

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2024.12.15

电极带对不锈钢电阻点焊温度场影响的数值模拟

王 薇¹, 许永仕¹, 杨志斌², 徐 野³

1. 青岛四机宏达工贸有限公司, 山东 青岛 266111
2. 大连交通大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116028
3. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266111

摘要: 电阻点焊是一个涉及热、力、电多种物理场的复杂耦合过程, 广泛应用于不锈钢车体结构的连接。通过有限元模拟软件ABAQUS研究了电极带对不锈钢电阻点焊温度场的影响。电极带式点焊通过在电极与待焊板材之间加入电极带来降低压痕, 并保护电极。基于现场参数, 采用三维有限元建模, 分析了电极带对温度场、熔核尺寸和压痕深度的影响。结果表明, 电极带能延缓点焊区域散热, 有利于熔核的形成与长大; 同时, 电极带能有效扩大接触界面的受力面积, 减小被焊板材表面的压强, 从而有效降低压痕深度; 在相同点焊参数下, 电极带点焊形成的熔核比常规点焊略大。通过试验验证, 模拟结果与试验结果基本吻合, 进一步证实了电极带在电阻点焊中的积极作用。为电极带式电阻点焊工艺的制定和优化提供了理论支持。

关键词: 电极带; 有限元模拟; 电阻点焊; 温度场

中图分类号: TG453^{+.9} 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2024)12-0096-05

Numerical Simulation of Effect of Electrode Strips on Temperature Field of Resistance Spot Welding of Stainless Steel

WANG Wei¹, XU Yongshi¹, YANG Zhibin², XU Ye³

1. Qingdao Siji Hongda Industry & Trade Co., Ltd., Qingdao 266111, China
2. School of Material Science and Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China
3. CRRC Qingdao Sifang Locomotive and Rolling Stock Co., Ltd., Qingdao 266111, China

Abstract: This paper investigates the influence of electrode strips on the temperature field of stainless steel resistance spot welding through the finite element simulation software ABAQUS. Resistance spot welding is a complex coupling process involving thermal, mechanical, and electrical physical fields, widely used in the connection of stainless steel vehicle body structures. Electrode stripe spot welding reduces indentation and protects the electrode by adding an electrode stripe between the electrode and the workpiece to be welded. Based on field parameters, this study adopts three-dimensional finite element modeling to analyze the effects of electrode strips on the temperature field, nugget size, and indentation depth. The results show that the electrode stripe can delay the heat dissipation in the spot welding area, which is beneficial for the formation and growth of the nugget; at the same time, the electrode stripe can effectively increase the contact area of the interface, reduce the pressure on the surface of the workpiece, and thus effectively reduce the indentation depth. Under the same spot welding parameters, the nugget formed by electrode stripe spot welding is slightly larger than that of conventional spot welding. Through experimental verification, the simulation results are basically consistent with the experimental results, further confirming the positive role of electrode strips in resistance spot welding. This study provides theoretical support for the formulation and optimization of the electrode stripe resistance spot welding process.

Keywords: electrode strips; finite element simulation; resistance spot welding; temperature field

收稿日期: 2024-02-28 修回日期: 2024-09-11

作者简介: 王 薇(1988—), 女, 工程师, 主要从事轨道车辆焊接工艺研究。

通讯作者: 杨志斌(1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事轨道车辆焊接技术及应用等方面研究。E-mail: yangzhibin@djtu.edu.cn。

引用格式:王薇,许永仕,杨志斌,等. 电极带对不锈钢电阻点焊温度场影响的数值模拟[J]. 电焊机,2024,54(12):96–100.

Citation:WANG Wei, XU Yongshi, YANG Zhibin, et al. Numerical Simulation of Effect of Electrode Strips on Temperature Field of Resistance Spot Welding of Stainless Steel[J]. Electric Welding Machine, 2024, 54(12): 96–100.

