

# 铝合金变极性等离子弧穿孔横焊焊缝成形规律分析

陈树君<sup>1</sup>, 蒋 凡<sup>1</sup>, 张俊林<sup>1</sup>, 黄 宁<sup>1</sup>, 张裕明<sup>2</sup>

(1. 北京工业大学 机械工程与应用电子技术学院, 北京 100124;

2. University of Kentucky Center for Manufacturing, Lexington, KY 40506, USA)

摘 要: 以穿孔等离子弧焊接过程中形成的穿孔熔池为研究对象, 根据熔池热源形态的特点, 采用数值模拟与试验相结合的手段研究横焊位置下的铝合金变极性等离子弧焊缝成形。由于焊接速度波动和工件厚度的影响, 体热源作用下的穿孔熔池背面存在最高温度点和最大熔宽截面相背离的现象; 因此通过对穿孔熔池背面进行分区和定义, 提出温宽偏离度概念, 即熔池背面最高温度点和最大熔宽截面的偏离程度, 用以描述穿孔熔池状态及焊缝成形; 通过调节焊枪角度来改变焊接过程中的温宽偏离度, 在其它参数不变的情况下减轻重力在焊接过程中对焊缝成形的影响, 实现变极性等离子弧穿孔焊接在横焊位置上的良好成形。

关键词: 温宽偏离; 变极性等离子弧焊; 小孔熔池; 横焊; 焊缝成形

中图分类号: TG456.2 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2013)04-0001-06



陈树君

## 0 序 言

穿孔型等离子弧焊(VPPAW)由于其能量集中、射流速度大、电弧力强的特性,与激光焊、电子束焊同被归为高能束焊接工艺<sup>[1-3]</sup>。高能束流焊接技术最大的特点是焊接时产生小孔效应,形成穿孔熔池,从根本上改变了焊接熔池的能量传递方式,由传统的导热焊转变为穿孔焊,与常规电弧焊方法相比有明显的优点<sup>[4-6]</sup>。在此基础上进一步开发的变极性等离子弧焊技术在阴极雾化作用和钨极烧损间实现了良好的平衡,所形成的穿孔熔池形貌既有利于焊缝的正面成形又有利于熔池中氢的逸出减少气孔缺陷,在航空航天领域的铝镁合金焊接中发挥了重要的作用。由于变极性等离子弧焊工艺参数众多,且各参数间相互耦合,导致焊接过程中等离子弧的稳定性较差,对焊接工艺参数的变化比较敏感,同时难以用单一变量描述和控制特定状态下的焊缝成形。所以目前仍需要采用立焊工艺来利用重力辅助熔池熔体的稳定过渡来保持焊缝成形。但是立焊位置对焊接工装及参数控制精度要求过高,且大型结构件难以在立焊位置施焊,严重制约了该工艺在高端领域焊接中的进一步推广。

变极性等离子弧穿孔横焊工艺较立焊而言,对工装的要求大幅降低,且能较好的保留了穿孔熔池气体易于逸出的优势,能大幅提高变极性等离子弧穿孔焊接工艺在大型结构件中的应用范围,但是穿孔熔池在重力的干扰下更难保持良好的稳定状态。文中针对铝合金变极性等离子弧穿孔横焊工艺开展研究,以试验中发现的温度最高点和熔宽最大点偏离的现象为基础,根据穿孔熔池的传热特点对体热源作用下的熔池形态进行分析,提出温宽偏离度概念并进行定义,以此为判据对穿孔横焊进行了数值模拟和工艺试验,研究分析了焊接熔池行为和焊缝成形,在此基础上通过调节焊枪角度来改变焊接过程中的温宽偏离度,在其它参数不变的情况下减轻重力在焊接过程中对焊缝成形的影响,实现变极性等离子弧穿孔焊接在横焊位置上的良好成形。

## 1 穿孔熔池传热和温宽偏离现象

与激光和电子束焊依靠高能量密度束流导致熔池汽化形成小孔不同,在穿孔等离子弧焊接过程中,高速运动的粒子同时对熔池进行力和热的输入,在熔池熔化的基础上冲击熔池形成穿孔。束流与熔池内壁形成滑移边界,电弧能量直接被工件内部吸收。随着焊枪的移动,高速射流迫使小孔前部的熔体沿滑移边界流向尾部,凝固后形成焊缝。由于熔池中

贯穿厚度方向小孔的存在,使熔池无需承载热源高温区的能量. 电弧对熔池的传热两部分组成:(1) 电弧中的带电粒子和弧柱区的辐射作为面热源对熔池表面的能量传输;(2) 等离子射流作为体热源对熔池内部能量传输.

