电极直径对连续点焊熔核的影响

付玉鹏[1]，李取浩[2]，臧云飞[3]

1.海翔机械厂　河北邯郸　057150
2.山东大学机械工程学院　山东济南　250013
3.海军航空大学青岛校区　山东青岛　266041

摘要：在电阻焊过程中，电极材料的选择直接影响着焊接质量。常用的Cr-Zr-Cu合金因其出色的电导率和力学性能而被广泛应用于电极制造。然而，在连续点焊操作中，电极头部的磨损会导致其直径增大，这一变化会直接影响到焊点熔核直径，进而影响焊点质量。为深入研究这一现象，利用ABAQUS软件构建了1.5mm厚的1Cr18Ni9Ti钢电阻点焊的仿真模型。通过模拟电极直径在6mm、7mm及8mm焊接条件下的温度场变化，探讨了电极直径变化如何影响焊接过程中熔核直径的温度分布。仿真结果表明：在固定焊接压力和焊接时间的条件下，随着电极直径的增大，焊点区域的温度降低，导致熔核直径逐渐缩小。特别是当电极直径达到8mm时，焊点区域的温度未能达到金属的熔化点，从而导致熔核消失，电极失效。

关键词：电阻焊；电极直径；熔核直径；ABAQUS模拟

Effect of electrode diameter on nugget in continuous spot welding

FU Yupeng[1], LI Quhao[2], ZANG Yunfei[3]

1. Haixiang Machinery Factory, Handan 057150, Hebei, China
2. School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250013, Shandong, China
3. Naval Aviation University Qingdao Campus, Qingdao 266041, Shandong, China

Abstract: The choice of electrode material directly influences the quality of resistance welding. The commonly used Cr-Zr-Cu alloy is widely employed in electrode manufacturing due to its excellent electrical conductivity and mechanical properties. However, in continuous spot welding operations, the wear of the electrode tip leads to an increase in its diameter, which directly affects the nugget diameter and subsequently the quality of the weld. To investigate this phenomenon in detail, employs ABAQUS software to construct a simulation model for resistance spot welding of 1.5mm thick 1Cr18Ni9Ti material. The study examines how variations in electrode diameter (6mm, 7mm, and 8mm) impact the temperature distribution during welding by simulating the changes in the temperature field. The simulation results indicate that under fixed welding pressure and welding time conditions, as the electrode diameter increases, the temperature in the weld zone decreases, resulting in a gradual reduction in nugget diameter. Notably, when the electrode diameter reaches 8mm, the temperature in the weld zone does not reach the melting point of the metal, causing the nugget to disappear and the electrode to fail.

Keywords: resistance welding; electrode diameter; nugget diameter; ABAQUS simulation

第一作者：付玉鹏，学士，工程师，主要从事金属材料及无损检测工作，E-mail：584033260@qq.com。

1 序言

1Cr18Ni9Ti属于典型的18-8型镍-铬奥氏体不锈钢，具有良好的耐蚀性，广泛应用于航空航天、石油化工等关键领域[1, 2]。在此背景下，电阻点焊作为一种常用的连接方法，在飞机蒙皮和航空发动机制造中占有重要地位[3-5]。电阻点焊是两个或多个焊件组合后通过上电极或上下电极同时施加压力，电流通过电极施加在焊件表面，产生电阻热，在压力和电流同时作用下进行焊接的技术。一个典型的点焊周期包括预压时间、焊接时间、维持时间及休息时间[6]。在技术进步方面，罗爱辉等[7]通过采用Fluent软件研究了电极内部水冷对冷却效果的影响。此外，袁荣等[8]分析了单点点焊时焊接电流、时间、压力等相关焊接参数对熔核尺寸、焊接时焊接区域及周围温度场变化的影响。万晓东等[9]以热力学行为为基础，从预压阶段、加热熔化阶段及加热保持阶段，得到了熔核中心温度在加热熔化阶段快速升高，在加热保持阶段缓慢下降，并对试验与仿真结果进行了对比，确认了仿真结果的一致性。TUCHTFELD等[10]对电极结构在使用过程中的影响进行了仿真模拟，证明了平面电极的直径、球面电极的半径等对电极使用寿命的影响。

