剖面的熔核直径、熔核厚度与热影响区直径; $d_{nW}$ 、 $p_{nW}$ 和 $d_{hW}$ 则代表宽度方向的相应指标。

由于标准工况下方向差异性很小,即 $d_{nL} \approx d_{nW}$ ,因此选用平均熔核直径 $d_N$ 进行比较。如图10所示,标准工况下当焊接电流为4~9 kA时均有熔核形成。随着焊接电流的增加,熔核直径与厚度同时增加。在偏斜3°工况下,焊接电流为4 kA时没有熔核形成;在偏斜6°工况下,焊接电流为4与5 kA时均没有熔核形成;在其他焊接电流下,电极偏斜工况的平均熔核直径 $d_N$ 与平均熔核厚度 $p_N$ 均偏小(见图10(a3)与图10(c)),说明电极偏斜工况下的有效焊接热输入小于标准工况。

根据图10(a1~a2),当采用6 kA以上的焊接电流时,电极偏斜工况下焊点长度方向的直径 $d_{nL}$ 已达到甚至超过了标准工况,但由于宽度方向的直径 $d_{nW}$ 显著偏小,使得平均熔核直径 $d_N$ 仍小于标准工况。电极倾角越大, $d_{nL}$ 与 $d_{nW}$ 的差异越大。此外,随着焊接电流的增大,电极偏斜工况的 $d_N$ 、 $d_H$ 、 $p_N$ 与标准工况越来越接近,说明增大焊接热输入能够有效减少

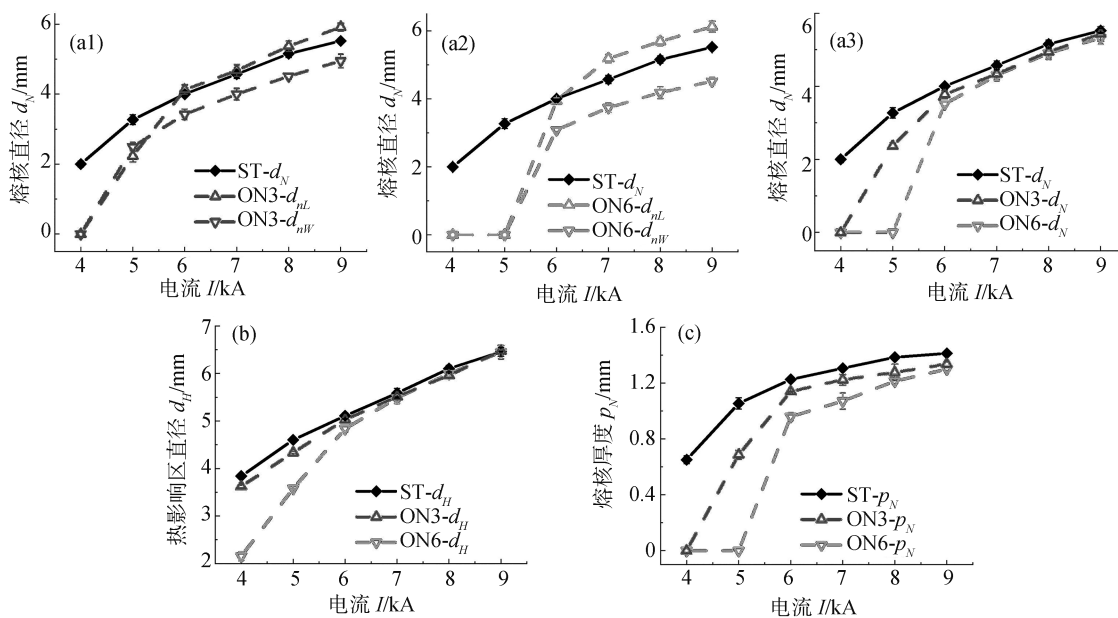


图10 标准工况与电极偏斜工况的熔核尺寸对比:(a1)~(a3)熔核直径,(b)热影响区直径,(c)熔核厚度

偏斜工况带来的不利影响,如图10(a3)、图10(b)与图10(c)所示。

### 3.3 接头形成过程分析

为了进一步研究偏斜工况对焊接过程的影响,研究多传感过程信号与接头宏观形貌的关联规律,对标准工况和偏斜 $6^\circ$ 工况下点焊接头的形成过程进行了分析。焊接初始压力为2.6 kN,焊接电流为8 kA,采用从10到150 ms共10种不同焊接时间进行焊接实验来获得接头宏观形貌的演化过程。

