

双面电弧焊接熔透穿透机制

Melt-Through and Penetrate-Through Mechanism of DSAW

北京航空航天大学 崔旭明 李刘合 张彦华

[摘要] 通过分析双面 TIG+TIG 工艺及双面 PAW+TIG 工艺工件熔化过程,对双面电弧焊接中熔池熔透、穿透机制进行了分析。

关键词: 双面电弧焊接 熔透 穿透 匙孔

[ABSTRACT] By analyzing part melting process of double sided TIG & TIG and double sided PAW & TIG, the melt-through and penetrate-through mechanism of double sided arc welding (DSAW) is analyzed.

Keywords: DSAW Melt-through Penetrate-through Keyhole

高能束(电子束、激光束等)焊接具有焊接缺陷少、焊缝深宽比大、焊接热影响区小等优点,被广泛应用于航空航天领域大厚度铝合金构件制造中。但电子束、激光束焊接在获得高质量焊接接头的同时也存在一些缺陷和不足,如电子束焊接存在需要真空或局部

真空焊接环境、工装夹具要求高、对复杂构件应变能力差、焊接设备成本高等缺点;激光束焊接则由于光致等离子体及材料表面对激光的反射降低了激光能量的有效利用,使激光焊对以铝为基体的飞行器构件焊接效率大大降低。以上缺点限制了这 2 种高效焊接方法在航空航天制造中的应用。

1998 年,美国 Kentucky 大学 Y. M. Zhang 提出双面电弧焊接工艺(Double Sided Arc Welding, DSAW)^[1-2],其采用等离子弧、钨极氩弧在工件两侧同时对同一位置进行双面焊接,可以在较小热输入条件下一次完成较大厚度工件的焊接,具有高能束焊接的一些特点。同激光束、电子束焊接相比,双面电弧焊接具有设备运行成本低、焊接准备时间短、工艺条件易于实现等优点,引起国内外研究者的重视。常见的双面 TIG+TIG 焊接及双面电弧焊接工艺原理见图 1。

本文将对双面电弧焊接中熔池熔透、穿透机制进

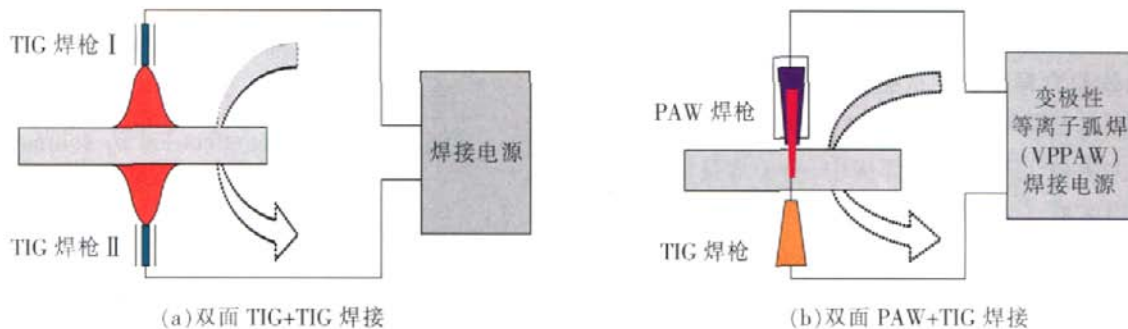


图 1 双面电弧焊接工艺原理

Fig.1 Principle of DSAW

行探讨,以明确双面电弧焊接工艺机理。

1 双面电弧焊接熔透机制

双面 TIG+TIG 焊接工艺中,在双侧 TIG 电弧持续作用下,焊接工件经初始熔化、熔池扩展、瞬时熔透至最终熔池稳定的变化过程(如图 2 所示)。在此过程中,焊缝中心区形成的热聚集区强化传热及熔池体积力导致的热挖掘作用是促使工件快速熔透的重要原因。

1.1 热聚集区强化传热作用

常规单面电弧焊接工艺中,当熔深超过板厚的 70%~80%后,焊缝根部出现热饱和现象而使熔深增大,这是单面热源作用下的热聚集现象^[3]。双面电弧焊接与常规单面焊不同,双侧热流沿各自法线方向流向焊缝中心区,对侧热源推动常规电弧焊中的热聚集区上移。双侧热源在工件中心区的传热互为正热阻效应,这一正热阻效应降低了焊缝中心区向外部的散热损失。随着热输入的逐渐增加,双侧热源作用下的热