电极直径是连续点焊过程中的一个重要参数，它对熔核的形成和大小有着直接影响，可以影响热输入和散热能力。较大直径的电极通常具有更大的热容量，能够吸收更多的焊接热量，这可能导致熔核形成速度较慢，因为更多的热量需要分散到电极和周围的材料中。相反，较小直径的电极可能会更快地将热量传递到工件，导致更快形成熔核。另外，较大直径的电极通常具有更大的接触面积，所以会导致焊接区域的热量分布更加均匀，从而可能产生更大直径的熔核。更大的接触面积还会施加更大的压力，从而使焊接区域的金属更容易形成均匀的熔池，而较小直径的电极则可能产生更局部化的热量和压力集中，导致较小直径的熔核形成。除此之外，在实际焊接过程中，较大直径的电极可能需要更长的焊接时间来达到相同的熔核大小，这是因为有更多的热量需要传递到工件中。当电极直径较大时，电极具有更好的热稳定性，此时电极能够吸收更多的热量，从而减少了温度的波动。相反，较小直径的电极可能更适合需要快速焊接的应用，因为较小直径的电极能够更快地传递热量并形成熔核。然而，电极直径的变化如何影响焊接过程中熔核直径的温度分布等问题，仍有待进一步研究。

本文通过ABAQUS软件构建了1.5mm厚的1Cr18Ni9Ti钢电阻点焊的温度场仿真模型。通过模拟电极直径在6mm、7mm及8mm焊接条件下的温度场变化，分析了电极直径的变化对焊接过程中熔核温度变化的影响，这对提高焊接的稳定性具有重要意义。

2 试验材料及研究方案

2.1 试验材料

本文所使用的材料为1.5mm厚的1Cr18Ni9Ti钢板材，化学成分见表1[11]。

表1 1Cr18Ni9Ti钢板的化学成分（质量分数）（%）

C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P	Ti
0.12	2.0	0.8	18.00	10.00	0.025	0.035	0.6

本文通过ABAQUS软件模拟了板厚为1.5mm的1Cr18Ni9Ti不锈钢板在电阻点焊过程中随电极直径变化而引起的熔核温度场的变化，为生产中焊接试验参数的确定提供参考，试验总体研究方案如图1所示。

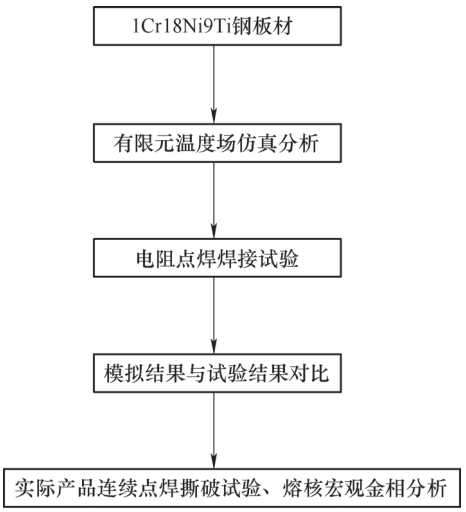


图1 试验总体研究方案

2.2 焊接设备

焊接设备采用国产汉森980电阻点焊机，电极材料采用Cr-Zr-Cu合金，电极形状为平面电极[12]。

2.3 基于ABAQUS软件模拟仿真分析

采用ABAQUS软件对电阻点焊的加热熔化过程进行模拟分析，研究不同电极直径对点焊温度场的

影响，对模拟结果进行分析，确定电极直径及焊接电流等参数。使用模拟计算得到的焊接参数，对单层厚度为1.5mm的1Cr18Ni9Ti钢板材进行双层搭接点焊，再与模拟结果进行对比，进而验证模拟结果的准确性和实用性。对试片进行撕破试验、熔核宏观检查，与HB 5282—1984《结构钢和不锈钢电阻点焊和缝焊质量检验》进行对比，确定出合理的焊接参数，为生产过程中1Cr18Ni9Ti钢板材的电阻点焊工艺卡的编制提供参考。

