

④ 71-74, 93

纵向磁场参数对 LD10CS 铝合金 TIG 焊
焊缝组织的影响殷咸青, 罗 键, 李海刚
(西安交通大学, 710049, 西安)

TG457.14

TG444.74

摘要: 通过对外加间歇交变纵向磁场作用下 LD10CS 铝合金 He-TIG 焊缝组织的分析, 发现磁场参数中磁感应强度 B 、磁场交变频率 f 和磁场断通比 Q 对焊缝组织细化效果影响很大。磁感应强度 B 与磁场交变频率 f 不能单独选择, 必须恰当匹配, 同时还必须与焊接规范参数相适应, 才能获得最佳细化效果。给出了试验条件下最佳的磁场参数。研究结果对磁控电弧焊接技术的应用具有重要的指导意义。

关键词: 电磁搅拌; 焊缝组织; 铝合金; 参数优选
中国图书资料分类法分类号: TG401

TIG 焊, 纵向磁场

Optimization of Magnetic Parameters for Grain Structure
Refinement of LD10CS Aluminum Alloy WeldmentYin Xianqing, Luo Jian, Li Haigang
(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Metallographic examination of LD10CS aluminum alloy weldment using He-TIG (Tungsten Inert Gas) with longitudinal intermittent alternative magnetic fields shows that the magnetic induction intensity, the frequency and magnetic ratio of the break to openness can greatly influence the weld grain refinement. These parameters cannot be chosen independently; they need to be optimized to control grain structure refinement and magnetic property.

Keywords: magnetic stirring; weld structure; aluminum alloy; parameter optimum

LD10CS 铝合金钨极氦弧焊(He-TIG)焊缝结晶组织粗大, 焊缝中心易形成羽毛晶组织, 致使焊缝金属热裂倾向较大, 塑性、韧性较低。研究证明^[1~3], 电磁搅拌是改善焊接质量的有效方法之一。

外加间歇交变纵向磁场的电磁搅拌焊接方法,

可以有效地细化焊缝一次结晶组织, 减小焊缝金属的偏析程度, 降低焊缝结晶裂纹和气孔的敏感性, 提高焊缝金属的塑性、韧性^[1,2]。但当磁场参数选择不当时, 电磁搅拌效果变差, 甚至使焊缝成形严重恶化^[2~6]。

收稿日期: 1998-09-25. 作者简介: 殷咸青, 男, 1968年6月生, 机械工程学院焊接研究所, 讲师。
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59775059)。

在外加间歇交变纵向磁场 LD10CS 铝合金 He-TIG 焊接时,磁场参数的选择更具有重要意义,它直接影响 LD10CS 铝合金焊缝金属一次结晶组织的细化程度.由于被焊材料焊接工艺参数的不同,焊缝金属结晶组织细化的磁场参数也各不相同,并且它们的可调范围较大,一般很难一次选取最佳参数.因此,通过分析 LD10CS 铝合金焊缝组织,探讨磁场参数对焊缝结晶组织细化效果的影响规律,以指导电磁搅拌焊接工艺,具有重要意义.

1 实验方法与设备

本文所采用的外加磁场是一种以一定频率间歇交变的纵向磁场,该磁场由安装在喷嘴上的激磁线圈产生,其激磁电流为双向脉冲电流,其断通比和幅值均可调节,产生纵向磁场或同轴磁场(磁力线方向与电弧轴线平行,并以电弧轴线为中心形成轴对称分布).试验用材料为 LD10CS 铝合金板材,厚度 $h = 4$ mm.焊接采用直流正极性(DCSP)不填丝钨极氦弧焊(He-TIG),钨极直径 $d = 4$ mm,弧长(钨极至工件距离) $l = 1.0 \sim 1.5$ mm,焊接电流 $I = 110$ A,焊接速度 $V = 300$ mm/min,气体流量 $q_v = 18$ L/min.详细内容见文献[2].

