磁控 TIG 高速焊焊缝成形机理

常云龙， 路 林， 李英民， 杨 旭
（沈阳工业大学 材料学院，沈阳 110870）

常云龙

摘 要：对磁控 TIG 焊焊缝成形机理进行了理论分析，外加磁场可以改变液态金属表面张力的差值，进而改变熔池的流动方向. 当$\partial\sigma/\partial T>0$时，焊缝边缘点附近的液态金属向熔池内部流动，焊缝凝固时容易产生咬边；$\partial\sigma/\partial T<0$时，液态金属由熔池中心向边缘流动，咬边倾向性很小. 分别比较了外加横向直流磁场、横向交流磁场以及纵向交流磁场时的焊接电弧通过焊缝截面的时间. 结果表明，外加磁场时 TIG 焊电弧阳极斑点的有效直径大于无磁场时的电弧阳极斑点有效直径，这将有助于减小表面张力温度系数，从而有助于解决高速焊接时出现的咬边与驼峰等问题.

关键词：外加磁场；电弧特性；焊缝成形；磁压缩
中图分类号：TG444$^+$.2 **文献标识码**：A **文章编号**：0253－360X(2013)06－0001－04

0 序 言

薄壁不锈钢管在直饮水、给水、热水、消防、排水、采暖、医药、食品、化工、船舶等领域具有广阔的应用前景. 目前将不锈钢带卷筒后采用 TIG 焊接速度提高时的焊缝成形缺陷主要包括两种，咬边和驼峰焊道[1－3]. 咬边又称咬肉缺陷即在焊缝边缘上出现一系列的内陷的凹槽. 驼峰是指焊缝金属沿焊接方向上的分布严重不均匀的焊缝成形缺陷. 一般来说咬边总是先出现，随着焊接速度增大驼峰焊道出现，速度进一步提高时甚至出现焊缝不连续的情况. 1 mm 以下的薄板焊接由于薄板自身的拘束度小、线膨胀系数大. 当焊接速度快时，则使得温度分布梯度增大，表面张力变化大，很容易出现焊缝咬边乃至驼峰等焊接不良现象，因此对于咬边机理的研究是高速焊接工艺实现的关键问题. 高速焊接时产生缺陷的机理十分复杂，尽管有许多学者对此现象进行了研究分析，但还没有一个满意的结论. 通过外加磁场控制焊缝成形质量是目前的研究热点[4,5].

1 焊接熔池受力情况分析

高速 TIG 焊接过程中，随着焊接速度提高极易出现焊缝咬边或者驼峰，严重的会出现未熔合，焊接过程将无法进行. 熔池表面张力是影响熔池内液体金属流动方式的主要因素之一，表面张力（或称 marangoni 力）驱使表面的流体分子沿着表面张力增加的方向流动. 表面张力梯度的符号和大小决定了熔池中流体流动的方向，进而影响着熔池内的温度分布及熔合区形状. 液体流动在表面张力的作用下，液体的流向与表面张力的温度系数有关系，而且液体的流动速度与流动方向也与表面张力密切相关.

一般情况下使用 TIG 焊接时，电流 $I<200$ A 电弧力和浮力较小，一般可以忽略不计，熔池内部液态金属流动主要受到的作用力有熔池金属重力 G，熔池金属表面张力 F，如图 1 所示.

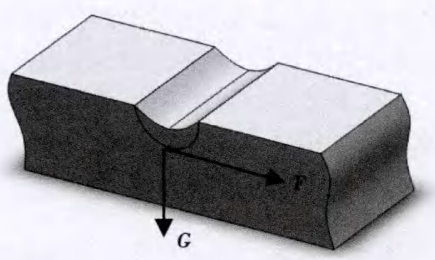


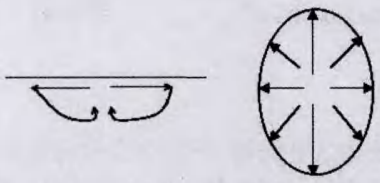
图 1 焊接熔池受力分析

Fig. 1 Force analysis of welding molten pool

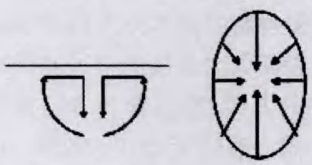
图 2 为熔池金属流动示意图，对于大部分物质来说，表面张力随温度升高而降低，即表面张力温度系数（$\partial\sigma/\partial T$）呈负数，熔池表面张力的分布将是中

收稿日期：2012－06－28
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51275314）；沈阳市重点科技基金资助项目（1071201-1-100）；沈阳市科技基金资助项目（F10-205-1-47）

