

铝合金点焊电极端面温度数值模拟

吴志生¹, 杨新华¹, 单 平², 胡绳荪², 廉金瑞²

(1. 太原科技大学 材料学院, 太原 030024; 2. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072)

摘 要: 采用数值模拟方法研究了铝合金点焊温度场及电极导电导热性能对电极端面温度的影响。电极端面温度是点焊过程温度场的一部分, 为研究点焊电极端面温度, 建立了铝合金点焊过程力、热、电耦合分析有限元数学模型, 采用 ANSYS 有限元软件, 数值模拟点焊过程温度场, 研究点焊电极端面温度的影响因素。结果表明, 一般电极/工件接触面中心温度在第 17 ms 达到铜铝合金化温度 548 °C, 在 58 ms 达到最高温度 577 °C。但当电极电阻率降低二分之一、导热率提高一倍时, 电极/工件接触面中心温度在第 57 ms 达到最高温度 488 °C, 点焊过程始终未达到铜铝合金化温度。电极导电、导热性能显著影响电极/工件接触面温度。

关键词: 铝合金; 点焊; 电极端面; 温度; 数值模拟

中图分类号: TG402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2004)06-15-05



吴志生

0 序 言

在相同刚度和强度下, 采用铝合金轿车车身可以减少车体重量的 60% 左右^[1]。但铝合金点焊存在电极寿命低及点焊接头质量不稳定等问题。铝合金点焊电极寿命降低的主要原因是铜合金电极与铝合金工件间发生铜铝合金化反应。铜铝合金化影响电极/工件界面间的产热, 改变电极端面的电流分布, 进而影响电极寿命及点焊质量^[2]。

电极端面铜铝合金化反应主要是在 548 °C 的铜铝共晶反应, 电极端面温度对该反应具有决定性影响。如果降低了电极端面温度, 就能抑制电极端面铜铝共晶反应, 即可提高电极寿命。由于铝合金点焊过程仅在几个周波内完成, 电极端面温度较难测试。因此, 控制电极端面温度使其低于铜铝共晶温度, 提高点焊电极寿命研究进行较少。文中通过建立铝合金点焊过程力、热、电耦合分析有限元模型, 采用 ANSYS 有限元软件, 数值模拟点焊过程温度场, 研究电极导电导热性能对铝合金点焊电极端面温度的影响, 为探索提高铝合金点焊电极寿命的新方法提供一定理论基础。

1 铝合金点焊过程有限元模型

点焊数值模拟涉及多因素、高度耦合和非线性

等问题。为简化分析, 将一些对求解准确性影响较小的因素进行简化和假设: 材料力学性能采用拉压同性材料模式, 材料硬化模式为各向同性, 流动准则采用 V. Mises 流动准则, 金属熔化后力学性能简化为近似各向同性不可压缩体; 忽略工件与电极的电磁作用, 不考虑电流趋表效应; 忽略液态熔核区流动; 忽略接触面接触热阻; 电极与工件表面辐射和对流散热用散热系数替代。

1.1 点焊过程电势方程

电阻点焊过程基本方程包括描述电压分布的电势方程、描述温度分布的热传导方程和描述点焊压力作用下的接触区域应力应变微分方程。

根据电磁场理论^[3], 给定电流时体内电压分布满足 Laplace 方程。对于轴对称问题, 体内电压分布规律用微分方程式为

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\rho_E} \frac{\partial U}{\partial r} \right) + \frac{1}{\rho_E r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho_E} \frac{\partial U}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

式中: r, z 分别为圆柱坐标系中的径向和轴向坐标; U 为电压; ρ_E 为材料的电阻率。

1.2 点焊过程热传导微分方程

电阻点焊属于有内热源的瞬态传热问题, 轴对称的热传导微方程为^[4]

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v = C_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2)$$

数值模拟采用热焓法处理相变潜热, 工件求解区域的热传导微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q = \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (3)$$

式中: $H = \int \rho \cdot c(T) dT$, H 为焓; T 为温度; t 为时间; q_v 为单位体积内的产热率; λ 为导热系数; ρ 为密度; C_p 为比热。