0 引言

电阻点焊是一个涉及热、力、电多种物理场的复杂耦合过程^[1-2],不锈钢电阻点焊技术广泛运用于车体结构的连接^[3-5],无涂装不锈钢车体为了提升商品化效果,需避免或者减小焊后产生的压痕。电极带式点焊通过在电极与待焊板材之间加入电极带的方法降低压痕^[6],同时对电极进行保护,避免电极的磨损,能够满足车辆点焊内外部质量的要求,但由于形核过程具有瞬时性和不可见性,无法进行有效的试验观测^[7-8],给电极带式电阻点焊工艺的制定和优化带来了困难。

计算机数值模拟方法利用多物理场耦合分析能够再现点焊熔核形成过程中的电、热、力等相关物理场之间的相互作用,并通过分析这些场变量与焊接质量影响因素之间的关系制定合理的提升措施^[9-10]。电极带的加入使得点焊过程耦合变量增多,并且此前无相关研究可以借鉴,使得此点焊工艺方法的优化和提升无据可依。

本文针对电极带式电阻点焊方法在点焊过程中所起到的作用以及影响机制还缺乏系统研究的问题,电极带式点焊试验数据与数值模拟技术结果相结合,分析电极带对点焊内外部质量的影响规律,从而为制定和优化点焊工艺提供支持。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试样为上下两块不锈钢薄板搭接形式,上板材料为SUS301L-HT,尺寸40 mm×40 mm×1.5 mm,下板材料EN1.4318-2G,尺寸40 mm×40 mm×1.5 mm,待焊试样如图1所示,其化学成分和力学性能分别如表1、表2所示。点焊电极头材料为铜合金,尺寸如图2所示。电极带为厚0.2 mm、宽12 mm的镀铜不锈钢。实际电极带式点焊如图3所示,焊机采用型号为NM-CC3-110/1的C型点焊机。

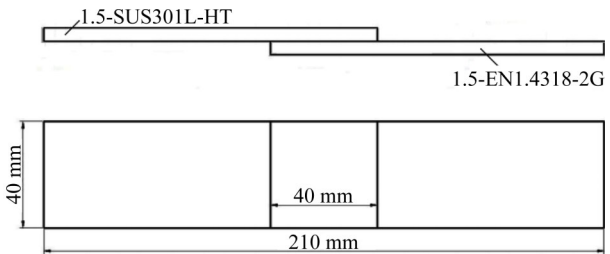


图1 点焊试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of spot welding specimen

表1 不锈钢板的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of stainless steel plate (wt. %)

不锈钢牌号	C	Si	Mn	P
SUS301L-HT	≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.045
EN1.4318-2G	≤0.03	≤1.00	≤2.00	≤0.045

不锈钢牌号	S	Cr	Ni	N
SUS301L-HT	≤0.030	16.00~18.00	6.00~8.00	≤0.20
EN1.4318-2G	≤0.015	16.50~18.50	6.00~8.00	0.10~0.20

表2 不锈钢板的力学性能

Table 2 Mechanical properties of stainless steel plate

材料种类及 牌号	加工处理 状态	调质 记号	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%
SUS301L-HT	调质压延	H	≥685	≥930	≥20
EN1.4318+2G	—	—	≥350	650~850	≥35

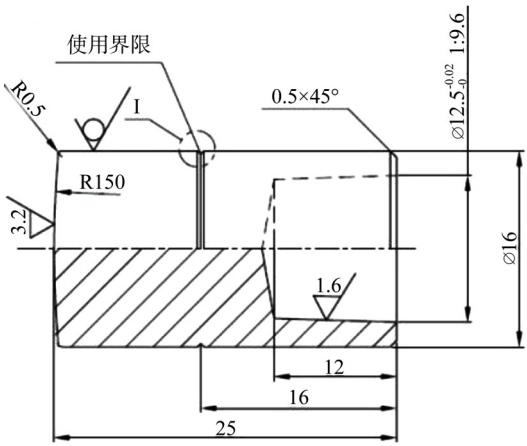


图2 电极头尺寸

Fig. 2 Dimensions of electrode tip

1.2 试验方法

1.2.1 工艺参数设定

为比较普通双面点焊与电极带点焊的不同,采用相同模型及工艺参数下的两组模拟试验:第一组



图3 电极带点焊示意

Fig. 3 Schematic diagram of electrode strip spot welding

为普通双面点焊,第二组为电极带双面点焊。整个焊接过程分为预压、通电预热、通电保持、断电保持和电极移除5个阶段。两组的工艺参数相同,焊接电流 7.5 kA、电极压力 6.5 kN、预热时间 100 ms、焊接时间 210 ms。工艺参数见表3。

