

GMAW 焊接熔滴过渡动态模拟的研究现状及进展

李士凯, 杨荣祥

(山东劳动职业技术学院, 山东 济南 250300)

摘要:对 GMAW 焊接熔滴过渡的形式及其对焊接质量的影响进行讨论,指出脉冲射滴过渡形式比常规熔滴过渡具有更好的焊接工艺性和可控性。通过对熔滴过渡理论模型分析可知,流体动力学理论在小电流范围内对滴状过渡的动态模拟具有优势;“质量-弹簧”理论则充分考虑熔滴脱离过程振荡速度的影响,对熔滴过渡过程进行动态模拟的适应面更广,并能用于脉冲电流 GMAW 焊接熔滴过渡主动控制模式的分析探讨。

关键词:熔滴过渡;GMAW 焊接;理论模型;动态模拟

中图分类号:TG442

文献标识码:A

文章编号:1672-1152(2024)12-0101-02

0 引言

在 GMAW (Gas Metal arc Welding, 熔化极气体保护电弧焊) 焊接中,熔滴过渡不仅影响焊接电弧的稳定性,对熔池金属的冶金过程和焊缝成形也有很大的影响。对熔滴过渡行为进行稳定可靠的控制,获得理想的熔滴过渡形式,是实现 GMAW 焊接过程智能化控制的基础。熔滴过渡的基本形式和特点主要取决于焊接电流、电弧电压、焊接速度、电源极性和保护气等焊接工艺参数的选择,因此建立焊接工艺参数与熔滴过渡的关系尤为关键。但是仅通过实验确定熔滴过渡与焊接工艺参数之间的关系,不但成本较高,且当母材及焊接材料发生变化时,还要重复进行实验。数值模拟加少量实验的方式成为熔滴过渡研究的重要手段,因此熔滴过渡的动态模拟具有重要的理论价值和实际意义。

1 熔滴过渡形式

在连续电流 GMAW 焊接中,改变焊接工艺参数可得到不同的熔滴过渡形式。常见的熔滴过渡形式包括短路过渡、滴状过渡、射滴过渡、射流过渡和旋转射流过渡等。射滴过渡电弧稳定,熔滴过渡规则,飞溅小,焊缝成形美观。但射滴过渡在常规的焊接方法中临界电流区间比较小,并受到焊丝直径、保护气体成分、焊丝干伸长等因素的影响,应用受到限制。

脉冲电流 GMAW 焊接比常规焊接方法具有更好的焊接工艺性和可控性,在较小的热输入条件下即可实现射滴过渡。图 1 给出了脉冲电流 GMAW 焊接的熔滴过渡形态与焊接参数之间的关系^[1]。随着焊接参数的变化,脉冲电流 GMAW 焊接的熔滴过渡可实现一脉一滴、一脉多滴和多脉一滴三种熔滴过渡形式。一脉一滴可控性最好,焊缝缺陷最低,但实现这种熔滴过渡形式的工艺参数范围较窄。目前,脉冲电流 GMAW 焊接脉冲参数的选择主要还是通过经验公式和工艺实验得到,熔滴大小不规则,熔滴的脱离时间无法确定。