偏斜 $6^\circ$ 工况下的形核过程发生了大幅度滞后,

形核时间在30~40 ms之间,如图11(a2)和图11(b2)所示,这说明偏斜工况在焊接初期的有效热输入整体偏小。在150 ms焊接时间范围内,偏斜 $6^\circ$ 工况的 $d_N$ 、 $p_N$ 和 $d_H$ 均小于标准工况,但差异会随着焊接时间的延长而逐渐减小,这与图10中较大焊接热输入使异常工况影响减弱的现象吻合。根据图11(a1)与图11(b1),熔核和热影响区的方向性尺寸差异产生于焊接初期,且随着焊接时间的增大而逐渐变大,在80 ms后基本维持稳定。这说明熔核的方向性差异与初期接触状态有关。

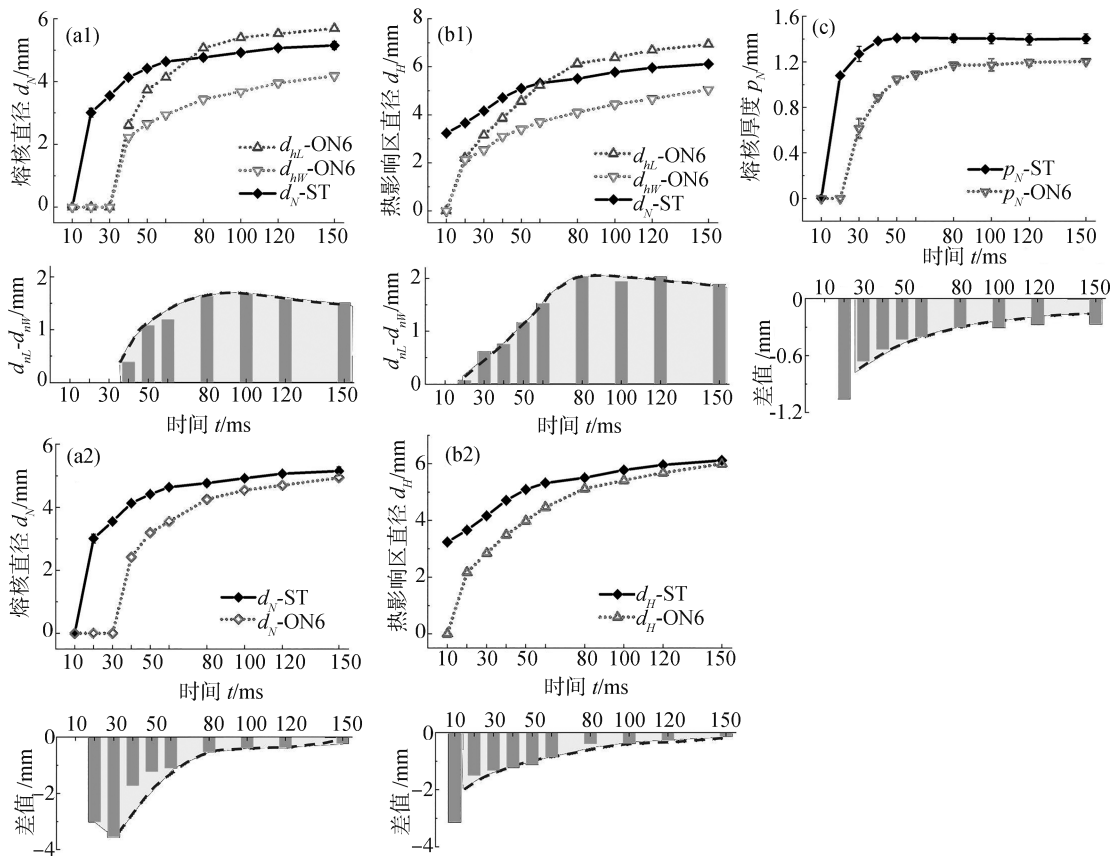


图11 8 kA下标准工况与偏斜 $6^\circ$ 工况的熔核生长过程对比:(a1)~(a2)熔核直径,(b1)~(b2)热影响区直径,(c)熔核厚度

## 4 影响机理分析

偏斜工况造成的影响始于焊接前的预压阶段。因此,为阐明偏斜工况对接头形貌和过程信号影响的内在机制,须分析预压阶段点焊接头各界面间的接触状态变化和能量输入演变。

### 4.1 接触状态分析

图12(a1)~图12(b3)显示了标准工况下预压阶段的接触面压力分布情况。对于S/S界面和E/S界