2 磁场变化频率 f 的影响

磁场频率是电磁搅拌焊接时的重要参数,它不仅影响焊缝金属一次结晶组织的细化效果,而且也影响焊缝成形.若激磁电流为脉冲方波,其频率可以按下式计算[7]

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2(T_1 + T_2)} = \frac{1}{2(T_2/Q + T_2)} = \frac{Q}{2T_2(1 + Q)} \quad (1)$$

式中 T 为脉冲周期; T_1 为脉冲持续时间; T_2 为脉冲休止持续时间; Q 为断通比.

为了有效细化一次结晶组织,在脉冲休止时间内,结晶前沿应该向前推进,其距离约等于两相区域的厚度,即

$$T_2 = b/V_{cb} \quad (2)$$

式中 b 为结晶线前沿两相区域的厚度; V_{cb} 为焊接速度.

将式(1)代入式(2),可以得到交变磁场适宜的脉冲频率

$$f = \frac{V_{cb}Q}{2b(Q + 1)} \quad (3)$$

两相区域的厚度取决于结晶温度范围和相界面附近的温度梯度,结晶温度范围越宽和温度梯度越低,两相区域厚度就越大.对于铝合金的焊接情况,这一区域的特征是具有向熔池液态金属延伸的树枝晶,液态金属充满结晶线前沿树枝晶之间的间隙.对于以镍、铝、钛为基的一系列合金,在焊接熔池尾部,两相区域厚度大约为 $0.01 \sim 0.07$ cm^[4].由于 LD10CS 铝合金具有较大的结晶温度区间(128 °C),在铝合金中仅次于超硬铝 LC4(161 °C)^[5],因此它的两相区厚度接近于上限值.取两相区域的厚度为 0.04 cm,按照公式(3)可计算出当 Q 等于 2.5 、 V 分别等于 150 、 300 、 500 mm/min 时,与此对应的磁场交变频率分别为 2.2 、 4.5 、 7.4 Hz.

自然电弧焊时,LD10CS 铝合金焊缝金属一次结晶组织粗大,且具有明显的方向性,如图 1a 所示.电磁搅拌焊接时,保持磁感应强度 $B = 0.04$ T 不变,磁场频率 $f = 2$ Hz 时,焊缝金属的结晶组织有所细化,如图 1b; $f = 5$ Hz 时,焊缝金属的结晶组织明显细化,如图 1c;将 f 值进一步提高至 15 Hz 时,由于熔池液态金属的机械惯性,磁搅拌力导致的熔化金属搅拌运动阻力增大,甚至不会产生节奏明显的搅拌运动,因此搅拌效果很差,一次结晶组织反而变得粗大,如图 1d 所示.

图 2 为 $B = 0.04$ T, $f = 2$ 、 5 Hz 时焊缝金属的显微组织.图 2 中箭头所示为磁场作用时形成的“波纹”,结晶线前沿枝晶的部分重熔即发生在“波纹”线及其附近.磁场休止时,因结晶线前沿枝晶重熔所造成的难熔质点开始活化,并以此为晶核,这些新形成的晶核从“波纹”线附近开始生长,直到下一条“波纹”线长大成柱状晶,此时,由于瞬时结晶速度加快,故晶粒横向尺寸减小.因此, $f = 5$ Hz 时,焊缝金属的“波纹”间距较小,细化效果显著.当磁场频率较低时,磁场休止时间较长,“波纹”线之间的间距较大,熔池金属的结晶状态接近自然电弧焊时的状态,结晶组织细化效果较差.

图 2 表明,促使熔池金属间歇性强制推移的磁场参数有一个恰当范围,只有在此范围内,才能获得较佳的细化效果.一般说来,在较佳的磁场频率和磁感应强度条件下,形成的“波纹”间距相对较小,柱状晶的长度尺寸和横向尺寸也相应减小,细化效果显著,反之,则细化效果不明显.

