

# 铝/镀锌钢焊接接头金属间化合物热力学分析

黄健康<sup>1</sup>, 刘宁<sup>1</sup>, 何翠翠<sup>1,2</sup>, 石玓<sup>1</sup>, 樊丁<sup>1</sup>

(1.兰州理工大学 有色金属先进加工与再利用省部级共建国家重点实验室,甘肃 兰州 730050; 2.廊坊燕京职业技术学院 机电工程系 河北 廊坊 065200)

**摘要:** 针对 Al/镀锌 Zn 钢板 Pulsed DE-GMAW 焊接接头界面区金属间化合物相的确定性研究,在热力学基本定律的基础上,建立铝/镀锌钢板异种金属焊接接头界面 Fe-Al-Zn 相形成的吉布斯自由能变化的计算模型,得到 Al/镀锌 Zn 钢板异种金属焊接接头  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  金属间化合物相形成的标准吉布斯自由能与温度的变化关系,分析界面  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  金属间化合物存在的可能性,并与焊接试验结果进行对比分析。模拟结果表明:所建立的热力学模型是合理的,在界面上形成  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  金属间化合物,与试验结果基本一致,并推论了  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  是在  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  与  $\text{FeAl}_3$  形成后,由于 Zn 扩散进入  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  的晶体空位所得到的。

**关键词:** 脉冲旁路耦合电弧焊; 铝/钢焊接; 金属间化合物; 热力学分析

**DOI:** 10.11990/jheu.201503026

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1390.u.20160421.1040.034.html>

中图分类号: TG401 文献标志码: A 文章编号: 1006-7043(2016)06-0837-05

## Thermodynamics analysis of intermetallic compounds on Aluminum-steel welded joint

HUANG Jiankang<sup>1</sup>, LIU Ning<sup>1</sup>, HE Cuicui<sup>1,2</sup>, SHI Yu<sup>1</sup>, FAN Ding<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2.Department of Mechanical and Electrical Engineering, Vocational Technical Institute of Langfang Yanjing, Langfang 065200, China)

**Abstract:** This research determines an intermetallic compound phase on the interface area of aluminum/galvanized steel plate pulsed DE-GMAW-welded joints. Based on thermodynamic fundamentals, a calculation model of Gibbs free energy change, formed by the Fe-Al-Zn compound phase on the interface area of aluminum/galvanized welded joints, was established. The relation between temperature change and the standard Gibbs Free Energy, formed by  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  intermetallic compound phase on the aluminum/galvanized steel plate welded joints, was obtained. The possible presence of an  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  intermetallic compound on the welding interface was analyzed and compared with the experiment results. The simulated results show that the established thermodynamic model is reasonable as the  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  intermetallic compound formed on the interface is basically consistent with the experimental results. It can be deduced that  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  forms because zinc diffuses into the crystal space of  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  after  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  and  $\text{FeAl}_3$  are formed.

**Keywords:** pulsed DE-GMAW; aluminum-steel welding; intermetallic compound; thermodynamic analysis

在铝/钢异种金属焊接过程中,因两者之间的热物理性能差异较大,在焊接过程中极易形成一定厚度脆硬的 Fe-Al 金属间化合物,且随着化合物层厚度的增加,铝/钢接头的塑性、韧性降低,从而影响焊接接头的力学性能<sup>[1-2]</sup>。Mathieu 等<sup>[3]</sup>采用激光焊实现了镀锌钢板与铝合金的搭接,研究发现铝/钢焊接界面区生成的金属间化合物以  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  和  $\text{FeAl}_3$  为

主,且化合物层厚度小于  $15\ \mu\text{m}$ 。西本·浩司<sup>[4]</sup>等对 A1050H24 一种工业纯铝与 SGCC-F08 镀锌钢板进行激光压力焊研究,发现在铝/镀锌钢板的焊接接头界面区,不仅仅形成 Fe-Al 金属间化合物,还生成了  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  三元金属间化合物相。且指出  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  相的硬度明显小于脆性化合物  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  的硬度。可知  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  相的形成可以提高接头的韧性,改善接头的性能。针对铝钢界面 Fe-Al 化合物的成分,许多学者从热力学的角度出发,研究了铝/钢界面区金属间化合物生成的机理。冯吉才等<sup>[5]</sup>通过对铝板和镀锌钢板 CMT 熔钎焊的界面反应进行热

收稿日期: 2015-03-10.

