

磁场对液态铝和固态铁界面微观组织的影响^{*}

韩 逸[†] 班春燕 巴启先 王书晗 崔建忠

(东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110004)

(2004 年 9 月 10 日收到, 2004 年 11 月 19 日收到修改稿)

研究了直流磁场、交流磁场对液态铝和固态铁界面微观组织的影响, 采用金相显微镜、电子探针和 x 射线衍射等方法对其扩散层内生成物进行了分析. 结果表明, 在直流磁场和交流磁场作用下, 固态铁界面内形成的扩散层厚度均比无磁场时小, 在交流磁场作用下, 液态铝和固态铁的界面变得凹凸不平; 在垂直于磁场方向上, 直流磁场抑制了铝原子和铁原子之间的扩散, 交流磁场则促进了扩散; 无磁场时固态铁内扩散层中生成的金属间化合物由 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 组成, 直流磁场条件下只有 Fe_2Al_5 生成, 交流磁场作用下由 Fe_2Al_5 和 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 组成.

关键词: 磁场, 铝, 铁, 金属间化合物, 扩散

PACC: 8130F, 4765

1. 引 言

铝为一种低密度、高韧性的有色金属, 其合金一直以质轻、韧性好等优点广泛应用于工业的各个领域, 尤其是在航天、航空中更是起着不可忽视的作用. 铝与少量过渡金属元素铁组成的合金依旧保持了铝合金密度小的特点, 且具有抗氧化、耐腐蚀等优点. 近几年来新型轻质耐热铝铁合金的开发, 使得铝铁合金成为国内外的研究热点^[1]. 此外, Fe-Al 系存在丰富的金属间化合物 (如 FeAl_3 , Fe_2Al_5 , FeAl_2 等), 研究这些金属间化合物的形成过程对实际生产, 如热浸铝、熔结、液态金属腐蚀等方面有着重要的参考价值^[2,3].

在液态铝和固态铁界面反应的微观组织分析方面, 人们已经做了大量的工作^[4-7]. 但有关磁场对其界面微观组织影响的研究目前尚属空白. 近十几年来, 在材料凝固过程中施加磁场这一技术得到了快速发展, 它已从最初的改进传统的工艺过程发展成为制备新材料、开发新工艺的重要手段. 由于该技术具有无污染、操作方便和效果显著等优点, 因此受到了人们的广泛重视^[8,9]. 然而, 目前这些研究大多停留在如何改善材料组织和性能方面, 关于磁场对微观组织影响的研究还开展的很少, 而且电磁效应的

作用机制以及对微观组织的影响机理更有待于深入研究.

本文研究了直流磁场、交流磁场对液态铝和固态铁界面微观组织的影响, 采用金相显微镜、电子探针和 x 射线衍射等方法对其扩散层内形成的金属间化合物进行了研究. 此外, 对磁场的作用机制进行了初步的探讨.

2. 实验材料及方法

实验所用材料为高纯铝和纯铁丝. 实验装置简图如图 1 所示. 它包括磁场处理部分 (由磁场电源和螺线管等组成); 控制部分 (由控温电源和各种控制仪表等组成); 工作台及负载部分 (由试样和外部支架组成); 加热装置 (由加热电阻丝、热电偶等组成).

称取高纯铝 25g, 放入内径为 17mm 的圆柱形石英坩埚中. 将石英坩埚置于电阻炉内加热至 700℃, 保温 10min, 用钨丝将铝熔体搅拌均匀, 稳定一段时间后, 将炉温缓慢降至 680℃. 将一直径为 2.8mm 的纯铁丝沿坩埚轴线插入液态铝中, 同时施加强度为 0.12T 的直流或交流磁场 (其中交流磁场频率为 10Hz), 保温 30min 后淬火. 作为对照, 另一组样品的实验在无磁场条件下进行. 将试样沿中部横截面切开, 制成金相样品. 在德国 Leica-DMR 金相显微镜下

^{*} 国家重大基础研究发展规划“973”项目 (批准号: G1999064905) 资助的课题.

