

文章编号: 1004-0609(2004)05-0735-06

铝合金电阻点焊中电极点蚀的形成机制^①

常保华¹, 都 东¹, Y. Zhou², I. Lum²

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084;

2. Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, N2L 3G1, Canada)

摘 要: 建立了铝合金电阻点焊过程数值模拟的有限元分析模型, 考察了焊接过程中电极与试件界面上接触半径的变化, 以及电极尖端表面上电极压力、电流密度和温度的分布。结果表明: 所考察的焊接条件下, 接触半径在焊接过程中逐渐增大, 电极端面的中部温度最高, 而电极压力和电流密度均在接触区边缘集中。实验研究发现电极表面上最初的点蚀部位呈环形, 其半径与接触区半径基本一致, 由此推断, 环状电极点蚀主要是接触区边缘明显的应力集中所致。为减少电极点蚀提高电极寿命, 电极的形状设计应使电极与工件接触界面上的应力集中尽可能减小。

关键词: 电阻点焊; 铝合金; 电极点蚀; 应力集中; 温度分布; 有限元法

中图分类号: TG 402

文献标识码: A

Formation mechanism of electrode pitting in resistance spot welding of aluminum alloys

CHANG Bao-hua¹, DU Dong¹, Y. Zhou², I. Lum²

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo,
Waterloo, Ontario, N2L 3G1, Canada)

Abstract: A finite element analysis model was constructed to simulate resistance spot welding process of aluminum alloys. The variation of contact radius, the distribution of stress, the current density and temperature at the electrode tip surface were calculated. The results show that during welding process the contact radius increases gradually, the highest temperature is always located at the center of the electrode tip surface, while the electrode stress and current density both concentrate at the edge of contact region. Experiments indicate that the initial pitting is in a ring form with a radius pretty close to the radius of the contact region. It is deduced that the ring form pitting can be attributed to the significant stress concentration at the periphery of contact region. To prevent pitting from occurrence and improve electrode life, the appropriate electrode design should mitigate the stress concentration at the electrode/workpiece interface.

Key words: resistance spot welding; aluminum alloy; electrode pitting; stress concentration; temperature distribution; finite element method

电阻点焊技术在汽车工业中被广泛地应用于薄板金属的连接。近年来, 为适应车辆轻型、高效和低污染的需要, 在汽车及地铁列车等运载工具制造中越来越多地采用铝合金来替代传统的钢铁材

料^[1-3]。可是与钢材相比, 铝合金由于热导率高而电阻率小, 形成所要求尺寸的焊点需要更高的焊接电流和电极压力, 与之相应的“热-力”条件使得电

① 基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2003033135); 国家教育部留学回国人员科研启动金资助项目

收稿日期: 2003-07-09; 修订日期: 2003-12-10

作者简介: 常保华(1973-), 男, 博士。

通讯作者: 常保华, 博士; 电话: 010-62783387; E-mail: bhchang@mail.tsinghua.edu.cn

极失效加剧, 电极寿命显著降低, 为此需要进行频繁的电极修复和电极更换操作, 从而大大降低了焊接生产率。

电极失效原因很多, 如磨损、氧化、变形等。Dilthey 等^[4]认为, 铝合金电阻点焊中电极的失效, 是由于电极材料与铝板间接触面上发生合金化, 随后合金产物从电极表面剥离而发生点蚀。点蚀后的电极表面由于不再能提供电极与试件、试件与试件之间均匀一致的接触和导电路径, 导致点焊质量下降, 电极失效。电极点蚀的形成是一个与温度、压力、电极形状和材料等多种因素相关的复杂过程, 由于在电阻点焊中电、热、力和冶金因素间强烈的相互耦合作用^[5, 6], 各因素对电极点蚀形成的影响很难用实验方法考察, 因而无法探究点蚀形成的根本原因。Yeung 等^[7]用有限元数值分析方法研究了电阻点焊过程中电极端面的热历史, 却没有考虑其他因素的影响。Sun 等^[8]的数值分析工作考虑了压力和温度的影响, 但却对电流的分布没有阐述, 也没有对电极点蚀现象的成因进行详细分析。