面,压印都接近圆形,在长宽方向上没有显著差异。感压纸灵敏度越高,压印的直径越大。

图12(c1)~图12(d3)是偏斜工况下预压阶段的接触面压力分布情况。对照FUJIFILM的标准比色卡,测定的不同压力范围的接触面积(压印面积)如图13所示。

对于E/S界面和S/S界面,压印长度方向的尺寸始终大于宽度方向,压印面积显著大于标准工况。这是因为电极偏斜并压紧板材时,电极与板材间的相互作用力存在沿长度方向的分量,增加了电极端

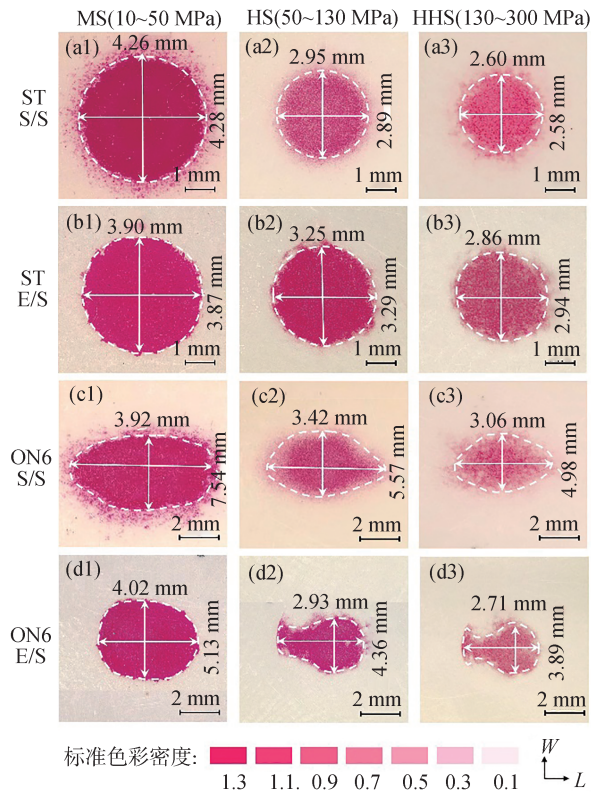


图12 标准工况与偏斜工况下的压印:(a1)~(a3)标准工况 S/S界面,(b1)~(b3)标准工况 E/S界面,(c1)~(c3)偏斜6°工况 S/S界面,(d1)~(d3)偏斜6°工况 E/S界面

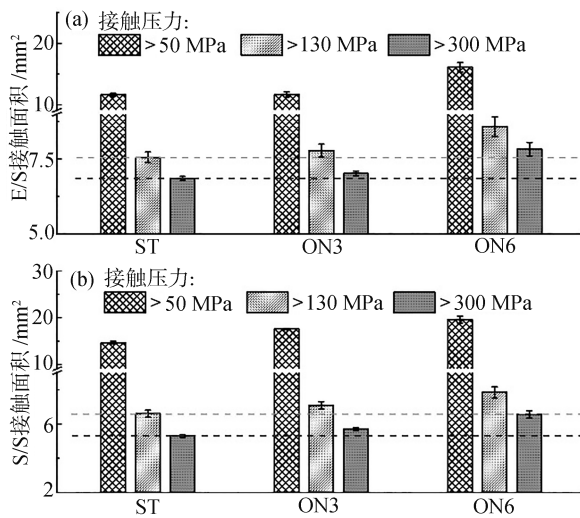


图13 不同接触压力范围的接触面积测量结果:  
(a) E/S界面,(b) S/S界面

面与板材表面沿长度方向的变形量,从而导致长度方向的接触面积增加。同时,电极偏斜引起垂直板材方向的作用力分量轻微减小,使得沿宽度方向的接触面积略微减小。综合而言,E/S界面的接触面积