心小而周边大,使得熔池表面形成由熔池中心向周边的流动,同时使液态金属液体由温度高的区域流向温度低的区域. 这种液体金属运动方式使得焊接熔池熔深较浅、熔宽较宽,成形后的焊缝表面较平、熔池较浅,焊缝较宽如图 2a 所示. 当表面张力随着温度的升高而升高时,即表面张力温度系数($\partial\sigma/\partial T$)呈正数. 熔池表面张力的分布将是中心大而周边小,使得熔池表面形成由熔池边缘向中心的流动,同时使金属液由温度低的区域流向温度高的区域. 这种液态金属运动方式具有很强的穿透性. 电弧热量将被带到熔池底部,它的熔池表面会形成元宝状如图 2b 所示,这种焊接熔池的熔深较深,焊缝宽度较窄,而且在焊缝边缘附近会出现两个较深的焊沟,熔池较深,焊缝较窄.



(a) 正的表面张力梯度



(b) 负的表面张力梯度

图 2 熔池金属流动示意图

Fig. 2 Diagram of weld pool metal-flowing

2 高速焊"咬边"形成力学分析

在高速 TIG 焊接熔池靠近熔合线区域附近液态金属液面受力情况如图 3 所示. 假定熔池横向截面方向为 y 方向,图 3 中单元点 A,B 都受到重力与表面张力的共同作用,表面张力差值为

$$\Delta\sigma = \frac{\partial\sigma}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial y}\Delta y \tag{1}$$

式中:σ 为熔池表面张力;$\Delta\sigma$ 为表面张力差值;y 为焊接方向单位变量. 由式(1)分析,当焊接方向不变始终为 y 方向时,$\partial\sigma/\partial T$ 符号始终不变,表面张力差值 $\Delta\sigma$ 方向将会取决于$\partial\sigma/\partial T$ 的方向. 当$\partial\sigma/\partial T>0$ 时,对于焊缝边缘点 A 来说,表面张力差值 $\Delta\sigma_A$ 的方向由熔池边缘指向熔池中心. 此时 $\Delta\sigma_A$ 与重力沿液面切向分力 G_{A1} 方向相同,二者共同作用在液面边缘处使得液态金属的流动方向指向熔池中心处,在这一时刻重力会同表面张力差值 $\Delta\sigma$ 共同作用使得液态金属凝固时的咬边倾向增强,甚至使得焊缝熔合线处没有液态金属凝固. 对于焊缝边缘点 B 来说,表面张力差值 $\Delta\sigma_B$ 的方向与重力分量 G_{B2} 方向相反. 重力称为减小咬边倾向的作用力,二力的相互比较,只有表面张力差值 $\Delta\sigma_B$ 远大于重力分量 G_{B2}时才会出现咬边. 因此对于液态熔池来说,越靠近熔合线附近咬边倾向越增加,而且熔池凝固是从熔合线开始向中心发展,一旦出现凹面,焊缝边缘点附近的液态金属在表面张力和重力的共同作用下迅速向熔池内部流动,而近熔合线附近的不能在得到液态金属的补充,因而形成咬边.

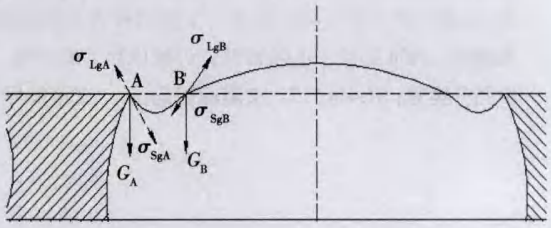


图 3 焊缝熔池受力分析

Fig. 3 Force analysis of welding seam molten pool

在高速焊接过程中由式(1)可知,$\Delta\sigma$ 的大小与 $\partial T/\partial y$ 和$\partial\sigma/\partial T$ 成正比例关系,也即表面张力温度系数$\partial\sigma/\partial T$ 越大,$\Delta\sigma$ 越大,温度梯度$\partial T/\partial y$ 越大,$\Delta\sigma$ 也越大. 熔池的液态金属表面张力温度系数是由材料本身的性质决定的. 而温度梯度则取决于焊接时的焊接速度与焊接过程的散热条件. 当其它焊接参数固定时,焊接速度越快,熔池的液态金属温度梯度越大,液态金属的表面张力差 $\Delta\sigma$ 就越大,从而越容易在焊接过程中形成咬边缺陷.

当$\partial\sigma/\partial T<0$ 时,液态金属的表面张力差 $\Delta\sigma$ 是由熔池的中心高温区域指向焊缝附近的低温区域,也就是熔合线处. 此刻熔池中的液态金属由熔池中心向熔池边缘流动,使得熔合线附近始终有液态金属补充,无论温度梯度大小如何变化都不会形成咬边缺陷. 因而即使增加焊接速度咬边倾向性也会很小[6].