网络出版日期: 2016-04-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51465031).

作者简介: 黄健康(1981-),男,副教授,博士.

通信作者: 黄健康, E-mail: sr2810@163.com.

力学分析,发现形成 FeAl<sub>3</sub>的吉布斯自由能比形成其他化合物的大的多,并且在整个温度范围内均大于零,所以该化合物在焊接过程中不可能生成,而其他化合物均可以形成;Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>和 FeAl<sub>3</sub>具有较低的吉布斯自由能,因而在 CMT 熔钎焊连接铝板和镀锌钢板时,Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>和 FeAl<sub>3</sub>两种化合物相最容易生成。在实际焊接过程中,某种金属间化合物是否会形核长大,需要对其形成热力学进行计算,进而判断其形成的可能性。研究异种金属焊接过程热力学特性,对铝/钢异种金属焊接接头金属间化合物形成机理的深入研究具有重要意义。

文中通过脉冲旁路耦合电弧熔钎焊<sup>[6]</sup>,获得成形良好的铝/镀锌钢焊接接头,通过对接头的 Fe-Al-Zn 三元金属间化合物进行分析,建立了基于相图模型的 Fe-Al-Zn 三元系统的热力学计算模型,分析了界面金属间化合物的形成机理。

### 1 Fe-Al-Zn 三元系统的热力学模型

#### 1.1 Fe-Al-Zn 金属间化合物的吉布斯自由能计算

对于多元混合体系,其摩尔吉布斯自由能<sup>[5]</sup>可表示为

$$G_m = {}^{srf}G + {}^{cig}G + {}^E G = \sum_i X_i {}^0 G_i(T) + RT \sum_i X_i \ln X_i + X_i X_j \sum_v L(X_i - X_j)^v \quad (1)$$

式中:前两项是理想部分的参考面自由焓和理想部分的混合熵,第三项是剩余部分的自由能;X<sub>i</sub>表示组分 i 的摩尔分数;<sup>0</sup>G<sub>i</sub>是组分 i 的吉布斯自由能,是温度的函数;R 是气体常数;T 是绝对温度;L 是 A、B 组元间的相互作用参数。

对于 Fe-Al-Zn 三元系统的吉布斯自由能,可根据相图模型进行计算。根据如图 1 所示温度为 460℃时 Fe-Al-Zn 三元相图<sup>[5]</sup>,铝、铁、锌三者相互作用可以形成一系列 Fe-Al-Zn 金属间化合物,如 δ相(Fe<sub>0.1288</sub>Al<sub>10.0667</sub>Zn<sub>0.8045</sub>)、Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>Zn<sub>x</sub>。

