2

双尖角磁场再压缩等离子弧的

物理特征及焊接工艺性能

赵彭生讲师 祝树燕讲师 赵国华助教

(太原工业大学)

摘 要

本文介绍了等离子弧经双尖角磁场再压缩以后电弧的状态和行为。通过电 弧负载特性、电流密度和压力的分布以及稳定性指标的测定,对其物理特征进 行了分析研究。在此基础上,进行了不锈钢板的熔入型及小孔型焊接试验。试 验表明:等离子弧经外磁场再压缩后,能量密度明显提高且容易调整、有利于 控制焊缝成型、抑制"双弧"产生、增加小孔型的焊接厚度,具有广泛的应用 价值。

一、序 盲

为了改善等离子弧焊接和切割的工艺质量,提高生产率,扩大应用范围,要求进一 步提高其压缩效果。实践表明,通过改进喷嘴结构,改善冷却条件,已经难以取得突破性 的进展。因此,对等离子弧进行二次压缩成为人们关注的课题。利用水进行二次压缩的 水弧等离子已在切割工艺中得到应用,但难以用于焊接,以CO₂作为保护气的气体再压 缩等离子弧,其压缩效果有限,稳定性也较差;而通过外加磁场对等离子弧进行二次压 缩不仅易于实现,而且便于控制,可以认为是一种很有前途的方法。

对于磁场再压缩等离子弧,虽然国内外已有人进行过初步研究^[1~3],但对其压缩 效果仍然存在不同的看法。对于磁场再压缩等离子弧的物理特征及其工艺性能还缺乏足 够的认识。本文在试验的基础上,较全面地研究了磁场再压缩等离子弧的物理特征及焊 接工艺性能,并且指明了它的应用价值。

二、基本原理与磁头结构

由四极直流电机的启示,将两对磁极按图1排列,则可形成双尖角磁场。当等离子

弧垂直穿过磁力线平面时,由于洛伦兹力的作用,使电弧截面在一个方向受压(图中Y 方向),在另一个方向受拉(图中X方向)。在磁头设计时,要尽可能增强使电弧截面 受压的磁场强度,降低受拉的磁场强度,则可获得满意的压缩效果。

试验采用的磁头结构如图 2 所示。铁芯为14×16mm工业纯铁,极靴厚度为 3 mm。 导线直径为1.25mm,每个线包为180匝。磁头端面装有紫铜护板,焊炬由顶丝对中并固 定在护板上。整个磁头的外形尺寸为 80×70×110mm,质量仅为 1.9kg。







图 2 磁头结构

对磁头通以不同激磁电流*I_J*,用铁粉法(湿法)和高斯计测得的磁极端面附近的磁 力线图象和磁感应强度等强线分布表明,磁场内弱区不大,随着*I_J*提高,磁感应强度增 大,当*I_J*=2.5A时,已体现出相当强烈的压缩作用。

三、双尖角磁场再压缩等离子弧的物理特征

1. 电弧形态

图 3 (图版 2)为 I_J = 2 A时 拍摄的等离子弧图象 (I=100 A, Q_R=20L/min, Q₈=5L/min,喷嘴孔径为2.8mm,钨棒直径为2.5mm,内缩量为3mm,喷嘴端面到阳 极平面的距离为8mm)。随着I_J增加,在洛伦兹力作用下,电弧截面沿一个方向拉长(图 3a),沿另一个方向压扁(图3b)。电弧变得更为光亮清晰,并有平稳的响声。由于沿 短径方向压缩作用增强,随着I_J增加,阳极斑点在短径方向上的游动幅度逐渐减小并趋 于稳定,而沿长径方向压缩作用减弱。由于热量集中于狭窄范围内,阳极表面金属蒸气 形成点转移较快,阳极斑点在长径方向上由原来的缓慢跳动变为较快的蠕动。

钨极顶端的形状对磁场再压缩等离子弧的行为有很大影响。钨极顶角 过 大 或 呈圆 形,则弧柱的方向不稳定,并易出现"双弧"。若顶角小于60°, *I*,和 *I* 即使在较大范 围内变化,等离子弧仍然十分稳定。