为此, 本研究拟采用 ANSYS 有限元分析软件, 采用“电-热-力”增量耦合算法^[9, 10], 数值模拟电阻点焊过程, 着重考察铝合金电阻点焊过程中电极与试件界面间接触状态的变化, 及电极尖端表面上应力、温度和电流密度的分布, 以探讨电极点蚀形成的主要原因。为了验证数值分析结果, 同时实验考察了电极早期点蚀的形貌。

1 电阻点焊过程

铝合金的电阻点焊过程如图 1 所示。在一个焊接周波中, 首先将被连接板装配好并施加电极压力; 然后通以电流, 由于电流流经被焊接板时产生电阻热, 两被连接板间界面上的材料受热发生熔化形成熔核; 一定时间后, 撤去电流, 熔核凝固形成焊点实现连接, 同时电极力需继续保持一段时间以保证焊接质量; 最后, 撤去电极压力, 焊接循环结束。由于电极发热很多, 铝合金电阻点焊过程中, 电极需用流动的冷却水进行冷却。

2 有限元分析模型

电阻点焊中所用的电极形状多种多样, 如平截面圆锥形、半球形等。铝合金的电阻点焊中, 大多

采用尖端为半球形的电极。本实验所用 Cu-Cr 合金电极形状和尺寸如图 2 所示。

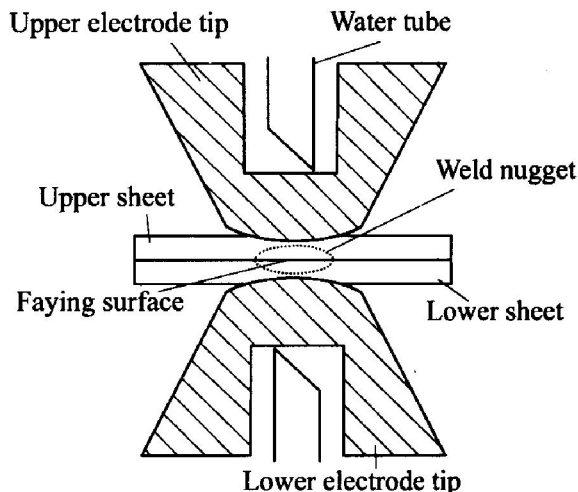


图 1 电阻点焊示意图

Fig. 1 Schematic of resistance spot welding

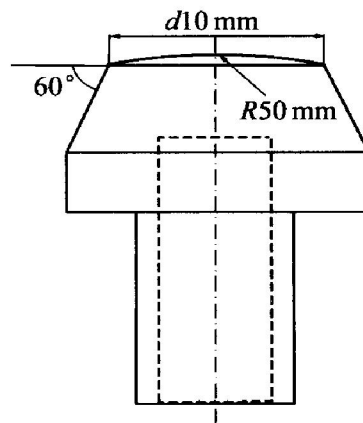


图 2 电极形状和尺寸

Fig. 2 Configuration of electrode

由于所用电极为圆柱形, 具有轴对称性, 故在有限元分析中可将电阻点焊过程的模拟简化为轴对称问题。应用大型有限元分析软件 ANSYS 进行数值计算, 所建立有限元网格的上半部分如图 3 所示, 网格中共含 930 个四节点固体单元, 1 088 个节点, 电极与试件、试件与试件之间的接触状况用点对点 (point-to-surface) 接触单元进行模拟, 两试件界面间的接触电阻采用基于显微电接触理论的接触电阻模型进行模拟^[11, 12]。

被连接材料为 AA5182 铝合金, 板厚 1.5 mm。铝合金材料物性参数由金属手册中获得^[13], 铜电极的材料性能参数与文献^[10]相同。采用直流焊接电源, 电流强度 29 kA, 电极压力为 5 kN, 焊接时间为 5 个周波(相应频率 60 Hz)。所有计算工作在 Pentium 4 个人计算机上完成。

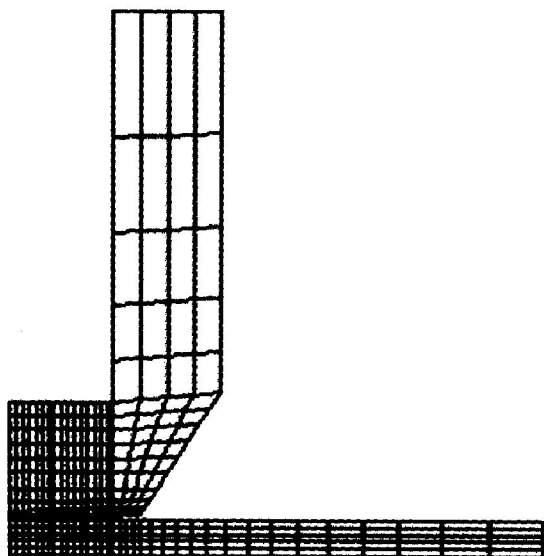


图 3 有限元分析中所用的网格(上半部)

