

点焊过程热膨胀变形分析

曹 彪 姜以宏 王建一

(广州 华南理工大学) (哈尔滨工业大学)

摘 要 用有限元方法模拟了低碳钢点焊过程的热膨胀变形。给出了正常焊接、工件受约束和极限条件下的热膨胀变形的理论计算结果,分析了热膨胀对电极的作用和各种机械约束对热膨胀行为的影响。结果表明:焊接区热膨胀对电极有很大的推动作用,最大位移量在电极轴线方向;焊接热膨胀变形受工件约束条件、电极压力及焊机机械参数的影响,变形规律有所不同。研究结果为热膨胀法点焊质量实时控制提供了理论指导。

关键词 电阻点焊; 理论分析; 热膨胀

0 序 言

点焊焊接区金属热膨胀变形受焊接区温度分布、电极的约束以及工件其它部位的约束条件(简称工件约束条件)的影响,它导致焊接区导电条件的变化,直接影响点焊过程的熔核形成,同时,这一现象也被用来促进点焊质量的稳定^[1, 2]。利用热膨胀信息实时控制点焊质量是长期受到关注的课题。

由于全面测量点焊热膨胀变形十分困难,对它的分析采用理论手段更为有效。过去的理论分析过分简化^[3],结果偏差很大,给出的结果仅限于正常焊接结束时的变形分布。对热膨胀法质量实时控制,不仅要考虑热膨胀与焊接区加热规律的关系,还应重视工件所受约束条件的变化对热膨胀信息的影响,在点焊过程中这种变化往往是不可避免的,过去在这方面没有认真探讨过。本文的目的在于全面探索各种因素对点焊热膨胀变形的影响,进一步丰富点焊理论和推动点焊质量实时控制的发展。

1 分析方法

对热膨胀变形的分析采用所建立的点焊过程轴对称有限元模型^[4]。该模型模拟了点焊过程导电、传热、力学行为以及它们之间的耦合作用过程,所考虑的因素全面。本文的分析中,工件为等厚度的低碳钢板,其厚度为 1.5mm、直径为 30mm,电极材料为紫铜;电极与工件作用的端面直径为 6mm。力学行为的模拟考虑为热弹塑性问题,材料的随温度变化的力学性能与热物理性能数据参照资料与手册选取。

模拟过程中在给定的时间步记录所得到的计算结果,其中力学行为的分析结果包括有限元网格各积分点的应力、节点位移、接触面的接触压力等。节点位移放大 7.4 倍叠加到网格上,采用计算机绘制变形分布图。对热膨胀变形的分析,先在标准焊接条件下计算出变形结果,对非加热因素的影响,则在保持热载荷(由标准焊接分析得到)不变的条件下,改变相应因素重新进行力学行为分析,以实现对各因素的独立处理。

2 结果与讨论

2.1 点焊过程热膨胀

图 1 为通常点焊条件下(电极压力 3720N、焊接电流 7800A,时间 15 周波)的热膨胀变形的理论分析结果。图中左下角为熔核中心,规定为坐标原点,板厚方向定为轴向。图中虚线表示变形前电极与工件的轮廓,实线为变形后的结果。电极与工件离开一定距离是作图时为了更清楚地表示工件的变形,实际模型中它们是相互接触的。图 1 中,电极接触面正下方的焊接区的轴向位移比较均匀,工件接触面接触边缘附近的变形较大,工件外侧面几乎没有径向位移。仅考虑电极接触面正下方的工件变形时,最大轴向位移($108.9\mu\text{m}$)在电极接触面最外的节点,最大径向位移($49.3\mu\text{m}$)则在工件接触面半径为 3.0mm 的节点上。根据模型结构和变形分布规律综合分析,热膨胀变形约 3/4 表现为轴向位移。这说明热膨胀法实时控制采用电极位移信号是合理的。