因受焊接速度和工件厚度的影响,当热源从工件正面输入的热量传递到工件的背面时,背面热源中心已不在原来位置,如图 1 所示,当  $t_0$  时刻电弧对熔池正面输入的能量传递到熔池背面时,穿透电弧已经移动到  $t_3$  时刻所在的位置. 因此根据穿透电弧对熔池传热特点,将电弧能量输入分为两部分,即面热源和体热源. 面热源对焊缝背面的传热和体热源相比有一定的滞后. 同时温度场自身是个渐变的物理量,它的形成主要依靠焊件各点上热量的不断累积叠加,由于热量变化的惯性很大,因此与热量变化相关的温度场也具有较大的惯性. 而穿孔熔池的温度最高点始终处于小孔中心位置,所以两部分热源对熔池背部传热的的时间差异和温度场的惯性导致焊缝背面熔池的最大熔宽截面和最高温度截面不在同一个位置上.

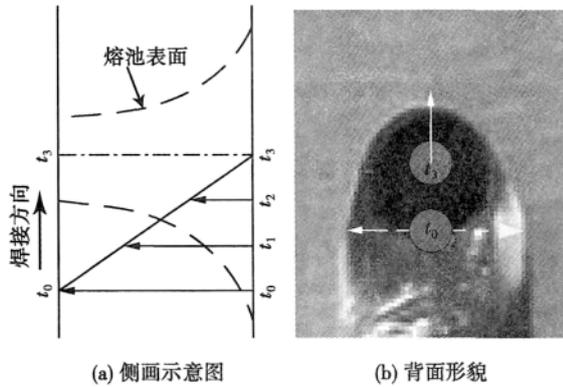


图 1 熔池背面传热滞后示意图  
Fig. 1 Heat transfer lag of molten pool root surface

图 2 为穿孔等离子弧焊缝背面温度分布示意图,由最大熔宽截面  $T_{MX}$  和最高温度截面  $W_{MX}$  把熔池分为三段: A 段为熔池融化区,在此阶段熔池的能量输入大于能量耗散,熔池处于急速加热融化状态,穿透电弧运动时熔融金属受到电弧压迫逆电弧运动方向流动; B 段为熔池保温区,该阶段由于电弧焰心的离开使熔池整体温度下降,但是电弧对熔池的传热仍然大于能量耗散,熔池两侧熔合线区域继续融化导致熔宽缓慢增加,直到  $W_{MX}$  处也就是熔池中能量输入等于能量耗散的热平衡位置. C 段为熔池凝固区,在此区域内熔池能量输入小于能量耗散,因此熔池迅速凝固. 图中  $T_m$  点为穿孔熔池温度最高点,

$W_m$  点为最大熔宽截面的中点. 由于焊接速度、工件厚度、焊枪角度、重力方向等诸多因素对熔池的影响,使两点空间位置上具有一定的偏离,文中将该现象称为温宽偏离现象.

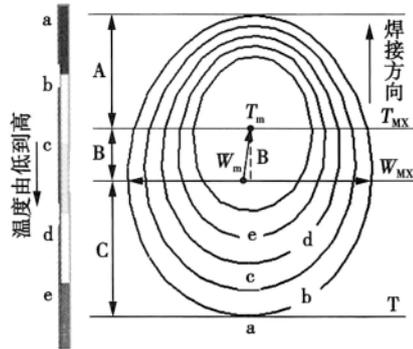


图 2 焊缝背面温度分布示意图  
Fig. 2 Predicted temperature field of root surface

为了进一步分析温宽偏离现象对熔池的影响,需要对焊枪位姿进行定义. 从焊接工艺角度来看,通常以焊缝坐标系为基坐标系,考虑焊枪坐标系相对于焊缝坐标系的位姿. 通常焊枪末端位于焊接点,即两坐标系的原点是重合的. 焊接电弧可以近似为一个回转体,因此需要确定 2 个变量就可确定焊枪姿态.

定义 1 工作角  $\alpha$ : 焊缝坐标系的焊缝法线即  $z$  轴与焊枪轴线在焊缝法平面  $yOz$  上投影所成的角.