1.3 点焊过程应力应变微分方程

点焊过程应力应变分析属于热弹塑性接触问题, 要考虑温度因素。根据文献[5]方法推导, 应力应变关系式为

$$\{d\sigma\} = [D_{ep}] (\{d\epsilon\} - \{d\epsilon_T\}) + \{d\sigma_0\}, \quad (4)$$

$$[D_{ep}] = [D_e] - [D_p] = [D_e] - \frac{9G^2}{(3G + E^p)\sigma_s^2} \{s\} \{s\}^T, \quad (5)$$

$$\{d\sigma_0\} = \frac{3G \frac{\partial \sigma_s}{\partial T}}{(3G + E^p)\sigma_s^2} \{s\}, \quad (6)$$

$$\{d\epsilon_T\} = \{\beta\} dT, \quad (7)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (8)$$

式中: $\{d\epsilon\}$ 、 $\{d\epsilon_T\}$ 分别为全应变、热应变增量; $[D_e]$ 为弹性应力应变矩阵; $\{d\sigma\}$ 为应力增量; $\{d\sigma_0\}$ 为初始应力增量; β 为线膨胀系数, 对轴对称问题, $\{\beta\} = \beta[1 \ 1 \ 1 \ 0]^T$; dT 为温度增量。 $[D_{ep}]$ 为弹塑性应力应变矩阵; $[D_e]$ 和 $[D_p]$ 分别为弹性应力应变矩阵和塑性应力应变矩阵; G 为剪切弹性模量, E , E^p 分别为弹性模量和塑性模量; ν 为泊松比; S 为偏斜应力张量, σ_s 为后继屈服应力, 是等效塑性应变和温度的函数。

2 铝合金点焊的接触电阻

点焊电极间电阻包含电极本体电阻 R_E 、工件本体电阻 R_W 、电极/工件间接触电阻 R_{EW} 和工件/工件间接触电阻 R_{WW} , 接触电阻对点焊熔核形成具有关键作用。

采用电阻率形式对接触电阻进行处理, 在工件/电极间、工件间设置了一层极薄的实体单元, 其厚度约为工件板厚的 1/20, 通过设置单元接触电阻率模拟接触电阻产热。点焊过程工件间和电极/工件接触面是变化的, 数值模拟根据热弹塑性接触分析结果设置这层实体单元的“死活”状态, 从而模拟接触面动态变化。根据接触分析结果设置电阻率参数, 施加电流进行电场计算得到电极间电压, 进而获得电极间电阻值。

试验测定接触电阻率与接触压强关系时, 采用与电极端面直径相同的表面酸洗处理的铝合金试件, 测试工件间及电极/工件间的接触电阻, 并换算成接触电阻率。数据处理采用曲线拟合法。根据接触电阻率曲线拟合表达式并考虑常用的线性假设,

接触电阻率计算式为

$$\rho_c(p, T) = \rho(p) \left[k_1 e^{-k(T-T_0)^2} + k_2 \frac{(T-T_0)}{(T_1-T_0)} \right], \quad (9)$$

式中: $\rho(p)$ 为接触电阻随接触压力变化的拟合公式, 其中包括工件间接触电阻率 $\rho_{WW}(p)$ 和电极/工件间接触电阻率 $\rho_{EW}(p)$; p 为压力; T 为温度; T_1 为材料的熔点; T_0 为室温。根据动态电阻实测结果确定 K_1 、 K_2 加权系数。数值模拟对接触单元接触电阻率的修改依据单元以往各载荷步中的最高温度和最大接触压强进行计算。

采用 ANSYS 有限元软件提供的表面单元进行接触分析, 通过建立接触单元与接触电阻实体单元之间的对应关系进行电场分析。用 ANSYS 参数化编程语言 APDL 开发用户子程序, 用于建立这种对应关系。根据接触分析得到各接触单元的接触压力, 确定与其对应实体单元的电阻率。

