

高强钢电阻点焊数值模拟及金相研究

周国荣

(上海华谊工程有限公司, 上海 200241)

摘要:针对常用的超高强度钢点焊件进行研究,利用有限元软件对 1.5 mm 厚的超高强度热成形钢点焊熔核的形成过程进行了数值模拟,对点焊过程中的温度场分布进行了详细的分析,分析了熔核的生长规律和影响因素。通过点焊接头的金相组织研究了焊接接头不同区域的金属组织,发现点焊热影响区可以分为不完全重结晶区、细晶区以及粗晶区;而熔核区为柱状晶形态的马氏体组织,熔核热影响区组织分布不均,夹杂着铁素体,热成形钢母材主要为比较细小的马氏体组织,硬度以及强度都很高。

关键词:高强钢;电阻点焊;数值模拟;金相分析

中图分类号:TG44 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2019)01-0142-03

Numerical Simulation and Metallographic Study of Resistance Spot Welding of High Strength Steel

ZHOU Guorong

(Shanghai Huayi Engineering Limited Company, Shanghai 200241, China)

Abstract: For the study of ultra high strength steel welding, this paper uses the finite element software to establish the simulation model of the forming process of the thickness of 1.5 mm ultra high strength hot forming nugget steel and analyzes the temperature field distribution in the process of spot welding in detail, its influencing factors and growth law. Through studying the microstructure of metal welding joints in different regions of the weld joint, it is found out that the welding heat affected zone can be divided into incomplete recrystallization zone, fine grain zone and coarse grain zone. The nugget zone is martensite with columnar crystal morphology. Its microstructure is uneven and accompanied by ferrite. Hot forming parent material is smaller martensite and its hardness and strength are higher.

Keywords: high strength steel; resistance spot welding; numerical simulation; metallographic analysis

0 引言

轻量化是当今工业界的发展趋势,采用先进的热成形技术生产制造的超高强度热成形钢因为具有极高的强度以及硬度在汽车、航天航空、能源等行业中得到了越来越多的应用^[1]。电阻点焊技术则由于具有较高的效率以及易于自动化特别适用于高强钢与高强钢或高强钢与普通碳钢间的连接使用。由于高强钢生产制造技术还处在发展阶段,而电阻点焊过程的不可见性、在焊接时存在热影响区软化以及焊接飞溅等问题都直接影响着高强钢电焊接头的强度,所以采用有限元建模的方法进行数值模拟有利于掌握电阻点焊熔核形成过程中的变化情况,对于优化焊接工艺参数,提高焊接构件之间的连接强度,制定适合于实际生产需要的焊接标准具有十分重要的意义^[2]。

1 数值模型

电阻点焊的过程中伴随着热的产生、电流的传导以及塑性变形,所以电阻点焊过程中主要涉及到电传导方程、热传导方程以及力学方程^[3]。

1.1 热电力三场耦合方程

在 ABAQUS 中对热电力三场的耦合过程涉及到热力之间的耦合以及热电之间的耦合。其中,对于热力耦合,ABAQUS 使用 Newton 方法来进行温度位移之间的耦合,可以用雅克比矩阵来描述^[4],如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} K_{uu} & K_{u\theta} \\ K_{\theta u} & K_{\theta\theta} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_u \\ R_\theta \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: K_{ij} 代表了热量与力的残余矢量, Δu 为位移的增量, $\Delta \theta$ 为温度的增量, R_u 为位移的矢量, R_θ 为温度的矢量。

导体材料中的电场是由电荷守恒的 Maxwell 方程控制的,如式(2)所示。

$$\int_S J \cdot n dS = \int_V r_c dV \quad (2)$$

式中:电流为稳态的直流电, V 是导体的体积, S 是导体表面积, n 是表面积 S 的法向且方向向外, J 是每单位面积上的电流密度, r_c 是每单位体积上的电流源。

点焊过程中的电流由欧姆定律描述,如式(3)所示。

$$J = \sigma^E \cdot E = -\sigma^E \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} \quad (3)$$

其中: $-\frac{\partial \varphi}{\partial x}$ 即为 E 表示电场的强度, σ^E 表示电导率矩阵。

电阻点焊过程是一个涉及到热电力三场耦合的非常复杂的过程,进行有限元计算时所花费的时间比较长,所以采用以下的简化方法进行有限元计算,以提高计算的效率。在效率提高的同时还应保证有限元计算的精度^[5]。因此假设:1) 在焊接过程中,点焊时的温度场、应力场等是对称分布的,所以将点焊的有限元模型简化为 1/4 的三维模型;2) 假设在实际的点焊过程中,电流以及电极压力均匀施加在上电极的表面上。