表3 点焊工艺参数

Table 3 Process parameters of Spot welding

试验序号	板材组合	点焊参数	是否加电极带	点焊过程
1	1.5 mm-SUS301L-HT	焊接电流	否	
	+1.5 mm-EN.4318-2G	电极压力		
		6.5 kN		
2	1.5 mm-SUS301L-HT	预热时间	是	
	+1.5 mm-EN.4318-2G	焊接时间		
		210 ms		

1.2.2 点焊过程数值模拟

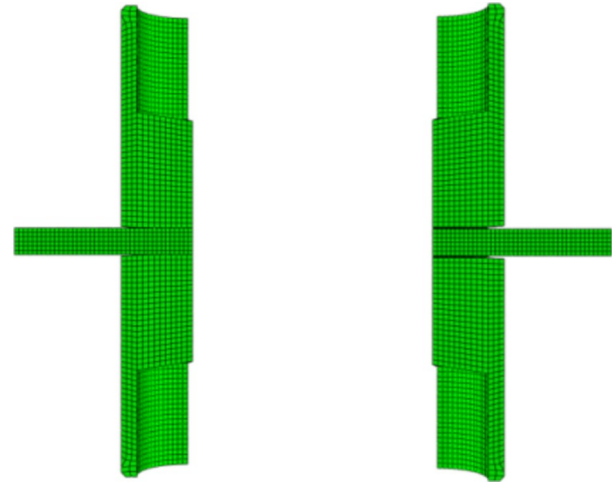
(1)有限元模型的建立。

虽然模型整体上是轴对称模型,但由于Abaqus目前仅支持三维的热-力-电耦合单元,因此,在本文中,仍采用三维有限元建模。鉴于模型的对称性,仅建立1/4模型即可,选择三维六面体“热-力-电”耦合单元Q3D8R。图4a为常规点焊有限元模型。图4b为电极带式点焊有限元模型。

(2)点焊物理场控制方程。

点焊有限元计算过程中各物理场的控制方程如下:

a. 电场控制方程。三维坐标系下的电势拉普拉



(a)常规点焊

(b)电极带式点焊

图4 点焊有限元模型

Fig. 4 Finite element model of spot welding

斯方程^[9]为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right] = 0$$

式中 φ 为电势; ρ 为材料电阻。

b. 热场控制方程。温度的分布在焊件及电极中的分布是连续的,控制方程为^[10]:

$$D \cdot c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right] + \frac{1}{\rho} \nabla \varphi \cdot \nabla \varphi$$

式中 D 为材料密度; c 为材料比热; k 热传导系数; T 为温度。

c. 力场控制方程。增量形式的弹塑性方程^[11]如下:

$$d\{\sigma\} = [C]d\{\varepsilon\} - \{C_T\}dT$$

式中 $d\{\sigma\}$ 为应力张量的微分; $[C]$ 为材料弹塑性矩阵; $d\{\varepsilon\}$ 为应变张量的微分; $\{C_T\}$ 为材料热膨胀系数; dT 为温度的微分。

(3)模拟参数的设定。

模拟的关键点为设定接触关系,在众多接触关系当中接触电阻是至关重要的,接触电阻和导电斑点的大小直接影响焊接温度场的形成,温度场又影响着熔核的形成。表4为接触电阻率的设定。

另外,在电极的上端具有通水孔用于焊接过程中的水冷,因此模拟的过程还需要考虑到电极的水冷,换热系数取 3 800 W/(m²·K)。

表 4 界面接触电阻率
Table 4 Interface contact resistivity

T/K	界面接触电阻率/(mΩ·mm ²)	
	工件-工件	电极-工件
294	0.157	0.078 5
477	0.157	0.066 9
699	0.155	0.049
922	0.149	0.018 8
1 144	0.117	—
1 366	0.07	—

2 试验结果与分析

2.1 仿真模拟结果

试验模拟结果的温度场云图,如图 5 所示。图中所示为点焊过程中温度最高时刻的温度场云图。灰色区域为超过不锈钢熔点(1 500 ℃)的区域,也即熔核区域。如图 5 所示,熔核区域中心处温度最高,远离熔核的上下端电极温度较低。经过软件测量,常规点焊灰色区域宽度约 3.01 mm,熔核直径即为 6.02 mm,熔深为 1.34 mm;电极带点焊灰色区域宽度为 3.05 mm,熔核直径 6.1 mm,熔深 1.47 mm。可以看出相同点焊参数下电极带点焊形成的熔核比常规点焊略大。可以认为电极带材料有对于焊接区域的散热具有一定的阻止作用,电极带点焊的保温效果更好,更有利于熔核的长大。