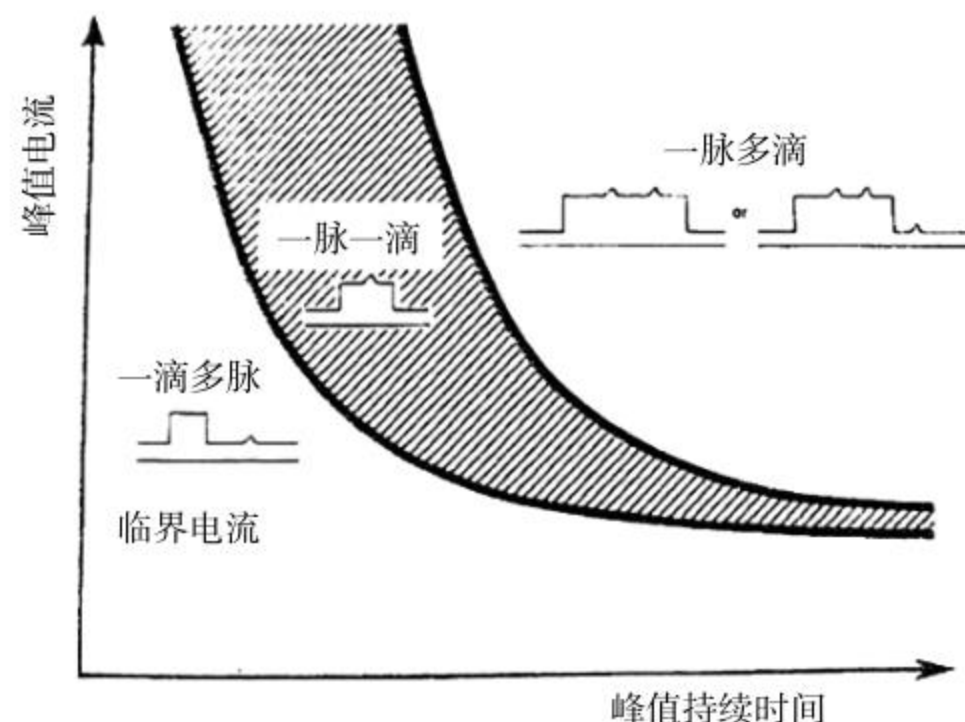


图 1 脉冲焊接参数对熔滴过渡的影响

2 GMAW 焊接熔滴过渡模型分析与比较

通过熔滴过渡模型分析电弧力和电弧热对熔滴过渡行为的影响,以及熔滴过渡的转变形式,可为实现稳定可控的射滴过渡提供基础数据,而且通过数值分析与微机实时控制相结合,可替代成本昂贵的高速摄像机等复杂的硬件系统,精确控制熔滴过渡。下面将对熔滴过渡模拟的几种理论模型的相关研究成果进行探讨分析。

2.1 静力学平衡理论和液柱不稳定收缩理论

在熔滴过渡理论模型中,静力学平衡理论和液柱不稳定收缩理论^[2-3]早期应用最为广泛。

静力学平衡理论认为熔滴上的作用力是实现熔滴过渡的关键因素,熔滴过渡是重力、等离子流力、电磁收缩力及表面张力等共同作用下的结果,当促进熔滴过渡的脱离力大于阻碍熔滴过渡的保持力时,熔滴将脱离焊丝向熔池过渡。

液柱不稳定收缩理论来自于 Rayleigh 液柱不稳定模型^[4],由于球体的自由能比圆柱体更低,当圆柱形液柱受到特定波长干扰时,表面将发生波动,有收缩为球形熔滴的趋势。

图 2 是利用液柱不稳定收缩理论和静力学平衡理论对熔滴脱离时的尺寸进行数值模拟的结果。由图 2 可知,小电流焊接时,熔滴过渡形式为滴状过渡,用静力学平衡理论得到的熔滴尺寸与实验结果基本

收稿日期:2024-10-22

第一作者简介:李士凯(1977—),男,山东泰安人,硕士研究生,副教授,主要从事金属材料焊接工艺的研究工作。

吻合,液柱不稳定收缩理论预测熔滴尺寸偏差较大;在大电流焊接时,熔滴过渡形式为喷射过渡,由于喷射过渡存在液柱不稳定现象,液柱不稳定收缩理论数据基本吻合,静力学平衡理论预测熔滴尺寸误差较大。