定义 2 行走角  $\beta$ : 定义焊接方向为正,焊枪轴线与焊缝法平面  $yOz$  所成的角.

以上定义的坐标系和角之间的几何关系如图 3 所示. 根据焊枪的实际情况,焊枪的行走角与工作角的取值范围为  $[-90^\circ, 90^\circ]$ .

根据焊缝背面熔池最大熔宽和最高温度偏离的特点,提出温宽偏离度概念: 将熔池背面最高温度点  $T_m$  和最大熔宽截面中心点  $W_m$  的偏离程度称为温宽偏离度,用  $B$  表示. 为了描述方便,将温宽偏离度  $B$  分为平行焊接方向的分量  $B_x$  与垂直焊接方向的分量  $B_y$ ,即

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \tag{1}$$

根据温宽偏离度  $B$  的定义及产生原因,可以认为其分量  $B_x$  与温度传递到焊缝背面所需要的时间  $\tau$ ,在焊缝背面积累的能量  $Q$ ,焊枪行走角  $\beta$  和熔池所受的重力  $G$  有关;分量  $B_y$  与熔池液态金属的表面张力  $\sigma$ ,焊枪工作角  $\alpha$  和熔池所受的重力  $G$  及其方向等有关,即

$$B_x \propto f(\tau, Q, \beta, G) \tag{2}$$

$$B_y \propto g(\sigma, \alpha, G) \tag{3}$$

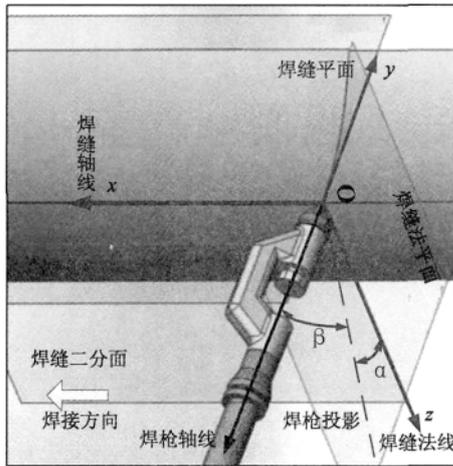


图 3 焊枪姿态示意图

Fig. 3 Schematic diagram of torch angle orientation

根据半无限大体非稳态导热公式,任意截面的热流密度  $q_x$  为

$$q_x = \lambda \frac{\Delta t}{\sqrt{\pi a \tau}} \exp(-x^2/4a\tau) \quad (4)$$

式中:  $\lambda$  为导热系数,  $a$  为热扩散率,  $\Delta t$  为温差,  $x$  为特征长度,  $\tau$  为厚度方向上的传热时间. 根据公式可得,传热时间与热流密度和特征长度有关,即与焊接热输入和工件厚度有关.

根据表面能量累积公式,即

$$Q = 2A\Delta t \sqrt{\frac{S}{v\pi}} \sqrt{\rho c \lambda} \quad (5)$$

式中:  $v$  为焊接速度;  $S$  为单位焊接长度;  $A$  为单位传热面积;  $c$  为热容;  $Q$  为积累的能量,大小和温度场的惯性有关.

同时,当电弧与工件不在垂直位置时,因角度变化导致面热源和体热源偏离,需要对温宽偏离度进行修正,即

$$B'_x = B_x - kh \cot \theta \quad (6)$$

式中:  $k$  为角度修正系数;  $\theta$  为偏离角度;  $h$  为工件厚度.

由式(1)~式(6)可以看出,温宽偏离度  $B$  与热输入、焊接速度、工件厚度、焊枪位姿有关. 可以认为温宽偏离度是熔池温度梯度的另一种表现形式,相对于温度梯度,温宽偏离度易于在焊接过程中实时观测,且能较好的反映熔池的状态. 同时,在不改变焊接工艺参数的前提下,通过改变焊枪姿态可以对温宽偏离度进行调整,减轻重力在焊接过程中对焊缝成形的影响.