[†] E-mail: hanyi7742@163.com

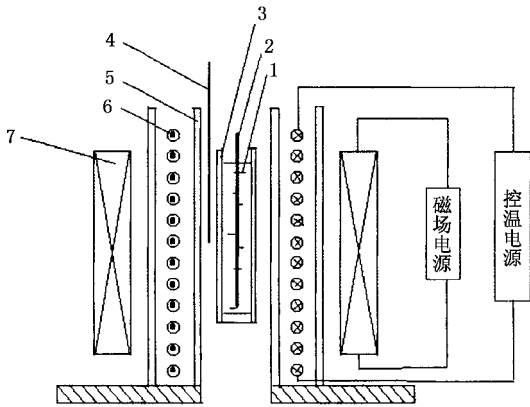


图1 实验装置简图 1—高纯铝 2—纯铁丝 3—石英管 4—热电偶 5—陶瓷管 6—加热电阻丝 7—工作线圈

进行显微组织分析;利用日本岛津 EPM-810Q 电子显微镜分别对扩散层及铝基体内进行铝元素和铁元素的面扫描,定性分析磁场对界面微观组织的影

响,并定量地计算出扩散层内生成物的铝铁原子比;采用日本理学株式会社 D/MAX2400x 射线衍射仪确定生成的金属间化合物的具体成分。

3. 实验结果与讨论

3.1. 金相显微组织的分析结果

图2分别显示了无磁场、直流磁场和交流磁场三种条件下的液态铝和固态铁界面的显微组织。照片中浅色部分是铝,深色部分是铁。从照片中可以看出,三种情况下在固态铁的界面内部均形成了非常明显的扩散层。此外,在交流磁场作用下液态铝和固态铁的界面变的凹凸不平,不如无磁场和直流磁场条件下平滑。这是因为交流磁场在液态铝中产生搅拌和对流^[10],加剧对固态铁边界的冲刷致使界面凹凸不平。

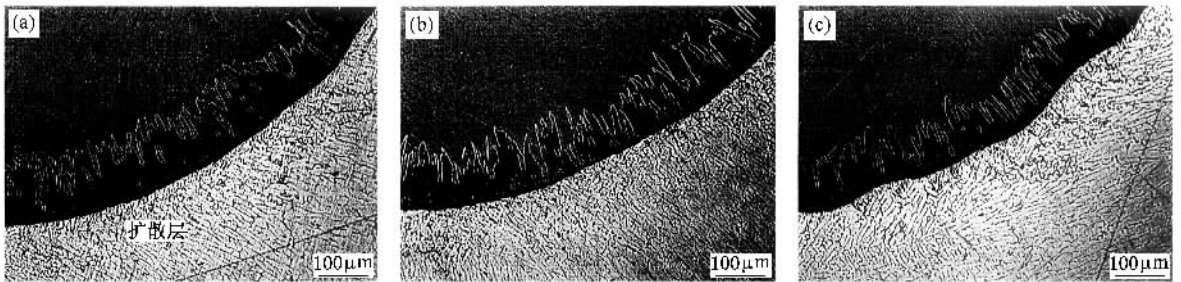


图2 液态铝和固态铁界面金相组织 (a)无磁场 (b)直流磁场 (c)交流磁场

3.2. 电子探针形貌及元素面扫描分析结果

3.2.1. 形貌分析结果

无磁场、直流磁场和交流磁场三种条件下的液

态铝和固态铁界面的形貌照片如图3所示。照片中亮白色部分是铁基体,黑色部分是铝基体,中间灰色部分是铝在固态铁中生成的扩散层。通过测量扩散层的平均厚度得到无磁场、直流磁场和交流磁场三