2.4 电极直径与熔核的关系

电极直径$d_{极}$与熔核直径$d_{核}$关系如图2所示。

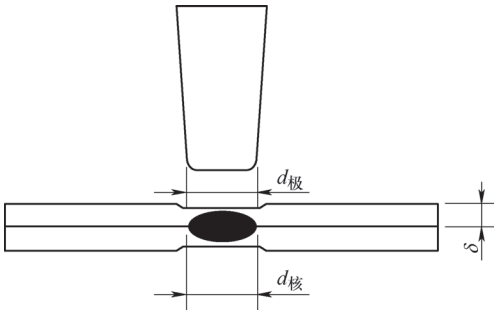


图2 电极直径与熔核直径关系示意

而熔核直径又取决于焊件厚度δ，因此通常有如下关系式，即

$$d_{核}=(0.9\sim1.4)\,d_{极} \tag{1}$$

当$\delta<2$mm时，则

$$d_{极}=2\delta+3 \tag{2}$$

式中 $d_{核}$——焊点核心直径（mm）；

$d_{极}$——电极工作表面直径（mm）；

δ——焊件厚度（mm）。

按式（2）进行选配，通过计算，当点焊1.5mm厚的1Cr18Ni9Ti钢板材的电极直径为6mm时，符合要求。

为了验证式（2）计算的准确性，在焊接电流、焊接压力、焊接时间及冷却水流量不变的情况下，分别对电极直径为6mm、7mm、8mm时，采用ABAQUS软件对1.5mm厚的1Cr18Ni9Ti钢板材连续点焊时熔核温度场进行模拟计算。

3 数值仿真过程

3.1 计算原理

点焊在加热、加压过程中产生热量的控制方程符合欧姆定律，即

$$Q=I^2Rt \tag{3}$$

式中 I——焊接电流（A）；

R——电阻（Ω）；

t——焊接时间（ms）。

轴对称瞬态热分析的控制方程和单位体积的热量计算由式（4）给出，即

$$\rho C\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial r}\left(k\frac{\partial T}{\partial r}\right)+\frac{k}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\dot{q}v \tag{4}$$

式中 r、z——径向坐标和轴向坐标；

ρ——密度（kg/m^3）；

C——比热 [J/(kg·℃)]；

T——温度（K）；

t——时间（s）；

k——热导率 [W/(m·℃)]；

$\dot{q}v$——内部发热速率（W）。

当焊接电流流经焊件时，电势控制方程采用拉普拉斯方程，由式（5）给出，即

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(Ce\frac{\partial\varphi}{\partial r}\right)+\frac{Ce}{r}\frac{\partial\varphi}{\partial r}+\frac{\partial}{\partial z}\left(Ce\frac{\partial\varphi}{\partial z}\right)=0 \tag{5}$$

式中 Ce——电导率（S/m）；

ϕ——电势（V）。

在模拟计算过程中，热-电耦合问题采用矩阵方程式（6）求解，即

$$\begin{bmatrix}[C^t] & [0]\\ [0] & [0]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{\dot{T}\}\\ \{\dot{V}\}\end{Bmatrix}+\begin{bmatrix}[K^t] & [0]\\ [0] & [K^v]\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\{T\}\\ \{V\}\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}\{Q\}\\ \{I\}\end{Bmatrix} \tag{6}$$