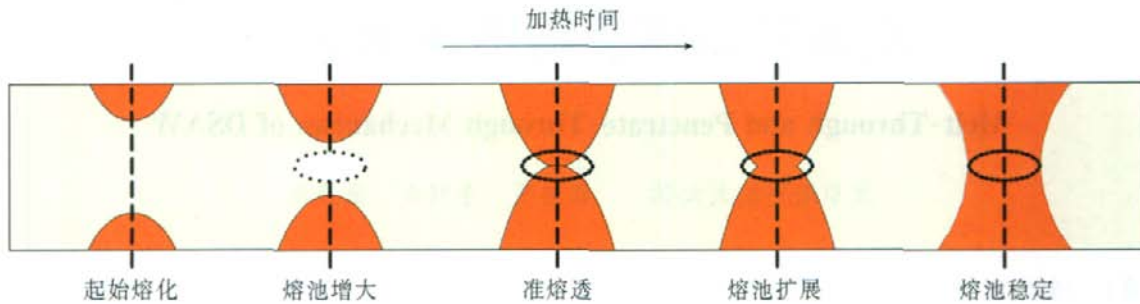


图2 双面电弧作用下的熔池扩展过程

Fig.2 Expanding process of molten bath during DSAW

累积效应日趋明显，在工件中心部位形成热聚集区。热聚集区的形成对工件熔透起到积极作用。

热聚集区的形成促使双面热源间产生互吸效应，引导上下热源沿单位法线方向向热聚集区集中传输热量，在区域内形成强化传热效果。这种强化传热加剧了中心区的热量聚集，促使热聚集区在短时间内出现“热饱和现象”。在此基础上再继续增加热输入，中心区的“热饱和”转变为瞬时熔透，形成所谓“临界崩溃现象”。“临界崩溃现象”的出现标志着焊缝中心区瞬态熔透行为的完成。工件熔透后，热聚集区依然存在。在工件内部，热聚集区与周边未熔化的母材金属发生强烈的热传递行为，产生内热源作用效果，进一步加快了工件的熔化进程。

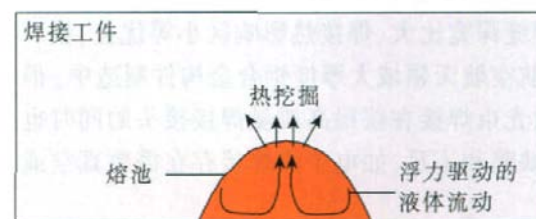
1.2 熔池体积力导致的热挖掘作用

熔池内部的体积力对双面电弧作用下的传热行为产生较大影响。双面电弧焊接中，由于焊接电流直接穿过被焊区域，焊缝中心部位电流密度分布集中，由此产生的也更加集中，使电磁力在熔池流体流动中的作用增强。如图3(a)所示，电磁力驱动熔池形成由外向内的流动，这种液体流动强化了熔池中的对流传热作用，使熔池表面高温金属向熔池底部流动，对熔池底部形成热挖掘作用。热挖掘作用可以加快焊缝中心区的熔化，使双侧熔池间未熔层减薄，利于焊缝的熔透。

浮力引起的熔池金属自然对流在上下熔池中形成的流体流动方向不同^[4]：在上侧熔池，浮力作用与单面焊接时的作用效果相同，驱动液态金属形成由内向外的流动；在下侧熔池则形成由外向内的流体流动，驱动熔池表面高温金属向底部流动，如图3(b)所示。下侧熔池浮力驱动的液体金属流动对熔池对流传热产生积极作用。浮力驱动的自然对流使电弧热由熔池表面向熔池根部的传递得到加强，对熔池根部形成挖