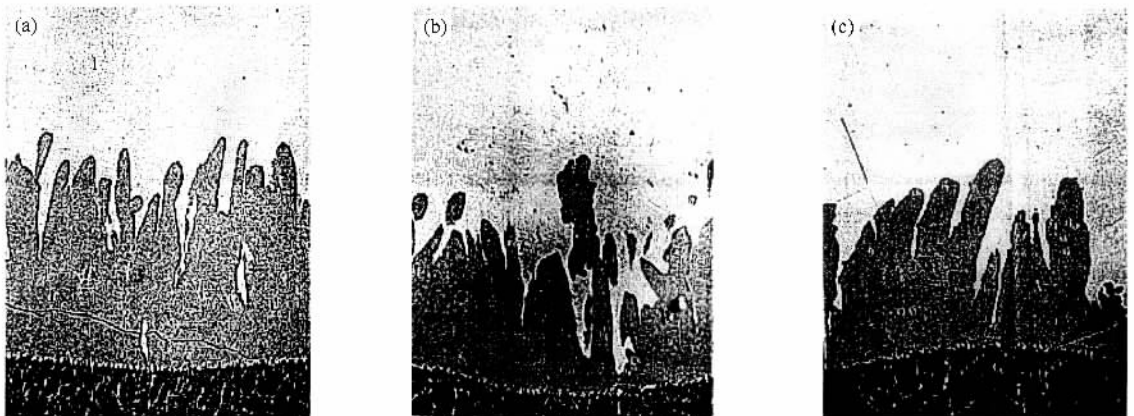


图3 液态铝和固态铁界面的形貌照片 (a)无磁场 (b)直流磁场 (c)交流磁场

种条件下分别为 $175\mu\text{m}$ 、 $128\mu\text{m}$ 和 $136\mu\text{m}$ ，由此可见，在直流磁场和交流磁场作用下，固态铁界面内形成的扩散层厚度均比无磁场时小。

根据菲克第一定律

$$J = -D \frac{dC}{dx}, \quad (1)$$

式中 J 为扩散流量， D 为扩散系数， dC/dx 为浓度梯度，负号表示物质的扩散流方向与浓度梯度的方向相反。由此可知，扩散是由粒子浓度梯度引发的粒子定向流动，定向流动的平均速度 V_d 的方向平行于浓度梯度 dC/dx ，如图 4 所示 V_d 应和界面垂直。按金属电子理论，无论在液态还是在固态金属中，原子失去价电子以离子形式存在，即扩散流带正电荷。在图 4 中，假设磁场 B 垂直于纸面向外，这样以平均速度 V_d 运动的铝离子在磁场中会受到洛伦兹力

$$f = qV_d \times B, \quad (2)$$

式中 q 为粒子电量。这样，运动轨迹发生偏转而沿着 V_{dm} 方向运动，这样垂直界面方向的速度减小，因此在相同时间内铝离子进入铁中的深度减小，以致扩散层厚度变薄。

3.2.2. 元素面扫描分析结果

(1) 对固态铁内扩散层进行铝元素面扫描

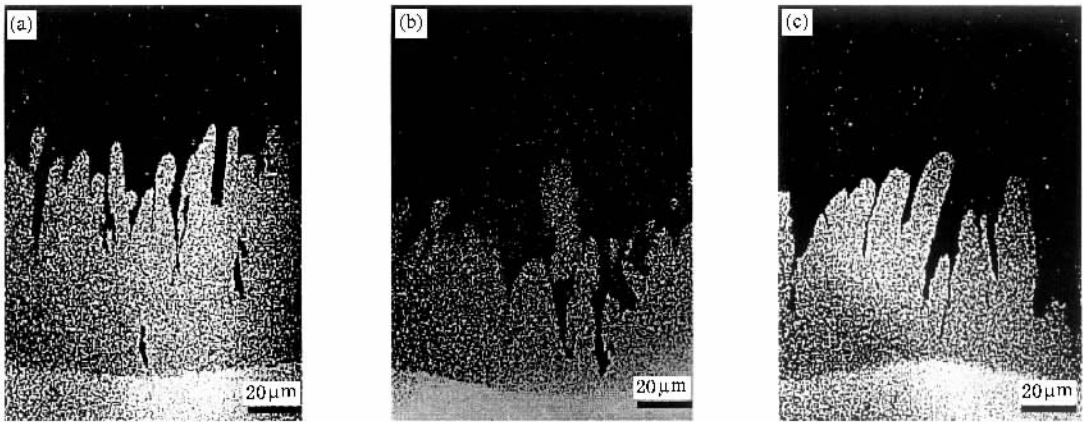


图 5 液态铝和固态铁界面处铝元素的面扫描照片 (a) 无磁场 (b) 直流磁场 (c) 交流磁场

产生上述现象的原因是，根据菲克第一定律（见 (1) 式），扩散来源于浓度梯度。在界面处，铝原子通过扩散进入固态铁中后，铁原子也通过扩散进入液态铝中，致使界面附近液体中铝的浓度会降低，浓度梯度减小，扩散则将变缓。直流磁场有抑制液态金属对流的作用^[11,12]，使得界面处的铝原子更难以得到补充，从而抑制了铝原子继续向固态铁中的扩散；交流磁场会在液态铝中产生搅拌和对流，使得界面处