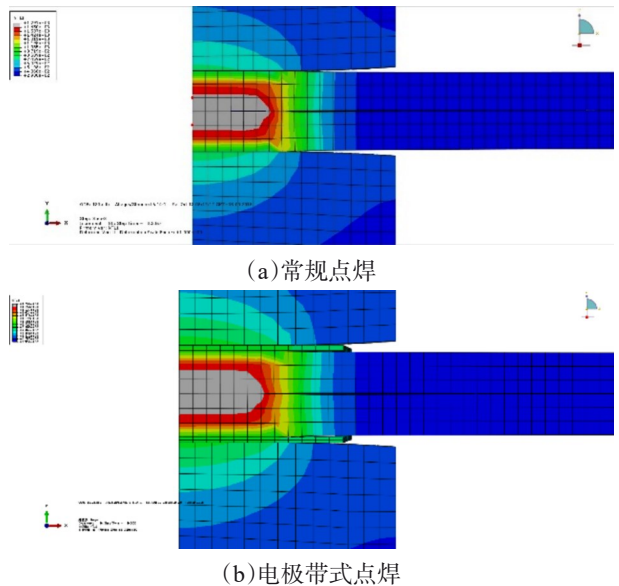


图 5 电阻点焊的温度场云图
Fig. 5 Temperature field cloud of resistance spot welding

取两组试样熔核中心处温度升高曲线对比如图 6 所示。可以看出,在加热初期由于接触电阻的存在,工件/工件表面节点处温度迅速升高,但随着温度的上升,接触电阻下降,加热变缓,通电 0.22 s 后,熔核区域达到最大温度 1 790 K,冷却下来形成熔核。对比升温曲线可以看出,由于电极带的升温也会需要一定热量,会分流部分电流,因此电极带试样焊接区域温度上升的速度稍慢于常规点焊。

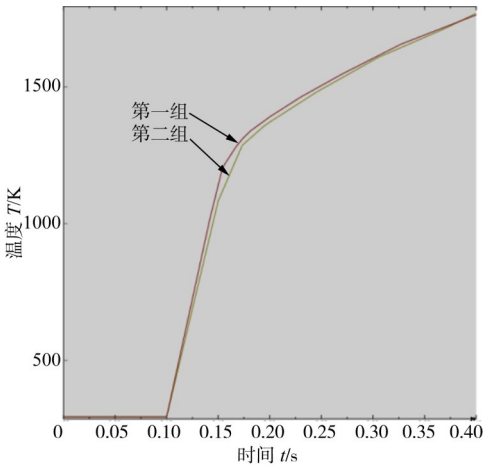


图 6 熔核中心处温度升高曲线
Fig. 6 Temperature rise curve at the center of the nugget

当点焊温度场散热至常温时,测量出常规点焊试样上表面最高点与最低点之差为 0.13 mm,即点焊压痕深度为 0.13 mm;电极带点焊试样上表面最高点与最低点之差为 0.06 mm,即点焊压痕深度为 0.06 mm,约为常规点焊压痕深度的 46.15%。这是因为电极带具有一定的硬度,通过扩大受力面积的方式降低试样受到压强,有效降低了焊接压痕。

2.2 试验验证

常规点焊与电极带点焊试样的熔核如图 7 所示。点焊试验与模拟采用相同的工艺参数,将试验试样沿着点焊中心切割,打磨抛光后做成金相试样并使用显微镜测量熔核尺寸,与模拟结果进行对比。可以看出模拟结果与试验结果基本吻合,计算的熔核比实际熔核直径略大,这是因为点焊模拟中,工件/工件间的接触关系难以把握,设定的接触参数与实际具有一定的误差所致,但得到的焊点直径均为电极带式点焊略大于普通点焊,模拟与试验具有一致的趋势。使用千分表测量焊点压痕深度,通过多次测量后取平均值约 0.067 mm,与模拟值较为一致。