3 外加磁场抑制"咬边"形成机理

图 4 为不同外磁场作用下的电弧形态,当对焊接电弧区施加不同的外加磁场时,由于磁场力与电场力的耦合作用使得 TIG 焊的电弧形态发生变化. 许多研究表明,当对电弧区施加外加直流横向磁场时电弧形态如图 4a 所示,其纵向截面呈现偏吹型;

当外加交流横向磁场时，电弧形体如图 4b 所示，其纵向截面呈现扇型；当外加纵向交流磁场时，电弧形体如图 4c 所示，其纵向截面呈现下部扩张、上部收缩钟罩型.

(a) 直流横向磁场　(b) 交流横向磁场　(c) 纵向交流磁场

图 4　不同外磁场作用下的电弧形态

Fig. 4　Arc shape of different external magnetic field action

图 5 为 TIG 焊电弧斑点，为了研究磁场作用下的焊接时间变化，假设 TIG 焊电弧通过焊缝截面，如图 5 所示，那么则有

$$t_0 = \frac{d}{v} \tag{2}$$

式中：t_0 为焊接时间；d 为焊缝上阳极斑点的有效直径；v 为焊接速度. 当电弧阳极斑点有效直径 d 不变时，焊接速度与电弧通过焊缝截面 S 的时间成反比. 说明焊接速度的提高实际上是电弧通过焊缝截面 S 的时间减小，这将导致温度梯度的增高，从而加大了咬边倾向. 由上面分析可知，温度梯度是影响焊缝咬边的最重要影响因素.

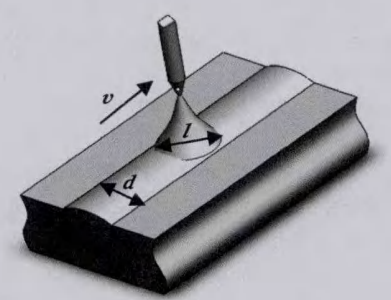


图 5　TIG 焊接电弧斑点

Fig. 5　TIG welding arc spot

外加磁场 TIG 焊接过程，使得电弧在磁场中受到磁场给予洛伦兹力作用，影响电弧形态. 外加磁场作用下，电弧在磁场作用下形态发生变化，阳极斑点形态也将随之改变.

3.1　外加直流横向磁场焊接电弧阳极斑点变化

图 6 为外加直流横向磁场 TIG 焊电弧斑点，当外加直流横向磁场时，电弧在洛伦兹力作用下呈现椭圆形，长轴直径 l 与焊接方向一直. 使得整个阳极斑点在沿焊接方向被拉长，如图 6 所示. 有效直径 $l > d$.

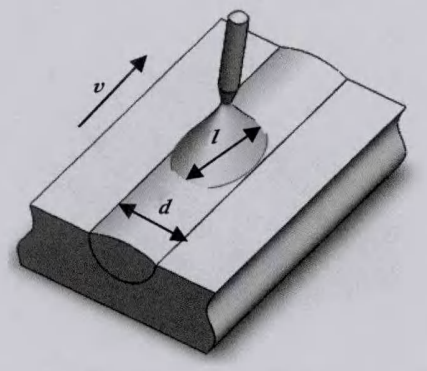


图 6　外加直流横向磁场 TIG 焊接电弧斑点

Fig. 6　TIG welding arc spot with direct current cross direction magnetic field

3.2　外加交流横向磁场焊接电弧阳极斑点变化

图 7 为外加交流横向磁场 TIG 焊接电弧斑点，当外加交流横向磁场时，电弧沿焊缝中心左右摆动，而且随着频率的增加，电弧阴极区明显扩展，电弧呈扇形，长轴直径 l 与焊接方向一致，如图 7 所示. 有效直径 $l > d$.

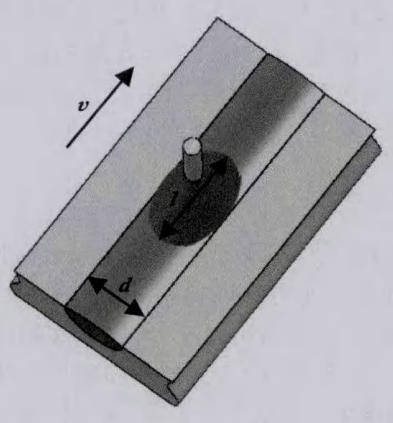


图 7　外加交流横向磁场 TIG 焊接电弧斑点

Fig. 7　TIG welding arc spot with alternating current cross direction magnetic field

3.3　外加交流纵向磁场焊接电弧阳极斑点变化

图 8 为外加纵向磁场 TIG 焊接电弧斑点，当外加交流纵向磁场时，具有纵向运动的带电粒子与磁场作用产生洛仑兹力，驱使这些带电粒子进行旋转，从而促使电弧旋转，而且焊接电弧外形下部扩张、上部收缩. 随着磁感应强度的增加，电弧旋转速度加

快. 当磁感应强度达到一定值时,电弧由原来的圆锥形变为钟罩形,其钟罩面是一个高速旋转的封闭曲面,如图 8 所示,有效直径 $l > d$.