式中 $[K^t]$——导热系数矩阵；

$[C^t]$——比热矩阵；

$[K^v]$——导电系数矩阵；

$\{Q\}$、$\{V\}$、$\{I\}$、$\{T\}$——热流、电势、电流和温度的矢量。

3.2 模型中所用到的边界条件

1）假设在整个焊接过程中，流经试片表面的电极压力和焊接电流是均匀分布的。

2）假定在整个焊接过程中，每一个点受到的电极压力、焊接电流、时间是相同的。

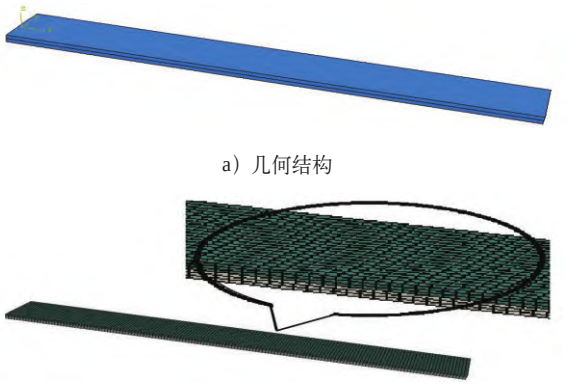
3）假设工作时温度为26℃，电极表面的温度与冷却水温度一致。

4）假设上电极只能上下移动，在焊接全过程中充当焊接电流和电极压力的加载面；下电极固定不动，电势为0。

5）将水冷对流换热系数和空气对流换热系数分别设定为3800W/（m^2·℃）和19.4W/（m^2·℃）。

3.3 有限元几何模型及网格划分

通过焊接试件的实际结构、尺寸及电极的工作方式，建立了模型的几何结构和网络划分（见图3），网格使用均等划分策略，网格为六面体结构且密度相近。



a）几何结构

b）有限元网格化

图3 电阻点焊几何模型及网格划分

采用Wanheim-Bay[13, 14]模型计算接触电阻，其计算公式为

$$\rho_{contact}=3\left(\frac{\sigma_{s_soft}}{\sigma_n}\right)\left(\frac{\rho_1+\rho_2}{2}+\gamma\rho'\right) \quad (7)$$

式中 σ_{s_soft}——材料的流动应力（MPa）；

σ_n——接触应力（MPa）；

ρ_1、ρ_2——相互接触的两种材料的电阻率（Ω·m）；

γ——用于修正的影响因子；

ρ'——接触界面附着物（如油、水、氧化物等）对接触电阻的影响。

3.4 点焊温度场模拟结果

采用建立好的模型对电极直径为6mm、7mm、8mm的电阻点焊温度场进行计算。在计算过程中，分别取焊接长度为15mm、45mm、75mm、105mm、135mm、145mm，即焊接时间分别为90s、270s、450s、630s、810s、870s的7个点，代表连续点焊过程中电极直径变大时温度场变化情况，将1Cr18Ni9Ti钢板材的熔点设为1420℃，超过此温度的区域即认为是熔核部分。下面以每个点熔核中心为例，比较焊接到不同长度时温度场演变的模拟结果。

（1）电极直径为6mm时点焊接头区域温度场分布 当电极直径为6mm、焊接电流为7kA、焊接时间为140ms、电极压力为0.3MPa时，点焊1.5mm＋1.5mm厚的1Cr18Ni9Ti钢板材所得到的点焊熔核区域温度场模拟结果如图4所示。

当电极直径为6mm时，随着焊接长度的增加，焊点中心温度均在2050℃左右，熔核温度稳定，当焊接到达焊件边缘（870s）时，焊点中心温度为2253℃，此时出现焊接飞溅，符合实际焊接情况。

（2）电极直径为7mm时点焊接头区域温度场分布 当电极直径为7mm、焊接电流为7kA、焊接时间为140ms、电极压力为0.3MPa时，点焊1.5mm＋1.5mm厚的1Cr18Ni9Ti钢板材所得到的点焊熔核区域温度场模拟结果如图5所示。

当电极直径为7mm时，随着焊接长度的增加，焊点中心温度均在1700℃左右，熔核温度稳定，当焊接到达焊件边缘（870s）时，焊点中心温度为1878℃，此时出现焊接飞溅，符合实际焊接情况。

（3）电极直径为8mm时点焊接头区域温度场分布 当电极直径为8mm、焊接电流为7kA、焊接时间为140ms、电极压力为0.3MPa时，点焊1.5mm＋1.5mm厚的1Cr18Ni9Ti钢板材所得到的点焊熔核区域温度场模拟结果如图6所示。