电极间电阻计算时, 接触分析中接触压强的计算结果通过数据文件传递给电场分析程序, 电场分析程序通过读取接触压强计算结果修改代表接触电阻实体单元的电阻率及死活状态, 进而进行电场静态分析; 最后根据电场分析的电压值计算电极间接触电阻。

3 几何模型网格划分与边界条件

电极几何模型参数为: 电极本体半径 $R_b = 10$ mm、电极冷却水孔半径 $R_w = 6$ mm、电极端面半径 $R_e = 2.5$ mm、电极端面距冷却水距离 $H_w = 10$ mm、电极尖端锥形角 $\alpha = 120^\circ$ 及工件厚度 $H_b = 1.0$ mm。点焊过程锥台形电极的热电分析网格划分及边界条件如图 1 所示。

点焊过程热弹塑性接触分析时, 在边界①均匀施加电极压力, 并耦合该边界上所有节点的轴向位移; 在边界②施加第一类边界条件, 对该边界所有节点的径向位移约束为 0; 在边界③施加第一类边界条件, 对该边界所有节点的轴向位移约束为 0。对每一载荷步求解时, 在各节点上根据热电分析结果施加温度载荷。

热电耦合分析时, 对边界①和②节点的电压自由度分别进行耦合, 使处于同一边界的节点具有相同电压值, 并在边界节点分别施加流入和流出电流; 在边界③上, 冷却水对电极的冷却考虑为管内强制对流换热, 根据经验公式^[9]冷却水流量为 3 L/min 时, 冷却水散热系数为 3800 W/(m²·°C); 边界④为电极和工件的外表面, 它们与空气存在对流和辐射换热, 其传热效果用综合换热系数表示; 边界⑤为电

极/工件接触面, 接触面存在帕尔帖效应热, 将其定义为界面热流密度, 为第二类边界条件, 其它边界为绝热边界和自由边界。

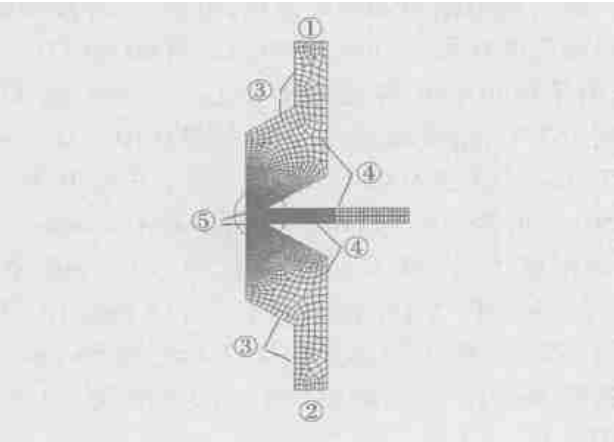


图 1 热电耦合分析有限元网格及边界

Fig. 1 Finite element mesh and boundary

材料力学性能模式采用双线性等向强化模式, 材料力学性能数据包括屈服强度 σ_s 、弹性模量 E 、硬化模量 E_T 、泊松比 ν 和线膨胀系数 β 。LF2 铝合金与铜电极的 σ_s 、 E 、 E_T 、 ν 随温度变化关系及工件材料线膨胀系数见参考文献[6, 7]。电极与工件表面综合换热系数见参考文献[8], 汤姆孙效应热系数和帕尔帖效应热系数用开尔文关系式根据材料温差电动势率计算。电极材料和工件材料温差电动势率参数依据文献[9] 中的数据。

数值模拟的点焊规范主要参数为: LF2 铝合金板厚 1 mm, 焊接电流 20 kA, 焊接时间 3 周波即 60 ms, 电极压力 3 kN, 锥台形电极端面半径 2.5 mm, 电极材料为 CuZrCu, 数值模拟用的 CuZrCu 合金电极称为一般电极, 将一般电极的导电导热性能参数提高一倍的电极称为改性电极, 冷却水流量 3 L/ min。