显著增大。由于没有板间间隙,E/S界面的接触直接决定了S/S界面的接触程度,故S/S界面的接触面积也显著增大,且长度方向的压印尺寸大于宽度方向。对比图12与图8和图9,可以发现电极偏斜工况的接触面积、表面形貌和熔核大小在长宽方向上的相对大小关系具有高度一致性,说明接触状态差异是导致熔核尺寸非对称性的重要原因。

#### 4.2 能量输入分析

电阻点焊的工艺原理是利用电流通过导体的焦耳效应将电能转换为热能,从而加热并熔化材料实现连接。热输入大小与分布是影响点焊接头形貌的关键因素。根据焦耳定律, $t$ 时间内的总热量输入  $E_{IN}$  为

$$E_{IN} = \int_0^{t_w} I^2 R dt = E_{Acc} + E_{Loss} \quad (2)$$

式中: $I$ 为焊接电流; $R$ 为两电极间的动态电阻。总能量输入有一部分通过电极、工件的热传导,以及空气等介质的热对流散失( $E_{Loss}$ ),剩余部分在焊接区域积累( $E_{Acc}$ )从而加热工件。在恒流控制模式下,电流不随焊接时间变化,可将式(2)变为

$$\begin{cases} E_{IN} = I^2 \int_0^t R dt = I^2 R_{Avg} t_w \\ R_{Avg} = \frac{1}{t_w} \int_0^t R dt \end{cases} \quad (3)$$

式中  $R_{Avg}$  为  $t$  时间内的平均电阻。可见,相同焊接电流的热量输入主要由平均电阻  $R_{Avg}$  决定。与标准工况相比,电极偏斜工况在焊接初期的E/S界面和S/S界面接触面积更大,导电通路面积更大,使得接触电阻更低,平均电阻  $R_{Avg}$  始终更小。从图5也能直观看出电极偏斜工况的  $R_{Avg}$  要小于标准工况,进而使得总热量输入  $E_{IN}$  偏小。此外,偏斜工况下E/S界面的接触面积总体上大于标准工况,沿电极轴向的散热能力略有提高。因此,在偏斜工况下熔核的直径与厚度均有减小。

#### 4.3 热分布分析

界面接触状态决定了焊接电流的分布,从而影响热输入的分布。可通过并联电阻等效电路模型来说明接触状态对热输入的影响机制,如图14所示。将两电极间与电极接触的板材区域划分为3部分:中心区域、长度方向区域和宽度方向区域,并将整个区域等效为由这3部分并联组成的电路。令  $R_L$ 、 $R_W$  和  $R_c$  分别表示长度方向、宽度方向和中心区域的电阻, $I_L$ 、 $I_W$  和  $I_c$  分别表示流经长度、宽度和中心区域的电流。根据分流定理和焦耳定律,存在以下关系:

$$\begin{cases} I_L: I_W: I_C = \frac{1}{R_L}: \frac{1}{R_W}: \frac{1}{R_C} \\ E_L: E_W = I_L^2 R_L t_w: I_W^2 R_W t_w = \frac{1}{R_L}: \frac{1}{R_W} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $E_L$  和  $E_W$  分别代表  $t$  时间内向长度和宽度方向区域输入的热量。可见,热量输入的分配与各区域的电阻呈反比。在相同压力水平下,当某一方向的接触面积增大时,该方向的导电面积增大、电阻减小,从而引起电流密度和热量输入分配比例的增加,继而改变接头的温度分布和宏观形貌。

#### 4.4 信号演化分析

图 15 对偏斜  $6^\circ$  工况下的过程信号与熔核生长行为进行了比较,进一步解释了偏斜工况下的信号演变。对于动态电阻信号,偏斜工况下峰值滞后于标准工况,在电阻峰值时刻后,两个工况下动态电阻信号的演化具有相似的规律。研究表明,动态电阻的峰值特征是板材平均温度达到钢的奥氏体转变温度  $Ac_3$  的间接表现<sup>[20]</sup>。偏斜工况导致在焊接初期的热影响区较小,板材初始升温速度较慢、温度较低。因此板材平均温度更晚到达  $Ac_3$ , 导致峰值电阻特