Fig. 3 Mesh used in finite element analysis(top half)

3 结果与讨论

为考察电极尖端表面在电阻点焊过程中所经历的电热力循环, 探究电极点蚀形成的原因, 以下从多个角度, 分别考察电极表面接触状态的变化, 及应力、电流密度和温度的分布状况。

3.1 接触半径变化

电极与试件界面上接触半径的变化是电阻点焊过程动态变化的体现, 也是焊接过程中电极压力与材料热膨胀共同作用的反应。图 4 给出了焊接过程中电极/试件界面上接触半径的变化。由图可见,

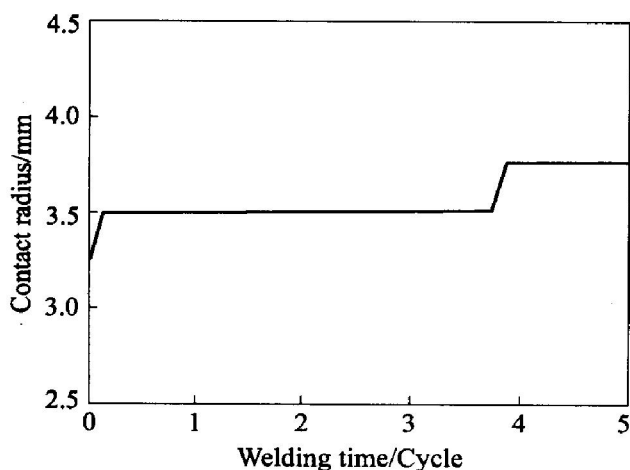


图 4 电极/试件界面上接触半径的变化

Fig. 4 Variation of contact radius at electrode/ workpiece interface

焊接开始, 施加电极力后, 该界面上接触半径约为 3.25 mm, 小于名义接触半径 5 mm。此后开始通电, 材料受热膨胀并同时软化, 此时由于材料受热膨胀所致的接触半径减小不足以抵消由于材料软化而导致的接触半径增大, 接触半径增大到 3.5 mm。在随后的 3.5 个焊接周波 (0.25~ 3.75) 内, 热膨胀所致接触半径减小和材料软化所致接触半径增大相互抵消, 电极与试件接触面上接触半径不发生变化。随后, 由于材料的进一步软化, 接触半径又增大至约 3.75 mm。已有研究结果表明, 高电极压力下, 采用平截面锥形电极时, 电极与试件间的接触半径基本不变^[11]。由图 4 可知, 采用端部为半圆形的电极时, 电极材料由内到外逐渐升温软化, 使接触半径逐渐增大, 显示出与平头电极不同的特征。

3.2 电流密度分布

接触半径的大小决定电流流过电极端面时的路径, 并影响电流密度在电极与试件界面上的分布。图 5 所示为焊接不同时刻, 电极尖端表面上电流密度的分布。名义电流密度 (电流强度除以电极尖端面积) 约为 369.2 A/mm²。

由计算结果可知, 在各焊接时刻, 接触区内电流密度均高于名义电流密度值, 由上节分析可知, 这是由于电极与试件间界面上的接触半径在整个焊接过程中都小于名义接触半径所致。在不同时刻, 电流密度分布形态基本相同。接触区边缘处存在明显的电流密度集中现象, 这是由于电极与试件接触界面上的接触半径小于电极半径, 电流流过接触界面时, 电流线由接触区外向接触区内聚集所致, 即所谓“边缘效应”。接触区中部电流密度的分布基本均匀, 焊接过程中由于接触半径变化小 (3.25~ 3.75 mm), 电流密度的变化范围也并不显著 (约 250 A/mm²)。接触区边缘向外, 电流密度逐渐减小。