1.2 有限元模型及边界条件

根据简化条件,有限元模型的几何尺寸及网格划分如图 1 所示。上工件厚度为 0.5 mm,下工件厚度为 1.5 mm,电极的半径为 10 mm,电极水冷的半径为 5 mm,电极端面的半径为 3 mm,电极的高度为 20 mm。对于锥台形电极,压力的变化对于工件之间的接触区域并不明显,这里在工件与工件之间建厚度为 0.1 mm 的预接触区域。由于热量的产生主要发生在电极与工件之间的接触区域以及工件与工件之间的接触区域上,所以对它们进行网格细化,在远离接触区域的地方采用相对稀疏的网格以减小计算量。采用 ABAQUS 中的 thermal-electrical-structural 网格进行点焊热电力的耦合分析。

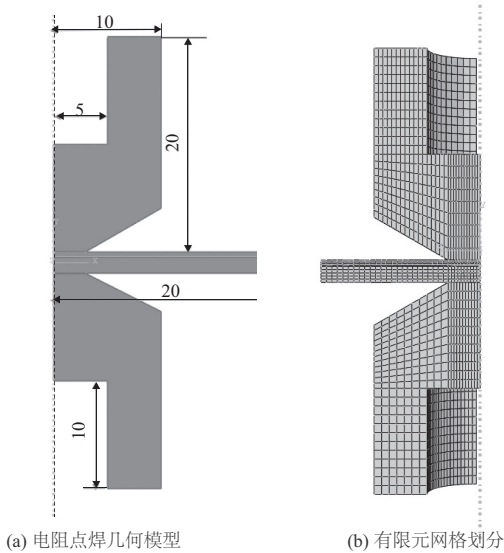


图 1 电阻点焊几何模型及网格划分

选取焊接电流为 8 000 A,焊接时间为 10 ct,焊接压力为 32 psi, (1ct = 0.02 s, 1 psi = 0.006 895 MPa),使用 ABAQUS 有限元软件进行电阻点焊的数值模拟,图 2 所示为电阻点焊过程中温度场的变化情况。

1.3 计算结果

如图 2(a)所示,在焊接的初始阶段,电极与工件之间以及工件与工件之间存在接触电阻,但是工件之间的接触电阻远大于电极工件之间的接触电阻,而且铜电极不仅具有良好的散热性,其中还通用冷却水以进行对流换热。因此,在以上因素的综合作用下,工件之间的温度显著大于

电极工件之间的温度。从图 2 中可以看到,熔核沿着直径方向的增长速率始终大于板厚方向。一方面因为在焊接初始阶段时,工件之间的接触面积决定了产热的面积,所以初始阶段温度的产生主要在直径方向。另一方面,随着焊接过程的进行,通有冷却水的电极持续与工件进行对流换热,而且随着温度的持续升高,工件之间的接触电阻在不断减小,产热量减小,这些都限制了熔核在厚度方向的生长。熔核在远离中心端的方向逐渐减小,这是因为由于空气对流换热以及电极冷却水散热的双重作用导致了远端方向熔核的减小。

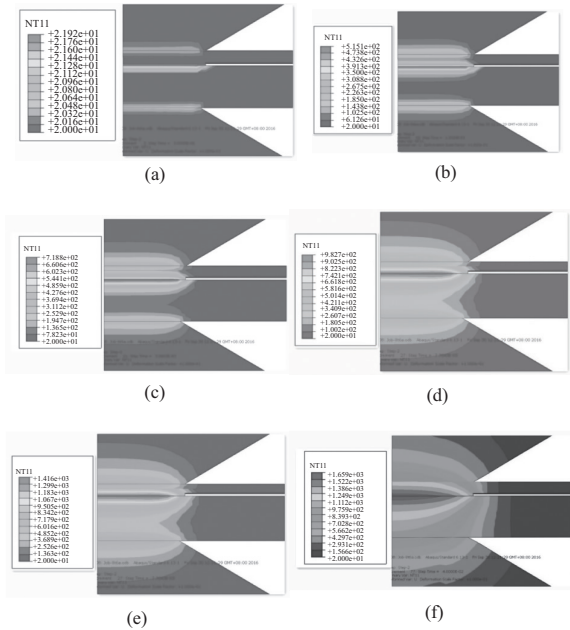


图 2 电阻点焊的温度场分布

2 点焊接头金相分析

点焊的焊接接头在热量的作用下,各个区域由于受到不同的热循环作用而形成了不同的金属组织,而焊接接头的力学性能主要取决于焊点处的金属组织,因此研究焊点处的金属组织有助于确定焊点处金属组织进而对于研究如何提高焊点的力学性能有着重要的作用。