对上述形貌照片(图 3)所示的同一视场作元素

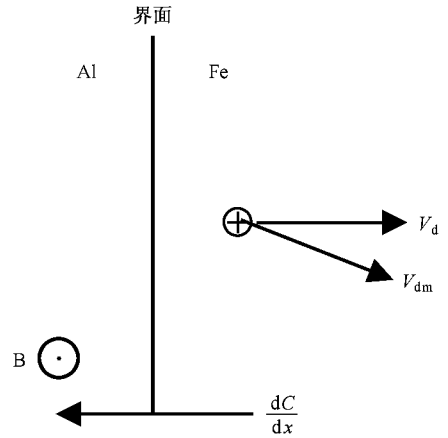


图 4 磁场使离子扩散速度发生偏离示意图

铝的面扫描，分别得到图 5(a)(b)(c)。扫描照片的白点对应铝元素，黑点对应铁元素。对比图 5 中的三幅扫描照片可明显看出，直流磁场作用下扩散层中生成物内的铝含量最低，无磁场较高，交流磁场作用下铝含量最高。这说明在试样的横截面方向上，即垂直于磁场方向上，直流磁场抑制了铝原子往固态铁中的扩散，而交流磁场促进了铝原子往固态铁中的扩散。

的铝原子能够较快得到补充，这样界面处的铝能保持较高的浓度梯度，从而促进了铝原子向固态铁中的扩散。

(2) 对铝基体中部和边部进行铝元素面扫描

图 6 和图 7 为无磁场、直流磁场和交流磁场三种条件下铝基体中部和边部位置处的铝元素面扫描照片。这几幅照片中白点对应铝元素，黑点对应铁元素。综合图 6 和 7 可以看出，铁元素大多数分布于铝

的晶界处,而且无论在铝基体的中部还是边部,铁在液态铝中的浓度均按直流磁场、无磁场、交流磁场次序增加.这显示了在试样的横截面方向上,即垂直于

磁场方向上,直流磁场对铁原子往液态铝中的扩散有着抑制作用,而交流磁场则起着促进作用.