极限条件下的热膨胀变形规律如图 2 所示,其温升规律与图 1 完全相同。图 2(a) 相当于单层 3mm 厚的板内部加热而几乎不受电极约束的情况,此时最大轴向位移在电极接触面中心附近,其值大约是图 1 计算条件下相同时刻时的两倍。这一结果说明热膨胀位移有一上限,而电极压力的作用使得电极接触面下的轴向位移分布均匀化并导致径向位移增加。图 2(b) 近似于对电极接触面施加刚性约束,工件热膨胀在轴向受限,径向位移大大增加,在电极接触面边缘附近的区域变形很大;对此条件下电极接触面的接触压力分析发现,工件热膨胀所导致的对电极的作用力在 0.01s 内超过焊接压力(3720N),在 0.06s 时达焊接压力的 3 倍以上(超过 12kN),其后增加缓慢,0.1s 后略有下降,焊接区塑性变形很大。这一结果说明,焊接区热膨胀对电极有很大的推动作用,当焊机机械因素影响不大时(气缸滑动性好或机臂刚性不大),热膨胀将导致电极方向较大的位移,这符合一般的点焊情况;焊机机械刚性较大时,热膨胀对电极产生较大的作用力,位移分布发生变化(轴向位移减小),工件内塑性变形增加,电极作用面边缘易磨损。

2.2 工件约束对热膨胀的影响

对实际焊接,工件的径向几何尺寸有时会很大,或者在焊接区附近往往存在已完成的焊点或其它约束。图 3 为工件外侧面受约束时的热膨胀变形计算结果,其热载荷与图 1 相

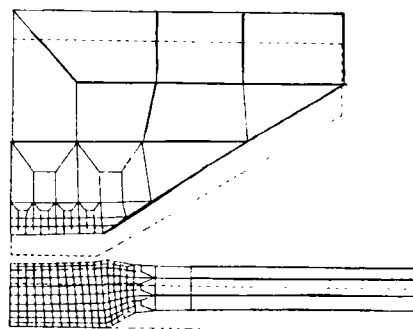
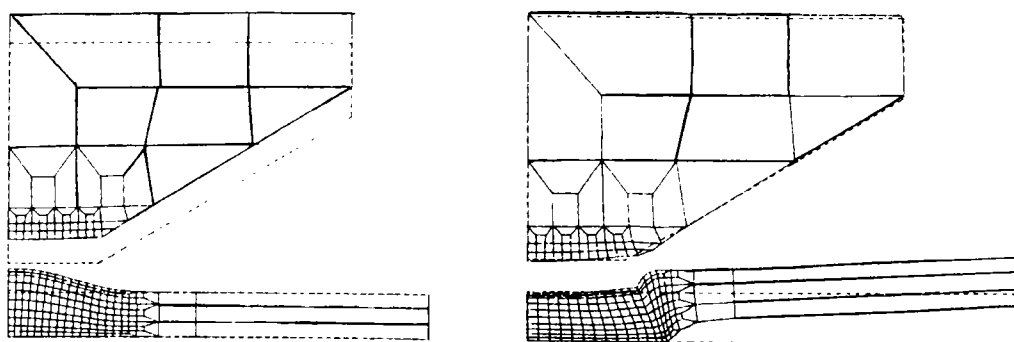


图 1 点焊热膨胀变形 ($t=0.3\text{s}$)

Fig.1 Thermal expansion deformation in resistance spot welding ($t=0.3\text{s}$)



(a) With workpiece interface rigidly fixed, $F_0=30\text{N}$, $t=0.08\text{s}$ (b) With top of electrode fixed, $t=0.16\text{s}$

图2 极限条件下的热膨胀变形

Fig.2 Thermal expansion deformations for extreme conditions

同,但热膨胀变形分布规律变化较大。工件外侧受刚性约束,限制了板的翘起,较大的变形发生在电极接触面边缘附近;工件接触面的接触面积较图1有所增加,但不是在整個面内接触,接触区外仍有微量的轴向位移。

图4为电极边缘下方的工件径向位移分布。图4虚线和实线分别对应图1和图3条件下的结果。约束条件不同,两种径向位移的分布规律不同。工件外侧面刚性固定时(实线),0.16s前径向位移在整个板厚方向同步增加,其后工件接触面一侧径向位移几乎不变,电极接触面一侧缓慢增加,焊接结束时(0.3s)最大径向位移较标准计算时小。

图5为两种条件下电极位移计算结果的比较,其数值是电极顶端的位移计算值的2倍,代表两电极间的热膨胀电极位移。工件外侧面刚性固定时的位移(图5中虚线)在后期比标准计算的位移(实线)高,前期则相互重合。对比图4分析,前期尽管径向位移分布规律发生变化,但总的位移量(曲线下的面积)两者相差不大;焊接后期工件受约束时总的工件径向位移量减小,使得电极位移有所增加。