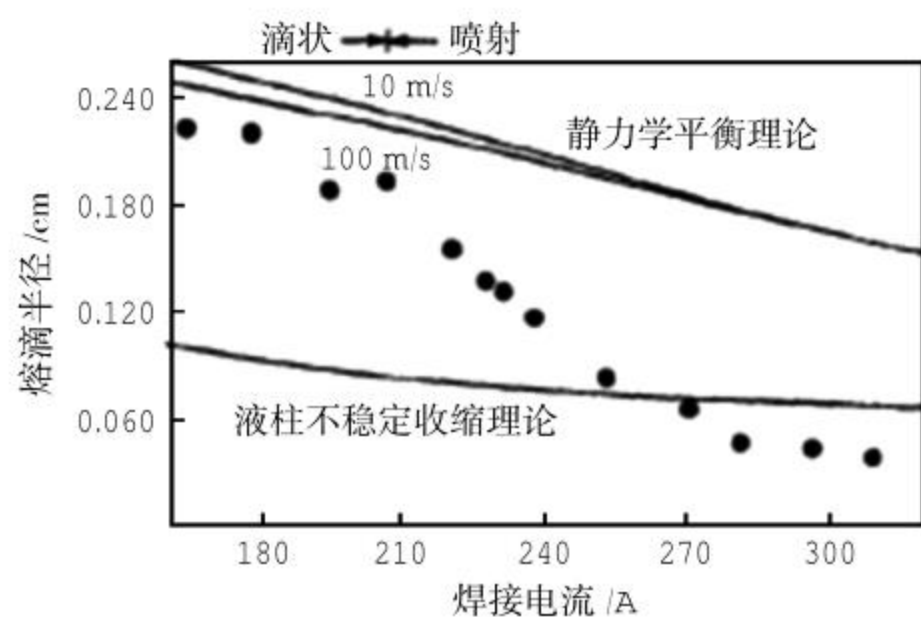


图 2 熔滴尺寸理论计算值与实验结果比较

通过与实验结果比较可知,受焊接工艺参数的限制,静力学平衡理论和液柱不稳定收缩理论对熔滴的数值模拟都存在一定的局限性,并且不能用于分析熔滴过渡的动态变化过程。

2.2 能量最小原理

利用静力学平衡理论分析熔滴过渡行为是考虑熔滴受到各种力综合作用的结果,此外还可以从能量的角度进行考虑。采用能量最小原理预测熔滴过渡,可以确定熔滴液面的变化,分析焊接电流、电弧覆盖区域等对熔滴体积几何形状的影响。杨世彦^[5]等利用该理论建立了熔滴过渡能量模型,采用有限元分析手段,考虑熔滴平衡和临界失稳状态,计算得到焊接电流的变化对熔滴脱离尺寸的影响,并讨论了在焊接过程中通过附加机械力来控制熔滴过渡。Joo^[6]等采用该原理建立了 GMAW 焊接熔滴过渡模型,通过模拟得到焊丝端部熔滴的体积及形状。

以上计算所依据的模型均为静态模型,不能动态分析随焊接工艺参数的变化,熔滴尺寸的长大过程、脱离时刻及体积形状的变化规律。

2.3 流体动力学理论

陈茂爱等^[7]利用流体动力学理论建立熔滴过渡动态模型,选用 VOF 算法跟踪熔滴长大过程自由表面的演变,分析熔滴过渡过程中熔滴形状的演变及脱离过程,并计算出不同电流条件下熔滴的过渡过程。通过数值分析可知,在小电流条件下熔滴尺寸及过渡频率的变化与实验结果基本吻合。文献[8]以流体力学和电磁理论为基础,建立 VOF 模型,对附加旁路电流的 GMAW 焊接熔滴过渡规律进行模拟,计算得到熔滴尺寸与实验结果吻合良好。

流体动力学理论适用于小电流范围内滴状过渡的动态模拟,主要考虑熔滴与熔池的相互作用,难以预测滴状过渡向射流过渡转变的临界条件。

2.4 “质量-弹簧”理论

“质量-弹簧”理论模型起初用于模拟水龙头中

流出的水滴,后由 Watkins 等^[9]采用该模型对熔滴过渡进行模拟。Watkins 利用该模型计算得到熔滴的尺寸和过渡频率,并将模拟数值与实验结果进行比较,吻合较好,但只研究了熔滴位移在临界电流范围内随时间的变化过程,没有考虑采用不同的熔滴过渡形式时,熔滴振荡、熔滴位移变化等对熔滴过渡行为的影响。研究发现,熔滴在脱离焊丝后,残留在焊丝端部的液态金属会产生明显的振荡,形状随之也发生变化。文献[10]通过该模型探讨了脉冲电流条件下熔滴过渡的主动控制模式,通过脉冲电流的切换激发熔滴振荡来促进熔滴过渡,可减小对焊接电流的依赖,降低实现一脉一滴过渡的临界焊接电流。

该理论模型对于连续电流下熔滴过渡的演变规律和脉冲电流下熔滴过渡的主动控制,均可进行建模数值分析,适用范围广。但该理论没有考虑熔滴与熔池相互作用时对热传递及速度场的影响,不能分析熔滴形状的演变及脱离过程。