有人认为,若晶粒的细化程度符合交变磁场频

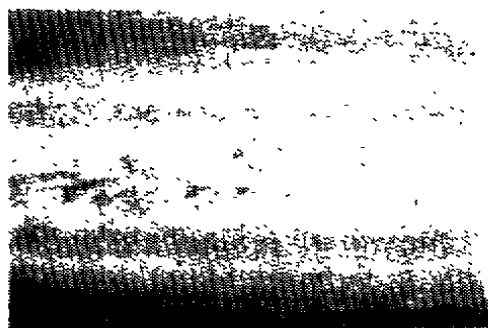
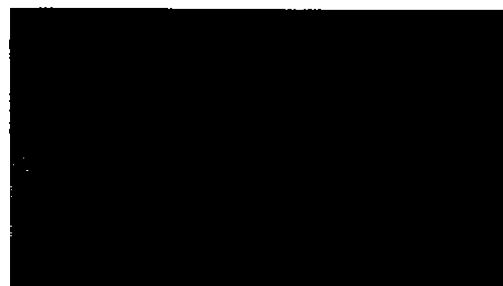
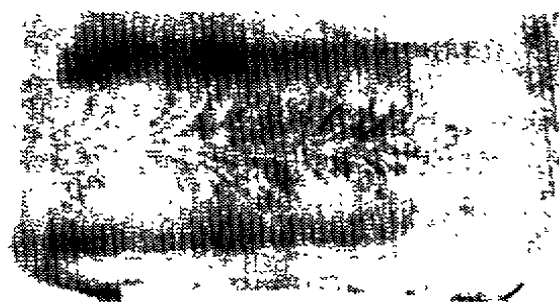
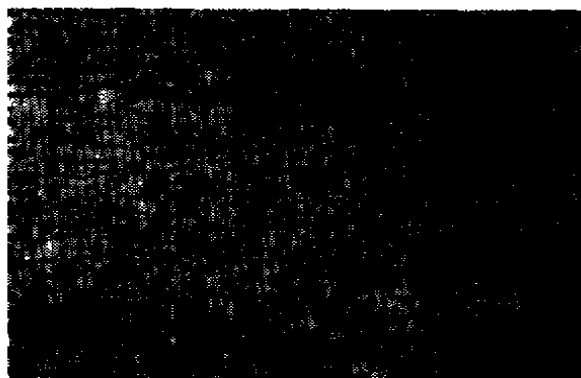
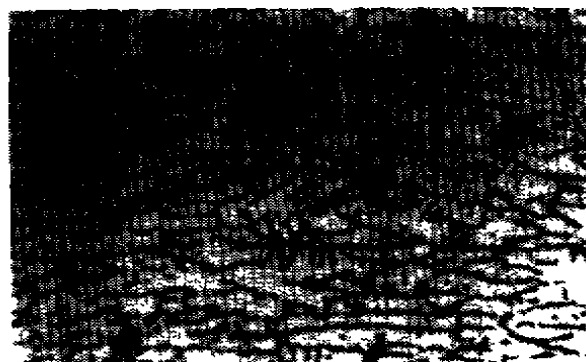
(a) $f=0$ (b) $f=2 \text{ Hz}$, $B=0.04 \text{ T}$ (c) $f=5 \text{ Hz}$, $B=0.04 \text{ T}$ (d) $f=15 \text{ Hz}$, $B=0.04 \text{ T}$

图1 磁场交变频率对焊缝金属结晶组织细化效果的影响

率与柱状晶生长长度的对应机理(如图2所示),那么,交变磁场使晶粒细化的最佳频率与焊接速度成正比例关系,因为2个“波纹”的间距(柱状晶在交变磁场半周期内所能生长的长度)与焊接速度成反比例。这种观点并不完全正确。自然电弧焊时,焊接速度即是影响焊缝金属结晶组织的重要因素,焊速的变化直接影响熔池的形状、质量、结晶界面的温度梯度、柱状晶的长大方式等。低速焊时,熔池结晶线前沿温度梯度较大,焊缝金属的结晶组织为柱状晶,磁场对结晶线前沿浓度过冷的影响较大;随焊速增大,