当电极直径为8mm时，随着焊接长度的增加，焊点中心温度均在1450℃左右，熔核温度稳定，当焊接到达焊件边缘（870s）时，焊点中心温度为1500℃，此时出现少量焊接飞溅，与实际工作中焊接一致。

由图4～图6可知，电极直径从6mm增大到8mm时，焊接区最高温度由2100℃下降到1450℃左右，温度呈现出逐渐降低的趋势。这是因为点焊过程中焊点区域加热速度极快，熔核形成与焊点区域的温度有关，而电流密度是决定焊接区域温度高低的主要因素之一。在焊接电流、电极压力、焊接时间不变的情况下，电极直径越大，流经焊接面的电流密度越小，因此产生的热量也越小。

在实际工作中，由于冷却水的冷却作用，使得电极垂直于焊点方向散热较快。在微观条件下焊件和电极的表面均存在凹凸不平的现象，使得焊接过程中焊件与焊件、电极与焊件之间接触面上的接触电阻分布不均匀，导致焊点表面电阻产生的热量高于焊点内部电阻产生的热量。同时，冷却水也会带

走焊接位置表面的热量。因此，当电极直径为8mm时，焊接区的最高温度将低于模拟时的1450℃，没有达到工件材料熔点，在焊接压力的作用下不能产生熔核，这时需要修整或更换电极。