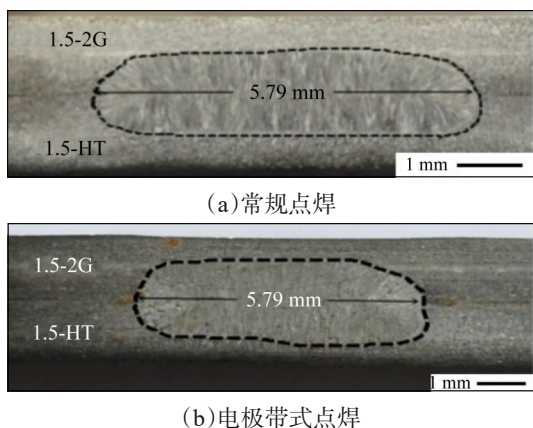


图7 电阻点焊熔核形状及尺寸
Fig. 7 Shape and size of resistance spot welding nugget

3 结论

(1)研究表明,电极带在电阻点焊过程中能有效延缓点焊区域的散热,这有利于熔核的形成与长大,从而提高焊接质量。

(2)与常规电阻点焊相比,电极带能显著扩大接触界面的受力面积,减小被焊板材表面的压强,有效降低焊点压痕深度,满足高质量焊接的要求。

(3)数值模拟结果与试验结果基本吻合,验证了模拟方法的有效性,为电极带式电阻点焊工艺的制定和优化提供了理论支持。

(4)当前模拟中工件-工件间的接触电阻设定与实际存在误差,需进一步研究以提高模拟精度,电极带材料及性能优化也是后续研究的重点。

参考文献:

- [1] 金成.焊接过程的数值模拟[M].北京:科学出版社,2017.
- [2] 郭猛,胡立国,刘海伟,等.焊接参数对轨道交通车辆不锈钢磁控电阻点焊的影响[J].城市轨道交通,2022(02):43-46.
GUO M, HU L G, LIU H W, et al. Influence of Welding Parameters on Stainless Steel Magnetic Controlled Resistance Spot Welding of Rail Transit Vehicle[J]. Urban Mass Transit, 2022(02):43-46.
- [3] 徐野,祁麟,韩晓辉,等.不锈钢单侧磁控电阻点焊工艺研究[J].中国机械工程,2019,30(07):877-881.
XU Y, QI L, HAN X H, et al. Research on Single-side Magnetic Assisted Resistance Spot Welding Process of Stainless Steel[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(07):877-881.
- [4] 康丽齐,吕冬连,程国利.不锈钢轨道车辆用电阻点焊设备的组成与应用[J].电焊机,2021,51(04):53-56.
KANG Q L, LV D L, CHENG G L. Composition and application analysis of resistance spot welding equipment for stainless steel vehicle [J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(04):53-56.
- [5] 康丽齐,邵有发,魏良,等.电阻点焊在不锈钢轨道车辆上的应用研究[J].电焊机,2018,48(3):349-353.
KANG L Q, SHAO Y F, WEI L, et al. Application study of spot welding equipment in stainless steel rail vehicles [J]. Electric welding machine, 2018, 48(3):349-353.
- [6] 李磊.电极带式新型电阻点焊设备及工艺[J].焊接,2011(08):2-3.
LI L. Electrode Belt-type New Resistance Spot Welding Equipment and Process [J]. Welding & Joining, 2011(08):2-3.
- [7] 文静,贾洪德.电阻点焊动态信号实时监测及焊接质量预测[J].电焊机,2020,50(05):102-106.
WEN J, JIA H D. Real-time monitoring of dynamic signals and quality prediction for resistance spot welding [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(05):102-106.
- [8] 夏裕俊,李永兵,楼铭,等.电阻点焊质量监控技术研究进展与分析[J].中国机械工程,2020,31(01):100-125.
XIA Y J, LI Y B, LOU M, et al. Recent Advances and Analysis of Quality Monitoring and Control Technologies for RSW[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(01):100-125.
- [9] 万晓东,徐靖,王元勋,等.双相钢电阻点焊应力与变形行为数值分析[J].焊接学报,2017,38(06):79-82+132.
WAN X D, XU J, WANG Y X, et al. Numerical simulation on stress and deformation behavior in resistance spot welding of dual phase steel [J]. Transactions of The China Welding Institution, 2017, 38(06):79-82+132.
- [10] 王春生,王文权,王洪潇,等.不锈钢轨道客车侧墙激光焊接与电阻点焊数值模拟对比研究[J].电焊机,2020,50(07):109-113.
WANG C S, WANG W Q, WANG H X, et al. Comparative study on numerical simulation of laser welding and resistance spot welding for side wall of stainless steel railway vehicle [J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(07):109-113.