结晶线前沿的温度梯度下降很多,浓度过冷加大,等轴晶得以发展,而且,高焊速所形成的狭长熔池形状使熔融金属在结晶线前沿的流动减弱。因此,在不同的焊速下,焊缝金属的结晶组织有很大差异,磁场对结晶区域的影响程度也不同。电磁搅拌焊接时,自然电弧状态下熔池金属的结晶条件及组织是影响晶粒细化程度的内在因素,而磁场这种外在因素对晶粒的细化程度则视内因而定。虽然存在磁场频率与焊速的最佳匹配,譬如高速焊时,磁场最佳频率也相应增大,但不能简单认为二者必定成正比例关系。

(a) $f=2 \text{ Hz}$, $B=0.04 \text{ T}$ (b) $f=5 \text{ Hz}$, $B=0.04 \text{ T}$ 图2 不同磁场交变频率作用下焊缝金属的微观组织 $\times 200$

试验表明,对 LD10CS 铝合金进行电磁搅拌 He-TIG 焊接,当频率 $f=5\text{ Hz}$ 时,对焊缝金属结晶组织的细化效果最好.而被焊材料、焊接方法和热输入不同时,这个最佳频率值也相应改变,例如,埋弧自动焊 20g 钢时,其最佳磁场频率 $f\leq 2\text{ Hz}$ [6].

3 磁感应强度 B 的影响

磁感应强度决定了磁搅拌力的大小,它也会影响焊缝成形和焊缝金属的细化程度.磁场交变频率不变, $B=0.02\text{ T}$, 0.04 T 时所焊焊缝的宏观组织如图 3 所示.当 $B=0.02\text{ T}$ 时,焊缝金属的一次结晶组织较自然电弧焊时有所细化; $B=0.04\text{ T}$ 时,一次结晶组织的细化效果显著,与此同时,柱状晶变得杂散,方向性变弱.

因此,在一定范围内,较高的磁感应强度有助于晶粒细化,但若磁感应强度过高,熔池和电弧运动激烈,保护气流的稳定性变差,则焊缝成形也会变差,严重者还会形成起皱焊道,所以,磁感应强度应有上限值.试验发现,只要 $B<0.06\text{ T}$,焊缝成形就不会明显变差.但磁感应强度也不能过低,否则产生的磁搅拌力较小,熔池液态金属的间歇性运动较弱,导致细化效果不明显.

磁感应强度值也应根据被焊材料的性质、焊接方法、热输入和其他磁场参数来确定,一般在 $0.02\sim 0.06\text{ T}$ 范围内. TIG 焊铝合金时,由于熔池尺寸小,铝合金比重小,因此, $B=0.04\text{ T}$ 时,即可获得满意的细化效果.

4 磁场参数的匹配

综上所述,磁场参数,即磁感应强度 B 和磁场

交变频率 f ,对电磁搅拌效果影响很大,而这 2 个参数不能单独选择,两者之间必须有一个恰当的配合,才能获得最佳细化效果.一般说来,当所选用的 f 较高时, B 值应适当加大;反之,当 B 值较小时, f 适当降低,才能达到同样的搅拌效果.另一方面,磁场参数还必须与所采用的焊接规范参数相适应,一般情况下,焊接热输入较大时,所需 B 值较大,因为热输入决定了熔池尺寸的大小;当焊接速度较快时,搅拌频率应适当提高,以使“波纹”间距较小.当然这些参数均有一定的调节范围,即有一定的最佳参数范围,例如,用 He-TIG 焊 LD10CS 铝合金时,当焊接速度 $V=300\text{ mm/min}$ 时,在外加磁场交变频率 $f=2\sim 5\text{ Hz}$ 范围内,均可获得较满意的焊缝一次结晶组织.