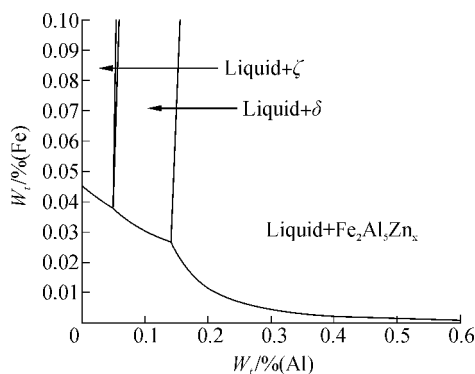


图 1 Fe-Al-Zn 三元相图<sup>[6]</sup>

Fig.1 Fe-Al-Zn ternary phase diagram

将式(1)推广到三元系统,故在 Fe-Al-Zn 三元系

统中,所形成的金属间化合物相的摩尔 Gibbs 标准自由能可表示为

$$G_m = X_{Fe} {}^0 G_{Fe} + X_{Al} {}^0 G_{Al} + X_{Zn} {}^0 G_{Zn} + RT(X_{Fe} \ln X_{Fe} + X_{Al} \ln X_{Al} + X_{Zn} \ln X_{Zn}) + X_{Fe} X_{Zn} [{}^0 L_{Fe,Zn} + {}^1 L_{Fe,Zn} (X_{Fe} - X_{Zn}) + {}^2 L_{Fe,Zn} (X_{Fe} - X_{Zn})^2] + X_{Al} X_{Zn} [{}^0 L_{Al,Zn}] + X_{Fe} X_{Al} [{}^0 L_{Al,Fe} + {}^1 L_{Al,Fe} (X_{Al} - X_{Fe}) + {}^2 L_{Al,Fe} (X_{Al} - X_{Fe})^2] \quad (2)$$

式中:<sup>0</sup>G<sub>Fe</sub>、<sup>0</sup>G<sub>Al</sub>和<sup>0</sup>G<sub>Zn</sub>分别是纯液态 Fe、Al 和 Zn 的自由能。X<sub>Fe</sub>、X<sub>Al</sub>和 X<sub>Zn</sub>分别是 Fe、Al 和 Zn 的摩尔分数,<sup>0</sup>L<sub>Fe,Zn</sub>、<sup>1</sup>L<sub>Al,Zn</sub>和<sup>0</sup>L<sub>Al,Fe</sub>分别是 Fe-Zn、Al-Zn 和 Fe-Al 的相互作用参数。

文献[7]对纯液态铁和铝的吉布斯标准自由能<sup>0</sup>G<sub>Fe</sub>的计算进行了详细的阐述,计算如下:

纯液态铁的自由能<sup>0</sup>G<sub>Fe</sub>为

$${}^0 G_{Fe} = {}^0 G_{Fe}^{bcc} - G_{Fe}^{mag} + \Delta G_{Fe}^{hbcc \rightarrow liq} \quad (3)$$

其中,<sup>0</sup>G<sub>Fe</sub><sup>bcc</sup>是体心立方晶格的铁的标准 Gibbs 自由能,G<sub>Fe</sub><sup>mag</sup>是具有磁性的铁的 Gibbs 自由能,ΔG<sub>Fe</sub><sup>hbcc→liq</sup>是非磁性 bcc 铁转化为液态铁时的 Gibbs 自由能的变化:

$$G_{Fe}^{mag} = RT \ln(\beta + 1) f(\tau) \quad \tau = T/T_c \quad (4)$$

$$f(\tau) = 1 - \frac{0.9053}{\tau} - 0.30602 \left( \frac{\tau^3}{2} + \frac{\tau^9}{45} + \frac{\tau^{15}}{200} \right) \quad (5)$$

其中,T<sub>c</sub>=1 043 K 为铁的磁性转变温度;β=2.22 为铁的玻尔磁子数。

ΔG<sub>Fe</sub><sup>hbcc→liq</sup>的表达式可表示为

$$\Delta G_{Fe}^{hbcc \rightarrow liq} = 12\,040.17 - 6.558\,43T - 3.675\,155 \times 10^{-21} T^7 \quad (6)$$