4 点焊电极端面温度数值模拟

4.1 一般点焊电极端面温度

点焊过程数值模拟结果给出点焊温度场随时间变化过程和工件/工件及电极/工件接触面各点温度随时间的变化。工件/工件即 W/W 接触面各点温度随时间变化如图 2 所示, 图中 MT0、MT2、MT6、MT10、MT14、MT18、MT22、MT26 及 MT30 分别表示接触面中心、距中心 0.2 mm、0.6 mm、1.0 mm、1.4 mm、1.8 mm、2.2 mm、2.6 mm、3.0 mm 各点温度在点焊过程中随时间变化的曲线。电极/工件即 E/W 接触面各点温度随时间变化如图 3 所示, 图中 UT0、UT2、UT5、UT8、UT12、UT15、UT18、UT22 及 UT25 分别

表示接触面中心、距中心 0.2 mm、0.5 mm、0.8 mm、1.2 mm、1.5 mm、1.8 mm、2.2 mm、2.5 mm 各点温度随时间变化的曲线。

数值模拟结果如图 2 可知, 工件/工件接触面中心温度在第 4 ms 达到 LF2 铝合金熔化温度 627 $^{\circ}\text{C}$, 在 17 ms 温度最高为 1059 $^{\circ}\text{C}$; 沿接触面径向、距接触面中心 0.2 mm, 第 17 ms 时最高为 1051 $^{\circ}\text{C}$; 距接触面中心 0.6 mm, 第 17 ms 最高 998 $^{\circ}\text{C}$; 距接触面中心 1 mm, 第 17 ms 时最高 885 $^{\circ}\text{C}$; 距接触面中心 1.4 mm, 在 27 ms 时最高 756 $^{\circ}\text{C}$; 距接触面中心 1.8 mm, 第 60 ms 时最高 633 $^{\circ}\text{C}$; 距接触面中心 2.2 mm, 在 46 ms 时最高达到 572 $^{\circ}\text{C}$; 距接触面中心 2.6 mm, 在 57 ms 时温度最高 483 $^{\circ}\text{C}$; 距接触面中心 3 mm, 第 60 ms 最高 387 $^{\circ}\text{C}$ 。

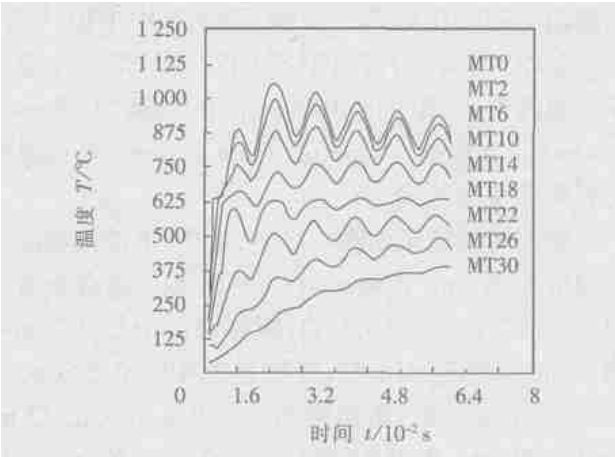


图 2 一般电极时 W/W 接触面温度

Fig. 2 W/W contact surface temperature by common electrode

由数值模拟计算结果如图 3 可知, 电极/工件接触面中心温度, 第 17 ms 达到铜铝合金化温度 548 $^{\circ}\text{C}$, 在 58 ms 温度最高为 577 $^{\circ}\text{C}$; 沿接触面径向、距接触面中心 0.2 mm, 第 18 ms 达到 548 $^{\circ}\text{C}$; 距接触面中心 0.5 mm, 第 57 ms 最高为 572 $^{\circ}\text{C}$; 距接触面中心 0.8 mm, 第 57 ms 时达到 566 $^{\circ}\text{C}$; 距接触面中心 1.2 mm, 在 56 ms 时温度达到 550 $^{\circ}\text{C}$; 距接触面中心 1.5 mm, 第 60 ms 达到 511 $^{\circ}\text{C}$; 距接触面中心 1.8 mm, 在 57 ms 时最高为 526 $^{\circ}\text{C}$; 距接触面中心 2.2 mm, 第 59 ms 温度最高为 459 $^{\circ}\text{C}$; 在距接触面中心 2.5 mm, 第 60 ms 最高为 399 $^{\circ}\text{C}$ 。