(a)电磁力作用



(b)下侧熔池浮力作用

图3 熔池体积力导致的热挖掘作用

Fig.3 Hot digging effect led by volume force of molten bath

掘作用，有利于下部熔池向更深的方向发展，促进上下熔池的迅速熔透。

2 双面电弧焊接穿透机制

在双面 PAW+TIG 工艺中，随着焊接热输入的增加，双侧熔池逐渐扩展并出现熔透现象。在此基础上继续增加等离子射流流量，焊缝出现从熔透到穿透并最终形成稳定匙孔的变化过程。双面电弧焊接穿透现象是电弧热、力共同作用的结果^[5-6]。

2.1 双面电弧焊接热力作用下的穿透行为

与普通电弧焊相比，等离子弧焊接具有更高的电弧能量密度，在高速等离子射流共同作用下，能够形成贯穿工件的“匙孔”，使焊缝熔深得到较大提高^[7-8]。双面 PAW+TIG 焊接工艺中，当采用弱规范(较小焊接

电流、较低等离子气流量、较小焊接速度)焊接时,在双面 PAW+TIG 热源作用下,工件两侧形成独立熔池并逐渐向工件中心区扩展,随着焊接热输入的增大,双侧熔池实现熔透,形成统一熔池。在此基础上,继续

增大等离子气流量,等离子射流热冲击作用增强,熔池出现从熔透到穿透的变化过程,并最终形成贯穿工件的“匙孔”。图 4 为高速等离子射流作用下熔池射流坑连续变化的过程。

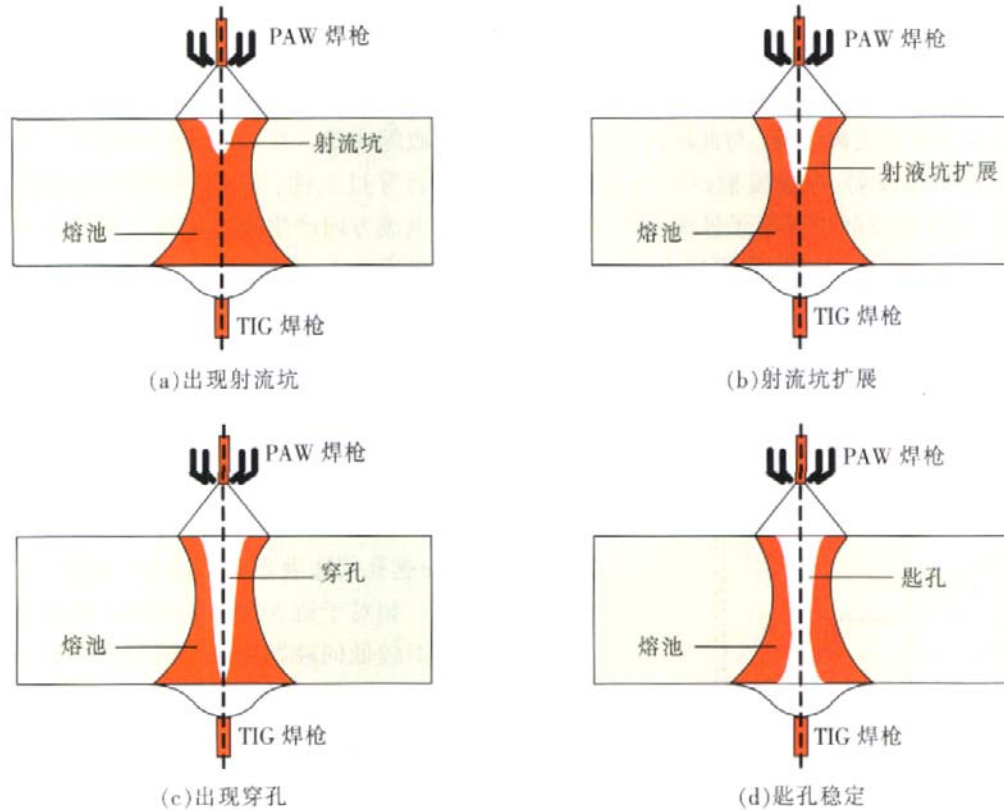


图 4 等离子射流热冲击对熔池穿孔作用过程

Fig.4 Process of molten bath punching affected by hot strike of plasma jet

在初始阶段,等离子气流量较小,射流热冲击作用较弱,等离子射流排开熔池表面形成射流坑,如图 4(a)所示;逐渐加大等离子气流量,等离子射流热冲击作用增强,射流坑逐渐向熔池深度方向扩展,见图 4(b);当射流坑贯穿整个工件厚度截面时,形成穿孔,焊缝出现穿透现象,见图 4(c);穿孔形成后,PAW 弧与工件对侧的 TIG 电弧连接,形成贯穿工件的匙孔,见图 4(d),由此完成双面 PAW+TIG 焊接的穿透过程。