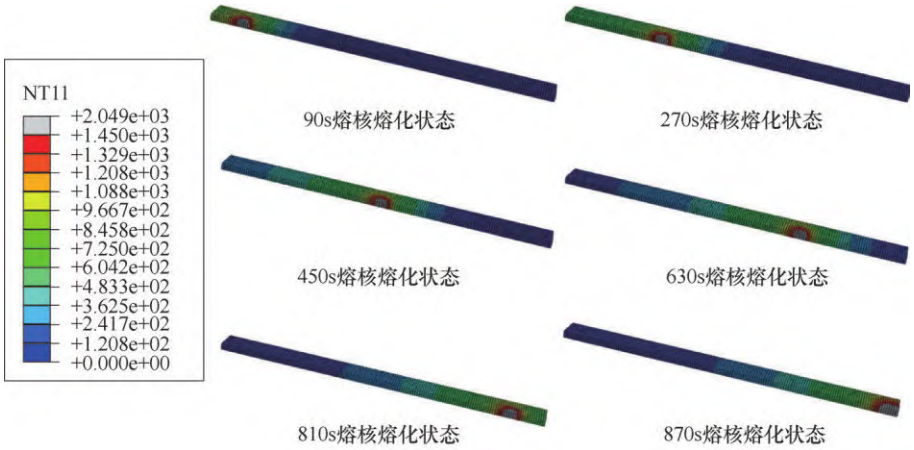


图4　电极直径为6mm时不同时间的点焊熔核区域温度场模拟结果

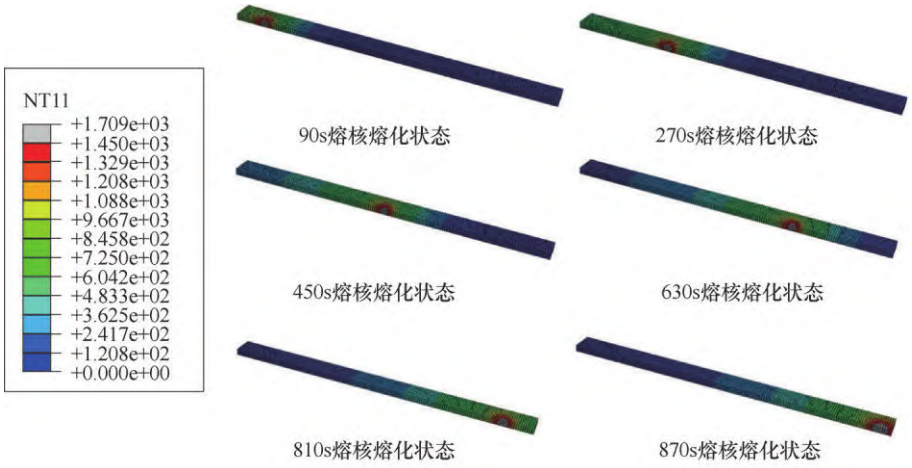


图5　电极直径为7mm时不同时间的点焊熔核区域温度场模拟结果

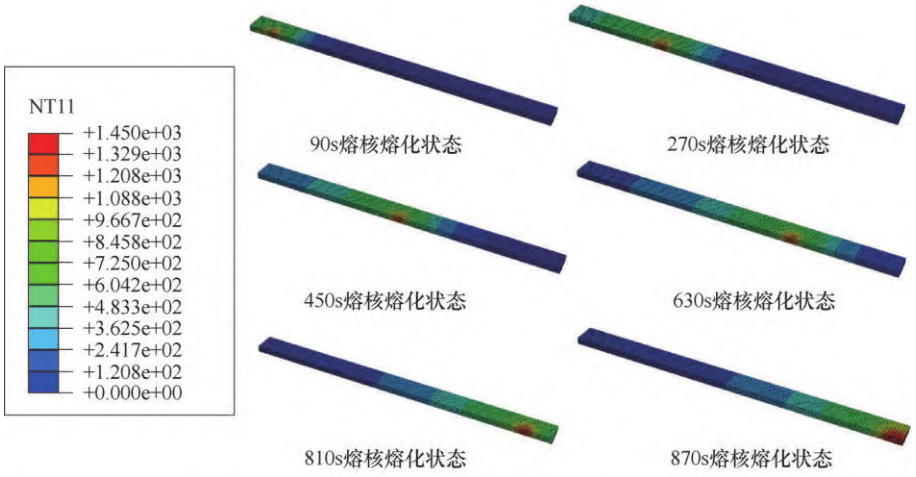


图6　电极直径为8mm时不同时间的点焊熔核区域温度场模拟结果

4　1Cr18Ni9Ti钢电阻点焊工艺试验

4.1　点焊接头外观分析

焊点的压痕深度及周围是否存在喷溅是检测点焊外观质量最直接的方式。

图7所示为焊接试验所得到的点焊表面压痕。由图7可知，焊点表面无喷溅及裂纹，使用千分尺检查熔核发现，当电极直径为6mm时，焊点的压痕深度为0.06mm；当电极直径为7mm时，焊点的压痕深度为0.04mm；当电极直径为8mm时，焊点的压痕深度为0.018mm。经过测量，电极直径为8mm的压痕深度最浅。由此可知，随着连续点焊的进行，电极头部在不断磨损消耗，直径从最开始的6mm逐渐增大至8mm，焊点压痕深度也随着电极直径变大而不断变小，这是由于随着点焊过程的进行，在焊接压力、焊接电流作用下，使工件在焊接区产生塑性变形。当接触电阻对焊接电流分布影响逐渐减小时，电极与焊件接触面温度升高，材料塑性变形抗力减小。电极直径的大小会影响到流经焊接位置表面的电流密度，因此当电极直径增大时，流经焊接表面的电流密度减小，产生的热量减小，材料的抗变形能力增大，导致压痕变小。

4.2　不同电极直径焊接试样的撕破检查

在焊接电流、焊接时间、电极压力不变，分别使用电极直径为6mm、7mm和8mm工艺参数条件下，使用台虎钳对试样进行撕破试验，如图8所示。当电极直径为6mm、7mm时，熔核从板材一侧拔出，焊点熔核呈现出凸台形状，失效模式为拔出断裂。当电极直径为8mm时，断裂位置是从熔核中心处断裂，断口平整，焊点未出现凸台形状的熔核，失效模式为界面断裂。

使用游标卡尺对试样撕破后的熔核进行测量，当电极直径为6mm时，熔核直径为5mm；当电极直径为7mm时，熔核直径为4mm；当电极直径为8mm时，无熔核出现。

由此得出，随着连续点焊的进行，电极头部在不断磨损消耗，直径从最开始的6mm逐渐增大至8mm，熔核直径也随着电极直径变大而不断变小，最终出现无熔核的情况，这是由于流经焊接面的电流密度减小，从而导致焊点加热不足，熔核变小，出现无熔核情况。同时，拉剪强度在也逐渐变低。