3.3 温度分布

不同时刻电极与试件接触界面上的温度分布如图 6 所示。

可以看到, 在焊接的不同阶段, 中部接触区域由于有电流流过而产生电阻热, 所以温度较非接触区高。边缘区外的温度因为仅仅通过热传导而升高, 所以从接触区到非接触区, 温度有很明显的下降。尽管电流密度在接触区边缘处集中, 相应区域的温度分布曲线上也有小尖峰存在, 但电极端面上的最高温度并不位于接触区的边缘, 而是位于电极

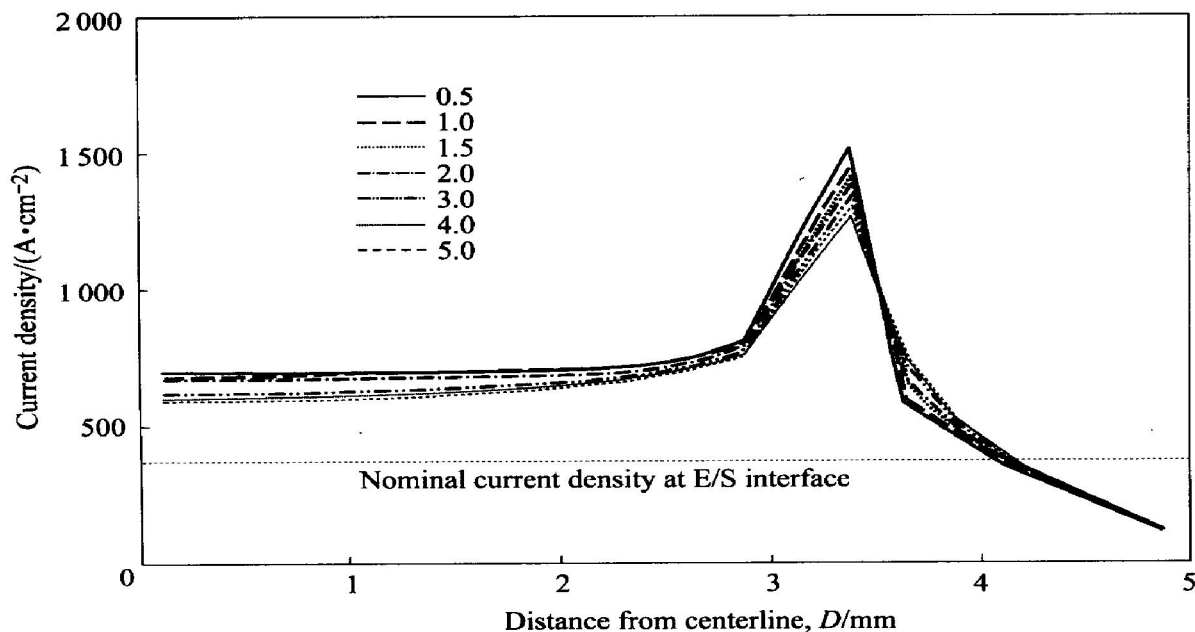


图 5 电极端部电流密度的分布

Fig. 5 Distribution of current density at electrode tip surface

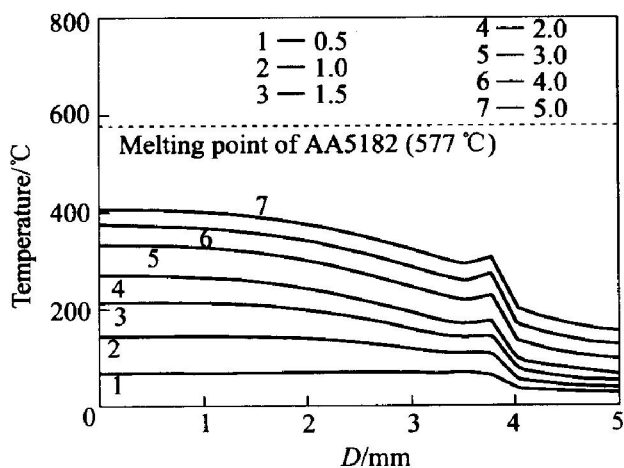


图 6 电极端部的温度分布

Fig. 6 Temperature distribution at electrode tip surface

中心线位置。这是由于距离电极中心线的距离越远,其散热条件越好,因为未接触的电极部分和试件部分都由于热传导而带走大量的生成热,因此中心温度高于边缘,而接触区边缘也没有出现明显的温度峰。在整个电极端面上,温度随焊接时间的增加而升高,在所采用的焊接参数下,电极端面上的最高温度没有达到合金的熔点 577 °C。由此可见,对于表面光滑,没有明显凸凹缺陷的新电极,在所考察的焊接条件下,最初点蚀的形成,并不是材料熔化的结果。