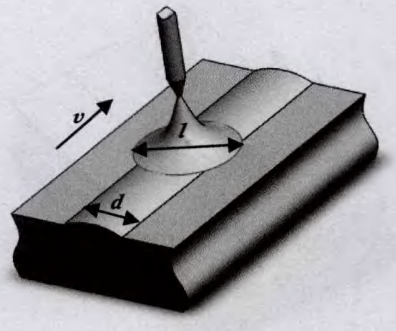


图 8 外加纵向磁场 TIG 焊接电弧斑点

Fig. 8 TIG welding arc spot with longitudinal magnetic field

由以上分析可知在高速 TIG 焊接过程中引入磁场,无论引入何种磁场,电弧都在洛伦兹力的作用下发生形态改变使得阳极斑点发生变化,这种变化都使得阳极斑点沿焊接方向均伸长一定长度. 有效直径 $l > d$,焊接时间为

$$t_1 = \frac{l}{v} \tag{3}$$

式中:t_1 为外加磁场作用下的焊接时间. 所以 $t_1 > t_0$. 在磁场作用下焊接电弧形态变化,使得电弧通过焊缝横截面 S 的时间增加,可以有效的降低温度梯度[6,7],减少甚至消除咬边倾向.

4 结 论

(1) 外加磁场可以改变液态金属表面张力的差值,进而改变熔池的流动方向,当 $\partial\sigma/\partial T > 0$ 时,熔池液态金属凝固时容易出现咬边. $\partial\sigma/\partial T < 0$ 时,咬边倾向性很小. 理论分析表明,外加磁场时 TIG 电弧阳极斑点的有效直径相比无磁场条件下时较大,这将有助于减小表面张力温度系数.

(2) 焊接速度的提高实际上是电弧通过焊缝截面的时间减小,这将导致温度梯度的增高,从而加大了咬边倾向. 因此温度梯度是影响焊缝咬边的最重要影响因素.

(3) 在高速 TIG 焊接过程中引入磁场,使得电弧在洛伦兹力的作用下发生形态改变引起阳极斑点发生变化,这种变化都使得阳极斑点沿焊接方向均伸长一定长度. 电弧通过焊缝横截面的时间增加,可以有效的降低温度梯度,减少甚至消除咬边倾向.

参考文献:

[1] 路 林, 常云龙, 李英民, 等. 不锈钢管磁控高速 TIG 焊多元非线性回归模型[J]. 焊接学报, 2012, 33(6): 93 -96.
Lu Lin, Chang Yunlong, Li Yingmin, *et al*. Nonlinear multiple regression model of stainless steel tube magnetic control high-speed TIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(6): 93 -96.

[2] 常云龙, 杨殿臣, 魏 来, 等. 外加横向磁场对高速 TIG 焊缝成形的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(3): 49 -52.
Chang Yunlong, Yang Dianchen, Wei Lai, *et al*. Influence of external transversal magnetic field for high speed TIG formation of weld[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(3): 49 -52.

[3] 周拔云, 路 林, 贺优优. 磁场在薄壁不锈钢高速 TIG 焊中的应用[J]. 焊管, 2011, 34(1): 54 -56.
Zhou Bayun, Lu Lin, He Youyou. Application of magnetic field on high speed TIG welding for thin-wall stainless steel pipe[J]. Welded Pipe, 2011, 34(1): 54 -56.

[4] 冯 雷, 陈树君, 殷树言. 高速焊接时焊缝咬边的形成机理[J]. 焊接学报, 1999, 20(1): 16 -21.
Feng Lei, Chen Shujun, Yin Shuyan. Mechanism of undercut phenomenon in high speed welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1999, 20(1): 16 -21.

[5] Sahoo P, Debroy T, McNallan M J. Surface tension of binary metal-surface active solute systems under conditions relevant to welding metallurgy[J]. Metallurgical Transactions B, 1988, 19B(2): 483 -490.

[6] 卢振洋. 焊缝咬边成形机理及高速焊工艺研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2006.

[7] 张久海, 王其隆, 韦伟平. 小电流 TIG 焊电弧磁控特性的研究[J]. 焊接学报, 1990,11(1): 43 -49.
Zhang Jiuhai, Wang Qilong, Wei Weiping. A study of the characteristics of magnetic control for low current TIC welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 1990, 11(1): 43 -49.

作者简介: 常云龙,男,1963 年出生,博士,教授. 主要从事焊接自动化方面教学与科研工作. 发表论文 50 余篇. Email: sychyl@126.com