## 2 试验和数值模拟方法

根据前期试验中发现的温宽偏离现象,分别进

行了数值模拟和焊接工艺试验,以调整焊枪角度的方式在不改变现有焊接工艺参数的前提下进行变极性等离子弧穿孔横焊的研究. 有限元计算采用与平板试样 1:1 的三维计算模型,在焊缝附近将网格细分,保证计算精度. 温度边界条件采用热力学中的第三类温度边界,确定换热系数和换热流体的温度. 选用 5A06 铝镁合金板材作为焊接试件,计算时采用与焊接试验相同的材料和工艺参数. 材料的热物理参数参见文献[7-8]. 由于穿孔熔池特殊的能量传输形式<sup>[9,10]</sup>,从宏观的传热过程出发,将小孔热和力的影响体现在恰当的热源分布模式上. 以焊缝横断面为参照,不涉及小孔的形成过程,将重点放在如何建立合适的体积热源分布模式以体现小孔效应. 采用面高斯热源和圆柱体热源组成复合热源,着重考察这种体积热源模式作用下的焊接温度场计算. 热源模型如图 4 所示,其中热源角度的变化通过坐标变换实现.

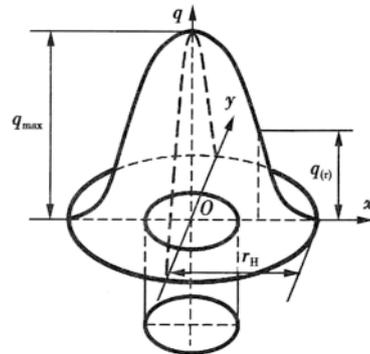
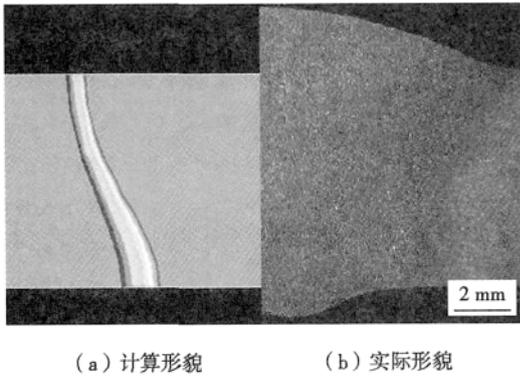


图 4 复合热源模型

Fig. 4 Composite heat source model

对准稳态时的熔池形状以及熔合线附近的温度分布进行计算. 有限元编程和求解采用 ANSYS 软件平台并使用 ANSYS 内部的 APDL 编程性语言. 图 5a 为由温度场计算获得的垂直位置焊缝横截面熔合线轮廓图,图 5b 为该工艺参数下的焊缝实际截面. 从图 5 中可以看出,计算结果与实际形貌吻合较好,说明所采用的复合热源能够较好的反映出变极性等离子弧穿孔立焊焊接过程中热源对焊缝成形的作用.

采用尺寸为 500 mm × 500 mm × 5 mm 的 5A06 铝镁合金板材开展实际焊接试验对数值模拟所得的结论进行验证. 填充材料为直径 1.6 mm 的 ER5183 铝镁合金焊丝. 焊接设备采用北京工业大学自主研发的 VPPA-500 变极性等离子弧焊接电源,焊枪为 PWM-300 型等离子弧焊枪,保护气和离子气均为氩气,钨极内缩量 4 mm,喷嘴口径 3 mm. 焊接试



(a) 计算形貌 (b) 实际形貌

图 5 焊缝实际形貌与计算值比较

Fig. 5 Comparison between practical shapes and calculated

验采用平板堆焊的方法进行横焊,焊接过程中保证电弧长度 4 mm,焊接速度 0.15 m/min,保护气流量 15 L/min,反极性电流 120 A,正极性电流 150 A,正反极性时间比为 21:4,焊枪行走角为  $0^\circ$ 。焊前分别用砂纸和钢刷打磨清理试板待焊表面的氧化膜,用丙酮去除表面油脂,并进行烘干。对典型的焊接接头焊后在焊接试块的焊缝中段,沿垂直于焊缝轴线方向截取试样,经切割、镶嵌、预磨、抛光后,用腐蚀剂进行腐蚀并在金相显微镜下观察焊缝横截面形貌。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 立焊与横焊成形对比

图 6 为铝合金变极性等离子弧穿孔立焊的宏观金相(正极性电流 120 A,反极性电流 150 A,正反极性时间比为 21:4,电弧长度 4 mm,焊接速度 0.15 m/min),焊接过程中行走角和工作角均保持  $0^\circ$ 。其焊缝成形良好,正面和背面熔宽狭小且隆起均匀,焊趾处过渡圆滑,焊缝和母材的分界线即熔合线对称良好。图 7 和图 8 分别为立焊熔合区的宏观形貌和微观组织,可以观察到熔合线非常清晰,热影响区范围狭窄,且熔合区组织过渡良好,基本没有热影响区晶粒粗大的现象。