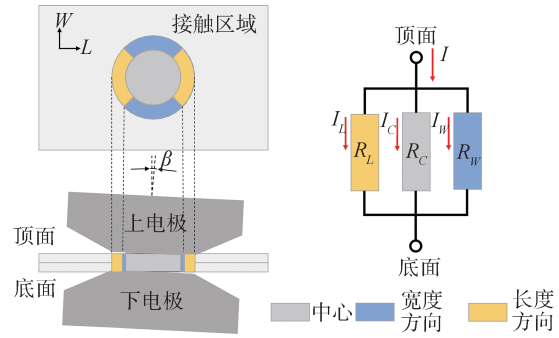


图 14 接触区域的等效电路模型示意图

征滞后。此外,偏斜工况使 E/S 接触面积增加,电流流经面积增大,这使得电阻信号低于标准工况。根据文献[20],进入“准稳态”阶段后,板材的平均温度基本稳定,熔核直径增大的速度减缓,动态电阻信号的变化主要取决于 E/S 界面接触直径  $d_{E/S}$  的大小,且随  $d_{E/S}$  的增大而不断减小。而根据图 15 (d) 可知,在形核后电极偏斜工况的接触直径  $d_{E/S}$  与标准工况相差较小,因此电阻信号演化规律相似,两种工况下的动态电阻信号收敛到相近值。

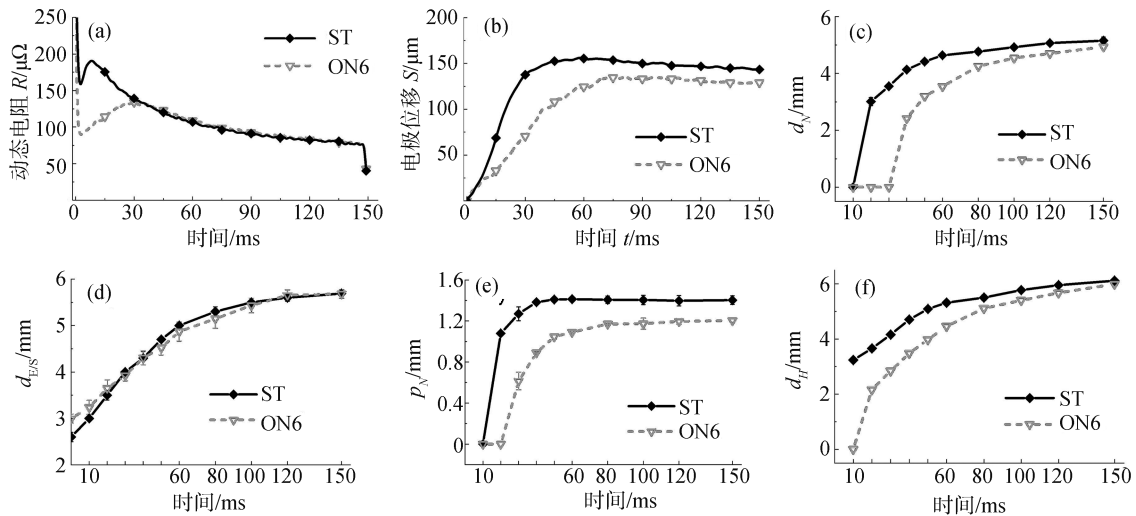


图 15 偏斜  $6^\circ$  工况的过程信号演化规律分析:(a) 动态电阻,(b) 电极位移,(c) 熔核直径,(d) E/S 接触直径,(e) 熔核厚度,(f) 热影响区直径

电极位移信号是板材热膨胀的直接反应,其中包括了固体和液体成分。当偏斜工况发生时,E/S 和 S/S 界面接触面积的增大使得动态电阻平均值低于标准工况,引起焊接产热减少,同时增大的接触面积促进了沿电极的热传导,引起散热增加,两者共同导致偏斜工况下的熔核直径、熔核厚度和热影响区尺寸小于标准工况,板材的热膨胀量更小,因此,偏斜工况下的电极位移信号小于标准工况。对比图 15

(b)和图 15(e)可以发现,电极位移信号的峰值时刻与熔核厚度的峰值时刻基本一致,证明了上述分析的准确性。

## 5 结论

本文研究了电极偏斜这种常见的异常工况对 DP590 高强钢电阻点焊的影响机理。通过比较标准

与偏斜工况下的多传感过程信号、焊点表面形貌、熔核尺寸与接头形成过程,并结合界面接触状态与能量输入分析,得出的主要结论如下。

(1)电极偏斜工况的存在会引起预压阶段E/S和S/S界面的接触状态发生变化,改变焊接过程的产散热条件,从而影响焊点的表面形貌、熔核尺寸和接头形成过程。这种影响可以通过动态电阻、电极位移等过程信号反映出来。