钨极与磁场轴线的对中程度,对于等离子弧的行为也有很大影响。若"磁对中"不

7 卷

1

良,则等离子弧由于受力不均匀而偏移一边,甚至把熔池中的液体金属吹走而产生切割 现象。因此,对于磁头和喷嘴的相对位置,应用顶丝仔细调准。

2. 负载特性

1期

¢

等离子弧经磁场再压缩后,导电截面减小。要维持同样的电流,要求更高的电场强度和电弧电压。随着激磁电流 *I*₃的增加,弧柱的电场强度 *E* 变化规律列于表 1,等离子弧的静特性曲线如图 4。

3. 电流密度

赛1 激磁电流对弧柱电场强度的影响

由电弧的弹性体性质及Steenbeck 原理推断,并据阳极残斑观察,不均匀受压等离子弧的截面为一椭圆。根据研究结果^[4],阳极平面上电弧截面内任一点的电流密度*J*(x, y)可

I; (A)	0	2.5	5	10	
E(V/mm)	0.50	2.07	2.88	3.38	

用分割阳极法进行测量(图5),并按二维正态密度函数计算如下:

$$J_{(x,y)} = \frac{I}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left[\frac{-x^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right]$$

式中

x、y——以电弧轴线与阳极平面的交点为原点,沿椭圆长径和短径方向的座标 I——电弧电流

 σ_x, σ_y ——分布函数在长径和短径方向的标准差。



σ_x、σ_y可由分割阳极法测得的电流一维分布积分曲线在正态概率纸上的拟合直线量 出。

当*I*=140A,喷嘴端面到阳极平面的距离为5.5mm(其它工艺参数同前),随着*I*₁ 的变化,电弧的形状参数和电流密度的分布参数变化列于表 2。

7 米

夜 2	冰蛛 电流/	·····································	沉谷 度 的		
要导电区长径0 主!	要导电区短径b	主要导电区面积 $\frac{\pi}{4}$ at	σ_x	σ	最大时

激磁电流I;	主要导电区长径a	主要导电区短径b	主要导电区面积 $\frac{\pi}{4}ab$	σχ	σ	最大电流密度 <u>1</u> 2πσ _x σ
(A)	(mm)	(mm)	(mm²)	(mm)	(mm)	(A/mm ²)
0	6.30	6.30	31.16	1.90	1.90	6.17
1	7.13	5.02	28.09	2.19	1.52	6.70
2.5	7.40	3.02	17.54	2.32	0.93	10.33
5	8.95	2.14	15.03	2,59	0.64	13.45
10	9.38	1.78	13.11	2.94	0.53	14.30

* 主要导电区定义为沿长径及短径方向,电流一维分布函数由5%到95%的相应座标长度为长短径的椭圆面积。

图 6 是按照上述数学模型的电算结果所绘出的 电 流 密 度分布图形。由图 6 及表 2



可见,随着石增加,长径增长,短径缩短,电弧导电截面缩小,电流密度显著增加,加 以电场强度也有所增加,故再压缩等离子弧的能量密度要比一般等离子弧高得多。

4. 电弧压力

1 期

图 7 为采用水冷测压探头(选通 孔 ¢0.5mm)测得的等离子弧压力分 布图形。等离子 弧 经 再 压缩后,压 力分布沿短径集中,而沿长径分散, 滞点压强增高,但总压力变化并不明 显。



5. 电弧的稳定性

1) 断弧长度

当 *I* = 70 A, 其它工艺参数同前, 激磁电流*I*₁为 0、 1、 2.5、 5、 10 A 时,断弧长 度为34.5、 19、11.5、 8.5、 8mm。随着*I*₁的增加,断弧长度显著减小,这不仅是电场强 度增大所造成,更主要的原因是长电弧在双尖角磁场中稍有偏移将导致两边受力不等, 从而偏移扩大,使电弧拉断。电弧的"弹性"较差是磁场再压缩等离子弧的一个缺点。 但是,即使激磁电流*I*₁高达10 A,断弧长度仍有 8 mm,可见能够满足它的实际应用。

2)出现"双弧"的临界电流

采用 \$2mm喷嘴,喷嘴端面至阳极平面的距离为 5.5mm (其它工艺参数同前),在 不同1,时,产生"双弧"的临界电流值列于表 3。

激磁电流 <i>I</i> ,(A)	0	1	2	3
临界电流I (A)	120	145	175	>250仍未出现"双弧"