另一个重要的磁场参数为断通比,即磁场休止时间与作用时间之比.研究表明,电磁搅拌焊接时,一般用较高的断通比 ($Q=2\sim 10$),它主要取决于磁感应强度和焊接熔池金属的粘度.该参数的选择原则与磁场交变频率 f 大体相同.当磁感应强度较大时,熔池运动激烈, Q 值应大一些,以保证熔池头部金属交替向尾部移动;若液态金属粘度较大, Q 值也应大一些.在本试验中,按照铝合金的焊接特点,依据文献[6]推荐的数据,取 $Q=2.5$.

5 结 论

(1)外加间歇交变纵向磁场 He-TIG 焊 LD10CS 铝合金时,焊缝金属一次结晶组织能有效得到细化.

(2)通过对外加间歇交变纵向磁场作用下 LD10CS 铝合金 He-TIG 焊焊缝组织的分析,发现磁场参数(磁感应强度 B 、磁场交变频率 f 和磁场断通比 Q)与焊接规范参数必须恰当匹配,焊缝组织才

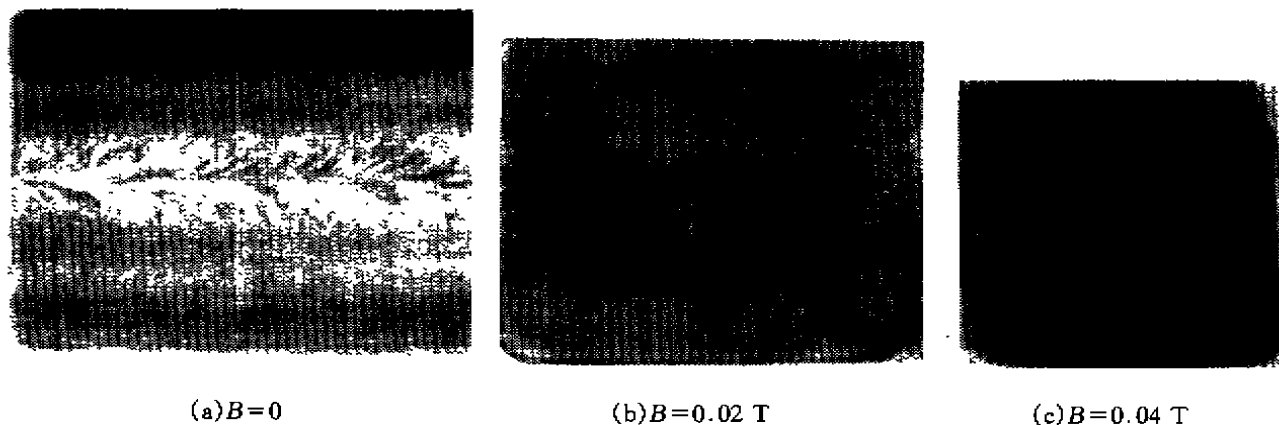


图3 磁感应强度对焊缝金属结晶组织细化效果的影响

(下转第93页)