图 9 为铝合金变极性等离子弧穿孔横焊的宏观金相,焊接过程中保持工艺参数和立焊位置相同,行走角和工作角均为  $0^\circ$ 。其焊缝组织明显偏向重力方向,背离重力方向侧的熔合线弯曲程度明显增大,重力指向侧熔体堆积导致焊缝与母材的接触角增大,且正面和背面熔宽较立焊位置相比大幅增加。图 10 和图 11 分别为横焊熔合区的宏观形貌和微观组织,可以观察到熔池熔体在重力作用下流动导致背离重力方向侧熔合区被拉长,且熔合区晶粒呈现较为明

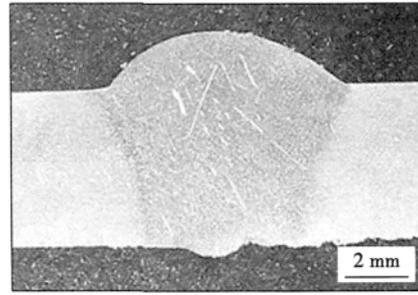


图 6 变极性等离子弧穿孔立焊焊缝宏观形貌

Fig. 6 Cross section of vertical up welding in VPPAW

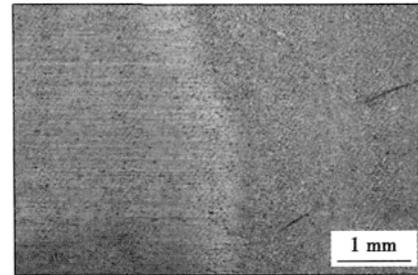


图 7 变极性等离子弧穿孔立焊熔合区宏观形貌

Fig. 7 Macrostructure of fusion area in vertical up welding

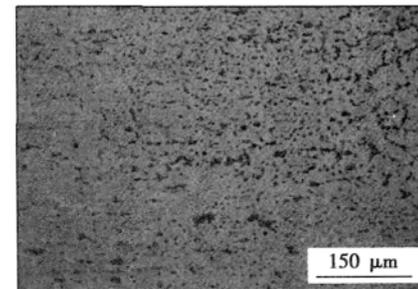


图 8 变极性等离子弧穿孔立焊熔合区微观组织

Fig. 8 Microstructure of fusion area in vertical up welding

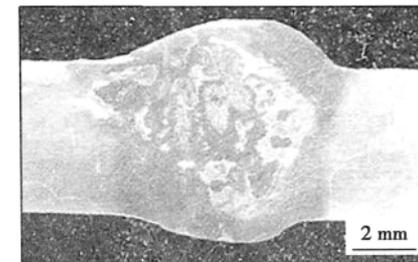


图 9 变极性等离子弧穿孔横焊焊缝宏观形貌

Fig. 9 Cross section of transverse welding in VPPAW

显的拉伸变形,熔合线及热影响区较立焊相比显著增大,这些都将对焊缝接头的力学性能造成不良影响,且会成为裂纹、气孔的缺陷产生的诱因。

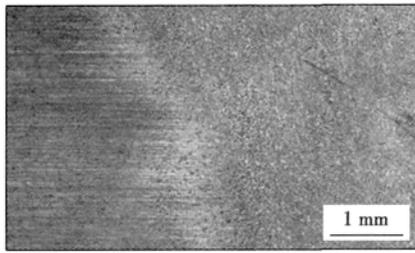


图 10 横焊背离重力方向侧熔合区宏观形貌  
Fig. 10 Macrostructure of fusion area in transverse welding

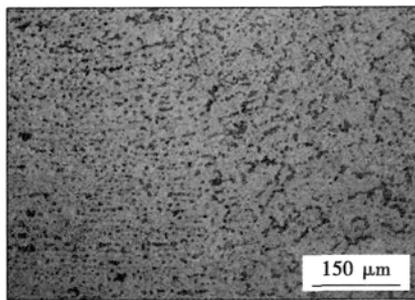


图 11 横焊背离重力方向侧熔合区微观组织  
Fig. 11 Microstructure of fusion area in transverse welding