(2)电极偏斜工况下熔核的平均直径和厚度小于标准工况,这是由于电极偏斜使预压阶段S/S界面的接触面积增加,减小焊接初期的动态电阻,使得热量输入降低;同时E/S界面的接触面积增加,增强了焊接过程的散热。随着偏斜角度的增大,这种现象变得更加明显。

(3)电极偏斜增加了预压阶段S/S和E/S界面的接触面积,导致板材升温速度减慢,电阻信号的峰值后移,形核时间滞后。由于E/S接触面积的增加,动态电阻信号也显著减小,因此工件温度降低,导致由热膨胀引起的电极位移信号整体减小。

(4)在电极偏斜工况下焊点的几何形貌是非对称的,这是由于长度方向上的接触尺寸大于宽度方向,焊接电流更趋于流向长度方向,从而在该方向产生更多的热量,因此在长度方向上熔核和压痕的尺寸更大。

### 参考文献

- [1] WANG W, YU S, CAO W, et al. Review of in-vehicle optical fiber communication technology [J]. *Automotive Innovation*, 2022, 5(3): 272-284.
- [2] 谷先广, 陈红林, 俞陆新, 等. 精密铸铝件一体化设计及在车身轻量化中的应用 [J]. *汽车工程*, 2024, 46(1): 179-186.  
GU X G, CHEN H L, YU L X, et al. Integrated design of precision aluminum castings parts and its application in lightweight vehicle body [J]. *Automotive Engineering*, 2024, 46(1): 179-186.
- [3] 林忠钦, 马运五, 夏裕俊, 等. 载运工具高性能薄壁承载结构成形及连接工艺研究进展 [J]. *机械工程学报*, 2023, 59(20): 1-17.  
LIN Z Q, MA Y W, XIA Y J, et al. Advances in forming and joining processes of lightweight high-strength thin-walled vehicle structures [J]. *Journal of Mechanical Engineering* 2023, 59(20): 1-17.
- [4] SATONAKA S, MATSUYAMA K I. Review on inspection techniques for spot welds [J]. *Welding in the World-London*, 2000, 44(3): 29-36.
- [5] ZHOU K, YAO P. Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 124: 170-198.
- [6] BUTSYKIN S, GORDYNETS A, KISELEV A, et al. Evaluation of the reliability of resistance spot welding control via on-line monitoring of dynamic resistance [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2023, 34(7): 3109-3129.
- [7] MOOS S, VEZZETTI E. Compliant assembly tolerance analysis: guidelines to formalize the resistance spot welding plasticity effects [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 61: 503-518.
- [8] JUN H U, KIM J W, KIM J H, et al. Comparison of weldability misalignment between rivets and electrodes in aluminum/steel resistance element welding [J]. *Journal of Welding and Joining*, 2021, 39(1): 51-58.
- [9] 龙海强, 胡玉梅, 刘波, 等. 基于随机载荷的白车身焊点疲劳寿命预测 [J]. *汽车工程*, 2016, 38(8): 1006-1010.  
LONG H Q, HU Y M, LIU B, et al. Fatigue life prediction for the spot welds of body-in-white based on random loadings [J]. *Automotive Engineering*, 2016, 38(8): 1006-1010.
- [10] CHO Y, LI W, HU S J. Design of experiment analysis and weld lobe estimation for aluminum resistance spot welding [J]. *Welding Journal*, 2006, 85(3): 45-51.
- [11] XING B, YAN S, ZHOU H, et al. Qualitative and quantitative analysis of misaligned electrode degradation when welding galvanized steel [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 97: 629-640.
- [12] NIELSEN C V, ZHANG W, PERRET W, et al. Three-dimensional simulations of resistance spot welding [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2015, 229(7): 885-897.
- [13] LEE J, NOH I, JEONG S I, et al. Development of real-time diagnosis framework for angular misalignment of robot spot-welding system based on machine learning [J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 48: 1009-1019.
- [14] ZHAO D, IVANOV M, WANG Y, et al. Welding quality evaluation of resistance spot welding based on a hybrid approach [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2021, 32(7): 1819-1832.
- [15] ZHOU K, CAI L. Online measuring power factor in AC resistance spot welding [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 61(1): 575-582.
- [16] XIA Y J, SU Z W, LI Y B, et al. Online quantitative evaluation of expulsion in resistance spot welding [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 46: 34-43.
- [17] XIA Y J, SHEN Y, ZHOU L, et al. Expulsion intensity monitoring and modeling in resistance spot welding based on electrode displacement signals [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2021, 143(3): 031008.
- [18] DEJANS A, KURTOV O, VAN RYMENANT P. Acoustic emission as a tool for prediction of nugget diameter in resistance spot welding [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 62: 7-17.
- [19] 季钰荣, 孙晓屿. 整车焊点失效预测的研究及应用 [J]. *汽车工程*, 2019, 41(2): 219-224.