表 3 激磁电流对产生"双弧"的临界电流的影响

由上可见,增强二次压缩有抑制"双弧"的作用。这可解释为:等离子弧受双尖角 磁场再压缩后,喷嘴内冷气膜沿短径方向增厚,虽然沿长径方向冷气膜位障局部减弱, 但由于受附近较厚冷气膜的冷却,以及外磁场的拘束作用,气膜不易遭受破坏,从而抑 制了"双弧"的产生^[51]。

综上所述,可以看出,等离子弧经双尖角磁场再压缩后,电弧压扁,截面减小,电 流密度、能量密度及滞点压力明显提高,产生"双弧"的临界电流也有所增加,这些物 理特征必将对其焊接工艺性能产生重大影响。

四、熔入型焊接试验

试件厚度为8mm的Cr18Ni8不锈钢板。

工艺参数: I = 100 A, $Q_{\text{R}} = 23 \text{ L/min}$, $Q_{\text{B}} = 4.5 \text{ L/min}$, $V_{\text{P}} = 182 \text{ mm/min}$, 喷 嘴孔径 $\phi 2.8 \text{ mm}$, 钨棒直径 $\phi 2.5 \text{ mm}$, 内缩量 3 mm, 喷嘴到阳极平面的距离5.5 mm。

在上述试验条件下, 施加不同激磁电流, 沿长径和短径方向焊接, 在所 有 的 情况 下,均可获得满意的成形,焊缝外形如图 8、图9(图版 2)所示。图10、图11从数值上 说明了激磁电流对焊缝形状的影响。随着 *I*₄增加,电弧被逐渐压扁,从而使得沿长径施 焊的焊缝变窄,沿短径施焊的焊缝变宽。由 图 10 可 以 看 出,通 过 改变电弧方位并使 *I*₄在 0 ~ 5 A 内调节,焊缝熔宽可在 3 ~ 15mm 内 调整。对于熔深的影响,沿长径方向 施焊,变化并不明显,当*I*₄从 0 增至 1 A 时,熔深从 3.5mm增至 3.9mm,当*I*₄>2.5A 时,随着 *I*₄增加,熔深反而减小。这是由于电弧沿焊缝过分拉长,熔池中的液体金属不 易排开,影响了母材进一步熔化的缘故。当*I*₄由 0 增至 2.5A 时,火口长度从 7.5mm **增** 至12.5mm。在沿短径方向施焊时,熔深随着 *I*₄增加而迅速减小,当*I*₄为 5 A 时,熔深 不足0.5mm,焊缝形状系数 *q* = *B*/*H*接近 30,这一特征表明,双尖角磁场再压缩等离子 弧在堆焊应用中具有广阔的前途。



五、小孔型焊接试验

试件厚度为5mm的Cr18Ni8不锈钢板。

工艺参数: I=130A, V_早=145mm/min, 其它参数同前。

通过改变电弧方位并施加不同激磁电流进行小孔型焊接试验,其焊缝外形如图12、 图13(图版 2)所示。对小孔型焊接而言,虽然激磁电流II对于熔宽的影响也有与熔入 型焊接类似的规律,但变化不如熔入型焊缝明显。

由焊缝的纵截面可以看出(图14、图15)(图版 2),沿长径方向施焊时, I,对焊 缝下塌量无显著影响;而沿短径方向施焊,则随着I,增加,焊缝严重下塌,这显然是由

7 卷

于熔池过于宽大,熔化金属与表面张力失去平衡所造成。在沿短径施焊时,I₃=1.5A,收弧小孔尺寸竟达3mm,产生严重下塌就不足为怪了。

为了考核经磁场再压缩后等离子弧的穿孔能力,以在4mm不锈钢板上产生小孔效应的最大焊速为指标(I=100A,Q_R=18.7L/min,Q₈=5L/min,其它参数同前), 沿长径施焊进行测定。当I₄分别为0、1、2、3A时,产生小孔效应的最大焊速分别为 185、196、201、203mm/min。可见I₄增加,穿孔能力有所增加,但进一步增加I₄,效 果并不明显。