取电极压力为 40 psi,焊接电流为 10 000 A,焊接时间为 10 ct 的点焊试样进行打磨、抛光以及腐蚀处理后,得到的金相组织如图 3 所示。

如图 3(a)所示,根据焊点处不同区域的微观组织的不同可以将焊点分为:热成形钢母材、焊接软化区、点焊热影响区、点焊熔核、低碳钢母材这几个区域。

图 3(b)为超高强度热成形钢的金相组织,可以看到主要成分为形态比较细小的马氏体组织,具有很高的强度以及硬度,另外还具有较好的韧性。

图中 3(c)为点焊热影响区,由于此处受到热量的不同,可以分为不完全重结晶区、细晶区以及粗晶区。不完全重结晶区是由于受到的热量少,温度在共析线以及铁素体转变为奥氏体终了温度即 Ac3 温度之间,在该区域中只有部分组织发生奥氏体化,所以此处的组织分布不均,

还夹杂着铁素体。细晶区受到的温度主要集中在 Ac_3 到 $1\ 100^\circ\text{C}$ 之间,此处的奥氏体受到快速冷却,形成细小的马氏体组织。粗晶区的温度高于 $1\ 100^\circ\text{C}$,组织相变的过程中发生过奥氏体化,晶粒比较粗大,在电极冷却水的作用下,形成了较为粗大的马氏体组织。

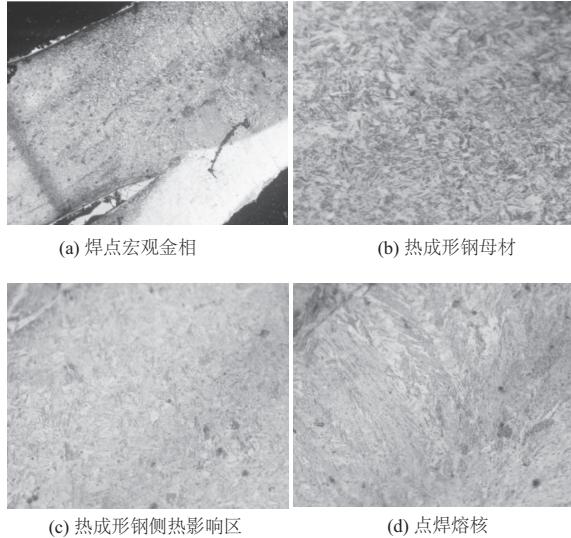


图3 点焊接头金相组织

图中 3(d) 为点焊的熔核区,此区域在点焊时承受的热量最高,其主要的组织为粗大的板条状马氏体组织。由于在焊接过程中,电极的水冷方向垂直于板的方向。因此,水冷的方向为温度冷却最大的方向。由熔核区的金相

组织可以观察到,组织的形态为柱状晶形状。由于主要是马氏体组织,故此处的硬度以及强度都很高,且具有较好的力学性能。

3 结语

1) 通过有限元模拟研究了点焊焊接过程中的温度场分布及熔核的增长规律和特点。

2) 研究了焊接接头不同区域的金属组织,点焊热影响区可以分为不完全重结晶区、细晶区以及粗晶区;而熔核区为柱状晶形态的马氏体组织,熔核热影响区组织分布不均,夹杂着铁素体,热成形钢母材主要为比较细小的马氏体组织,硬度以及强度都很高。

参考文献:

- [1] 王利,杨雄飞,陆匠心. 汽车轻量化用高强度钢板的发展[J]. 钢铁, 2006, 41(9): 1-8.
- [2] Radaj D. Structural concentration at joints spot-welded: improved model comparison of results stress singularity [J]. Welding in the World, 1990, 28(9/10): 193-189.
- [3] 杨潇. TTS443 电阻点焊数值模拟及组织性能研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [4] 王春生. 异质金属电阻点焊熔核形成热过程数值模拟[D]. 吉林: 吉林大学, 2000.
- [5] 古海轮. 基于 ANSYS 铝合金 LY 16 电阻点焊数值模拟[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.

收稿日期: 2017-08-22