(下转第577页)

- [8] 祝晓龙. 基于轮胎智能化监测的车辆稳定性控制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.  
ZHU X L. Research on vehicle stability control based on intelligent tire monitoring[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [9] CUI L Z, AI J C, LEI W, et al. Analysis of effect on temperature field of tire curing process by initial temperatures and condensate discharging [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 257: 124424.
- [10] XU L, JIA P H, XUE Z D, et al. Monitoring overloaded trucks with infrared thermal imaging of tire sidewall[J]. Heliyon, 2024, 10(14):e34358.
- [11] MASAHIRO H, YOSUKE S, TMONHIKO S, et al. Measurement of road friction coefficient using strain on tire sidewall[J]. Precision Engineering, 2023, 84:28-36.
- [12] FERNANDA M, GARCIA-POZUELO D, DIAZ V, et al. Characterization of the loss of grip condition in the strain-based intelligent tire at severe maneuvers[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 168.
- [13] 刘钊汛, 刘志浩, 高钦和, 等. 基于精细参数化建模的重载轮胎接地特性分析[J]. 计算机仿真, 2023, 40(11):243-251, 310.  
LIU Y X, LIU Z H, GAO Q H, et al. Analysis of heavy-duty tire ground contact characteristics based on refined parameterized modeling [J]. Computer Simulation, 2023, 40 (11) : 243-251, 310.
- [14] TIAN T, DANIEL J, ROBERT E S, et al. Numerical evaluation of the temperature field of steady-state rolling tires [J]. Applied Mathematical Modelling, 2014, 38:1622-1637.
- [15] JUN Z, HONG W L, XIAO K Y, et al. A novel moisture damage detection method for asphalt pavement from GPR signal with CWT and CNN[J]. NDT & International, 2024, 145:103116.

~~~~~  
(上接第 550 页)

- JI Y R, SUN X Y. Research and application of vehicle welding spot failure prediction [J]. Automotive Engineering, 2019, 41 (2): 219-224.
- [20] XIA Y J, LV T L, GHASSEMI-ARMAKI H, et al. Quantitative interpretation of dynamic resistance signal in resistance spot welding [J]. Welding Journal, 2023, 102(4): 69-87.
- [21] XIA Y J, LI Z, WANG W, et al. Influence mechanism of initial gap disturbance on the resistance spot welding process [J]. Automotive Innovation, 2024: 1-13.

~~~~~  
(上接第 585 页)

- CAO Y T. Research on design and evaluation method of active sound generation system for electric vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [18] LIU Shengju, HAO Guitang, ZHOU Qin. A method for realizing variable speed and constant variable speed and variable speed system of sound: CN 200810202193. 3[P]. 2008-11-04.
- [19] 潘雷, 蔺磊, 顾彦. 基于“粒子算法”的汽车主动声效设计[J]. 上海汽车, 2019(7): 27-30, 40.  
PAN L, LIN L, GU Y. Design of automobile active sound based on “Particle Algorithm”[J]. SAIC, 2019(7): 27-30, 40.
- [20] 毛东兴. 车内声品质主观评价与分析方法的研究[D]. 上海: 同济大学声学研究所, 2003.  
MAO D X. Research on subjective evaluation and analysis method of vehicle interior sound quality [D]. Shanghai: Institute of Acoustics, Tongji University, 2003.
- [21] HEMPEL T, CHOUARD N. Evaluation of interior car sound with a new specific semantic differential design[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1999, 105(2\_S): 1280.