图 12 工作角 -10°时的穿孔熔池背面温度分布  
Fig. 12 Temperature distribution of pool backside

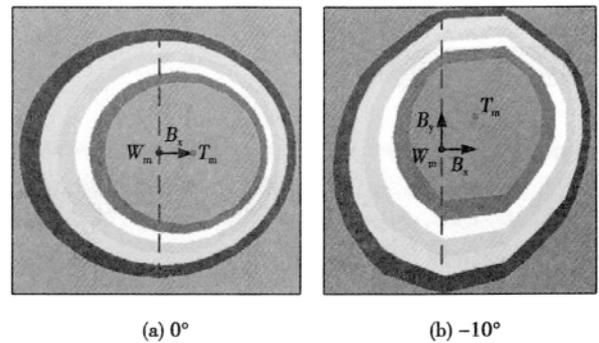


图 13 不同工作角的穿孔熔池背面温度分布对比  
Fig. 13 Comparison between different torch working angles

### 3.2 计算结果与试验验证

根据对温宽偏离现象和温宽偏离度的分析可知,在不改变焊接工艺的前提下,调整焊枪姿态可以有效的干预穿孔熔池的温宽偏离程度.因此采用三维有限元模拟的方法在无重力条件下对穿孔熔池的温度场进行计算,分析焊枪工作角的变化对熔池温宽偏离程度的影响.图 12 为焊枪工作角偏离垂直位置 -10°时有限元计算所得的穿孔熔池的背面温度场计算结果,图 12 中所示区域截取穿孔熔池中 580 ~ 620 °C 的温度区间内熔池温度场的分布,该温度区间为所选用的铝合金凝固温度,用以描述焊缝凝固时的最大宽度.因此,最大宽度截面的中心点可以通过所截取温度区间内图像的最大边界获得,熔池背面的温度最高点直接计算得出.如图 12 所示,当焊枪工作角调整为负值时,熔池上半部分温度梯度较熔池下半部分明显增大,且熔池的温度滞后效应呈斜下方分布.熔池上方产生较大的温度梯度能使熔体快速凝固,减少受重力影响而向下流动的熔体量;熔池下方较小的温度梯度能更好的利用熔体的表面张力托住穿孔熔池,维持小孔的稳定存在.

图 13 为根据计算所得的不同工作角熔池背面温度分布对比.如图 13 所示,在工艺参数保持不变的前提下温宽偏离度分量  $B_x$  在不同的工作角(0°和

-10°)中变化很小,但是其焊接垂直方向的分量  $B_y$  在工作角变负值时显著增大且方向和重力方向相反.因此认为在工作角为负值时,其温宽偏离度的变化可以减轻重力的不良影响.

图 14 为焊枪工作角 -10°时的铝合金变极性等离子弧穿孔横焊接头的宏观形貌.其余焊接工艺参数均与工作角 0°时的铝合金变极性等离子弧穿孔横焊试验相同.如图 14 所示,和工作角为 0°时的横焊焊缝截面(图 9)相比,熔池表面熔体在重力影响下的侧向堆积程度明显减轻,且背离重力方向侧熔

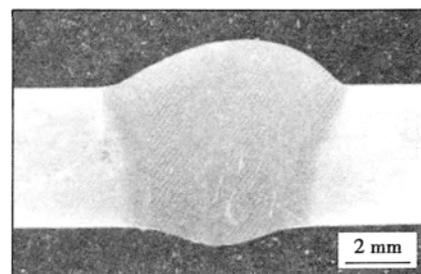


图 14 工作角 -10°的横焊焊缝宏观形貌  
Fig. 14 Cross section of torch working angles of -10 degree

合区几乎没有被拉长的现象. 焊缝截面正面和背面熔宽都已接近立焊焊缝. 图 15 为工作角  $-10^\circ$  时横焊焊缝背离重力方向侧熔合区的组织形貌, 熔合区组织和立焊的熔合区组织几乎一致, 焊缝组织到母材过渡良好, 没有明显的热影响区, 且晶粒也没有拉伸变形. 焊缝组织和工作角  $0^\circ$  时相比具有明显改善.