3.4 电极压力分布

本研究同时考察了焊接不同时刻电极尖端表面上电极压力(轴向压应力 σ_y 的相反数)的分布(如图 7 所示)。由图可以看出,焊接进行 1 个焊接周波后,在半径为约 1.2 mm 处应力最高,达 290 MPa,中心部位($D < 1.2$ mm)为高应力区, $1.2 \text{ mm} < D < 3.75 \text{ mm}$ 区间内应力逐渐降低。

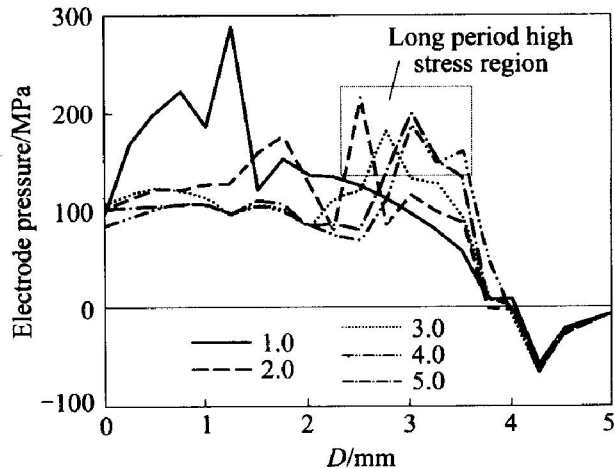


图 7 焊接过程中电极端面上的压应力分布

Fig. 7 Stress distribution at electrode tip surface during welding

在第 2 个焊接周波结束时,压力分布形态发生了变化。接触区中部应力水平较焊接刚开始时降低,应力的分布趋于均匀,接触区边缘处存在压应力集中。这是由于中部材料在高温下软化并发生屈

服, 因此各处应力水平基本相同; 边缘处应力集中是由于在界面接触区的边缘存在截面积突变, 因此产生了奇异应力。从第 2 个到第 5 个焊接周波, 应力分布形态基本不发生改变, 试件中部的应力水平也基本持平, 只是由于随着焊接过程的进行, 接触半径增大, 所以应力峰值随之外移。

从第 2 个到第 5 个共 4 个周波的焊接时间内, 电极尖端半径为 3 mm 左右的区间长时间地承受较高的电极压力。显然, 应力集中与电极界面上的高温共同作用, 对于铜电极与铝合金试件之间的相互扩散具有促进作用, 有利于接触界面处 Cu-Al 合金的形成。这一长时间高应力的存在, 有可能是电极表面产生点蚀的决定性因素。根据这一计算结果, 对于一个新电极而言, 最初的点蚀将从电极表面的中部而不是中心线处开始发生。这一推论已经得到了实验结果的证实。图 8 所示为在所给焊接条件下, 一个新电极在焊接 50 个焊点后, 电极尖端表面的外观形貌。可以看出, 在该电极表面上有一个半径约为 3 mm 的环状凹陷存在。这正是由于焊接过程中该处生成 Cu-Al 合金, 并在后续的焊接中被撕裂所致。由于点蚀并没有发生在焊接过程中始终具有最高温度的电极中心线处, 所以, 与温度相比, 电极端面处的应力集中是产生电极点蚀更为主要的原因。当然, 一定的高温在材料相互扩散和合金的形成中也是必不可少的条件之一。由以上分析可见, 在铝合金电阻点焊过程中, 为了减轻点蚀现象, 提高电极使用寿命, 应合理设计电极端部几何形状和尺寸, 尽量减小焊接过程中电极与试件界面上的应力集中。