液态铝和液态锌的标准 Gibbs 自由能

$${}^0 G_{Al} = {}^0 G_{Al}^{bcc} \quad (7)$$

$${}^0 G_{Zn} = {}^0 G_{Zn}^{hep} \quad (8)$$

#### 1.2 吉布斯自由能的变化

在 Fe-Al-Zn 三元混合系统中,根据化学反应方程式,反应前后吉布斯自由能变化为

$$\Delta G = G_m - xG_{Fe} - yG_{Al} - zG_{Zn} \quad (9)$$

对于 1 mol 纯铁、纯铝或纯锌,其自由能和化学势相等,即

$$\mu_{Fe} = G_{Fe}; \mu_{Al} = G_{Al}; \mu_{Zn} = G_{Zn}$$

在二元组分体系中,某一组分的偏摩尔吉布斯自由能即为该组分的化学势,这一规律同样适用于 Fe-Al-Zn 三元系统,故铁的化学势可表示为

$$\mu_{Fe} = G_m + \frac{\partial G_m}{\partial X_{Fe}} - X_{Fe} \frac{\partial G_m}{\partial X_{Fe}} - X_{Zn} \frac{\partial G_m}{\partial X_{Zn}} - X_{Al} \frac{\partial G_m}{\partial X_{Al}} \quad (10)$$

将式(2)代入式(10)可得铁的化学势为

$$\mu_{Fe} = {}^0 G_{Fe} + RT \ln X_{Fe} + X_{Zn} (X_{Zn} + X_{Al}) {}^0 L_{Fe,Zn} + [2X_{Zn} X_{Fe} (2X_{Zn} + X_{Al}) - X_{Zn}^2] {}^1 L_{Fe,Zn} +$$

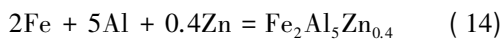
$$\begin{aligned}
 & [X_{Zn}X_{Fe}(3X_{Fe} - 3X_{Fe}^2 + 6X_{Fe}X_{Zn} - 4X_{Zn} - 3X_{Zn}^2) + \\
 & X_{Zn}^3]^2L_{Fe,Zn} + X_{Al}(X_{Al} + X_{Zn})^0L_{Al,Fe} + \\
 & [X_{Al}^2 - 2X_{Al}X_{Fe}(2X_{Al} + X_{Zn})]^1L_{Al,Fe} + \\
 & [X_{Al}X_{Fe}(3X_{Fe} - 3X_{Fe}^2 + 6X_{Fe}X_{Al} - 4X_{Al} - 3X_{Al}^2) + \\
 & X_{Al}^3]^2L_{Al,Fe} - X_{Al}X_{Zn}^0L_{Al,Zn} \quad (11)
 \end{aligned}$$

同理,可分别得 Al 和 Zn 的化学势:

$$\begin{aligned}
 \mu_{Al} = & {}^0G_{Al} + RT\ln X_{Al} + X_{Fe}(X_{Zn} + X_{Fe})^0L_{Fe,Al} + \\
 & [2X_{Al}X_{Fe}(X_{Zn} + 2X_{Fe}) - X_{Fe}^2]^1L_{Fe,Al} + \\
 & [X_{Al}X_{Fe}(3X_{Al} - 3X_{Al}^2 + 6X_{Fe}X_{Al} - 4X_{Fe} - 3X_{Fe}^2) + \\
 & X_{Fe}^3]^2L_{Fe,Al} + X_{Zn}(X_{Fe} + X_{Zn})^0L_{Al,Zn} - \\
 & X_{Zn}X_{Fe}^0L_{Fe,Zn} + 2X_{Zn}X_{Fe}(X_{Zn} - X_{Fe})^1L_{Fe,Zn} + \\
 & X_{Fe}X_{Zn}(-3X_{Fe}^2 + 6X_{Fe}X_{Zn} - 3X_{Zn}^2)^2L_{Fe,Zn} \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mu_{Zn} = & {}^0G_{Zn} + RT\ln X_{Zn} + X_{Fe}(X_{Zn} + X_{Al})^0L_{Fe,Zn} + \\
 & [2X_{Zn}X_{Fe}(X_{Zn} + X_{Al}) - X_{Zn}^2]^1L_{Fe,Zn} + \\
 & [X_{Zn}X_{Fe}(3X_{Fe} - 3X_{Fe}^2 + 6X_{Fe}X_{Zn} - 4X_{Zn} - 3X_{Zn}^2) + \\
 & X_{Zn}^3]^2L_{Fe,Zn} + X_{Al}(X_{Al} + X_{Fe})^0L_{Al,Zn} - X_{Al}X_{Zn}^0L_{Fe,Zn} + \\
 & 2X_{Al}X_{Fe}(X_{Fe} - X_{Al})^1L_{Al,Fe} + X_{Al}X_{Fe}(-3X_{Al}^2 + \\
 & 6X_{Al}X_{Fe} - 3X_{Fe}^2)^2L_{Al,Fe} \quad (13)
 \end{aligned}$$