4.3　不同电极直径焊接试片的熔核形貌及焊透率检查

进行撕破试验后，当电极直径为8mm时，无熔核出现，因此按HB 5282—1984要求，只对电极直径为6mm、7mm的熔核进行宏观金相及焊透率检测。

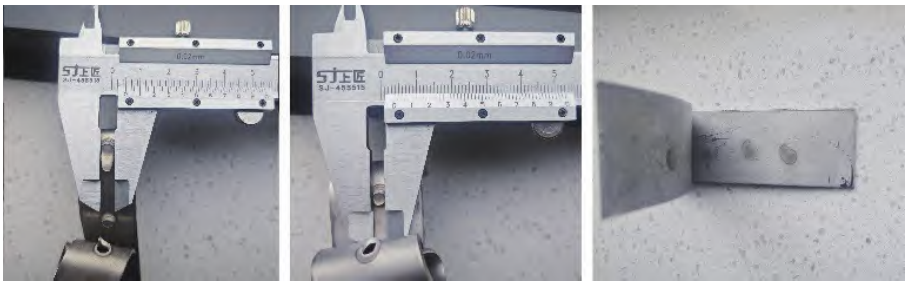
（1）宏观金相检测　主要流程如下。

1）采用10倍放大镜对熔核进行检测，结果显示内部无裂纹、缩孔。

2）采用游标卡尺对熔核进行测量，当电极直径

a）电极直径6mm　b）电极直径7mm　c）电极直径8mm

图7　不同电极直径点焊接头表面压痕



a）电极直径6mm　b）电极直径7mm　c）电极直径8mm

图8　试样撕破试验

为6mm时，熔核直径为5.2mm；当电极直径为7mm时，熔核直径为4.8mm。按HB 5282—1984要求，当板厚为1.5mm时，焊点熔核直径最小为4.8mm，因此当电极直径为6mm和7mm时，均满足要求，宏观形貌如图9所示。

a）电极直径6mm　　b）电极直径7mm

图9　熔核宏观形貌

（2）焊透率检测　焊透率计算时各尺寸如图10所示。

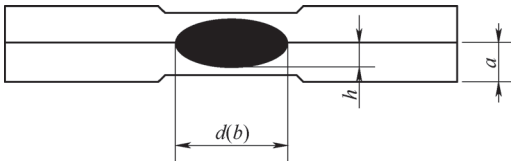


图10　焊透率计算示意

焊透率的计算公式为

$$\eta = (h/a) \times 100\% \qquad (8)$$

式中　η——焊透率（%）；

h——熔核焊透高度（mm）；

a——板材实际厚度（mm）。

按式（8）进行计算，当电极直径为6mm时，焊透率为70%；当电极直径为7mm时，焊透率为50%，符合HB 5282—1984要求。

通过对焊点温度场模拟和试样的焊接，对不同电极直径下试样进行焊点压痕深度、焊透率、焊点撕破后状态测试，最终确定产品焊接参数见表2。

表2　产品焊接参数

电极直径/mm	焊接电流/A	焊接时间/ms	焊接压力/MPa
8	7000	140	0.3

5　产品实际焊接

按确定好的试样焊接参数，对产品进行焊接，焊接效果如图11所示。对产品按HB 5282—1984要求进行外观检查、撕破试验、熔核宏观形貌进行判定。

图11　焊接效果

5.1　整体目视检查与X光射线检测

焊接后对试样进行了整体目视检查，焊点压痕深度均匀一致，表面焊点间距均匀、成形良好，无飞溅、裂纹，外观合格；按GJB 1187A—2001《射线检验》，对焊缝进行X射线检测，结果如图12所示。由图12得知，焊缝清晰，焊缝内部无裂纹、缩孔、飞溅，焊缝内部合格。