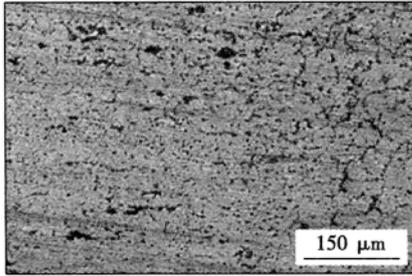


图 15 工作角  $-10^\circ$  的横焊焊缝熔合区组织

Fig. 15 Microstructure of fusion area under torch working angle of  $-10$  degree in transverse welding

## 4 结 论

(1) 依据最高温度点和最大熔宽截面对熔池背面进行分区和定义, 提出了温宽偏离度概念, 即熔池背面最高温度点  $T_m$  和最大熔宽截面中心点  $W_m$  的偏离程度, 用以描述穿孔熔池状态及焊缝成形; 并得出温宽偏离度的主要影响因素以及在横焊位置中不改变焊接工艺的前提下减轻重力影响的参数.

(2) 根据三维有限元模拟的计算结果, 改变焊接工作角可以明显的改变温宽偏离度在垂直焊接方向上的分量, 且当工作角为负值时, 温宽偏离度在垂直焊接方向上的分量方向与重力方向相反.

(3) 当采用负工作角在横焊位置进行铝合金变极性等离子弧穿孔焊接, 即温宽偏离度在垂直焊接方向上的分量与重力方向相反时, 可以有效地减轻重力对穿孔熔池的负面影响, 从而获得良好的焊缝组织结构和焊缝成形.

## 参考文献:

- [1] O'Brien R L. Welding handbook 8th edition. Vol. 2: Welding processes[M]. Miami, Fla: American Welding Society, 1991.
- [2] Craig E. The plasma arc process—a review[J]. Welding Journal, 1988, 67(2): 19–25.
- [3] Holmoy E, Fostevoll H. New applications of plasma keyhole welding[J]. Welding in the World, 1994, 34(9): 285–291.
- [4] Nunes A C, Bayless E O. Variablepolarity plasma arc welding on space shuttle external tank[J]. Welding Journal, 1984, 63(4): 27–35.
- [5] 韩永全, 陈树君, 殷树言, 等. 变极性等离子电弧稳定性及其控制[J]. 焊接学报, 2008, 29(4): 18–20.  
Han Yongquan, Chen Shujun, Yin Shuyan, et al. Arc stability and its control of VPPA[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2008, 29(4): 18–20.
- [6] 韩永全, 陈树君, 殷树言. 铝合金变极性等离子焊接电弧产热机理[J]. 焊接学报, 2007, 28(12): 35–37, 42.  
Han Yongquan, Chen Shujun, Yin Shuyan. Principle of produced heat by arc properties in VPPA of aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(12): 35–37, 42.
- [7] 马庆芳, 方荣生. 实用热物理性质手册[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1986.
- [8] 武 恭, 姚良均, 李震夏, 等. 铝及铝合金材料手册[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [9] 卢振洋, 王 龙, 陈树君, 等. 铝合金变极性穿孔型等离子弧焊工艺的热源模型[J]. 焊接学报, 2012, 33(10): 87–91.  
Lu Zhenyang, Wang Long, Chen Shujun, et al. Variable polarity plasma arc welding heat source model for an aluminum alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(10): 87–91.
- [10] Fan H G, Kovacevic R. Keyhole formation and collapse in plasma arc welding[J]. Journal of Physics D (Applied Physics), 1999, 32(22): 2902–2909.

作者简介: 陈树君, 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士生导师. 主要从事变极性等离子弧焊接工艺及装备、焊接电源开发等方面的科研和教学工作. 发表学术论文 100 余篇, 申报专利 20 项. Email: sjchen@bjut.edu.cn

## MAIN TOPICS ,ABSTRACTS & KEY WORDS

**Principle of weld formation in variable polarity keyhole plasma arc transverse welding of aluminum alloy** CHEN Shujun<sup>1</sup> , JIANG Fan<sup>1</sup> , ZHANG Junlin<sup>1</sup> , HUANG Ning<sup>1</sup> , ZHANG Yuming<sup>2</sup> ( 1. Beijing University of Technology , College of Mechanical Engineering and Applied Electronics Technology , Beijing 100124 , China; 2. University of Kentucky , Center for Manufacturing , Lexington KY 40506 , USA) . pp 1 – 6

**Abstract:** Taking the keyhole molten pool in plasma arc welding as the study object , the weld formation in variable polarity keyhole plasma arc transverse welding of aluminum alloy was investigated by using both experiments and numerical simulation according to the characteristic of heat source. The study indicates the deviated phenomena between the highest temperature point and the widest fusion width section in keyhole molten pool root surface under the heat source due to the welding speed fluctuation and effect of thickness of plate. By making division of the keyhole molten pool root surface , the concept named temperature width deviation was defined as the deviation between the highest temperature point and the widest fusion width point in molten pool root surface , to describe the state of keyhole molten pool root surface and the welding formation. Temperature width deviation was changed by adjusting the welding torch position , so as to reduce the effect of gravity in welding process , with other parameters being unaltered , to get a good weld formation of variable polarity keyhole plasma arc welding at transverse position.