4.2 改性电极端面温度

将一般电极电阻率降低二分之一、电极导热率提高一倍进行铝合金点焊温度场数值模拟。数值模拟计算铝合金点焊温度场随时间的变化及点焊工件/工件接触面、电极/工件接触面各点温度随时间

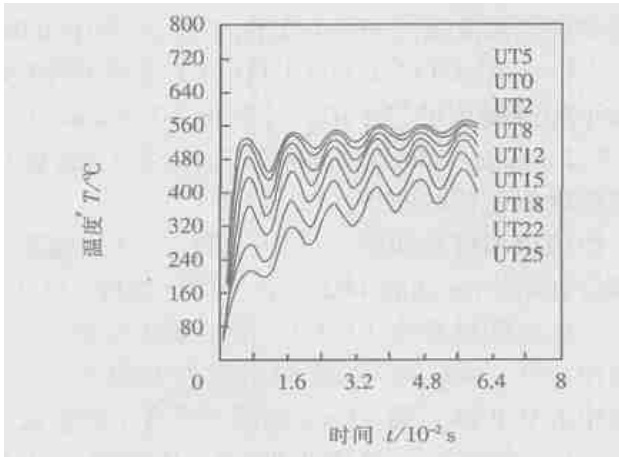


图 3 一般电极时 E/W 接触面温度
Fig. 3 E/W contact surface temperature
by common electrode

的变化。工件/工件即 W/W 接触面各点温度随时间变化如图 4 所示, 电极/工件即 E/W 接触面各点温度随时间变化如图 5 所示, 图 4、5 中 UT0、UT2、UT5、UT8、UT12、UT15、UT18、UT22 及 UT25 分别表示接触面中心、距中心 0.2 mm、0.5 mm、0.8 mm、1.2 mm、1.5 mm、1.8 mm、2.2 mm、2.5 mm 各点温度随时间变化的曲线。

数值模拟结果如图 4 显示, 工件/工件接触面中心温度在第 5 ms 达到 637 °C, 达到 LF2 铝合金熔化温度, 在 17 ms 达到 936 °C; 距接触面中心 0.2 mm, 第 17 ms 时达到 928 °C; 距接触面中心 0.5 mm, 第 17 ms 达到 869 °C; 距接触面中心 0.8 mm, 第 27 ms 时达到 761 °C; 距接触面中心 1.2 mm, 在 29 ms 为 645 °C; 距接触面中心 1.5 mm, 第 17 ms 温度达到 608 °C; 距接触面中心 1.8 mm, 在 37 ms 达到最高 523 °C; 距接触面中心 2.2 mm, 第 57 ms 最高温度为 422 °C; 距接触面中心 2.5 mm, 第 60 ms 最高为 327 °C。

工件/工件接触面各点温度随点焊时间增加而

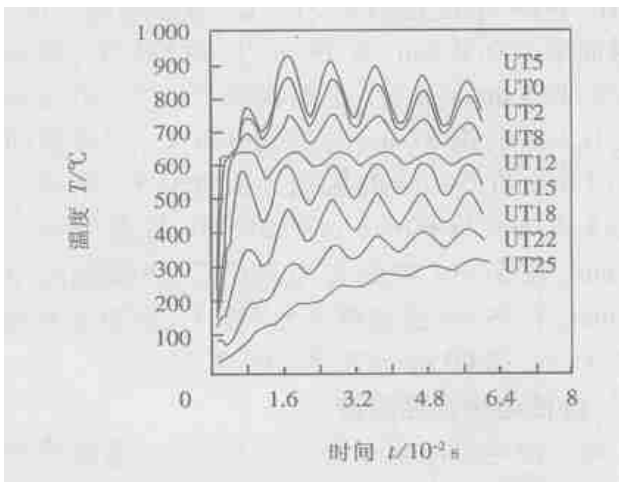


图 4 改性电极时 W/W 接触面温度
Fig. 4 W/W contact surface temperature
by improving electrode