2.3 电极约束的影响

来自电极的约束条件包括焊机机械参数和电极压力的影响。焊机机械参数的影响可从图2(b)的极限情况加以说明。焊机的机械参数可能包括弹性、阻尼与惯性,对常见气动加压式焊机,当加压导轨滑动性好时以阻尼和惯性的影响为主,不滑动时以弹性影响为主。由于焊机机械参数的存在,电极的顶端不是自由边界,热膨胀变形将对电极产生动态作用力,机械

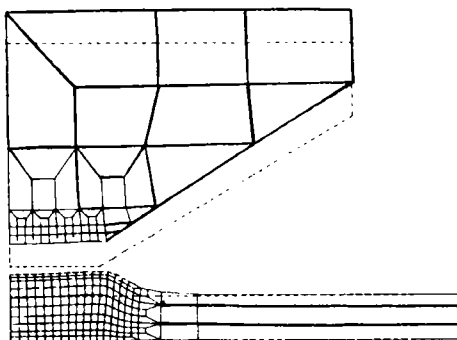


图3 工件外侧面受约束时的热膨胀变形
($t=0.3\text{s}$)

Fig.3 Thermal expansion deformation for fixing workpiece side ($t=0.3\text{s}$)

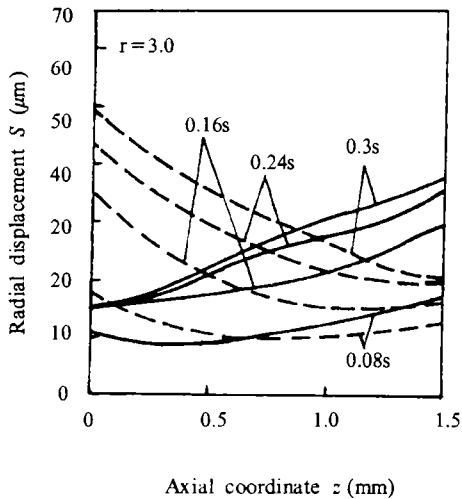


图 4 径向位移分布

Fig.4 Radial displacement distributions

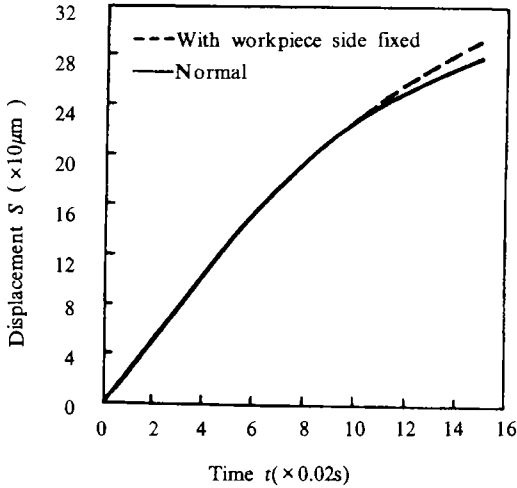


图 5 工件受约束时的电极位移

Fig.5 Electrode displacement with workpiece restrained

约束大时这一动态力大，而电极位移将有所减小。通常焊接时，焊机机械参数是基本不变的，但焊机机械调整后（如机臂伸长）将会有变化。

实际应用中随压力源的波动，焊接压力不稳定。在焊接区温升规律完全相同的条件下，改变焊接压力计算热膨胀变形，图 6 为电极位移的计算结果。电极压力增大时，整个过程中电极位移减小，观察不同通电时间电极接触面边缘下方的工件径向位移分布，增大压力时径向位移都增大，但分布规律不变，说明热膨胀变形在轴向与径向的比例发生变化。在多种压力下的计算结果也表明整个过程中热膨胀电极位移速率随电极压力的增加而减小。电极位移速率是实时控制中常采用的反馈量，压力的独立影响规律靠试验无法分析，因为压力变化同时改变工件之间的接触面积，从而改变加热规律。