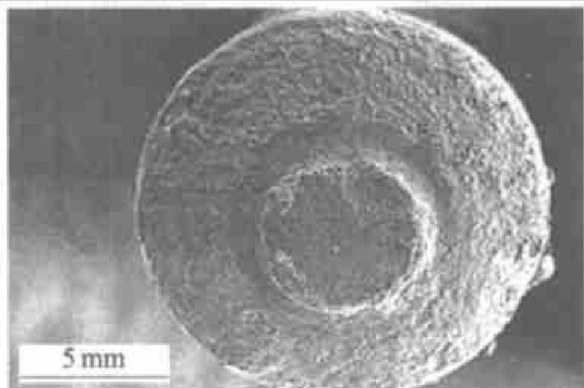


图 8 焊接 50 个焊点后电极尖端形貌

Fig. 8 Image of electrode tip surface after 50 welds finished

4 结论

1) 采用尖端为半球形的电极时, 电极与试件

接触界面上的接触半径在焊接过程中逐渐增大。

2) 电极与试件接触界面上, 电流密度由于“边缘效应”而在接触区边缘集中, 电流密度分布形态在焊接过程中基本不发生变化。

3) 接触区边缘由于电流密度的集中而出现不很明显的温度峰, 但在接触面上, 最高温度并不位于接触区边缘, 而是始终位于电极尖端中心线处。

4) 电极与试件接触区的边缘长时间存在应力集中, 它与界面上的高温共同作用, 对电极与试件界面上点蚀的形成具有促进作用。

5) 实验所得环状点蚀的位置与应力集中位置一致。为减少电极点蚀提高电极寿命, 电极的形状设计应使电极与工件接触界面上的应力集中尽可能减小。

REFERENCES

- [1] 屈金山, 胡久富, 周有龙, 等. 运载工具的铝合金选材于焊接[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(S2): 1-5.
QU Jin-shan, HU Jiu-fu, ZHOU You-long, et al. Selection and welding of aluminum alloy in vehicle[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(S2): 1-5.
- [2] 唐 剑, 黄 平, 杨纯梅, 等. 地铁列车用 7005 铝合金力学性能及微观结构分析[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(6): 1069-1073.
TANG Jian, HUANG Ping, YANG Chun-mei, et al. Mechanical properties and microscopic structure analysis of 7005 alloys employed in underground railway trains[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(6): 1069-1073.
- [3] 刘允辉, 陈俊梅, 张玉凤, 等. 超声冲击法改善 LF21 铝合金焊接接头的疲劳性能[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 754-759.
LIU Yun-hui, CHEN Jun-mei, ZHANG Yu-feng, et al. Fatigue properties improvement of welded joints for LF21 aluminum alloy by ultrasonic peening method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 754-759.
- [4] Diltney U, Sven H. Metallographic investigations into wear processes on electrodes during the resistance spot welding of aluminum[J]. Welding and Cutting, 1998, 50(1): 34-40.
- [5] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册(第 1 卷)[M]. 第 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2002.
Chinese Mechanical Engineering Society, Chinese Welding Society. Welding Handbook(Vol. 1)[M]. 2nd editing Society.

- tion. Beijing: China Machine Press, 2002. 318 - 334.
- [6] American Welding Society. Welding Handbook(Vol. 2): Welding Process [M]. 8th edition. Miami: American Welding Society, 1991. 224 - 245.
- [7] Yeung K S, Thornton P H. Transient thermal analysis of spot welding electrodes [J]. Welding Journal, 1999, 78 (1): 1s - 6s.
- [8] Sun X, Dong P. Analysis of aluminum resistance spot welding process using coupled finite element procedures [J]. Welding Journal, 2000, 79(8): 215s - 220s.
- [9] Browne D J, Chandler H W, Evans J T, et al. Computer simulation of resistance spot welding in aluminum: part 1 [J]. Welding Journal, 1995, 74(10): 339s - 344s.
- [10] Tsai C L, Jammal O A, Papritan J C, et al. Modeling of resistance spot weld nugget growth [J]. Welding Journal, 1992, 71(2): 47s - 54s.
- [11] Chang B H, Li M V, Zhou Y. Comparative study of small scale and ' large scale ' resistance spot welding [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2001, 6(5): 1 - 8.
- [12] Chang B H, Zhou Y. Numerical study on the effect of electrode force in small-scale resistance spot welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 139 (1 - 3): 635 - 641.
- [13] American Society for Metals. Metals Handbook (Vol. 2) — Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals [M]. 9th edition. Ohio: American Society for Metals, 1979. 45 - 95.

(编辑 陈爱华)