在图 5 中黑色部分是铁基体,界面下方亮白色

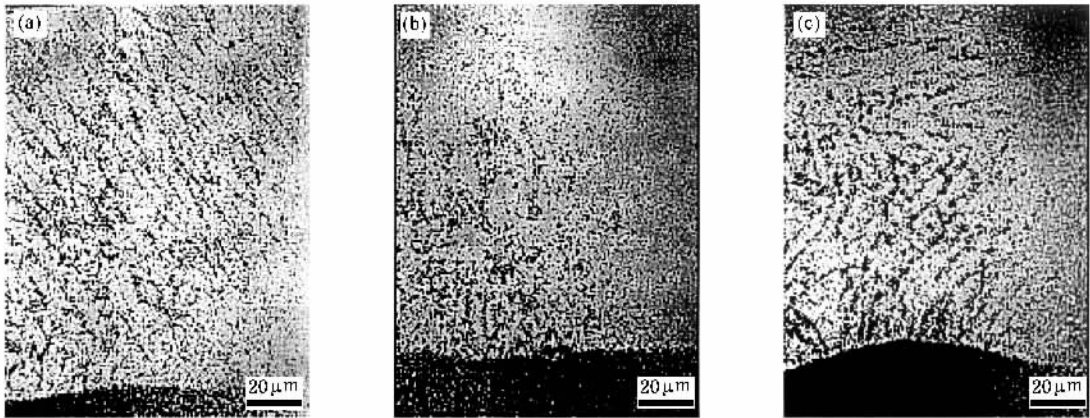


图 6 铝基体中部的铁元素面扫描照片 (a)无磁场 (b)直流磁场 (c)交流磁场

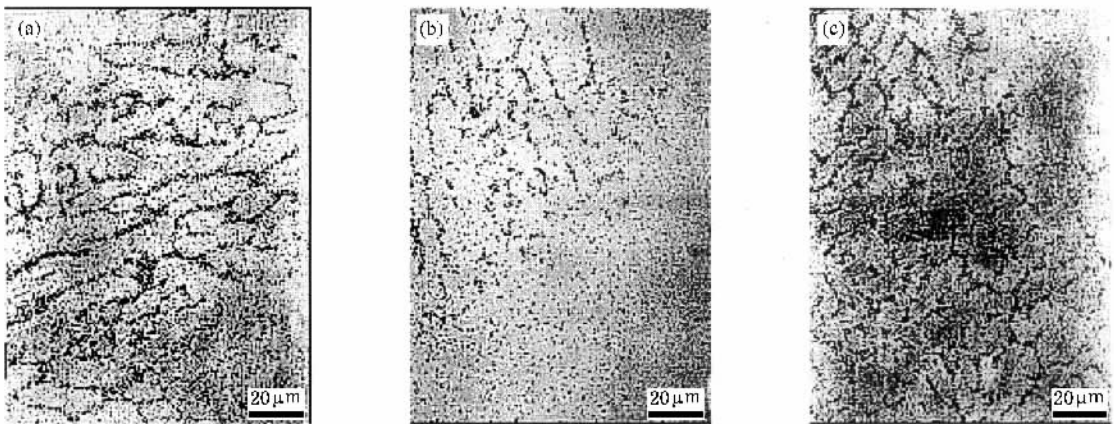


图 7 铝基体边部的铁元素面扫描照片 (a)无磁场 (b)直流磁场 (c)交流磁场

部分是铝基体,可以看到仅在铁基体边部有有限厚度的扩散层,说明铝原子扩散进入固态铁中的深度有限.而图 6 和 7 中无论是铝基体中部还是边部的黑点都很多,说明铁原子可以扩散到整个液态铝中.这是因为液态金属中原子的可动性远远大于固态金属,所以铝原子扩散进入固态铁中的深度就远远小于铁原子扩散进入液态铝的深度.这表明,在相同条件下,液态金属的扩散系数远远大于固态金属的扩散系数.

3.3. 电子探针定量分析结果

采用电子探针微区成分分析方法,在铝-铁界面固态铁扩散层内生成物中按如图 3(a)所示的箭头所指方向,每隔 $10\mu\text{m}$ 的距离测一个点,得到每个

点处铝的浓度,由此算出铝含量的平均值,继而算出铝和铁的原子个数比,列于表 1.计算得到的数值又一次证明了扩散层内生成物中铝含量按直流磁场、无磁场、交流磁场递增的结论.

表 1 扩散层内生成物中铝含量的平均值及铝和铁的原子个数比

实验条件	$B=0$	DC	AC
铝含量的平均值(质量百分数,%)	56.623	55.667	58.402
铝和铁的原子个数比	2.71	2.59	2.91

3.4. x 射线分析结果

为确定固态铁内扩散层中金属间化合物的具体成分,利用 x 射线衍射方法对扩散层内生成物进行分析.由于扩散层厚度很薄,生成的金属间化合物数量很少,因此,除 Fe 和 Al 的峰值很强外,金属间化

合物的衍射峰值很弱.在此,为了分析方便,把衍射图谱放大,得到的 x 射线衍射图谱如图 8 所示.图 8 中,在无磁场、直流磁场和交流磁场三条曲线中均有 FeAl_3 峰的最强峰($2\theta = 44.72$),但此峰同时也是 Fe 的最强峰和 Al 的次强峰,而且直流磁场和交流磁场两条谱线中没有 FeAl_3 的次强峰($2\theta = 43.52$),由此断定在直流磁场和交流磁场作用下扩散层内生成的金属间化合物中没有 FeAl_3 .在图 8 中还可以看出,在无磁场、直流磁场和交流磁场三种条件下,扩散层

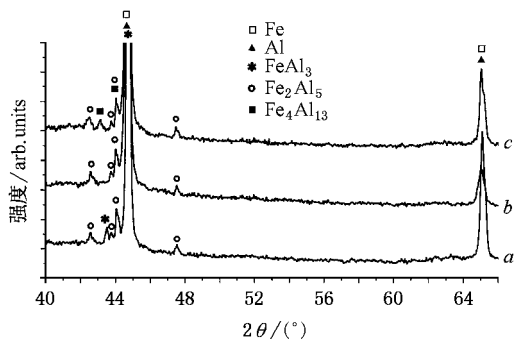


图 8 固态铁内扩散层中生成物 x 射线衍射图谱 (a)无磁场, (b)直流磁场 (c)交流磁场

内生成的金属间化合物中均有 Fe_2Al_5 ,不同之处是,在无磁场条件下还有 FeAl_3 生成,而在交流磁场条件下还有 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 生成.综合 X 射线衍射分析结果与电子探针微区成分分析结果可以看出,与无磁场情况相比,交流磁场促进了高铝化合物的生成,而在直流磁场作用下,可能仅生成低铝化合物 Fe_2Al_5 .