增加, 但经过一定时间, 各点温度随时间增加而下降; 点焊过程某一时刻, 距点焊工件接触面中心较近点温度较高, 距接触面中心愈远, 该点温度愈低; 与未改变电极物理性能参数的模拟结果相比, 工件/工件接触面中心最高温度为 936 °C, 而后者为 1059 °C, 高于铝合金熔点温度场的范围有所缩小。

数值模拟结果如图 5 显示, 电极/工件接触面中心最高温度在第 57 ms 为 488 °C, 第 60 ms 仅为 442 °C; 沿接触面径向、距接触面中心 0.2 mm, 第 57 ms 达到 487 °C; 沿接触面径向、距接触面中心 0.5 mm, 在 57 ms 时温度为 484 °C; 距接触面中心 0.8 mm, 在 56 ms 时为 476 °C; 距接触面中心 1.2 mm, 在 57 ms 时温度达到 463 °C; 距接触面中心 1.5 mm, 在 57 ms 时达到 447 °C; 距接触面中心 1.8 mm, 在 57 ms 时为 423 °C; 距接触面中心 2.2 mm, 第 56 ms 时温度达到 385 °C; 距接触面中心 2.5 mm, 第 60 ms 达到 317 °C。

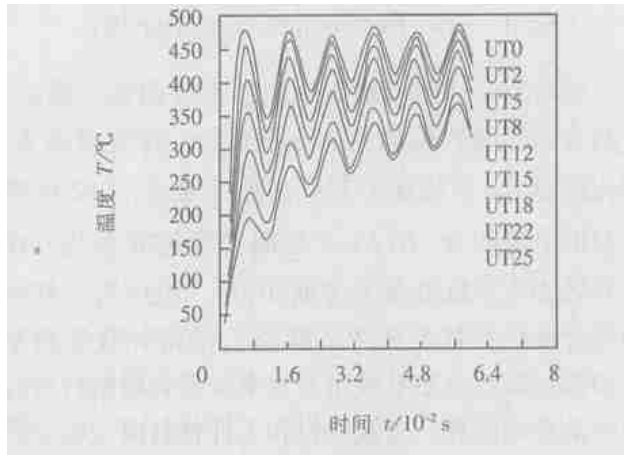


图 5 改性电极时 E/W 接触面温度
Fig. 5 E/W contact surface temperature
by improving electrode

电极/工件接触面各点温度, 随点焊时间增长而增加; 点焊过程某一时刻, 距点焊电极/工件接触面中心较近点温度较高, 距接触面中心愈远, 该点温度愈低。与未改变电极性能参数的数值模拟结果相比, 电极/工件接触面中心最高温度为 488 °C, 而后者为 577 °C。显然, 提高电极导电、导热性能, 可显著降低电极端面温度并使之低于铜铝合金化温度。

5 数值模拟与试验结果的比较

采用数值模拟点焊规范, 进行铝合金点焊并观测点焊熔核尺寸, 实际点焊的熔核尺寸如图 6 所示, 一般电极的数值模拟熔核轮廓如图 7 所示。图 6、7 表明, 采用一般电极时, 点焊熔核与数值模拟的熔核基本相同, 数值模拟结果比较真实地反映了铝合金点焊过程。

大气环境中以不同截面积的 Stellite 6 合金为喷涂材料进行了喷涂试验,得到了亚微米的细晶涂层。两种不同尺寸材料的涂层晶粒均大大细化,最小晶粒的 ASTM 晶粒度达到 26 级,小晶粒的弦长平均值为 100 nm 左右。以 ASTM 晶粒度 21 级为大小晶粒分界,截面积越小的喷涂材料涂层小晶粒所占涂层比例越大,并且大晶粒的 ASTM 晶粒度平均值也越高。快速凝固是晶粒细化的主要原因。

(2) 两种涂层与基体的结合良好,在喷涂过程中,基体表面发生熔化,界面发生了扩散现象。涂层间没有出现层状结构,涂层致密。

(3) 涂层硬度比原始合金硬度提高了 1~2 倍左右,最高分别达到 997 HV 和 738 HV。分析表明,涂层硬度的提高、晶粒的细化,与电热爆炸定向喷涂过程中熔融颗粒在基体上发生的快速凝固相关。