在 Fe-Al-Zn 三元混合系统中,形成  $Fe_2Al_5Zn_{0.4}$  的方程式为



根据式 (11) 可分别确定式 (9) 中的各项系数,则  $X_{Fe} = 10/37$ 、 $X_{Al} = 25/37$ 、 $X_{Zn} = 2/37$ 、 $x = 2$ 、 $y = 5$ 、 $z = 0.4$ 。将各值代入式 (14),化简整理得

$$\begin{aligned}
 \Delta G = & G_m - 2G_{Fe} - 5G_{Al} - 0.4G_{Zn} = \\
 & -1.7297^0G_{Fe} - 4.3243^0G_{Al} - 0.3459^0G_{Zn} - \\
 & 5.1043RT - 0.0117^0L_{Fe,Zn} + 0.0930^1L_{Fe,Zn} - \\
 & 0.0132^2L_{Fe,Zn} - 1.2418^0L_{Fe,Al} - 0.6418^1L_{Fe,Al} - \\
 & 0.1921^2L_{Fe,Al} - 0.2337^0L_{Al,Zn} \quad (15)
 \end{aligned}$$

## 2 Fe-Al-Zn 计算与试验分析

根据表 1 列出的与 Fe-Al-Zn 反应有关的热力学数据,按照计算模型,应用 Matlab 编制求解程序,计算了  $Fe_2Al_5Zn_{0.4}$  相在 300~1500K 的生成自由能,计算结果如图 2 所示。从计算结果可以看出,形成

$Fe_2Al_5Zn_{0.4}$  相的摩尔吉布斯自由能在电弧熔钎焊温度范围内小于零。因此,该化合物相在铝/镀锌钢板焊接接头界面处可能存在。

为进一步验证所建立的铝/钢界面 Fe-Al-Zn 三元金属间化合物形成吉布斯自由能计算模型的合理性,采用旁路脉冲耦合电弧熔钎焊对铝与镀锌钢板进行焊接。焊接所使用的材料为镀锌层为 100 g/m<sup>2</sup> 的镀锌钢板,填充材料为直径 1.2 mm 的 ER5356 铝合金焊丝,保护气体为 Ar。采用电子探针仪进行线扫描分析焊接接头界面中心的金属间化合物层的化学成分,由图 3 可知,在金属间化合物层中,Al 和 Fe 的含量分布在焊接接头界面中心比较平齐,且出现平台。对界面进行 EDS 分析,如图 4 所示,获得界面中心不同区域元素成分,如表 2 所示。这表明在焊接接头界面中心可能形成  $Fe_xAl_y$  金属间化合物。

表 1 模型中的计算参数<sup>[7]</sup>

Table 1 computational parameters in model<sup>[7]</sup>

符号	表达式或值	符号	表达式或值
${}^0L_{Fe,Al}$	-91 976.5+22.131 4T	${}^0L_{Fe,Zn}$	58 088-23.665T
${}^1L_{Fe,Al}$	-5 672.58+4.872 8T	${}^1L_{Fe,Zn}$	92 219-55.584T
${}^2L_{Fe,Al}$	+121.9	${}^2L_{Fe,Zn}$	13 570
${}^0L_{Al,Zn}$	10 465.5-3.392 59T	$T_c$	1 043 K
$R$	8.314	$\beta$	2.22