4. 结 论

(1)在直流磁场和交流磁场作用下,固态铁界面内形成的扩散层厚度均比无磁场时小.而且在交流磁场作用下,液态铝和固态铁的界面变得凹凸不平,不如无磁场和直流磁场条件下平滑.

(2)在垂直于磁场方向上,直流磁场抑制了铝原子和铁原子之间的扩散,交流磁场促进了铝原子和铁原子之间的扩散.

(3)无磁场时固态铁内扩散层中生成的金属间化合物由 FeAl_3 和 Fe_2Al_5 组成,直流磁场条件下只有 Fe_2Al_5 生成,交流磁场作用下由 Fe_2Al_5 和 $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ 组成.

[1] Zhou T, Huang B Y, Zhou K C and Li W X 2004 *Rare Metal Mater. Eng.* **33**(2) 187 (in Chinese)[周 涛、黄伯云、周科朝、黎文献 2004 稀有金属材料与工程 **33**(2) 187]

[2] Heo N H, Kim M T, Shin J H and Kim C Y 2000 *Surface Coating Tech.* **124** 39

[3] Bouayad A, Gerometta Ch, Belkebir A and Ambari A 2003 *Mater. Sci. Eng.* **A363** 53

[4] Yermenko V N, Natanzon Y V and Dybkov V I 1981 *J. Mater. Sci.* **16**(9) 1748

[5] Bahadur A and Mohanty O N 1998 *Mater. Trans. JIM*, **32**(11) 1053

[6] Richard R W, Jones R D, Clements P D and Clarke H 1994 *Int. Mater. Rev.* **39**(5) 191

[7] Bouche K, Barbier F and Coulet A 1998 *Mater. Sci. Eng.* **A249** 167

[8] Zi B T, Ba Q X, Cui J Z, Bai Y G and Na X J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49**(5) 1010 (in Chinese)[訾炳涛、巴启先、崔建忠、白玉光、那兴杰 2000 物理学报 **49**(5) 1010]

[9] Ban C Y, Ba Q X, Cui J Z, Lu G M and Zi B T 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2028 (in Chinese)[班春燕、巴启先、崔建忠、路贵民、訾炳涛 2001 物理学报 **50** 2028]

[10] Zhang W Q, Yang Y S, Zhu Y F, Liu Q M and Hu Z Q 1998 *Met. Mater. Trans. A* **29** 406

[11] Botton V, Lehmann P, Bolcato R, Moreau R and Haettel R 2001 *Int. J. Heat Mass Transfer* **44** 3345

[12] Takuma M, Yuko I and Kazuhiko K 2002 *Japan Society Appl. Phys.* **A 41**(7A) L811

Effect of magnetic field on the interfacial microstructure between molten aluminium and solid iron ^{*}

Han Yi[†] Ban Chun-Yan Ba Qi-Xian Wang Shu-Han Cui Jian-Zhong

(*The Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials* , Ministry of Education , Northeastern University , Shenyang 110004 , China)

(Received 10 September 2004 ; revised manuscript received 19 November 2004)

Abstract

The effects of DC and AC magnetic fields on the interfacial microstructure between molten aluminium and solid iron were studied, and the intermetallics formed in the diffusion layers were also investigated by means of metallography, electron microprobe (EPM) and x-ray diffraction(XRD). Results showed that the diffusion layer in solid iron under DC and AC magnetic fields was thinner than that without magnetic field, and the interface became irregular under AC magnetic field. In the direction perpendicular to the magnetic field, DC magnetic field damped the diffusion between aluminium and iron; on the contrary, under AC magnetic field diffusion was enhanced; the diffusion layer in solid iron was mainly composed of Fe_2Al_5 and FeAl_3 without magnetic field, while there was only Fe_2Al_5 under DC magnetic field, and Fe_2Al_5 and $\text{Fe}_4\text{Al}_{13}$ under AC magnetic field.

Keywords : magnetic field , aluminium , iron , intermetallics , diffusion

PACC : 8130F , 4765

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. G1999064905).

[†] E-mail : hanyi7742@163.com