2.4 热膨胀法实时控制评价

对点焊热膨胀变形的模拟结果表明，通常焊接状态下焊接区热膨胀位移大部分在轴线方向，这为实际测量热膨胀信号提供了保证。当加压机构滑动性好或易于变形时，可以测电极位移作为反馈信号，当焊机机械刚性较大且机臂不能滑动时，采用热膨胀动态电极力等效。在一般焊机的机械参数条件下，热膨胀信息可以可靠地获得。

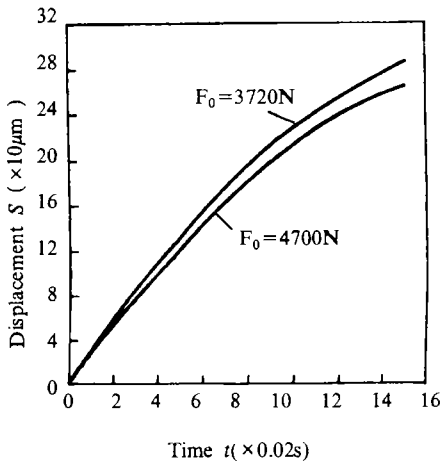


图 6 焊接压力对电极位移的影响

Fig.6 Influence of electrode force on electrode displacement

当不存在机械因素变化的影响时,热膨胀量仅与焊接加热有关,电极位移速率反映温升快慢,根据热膨胀信息控制焊接区加热,从而控制熔核的形成是完全可行的。

实际生产中,工件约束或电极约束的变化是时有发生。以上的分析表明,工件受约束使得焊接后期电极位移增大,电极压力增大使整个过程电极位移减小。这些变化与焊接加热无关,对热膨胀法实时控制可看作干扰源,应该设法消除。根据其影响规律,对工件约束条件变化的影响应避免在后期进行控制,电极压力波动的影响应知道压力的波动量及由此导致的热膨胀信息的变化量,在实际控制中加以补偿。电极压力可以实测,压力对热膨胀的独立影响规律可借助本模型分析较准确地获得。

3 结 论

(1) 点焊过程中焊接区金属受热膨胀,热膨胀变形按一定的规律分布,其中焊接区轴向位移较大且分布均匀,径向位移在工件接触面一侧较大。

(2) 工件受约束时热膨胀径向位移分布发生变化,焊接前期对轴向位移的影响不大,在焊接后期由于径向位移受限而轴向位移增加。电极压力增加则使整个焊接过程中轴向位移减小。电极受约束加大,热膨胀对电极的作用力增大,轴向位移减小。

(3) 采用热膨胀电极位移或电极力进行点焊质量实时控制时,需要设法消除机械约束变化对热膨胀信息的干扰。利用模型分析可以较准确地获得压力对热膨胀的独立影响规律,为实时控制提供正确的补偿依据。

参 考 文 献

- 1 Waller D N. Head movement as a means of resistance welding quality control. *British Welding Journal*, 1964, 11(3): 118 ~ 122
- 2 Chang H S. Cho H S. A propotional-integral controller for resistance spot welding using nugget expansion. *Transaction of the ASME*, 1989, 111(6): 332 ~ 336
- 3 Nied N A. The finite element modeling of the resistance spot welding process. *Welding Journal*, 1984, 63(4): 123s ~ 132s
- 4 曹彪, 姜以宏, 王建一. 点焊熔核形成过程的有限元模型. *机械工程学报*, 1995, 31(2): 130 ~ 135

Analysis of thermal expansion deformation in resistance spot welding

Cao Biao

(South China University of Technology, Guangzhou)

Jiang Yihong, Wang Jianyi

(Harbin Institute of Technology)

Abstract Thermal expansion deformation for resistance spot welding of low-carbon steel is simulated by an finite element model. Theoretical thermal expansion deformations for normal welding, or welding under restraint of workpiece and some extreme conditions are provided. The action of workpiece expansion on electrode and the influence of mechanical restraint on expansion behavior are determined. Following conclusions have been drawn: (1) The thermal expansion causes a heavy push on electrode and the maximum expansion displacement of workpiece is in axial direction. (2) Thermal expansion deformation distribution changes with the variation of workpiece -restrained condition, electrode force or the mechanical parameters of welding machine. The modeling provides a theoretical guidance for the study of real-time quality control based on thermal expansion.

Key words resistance spot welding; theoretical analysis; thermal expansion