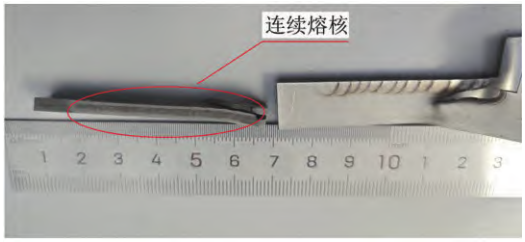
图12　X光透视图

5.2　撕破试验与熔核宏观金相检测

焊接产品后，在焊接参数不变的情况下，采用使用后的原的电极连续点焊试样，并对试样进行撕破试验与熔核宏观金相检测，结果如图13所示。

由图13a可看出，撕破起点在第一个焊点处，试

a）试样撕破试验



b）熔核宏观金相

图13　焊后试样撕破试验及熔核宏观金相

样撕破处台阶状明显，内部未出现飞溅物。由图14b可看出，试样宏观熔核连续，无断点、气孔，为合格品。

5.3 产品检测

使用线切割对焊后的板材进行加工，得到正式产品（见图14），再对产品进行撕破试验。通过撕破试验可知，产品断裂位置均在焊点处，符合使用要求。

a）产品实物

b）产品撕破试样

图14 产品撕破试验

6 结束语

1）仿真结果表明，连续点焊时，随着电极直径不断变大，焊点区域温度逐渐减低，由2100℃下降到1450℃左右。当电极直径为8mm时，与焊接材料（1Cr18Ni9Ti钢）的熔化温度基本一致。

2）在电极直径为6mm、7mm时进行焊接，试样内部无裂纹、缩孔、飞溅，符合要求；随着电极直径进一步增大到8mm，焊接温度降低，导致试样熔核直径急剧减小，焊透率较低。

参考文献：

[1] 郑韶先，徐龙强，杜宝峰，等. 1Cr18Ni9Ti不锈钢脉冲超窄间隙焊接头的组织及耐腐蚀性能[J]. 机械工程材料，2021，45（4）：13-18.

[2] HUA W S，ZHUANG Y D，YU H S，et al. Tensile deformation behavior of 1Cr18Ni9Ti steel at low temperatures[J]. Materials，2020，13（23）：5369.

[3] 晁耀杰. 基于声弹性原理钢的焊接应力测量方法的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015.

[4] 路浩. 铝合金冷金属过渡焊接及补焊组织特征[J]. 焊接，2015（11）：34-37，70-71.

[5] 晁耀杰，张义文，周元彪，等. 1Cr18Ni9Ti不锈钢电阻点焊接头界面结构及性能[J]. 金属加工（热加工），2022（7）：25-29.

[6] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册（第1卷）：焊接方法及设备[M]. 2版. 北京：机械工业出版社，2007.

[7] 罗爱辉，张旭强，张延松，等. 电阻点焊电极头冷却对流换热数值模拟与分析[J]. 焊接学报，2007，28（1）：13-16，20，113.

[8] 袁荣，方军，张涛，等. 工艺参数对高温合金电阻点焊熔核尺寸及变形的影响研究[J]. 热加工工艺，2023，52（17）：131- 135，14.

[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（6）：79-82.

[10] TUCHTFELD M，HEILMANN S，FÜSSEL U，et al. Comparing the effect of electrode geometry on resistance spot welding of aluminum alloys between experimental results and numerical simulation[J]. Welding in the World，2019，63（2）：527-540.

[11] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册（第1卷）：结构钢 不锈钢[M]. 2版. 北京：中国标准出版社，2002.

[12] 刘尧铭. 点焊电极材料及结构设计[J]. 汽车技术，1990（5）：44-47，28.

[13] 于燕，陈军，贾坤宁. DP800高强钢板的点焊性能研究[J]. 热加工工艺，2010，39（1）：17-19.

[14] KHAN M I. Effects of weld microstructure on static and impact performance of resistance spot welded joints in advanced high strength steels[J]. Science and Technology of Welding and Joining，2008，13（3）：294-304.

MW 20241202