2.2 穿透机制下双面电弧焊接热物理行为

在电弧热、等离子射流力共同作用下,双面 PAW+TIG 焊接出现穿透现象,并形成贯穿工件的匙孔^[9]。匙孔模式下,焊接电流传输路径发生变化,导引等离子弧进入匙孔,对等离子射流产生能量补偿作用,双面 PAW+TAW 工艺出现新的热物理行为。

2.2.1 匙孔模式下电流的传输路径

“匙孔效应”出现前,双面 PAW+TIG 工艺中的焊接电流按照传统传输路径经工件阳极侧进入,在阴极侧流出,焊接金属为电流唯一传输通道。“匙孔效应”出现后,由电子、离子组成的中性等离子体穿过匙孔,为焊接电流提供了一个新的传输通道^[9]。

导体中电流的传输路径满足最小电压定理,即电流总是沿压降最小的通道传输。如果电流沿金属路径传输,需要克服工件两侧阴极压降、阳极压降的作用,整个导电空间压降满足公式:

$$V=V_{EC}+V_{C1}+V_{WA}+V_{WC}+V_{C2}+V_{EA}, \quad (1)$$

其中, V 为导电空间总压降, V_{EC} 为 PAW 侧阴极压降, V_{C1} 为 PAW 侧弧柱压降, V_{WA} 为工件阳极压降, V_{WC} 为工件阴极压降, V_{C2} 为 TIG 弧柱压降, V_{EA} 为 GTAW 侧阳极压降。压降示意图见图 5(a) 所示^[9]。

如果电流沿匙孔路径传输,导电空间压降满足公式:

$$V = V_{EC} + V_{CI} + V_k + V_{CZ} + V_{EA}, \quad (2)$$

其中, V_k 为小孔弧柱压降, 其他参数意义同于公式(1), 压降示意图见图 5(b)^[9]。匙孔模式下, 匙孔中充满由电子、离子组成的中性等离子体射流。等离子体是由电弧热作用下等离子气热电离获得, 其由电子和正离子组成。这些带电粒子在外加电场及压缩电弧吹力作用下, 正离子向阴极方向流动, 电子向阳极方向流动, 形成双向电子流和正离子流。与此同时, 在电极阴极区、阳极区由于热发射、电场发射产生相应的电子流、正离子流, 与匙孔空间的等离子体流保持平衡, 使整个匙孔空间保持中性。这样, 当焊接电流流过中性导电空间时, 不受空间电荷电场的排斥作用, 传输阻力小, 压降低。