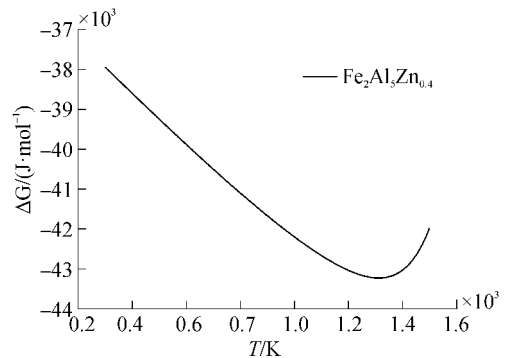
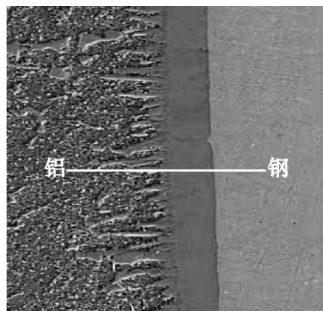
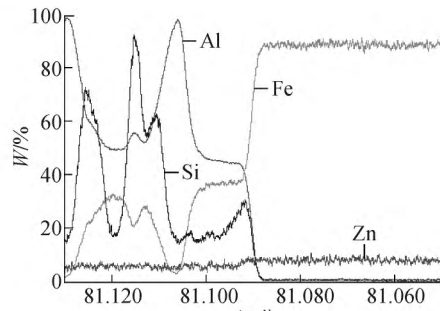


图 2  $Fe_2Al_5Zn_{0.4}$  相形成的吉布斯自由能变化

Fig.2 The Gibbs free-energy change of form  $Fe_2Al_5Zn_{0.4}$



(a) 线扫描区域



(b) 线扫描分析图

图 3 铝/镀锌钢焊接接头线扫描分析

Fig.3 Linear scanning analyses of welded joint

将焊后的铝/钢接头试样从界面处撕裂拉断,分离后的试样如图5所示。分别对铝侧和镀锌钢板一侧试样的剥落面进行X射线衍射分析,其结果如图6所示。

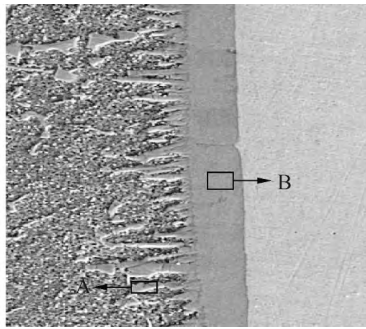
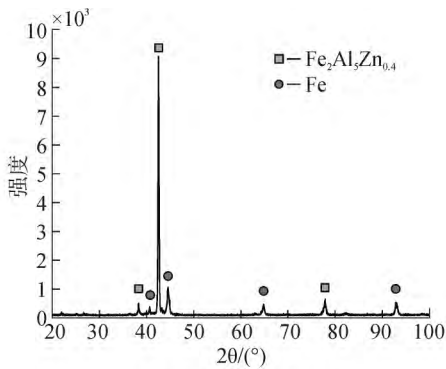
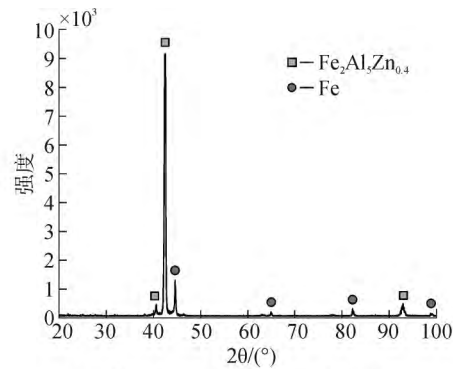