(4) 两种截面积喷涂材料制备的涂层致密性高,孔隙率均较低。小截面积喷涂材料的涂层孔隙率比大截面积材料涂层低。电热爆炸过程中,颗粒的速度较高,与基体的碰撞压力较大。因而使得基体与涂层结合紧密,涂层孔隙率低。碰撞压力越大,

孔隙率越低。并且,小截面积喷涂材料制备涂层具有较好的厚度均匀性。

参考文献:

[1] 刘宗德, 杨 昆, 段 鹏, 等. 线爆炸法制备 WC-Co 硬质合金涂层的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(2): 116-121.
[2] 盛季生, 王依野. 金属线爆炸喷涂法[J]. 表面技术, 1992, 21(2): 83-85.
[3] Tamura H, Konoue M, Sawaoka A B. Zirconium boride and tantalum carbide coating sprayed by electrothermal explosion of powders[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1997, 6(4): 463-468.
[4] Zhang H, Wang X Y, Zheng L L, et al. Studies of splat morphology and rapid solidification during thermal spraying[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2001, 44: 4579-4592.
[5] 蒲泽林, 杨 昆, 刘宗德, 等. 电热爆炸喷涂层温度场的数值模拟[J]. 中国表面工程, 2004, 17(1): 20-23.

作者简介: 蒲泽林, 男, 1977 年出生, 博士研究生。研究方向为大机组安全与寿命管理, 已发表论文 6 篇。

Email: pzl-ly@sohu.com

[上接第 18 页]



图 6 一般电极点焊的熔核

Fig. 6 Nugget spot welded by common electrode

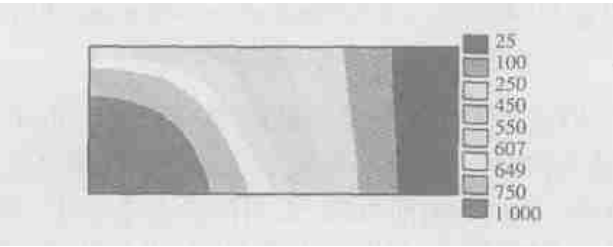


图 7 一般电极的模拟结果

Fig. 7 Nugget simulated by common electrode

6 结 论

数值模拟研究电极导电、导热性能对点焊电极端面温度影响,结果表明,一般电极/工件接触面中心温度在第 17 ms 达到铜铝合金化温度,在 58 ms 达到最高温度 577 ℃。电极电阻率降低二分之一、导热率提高一倍,电极/工件接触面中心温度在第 57 ms 达到最高温度 488 ℃,点焊过程未达到铜铝合金化温度。电极导电、导热性能显著影响电极/工件接

触面最高温度。

参考文献:

[1] 曲晓峰. 轻质材料在汽车上的应用[J]. 中国机电行业, 2002, (7): 37-38.
[2] Warren Banbury A S. The future of applying aluminum alloy to automobile[J], Aluminum, 1991, 6711: 1078-1080.
[3] 吴万春. 电磁场理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 1985. 121-123.
[4] 孔祥谦. 有限元法在传热学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 98-102.
[5] 蒋友谅. 非线性有限元法[M]. 北京: 北京工业学院出版社, 1988. 121-122.
[6] 田荣章, 王祝堂. 铝合金及其加工手册[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2000. 63-66.
[7] 张士林, 任颂赞. 简明铝合金手册[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2001. 136-138.
[8] 曹彪. 点焊熔核形核过程的有限元模拟及其实时控制[D]. 哈尔滨工业大学, 1991. 37-39.
[9] Pollock, Daniel D. Thermoelectricity: theory, thermometry, tool[M]. Philadelphia PA: ASTM, 1958.

作者简介: 吴志生, 男, 1963 年 10 月出生, 工学博士, 教授。天津大学材料科学与工程学院博士后。山西省焊接学会常务理事。主要研究方向为焊接过程控制自动化, 已发表论文 20 余篇。

Email: wuzhisheng@tyhmi.edu.cn