而当焊接电流通过匙孔周边的金属传输时, 需要克服工件两侧存在的阴极压降和阳极压降, 2 个电极

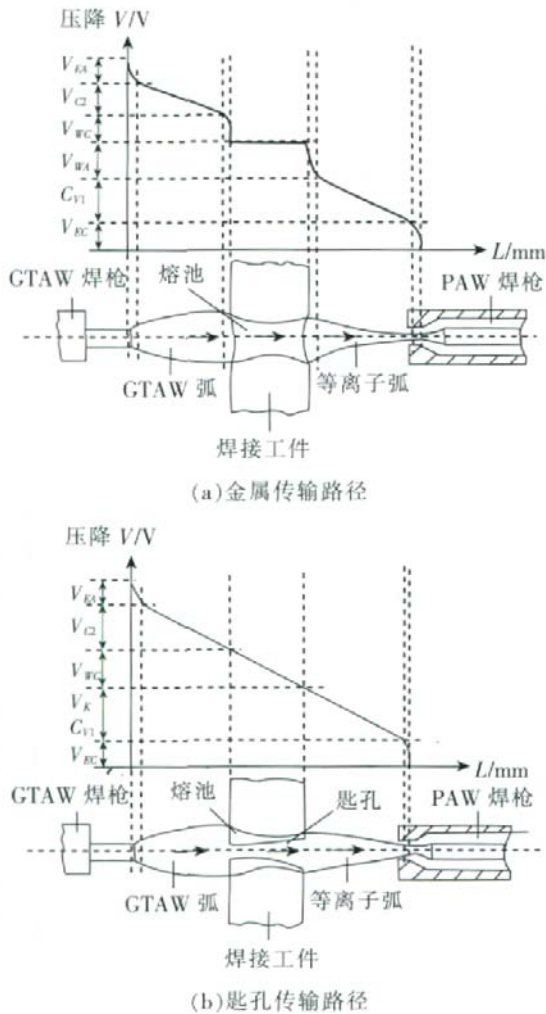


图 5 双面 PAW+GTAW 工艺焊接电流传输路径
Fig.5 Transmission route of welding current of double sided PAW & GTAW

区的电阻较大, 压降较大。按照最小电压定理, 焊接电流大部分穿过匙孔进行传输。

2.2.2 匙孔模式下的等离子弧收缩效应

当焊接电流穿过匙孔时, 引导等离子弧流入匙孔, 在电磁压缩、机械压缩作用下等离子弧产生收缩效应。

首先, 弧柱电流间的电磁压缩作用使等离子弧产生收缩现象。在对侧 TIG 焊枪导引下, 焊接电流近乎平行穿过工件, 根据法拉第电磁感应定律, 电流线沿其电流方向产生感应磁场。穿过磁场的电流线 i_2, i_3 受到磁场力 f_{12}, f_{13} 的作用, 其作用方向根据右手螺旋法则给出, 分别指向中心电流线方向, 如图 6 所示。这样, 流经工件的电流线在电磁力作用下产生聚集效应, 使等离子弧产生电磁收缩现象, 提高了能量密度。

其次, 等离子弧导入匙孔后, 匙孔周边的液态金属限制了等离子弧的扩展, 对其形成机械压缩作用。匙孔中充满等离子射流温度一般在 20 000 ~30 000 之间, 而匙孔周边液态金属温度一般在 1 000 ~2 000 之间。相对于流入匙孔的等离子弧而言, 匙孔周围温度相对较低的液态金属形成低温空腔, 对等离子弧产

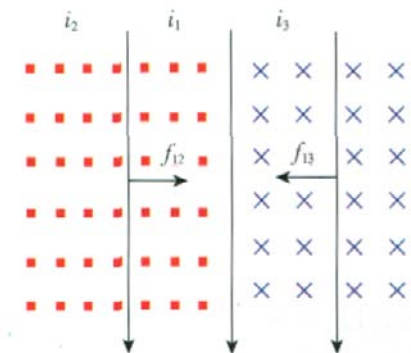


图 6 电磁力作用下电弧收缩效应
Fig.6 Arc pinch effect affected by electromagnetic force

生机械压缩作用, 促使其能量密度进一步提高。同时高速流动的等离子射流也对等离子弧产生一定的气压缩作用, 有利于提高电弧能量密度。

文献[9]中拍摄的双面 PAW+TIG 工艺中的等离子弧形貌, 其收缩效应明显, 功率密度增大, 熔深能力得到提高。

2.2.3 匙孔模式下的能量补偿机制

常规等离子焊接中, 大量焊接电流在“趋肤效应”作用下通过母材表面流失, 只有被电弧加热、电离的等离子射流才能透过匙孔穿过工件^[10], 而等离子弧本

身并没有穿过匙孔(如图7所示)。在等离子射流贯穿工件形成穿孔过程中,等离子射流与被焊金属间不断通过碰撞、反射、传导、辐射、对流等行为发生能量交换,促使焊接工件不断熔化。随着穿透深度的不断增加,等离子射流能量逐渐衰减,穿透能力逐渐减弱。如果等离子射流能量损耗得不到补偿,使其熔深能力受到一定限制。