图4 焊接接头界面中心不同区域的EDS分析

Fig.4 EDS analysis on different interface centre areas



(a) 铝侧剥落面的XRD图



(b) 镀锌钢板一侧剥落面的XRD图

图6 试样剥落面的XRD分析图谱

Fig.6 XRD analysis on the specimen spalling surface

从图6中可以看出,中间界面区金属间化合物还存在有 $Fe_2Al_5Zn_{0.4}$ ,这表明在铝钢界面这与计算结果相吻合。由计算及试验结果可知,在铝/镀锌钢板接头界面存在 $Fe_2Al_5Zn_{0.4}$ 相化合物组织。

### 3 铝/镀锌钢界面过程分析

将相同温度范围内的各种Fe-Al金属间化合物相和 $Fe_2Al_5Zn_{0.4}$ 相的摩尔吉布斯自由能进行比较,Fe-Al化合物自由能计算依据文献[8-10]。结果如图7所示。

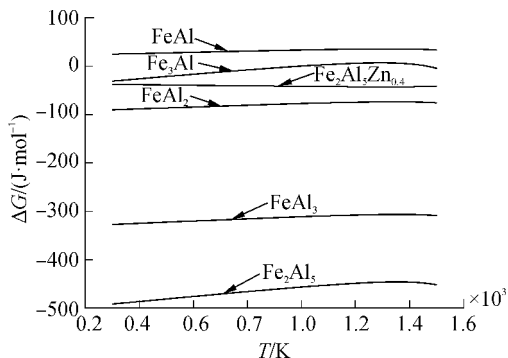


图7 金属间化合物的吉布斯自由能变化

Fig.7 The gibbs free energy change of intermetallic compounds

表2 焊接接头界面中心不同区域的化学成分

Table 2 Compositions of different areas at the interface centre of welded joint

Area	$W_i / \%$		$A_i / \%$	
	Fe	Al	Fe	Al
A	41.70	55.74	25.84	71.48
B	37.31	62.69	21.63	75.38



(a) 铝侧剥落试样

(b) 镀锌钢板侧剥落试样

图5 剥落的试样

Fig.5 The spalling samples

由图7可以看出,生成 $Fe_2Al_5Zn_{0.4}$ 相的摩尔吉布斯自由能远远大于生成 $Fe_2Al_5$ 和 $FeAl_3$ 相的摩尔吉布斯自由能,表明 $Fe_2Al_5Zn_{0.4}$ 相是在 $Fe_2Al_5$ 和 $FeAl_3$ 相形成后才形成的,由此可以推断在铝/镀锌钢板焊接界面处金属间化合物的形成过程如图8所示。

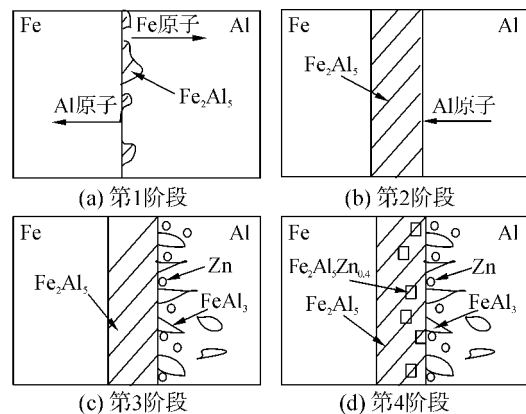


图8  $Fe_2Al_5Zn_{0.4}$ 金属间化合物形成过程的示意图

Fig.8 Illustration for formation process of  $Fe_2Al_5Zn_{0.4}$

根据以上对铝/钢界面金属间化合物的吉布斯自由能变化的计算,提出以下化合物扩散生长模型,并将其形成生长过程分为四个阶段。由于形成 $Fe_2Al_5$ 相

的 Gibbs 自由能最低,当液态 Al 与固态 Fe 界面处的 Fe 原子达到热处理温度下的极限溶解度时,便在铝/钢界面处形成了  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  晶核,如图 8(a) 所示;随着 Al 原子继续向 Fe 基体中扩散,  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  晶核先沿界面横向生长,逐渐连成整体,形成连续的  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  相层,如图 8(b) 所示;电弧加热完成以后,随着温度的降低, Fe 原子在液态铝中的溶解度降低,液态 Al 逐渐开始凝固,游离 Al 原子与  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  相结合形成离散的、针片状的  $\text{FeAl}_3$  相,如图 8(c) 所示;当  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  和  $\text{FeAl}_3$  形成后,由于  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  的斜方晶系结构,晶体内存在大量空位,于是在  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  与镀锌层的界面处, Zn 缓慢扩散进入  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  相与 Zn 原子结合反应生成了  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  金属间化合物,如图 8d 所示。