通常,保证在焊接过程中持续穿孔并稳定地保持熔池中液体金属的力学平衡是形成 良好小孔型焊缝的两个前提。随着焊接厚度的增加,要同时作到以上两点,往往存在着 实际困难。为了保证持续穿孔,又要防止"双弧"产生,往往不得不采用加大喷嘴孔径 的办法来达到增加电流的目的。这样势必削弱了等离子弧高能密度的热源特征,从而使 熔池扩大,导致液态金属失稳。因为要寻求一个合适的工艺参数并在整个焊接过程中精 确地控制它的稳定是困难的,故小孔型焊接存在着一定的厚度极限。

采用双尖角磁场再压缩等离子弧沿长径方向施焊,能够有助于解决"穿孔"和"液态金属失稳"这一矛盾。其原因在于:等离子弧经双尖角磁场再压缩后,电流、能量及压力向长径集中,最大电流密度、能量密度及滞点压力均有显著增加,从而使穿孔能力 增加,而与此同时电弧总压变化不大,并且由于熔池沿接口呈窄条形,其比表面积大为 增加,有利于维持液态金属的力学平衡。此外,由于产生"双弧"的临界电流也有所提 高,这意味着在同样的电流下可以采用较小的喷嘴孔径,这一点对于厚板焊接也是十分 有利的。在试验中发现(板厚 8 mm, I₁=2A,沿长径方向施焊),即使焊接电流、气 体流量在较大的范围内波动,仍然可以获得满意的焊缝成形,可见,双尖角磁场再压缩 等离子弧沿长径方向施焊,其焊缝成形的稳定性高于一般等离子弧,这是解决厚板等离 子弧焊接的有效途径。

六、结 论

1. 等离子弧经双尖角磁场再压缩后,电弧截面压扁,能量分布及压力分布向长径 密集,电位梯度、电流密度及滞点压强均有显著增加,产生"双弧"的临界电流也有所 提高。此外,由于外磁场的引入使得焊接工艺性能可以通过电弧方位和激磁电流进行大 幅度调节。上述物理特征提高了等离子弧焊接的工艺适应性,扩大了它的应用范围。

2. 采用双尖角磁场再压缩等离子弧进行熔入型焊接,可以方便地控制焊缝的形状 系数。沿短径方向施焊可大大提高焊道的堆覆面积并减小母材的稀释率,这一特征特别 适合于堆焊工艺需要。

3. 等离子弧经再压缩后,沿长径方向的穿孔能力有所提高。与一般小孔型等离子 弧焊相比,其焊缝成形的稳定性明显提高。焊缝形状也可通过改变激磁电流进行适当调 整。

4、根据小孔效应焊缝成形机理及双尖角磁场再压缩等离子弧的能量特征和力学特

1期

٠

征分析,并经**初步试验**证明,可以认为,采用双尖角磁场再压缩等离子弧沿长径方向施 焊是解决等离子弧厚板焊接的有效途径。

(1985年4月5日收到)

参考文献

- (1) Arata Y. et al. : Welding in the World, 10 (1972), №7~8, P234~245.
- 〔2〕兵器工业部第五设计院:《磁场焊接》(译文集),(1975)。
- 〔3〕吴立强等,《环向脉冲电流磁场对焊接电弧的作用》,郑州机械研究所, (1983)。
- (4) 赵彭生:《等离子弧电流密度的分割阳极测定法》,太原工业大学,(1985)。
- 〔5〕王震激等:《气体保护焊工艺及设备》,国防工业出版社,(1982),P54~59, P173~184。

PHYSICAL FEATURES AND WELDING CHARACTERISTICS OF A PLASMA ARC RE-CONSTRICTED BY A DUAL—CUSP MAGNETIC FIELD

Lecturer Zhao Pengsheng, Lecturer Zhu Shuyan, Assistant Zhao Guohua (Taiyuan University of Technology)

Abstract

This paper describes the state and behaviours of a plasma arc re-constricted by a dual-cusp magnetic field. The load characteristics, the current density, the pressure distribution and the arc stability indexes were measured. On the basis of investigating the physical features of the re-constricted plasma arc, the melt-in mode, and the keyhole mode plasma arc welding on stainless steel plate had been tested. It is shown that when re-constricted, the energy density of the plasma arc is greatly increased, the current distribution and pressure distribution, thus the weld configuration, can be easily adjusted, the "dual-arc" occurring current and the limited welding thickness for keyhole mode plasma arc welding increase. All these characteristics make a plasma arc more flexible and give many advantages to its application.