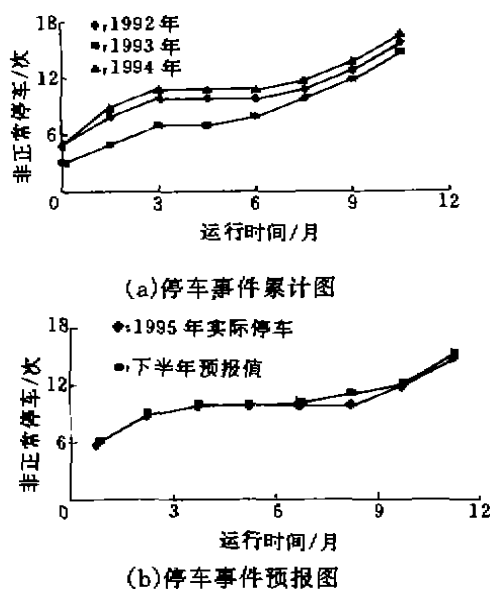


图6 烟机停车事件累计和预报图

4 结束语

本文首先从人工神经网络的非线性映射能力出发,概述了神经网络预报的基础和常见的神经网络预报方法,分析了单步神经网络预报的不足和实现神经网络多步预报的关键.其次,提出了相空间动力学轨道的相似多步预报概念,采用概率神经网络方

法,有效地实现了依据模式向量的影响概率函数估计和基于概率映射的相似预报方法,并给出了多步预报的概率神经网络结构.最后,比较了单步预报神经网络、多步预报神经网络和多步预报概率神经网络的预报能力,并通过对燕山石化大机组停车概率的多步预报结果,反映出概率神经网络具有良好的多步预报能力.

参考文献:

- [1] Matsuba I. Application of neural sequential associator to long-term stock price prediction. In: Low T S, Ed. IEEE Joint Conference on Neural Networks. Singapore: BAC Printers, 1991. 1 196~1 201.
- [2] 谢爱林. 机械故障的非线性诊断方法:[硕士学位论文]. 西安:西安交通大学机械工程学院,1991.
- [3] 林振山. 长期预报的相空间模回归. 北京大学学报, 1992, 28(5): 596~601.
- [4] Bacha H, Meyer W. A neural network architecture for load forecasting. In: Clifford L, Ed. IEEE Joint Conference on Neural Networks. Baltimore: 1992. II-442~II-447.
- [5] 徐光华. 概率神经网络及大机组智能诊断技术:[博士学位论文]. 西安:西安交通大学机械工程学院,1995.

(编辑 葛赵青)

(上接第74页)

能获得最佳的细化效果.

(3)本文研究了外加纵向磁场参数对焊缝一次结晶组织细化的影响规律,发现磁感应强度 B 和磁场交变频率 f 对电磁搅拌效果影响最大,两者也必须适当配合,才能获得满意的搅拌效果.

(4)LD10CS 铝合金 He-TIG 焊接条件下最佳参数的匹配原则是: f 较高时, B 应适当加大; B 较小时, f 应适当降低;焊接热输入较大时,所需 B 值较大;焊接速度较快时,搅拌频率应适当提高,这样才能达到同样的搅拌效果.各参数均有一定的最佳参数范围.本研究对磁控电弧焊接技术的应用具有重要的指导意义.

参考文献:

- [1] 贾昌申,殷威青. 纵向磁场中的焊接电弧行为. 西安交通大学学报, 1994, 28(4): 7~13.

- [2] 殷威青,李海刚,罗键. 用电磁搅拌抑制 LD10CS 铝合金焊缝热裂纹的研究. 西安交通大学学报, 1998, 32(5): 91~95.
- [3] Kou S., Le Y. Improve weld quality by low frequency arc oscillation. Welding Journal, 1985, 64(3): 51~55.
- [4] [苏]阿勃拉洛夫 M A, 阿勃杜拉赫曼诺夫 P Y. 电磁作用焊接技术. 韦福水,路登平译. 北京:机械工业出版社, 1988. 1~60.
- [5] 贺运佳. 金属材料熔焊工艺. 西安:西北工业大学出版社, 1988. 163~177.
- [6] 贾昌申,肖克民. 用电磁搅拌提高 20g 铜埋弧自动焊焊缝质量. 电焊机, 1987, 18(4): 14~17.
- [7] Абрапов М А, Абдурахманов Р У. О механизме изменения дорвичной структуры металла сварного шва при электромагнитном воздействии. Автоматическая Сварка, 1982, 72(2): 18~21.

(编辑 葛赵青)