## 4 结论

1) 通过对  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  金属间化合物相的热力学计算,结果表明在铝/镀锌钢接头界面处可以形成  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  金属间化合物,与试验结果相吻合。

2)  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  的吉布斯自由能高于  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  和  $\text{FeAl}_3$ , 则  $\text{Fe}_2\text{Al}_5\text{Zn}_{0.4}$  是在  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  和  $\text{FeAl}_3$  形成后, Zn 扩散进入  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  的晶体内的空位,  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  相与 Zn 原子结合反应生成的。

## 参考文献:

- [1] MURAKAMI T, NAKATA K, TONG Hongjun, et al. Dissimilar metal joining of aluminum to steel by MIG arc brazing using flux cored wire [J]. ISIJ international, 2003, 43(10): 1596-1602.
- [2] RATHOD M, KUTSUNA M. Laser roll bonding of A5052 aluminium alloy and SPCC steel [J]. Quarterly journal of the Japan welding society, 2003, 21(2): 282-294.
- [3] MATHIEU A, SHABADI R, DESCHAMPS A, et al. Dis-

## 本文引用格式:

黄健康,刘宁,何翠翠,等. 铝/镀锌钢焊接接头金属间化合物热力学分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(6): 837-841.

HUANG Jiankang, LIU Ning, HE Cuicui, et al. Thermodynamics analysis of intermetallic compounds on Aluminum-steel welded joint [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(6): 837-841.

similar material joining using laser (aluminum to steel using zinc-based filler wire) [J]. Optics & laser technology, 2007, 39(3): 652-661.

- [4] NISHIMOTO K, HARANO T, OKUMOTO Y, et al. Mechanical properties of laser-pressure-welded joint between dissimilar galvanized steel and pure aluminium [J]. Welding international, 2009, 23(11): 817-823.
- [5] ZHANG H T, FENG J C, HE P. Interfacial phenomena of cold metal transfer (CMT) welding of zinc-coated steel and wrought aluminium [J]. Materials science and technology, 2008, 24(11): 1346-1349.
- [6] 石玢,温俊霞,黄健康,等. 基于旁路耦合电弧的铝钢 MIG 熔钎焊研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(16): 25-29. SHI Yu, WEN Junxia, HUANG Jiankang, et al. Study on DE-GMAW MIG-brazing method for bonding steel with aluminium [J]. Journal of mechanical engineering, 2011, 47(16): 25-29.
- [7] LUKAS H, FRIES S G, SUNDMAN B. Computational thermodynamics [M]. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2007.
- [8] KANG Yilin. The dissolution of iron from automotive steel sheets in a molten zinc bath and the kinetics of the nucleation and growth of dross particles [D]. Cleveland, Ohio: Case Western Reserve University, 2011.
- [9] SUNDMAN B, OHNUMA I, DUPIN N, et al. An assessment of the entire Al-Fe system including D03 ordering [J]. Acta materialia, 2009, 57(10): 2896-2908.
- [10] 石玢,何翠翠,黄健康,等. 铝钢焊接界面金属间化合物形成的热力学分析[J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(4): 5-7. SHI Yu, HE Cuicui, HUANG Jiankang, et al. Thermodynamic analysis of the forming intermetallic compounds on aluminum-steel welding interface [J]. Journal of Lanzhou university of technology, 2013, 39(4): 5-7.