**Key words:** temperature width deviation; variable polarity plasma arc welding; keyhole welding pool; transverse welding; weld formation

**Microstructure and impact property of 690 MPa level HSLA steel weld** WANG Aihua<sup>1,2</sup> , PENG Yun<sup>2</sup> , XIAO Hongjun<sup>2</sup> , TIAN Zhiling<sup>2</sup> , WANG Jing<sup>1</sup> ( 1. Chengde Petroleum College , Chengde 067000 , China; 2. State Key Laboratory of Advanced Steel Processes and Products , Central Iron & Steel Research Institute , Beijing 100081 , China) . pp 7 – 10 , 42

**Abstract:** The weld metal of 690 MPa level high strength low alloy ( HSLA) steel was investigated in this paper. The M-A constituents were etched with Lepera reagent , and the microstructure , residual austenite and grain boundary in the welded metal were observed with optical microscope ( OM) , transmission electron microscope ( TEM) and electron back-scattering diffraction ( EBSD) , and the impact property was tested. The results reveal that the average Charpy impact values of welded metals made with shielded metal arc welding process and metal inert gas ( MIG) welding process were 31 J and 98 J at  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  respectively. The volume fractions of M-A constituents in welded metals made with shielded metal arc welding and MIG welding processes were 4.4% and 2.52% , respectively. The increase of volume fraction of M-A constituents resulted in the deterioration

of impact property of welded metal with shielded metal arc welding , and the decrease of residual austenite and large grain boundary in the welded metal also led to the degradation of impact property.

**Key words:** impact property; chemical composition; martensite-austenite constituent; residual austenite; large grain boundary

**Laser-adhesive hybrid bonding of dissimilar metals between steel and aluminum alloy** DAI Ting , LIU Jinshui , ZHOU Dianwu , PENG Yan ( State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body , Hunan University , Changsha 410082 , China) . pp 11 – 14

**Abstract:** Fiber laser was adopted with adhesive layer to join 1.4 mm thick DC56D + ZF galvanized steel and 1.2 mm thick 6016 aluminum alloy sheets. The microstructure , fracture appearance and mechanical properties of the joint were investigated. The influences of welding parameters on the weld appearance were analyzed. The results show that with the addition of adhesive layer , no pores or cracking were observed on the welds. The average shearing strength and shearing load of the steel/aluminum joint were 41 MPa and 1.04 kN. The failure mode of welded joint presented a mixture of ductile and quasi-cleavage fractures.

**Key words:** laser-adhesive hybrid welding; steel; aluminum; weld appearance; tensile strength

**Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of ultra-thin 443 ferritic stainless steel** ZHANG Hongxia<sup>1</sup> , LI Hongzhi<sup>1</sup> , WANG Zhibin<sup>2</sup> , WANG Wenxian<sup>1</sup> , ZHANG Xinbao<sup>2</sup> , YAN Zhifeng<sup>1</sup> ( 1. College of Materials Science and Engineering , Taiyuan University of Technology , Taiyuan 030024 , China; 2. TISCO Technology Center , Taiyuan 030003 , China) . pp 15 – 18 , 34

**Abstract:** Tungsten inert gas ( TIG) welding , pulsed tungsten inert gas ( P-TIG) welding and pulsed laser beam welding ( P-LBW) of ultra-thin 443 ferritic stainless steel sheets were conducted to investigate the problems of coarsened grain and brittleness in the weld. The effects of different welding processes on the microstructure and mechanical properties of resultant joints were analyzed with optical microscope ( OM) and scanning electron microscope ( SEM) . The effects of welding heat input on microstructure , tensile property and cupping property of joints were evaluated. The experimental results reveal that the welding heat input was the key factor to determine the microstructure and mechanical properties of 443 ferritic stainless steel welded joints. And grain refinement by pulsed welding process can improve the comprehensive mechanical properties of the resultant joint.

**Key words:** 443 ferritic stainless steel; tungsten inert gas