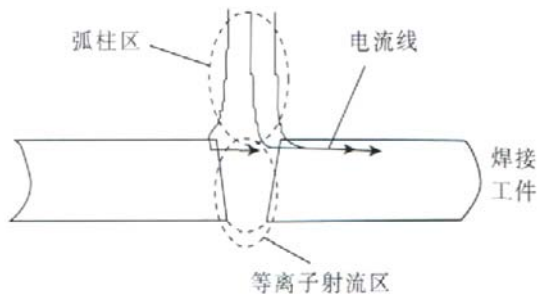


图7 常规PAW工艺等离子射流作用

Fig.7 Effect of plasma jet of normal PAW

穿透型双面PAW+TIG工艺中,等离子弧被焊接电流导引入匙孔,在此过程中,由于电磁收缩、匙孔压缩使其能量密度得到提高;同时,进入匙孔的等离子弧直接对等离子射流产生能量补偿作用,进一步提高等离子射流的能量密度,提升其穿透能力,有利于匙孔效应向更深工件延伸。

2.2.4 匙孔模式下的内部强化传热机制

焊接电流导引等离子弧穿过匙孔,与工件对侧的TIG电弧连接,形成一个贯穿工件的长电弧。经电磁收缩、匙孔压缩的等离子弧能量密度得到进一步提高,其潜入工件内部对被焊金属进行加热,传热机制与常规表面热源明显不同。

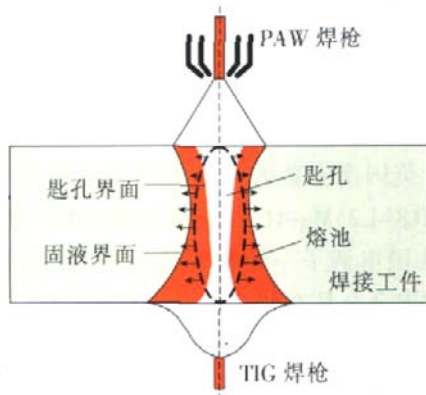


图8 匙孔等离子弧内部强化传热

Fig.8 Strengthening heat transfer inside plasma arc of keyhole

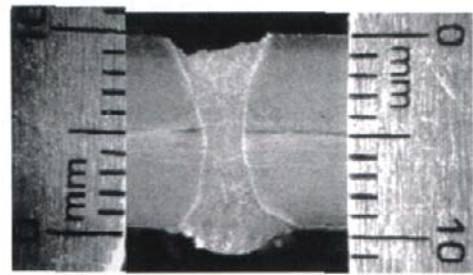


图9 匙孔模式下双面PAW+TIG工艺焊缝形貌

Fig.9 Appearance of double sided PAW & TIG seam under keyhole mode

如图8所示,作用于工件内部的等离子热源,通过匙孔界面、固液界面向周边金属传递热量,推动固液界面不断向工件内部扩展,散热损失少,传热行为得到进一步强化,有利于获得更大深宽比的焊缝。

图9为中等焊接规范条件下(焊接电流67A、焊接电压30V、焊接速度1.3mm/s、等离子气流量1.15L/min),采用穿透型双面PAW+TIG工艺可以一次性焊透9.5mm厚的1Cr18Ni9Ti不锈钢^[11]。这一结果已与10kW激光束焊接效果相近^[12]。

3 结论

本文对双面电弧焊接中的熔透、穿透机制进行了分析。

(1) 双面电弧焊接中,在双侧热源集中作用下,在工件中心区域形成热聚集区,热聚集区促使双面热源间产生互吸效应,引导双侧热源在热聚集区内形成强化传热效果,导致双侧熔池间未熔金属瞬时熔透。

(2) 电磁力、浮力驱动的液态金属流动对熔池内部对流传热产生强化作用。其驱动熔池表面高温金属流向熔池底部,对熔池底部形成“热挖掘作用”,使中间未熔层逐渐减薄,有利于双侧熔池的快速熔透。

(3) 双面PAW+TIG工艺中,增加等离子气流量使等离子射流热冲击作用增强,使熔池表面射流坑逐渐向工件内部扩展,并最终实现穿孔,焊缝出现穿透现象。等离子射流的热冲击作用是导致熔池穿透的重要原因。

(4) 匙孔模式下,双面PAW+TIG工艺焊接电流主要通过匙孔路径进行传输,引导等离子弧流入匙孔,穿过匙孔的压缩等离子弧对等离子射流产生的能量补偿作用,提升其穿透能力;同时形成的体积内热源

(下转第93页)