3 结论

1)通过对 GMAW 焊接熔滴过渡研究现状的分析可知,射滴过渡是最理想的熔滴过渡形式,脉冲电流 GMAW 焊接比常规焊接方法具有更好的焊接工艺性和可控性,实现稳定可控的脉冲射滴过渡形式仍需要进行大量的研究工作。

2)通过熔滴过渡理论模型的分析,可以认为流体动力学理论在小电流范围内对滴状过渡的动态模拟具有优势。“质量-弹簧”理论则充分考虑熔滴脱离过程振荡速度的影响,对熔滴过渡过程进行动态模拟适应面更广。

参考文献

- [1] C. J. Allum. Welding technology data: pulsed MIG welding [J]. Welding and Fabrication, 1985, 10(2): 24-30.
- [2] Y. S. Kim and T. W. Eagar. Analysis of metal transfer in gas metal arc welding [J]. Welding Journal, 1993, 72(6): 269-277.
- [3] C. J. Allum. Metal transfer in arc welding as a varicose instability: I. Varicose Instability in a current carrying liquid cylinder with surface charge, Journal of Physics D [J]. Applied Physics, 1985, 18: 1 431-1 446.
- [4] J. F. Lancaster. The Physics of Welding [M]. Oxford: Pergamon press, 1984.
- [5] 杨世彦. MIG/MAG 焊附加机械力射滴过渡控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998.
- [6] T. M. Joo, C. D. Yoo and T. S. Lee. Effects of welding conditions on molten drop geometry in arc welding [J]. Welding Journal, 1996, 75(4): 62-76.
- [7] 陈茂爱, 武传松, 廉荣. GMAW 焊接熔滴过渡动态过程的数值分析 [J]. 金属学报, 2004(11): 1 227-1 332.
- [8] 李万里, 卢玫, 单彦广. DE-GMAW 焊接熔滴过渡过程模拟研究 [J]. 热加工工艺, 2020, 49(1): 132-137.

(下转第 105 页)

高使用寿命。由于采用充气压紧的设计方案,也不再需要硬密封所用的压紧弹簧。

3) 充气软密封的密封环一般采用类橡胶材质,但橡胶材质一般耐温在 300 ℃ 以下,无法在氢基竖炉的高温环境下直接使用,因此还需在软密封附近增加冷却水道,来对软密封区域进行通水冷却。

在氢基竖炉工况下,水冷软密封球阀在国内各阀门厂家几乎没有相应的产品,也没有相应的设计和制造经验。此类阀门主要为进口产品。此种阀门降低了制造成本,但橡胶密封圈使用寿命 3~6 个月,阀门也需要每年返厂维修,较适合定修较频繁的产线。

4 氢基竖炉项目出料阀门的选用

在高温工况下,金属材料会失去强度,所以硬密封的阀门必然采用高价值的耐高温金属制造,导致阀门的造价高昂。同时,在高温工况下,阀芯和阀杆一定会发生热变形,这种热变形是不可预测的,也是不可控的,这导致硬密封阀门非常容易由于热变形导致密封失效。为了减少这种高温变形,硬密封阀门阀芯必须采用实心球,进一步推高了阀门制造成本。

采用充气密封的阀门可以通过调整充气压力更好地应对热变形。而由于橡胶材质的软密封无法工作在 300 ℃ 以上的工况,所以采用充气软密封的阀门必须增加冷却系统,正是由于增加了冷却系统,也可以

使充气密封的阀门采用普通金属材质制造即可,降低了阀门制造的成本。经深入研究以及和多个知名阀门厂家的交流,认为水冷软密封球阀更适合于氢基竖炉项目的使用。

5 结语

现阶段氢基竖炉均采用天然气作为还原气,由于国内缺少天然气资源,氢基竖炉在国内并没有得到广泛的发展。目前仅有湛江钢铁、河钢宣钢、中晋太行等三个项目具备正常生产能力,产出产品也符合设计要求。但由于运行成本较高,并没有连续生产。所以氢基竖炉产线上的阀门目前均采用国外进口的水冷软密封球阀,而没有采用国产的耐高温硬密封球阀和耐高温硬密封盘阀的方案。所以目前没有国产耐高温硬密封阀门在氢基竖炉产线工况下的使用案例。

但各冶金工程公司目前积极推进氢基竖炉项目的各种中试项目,积极探索氢基竖炉工艺设备稳定运行的设计和运营经验。当绿电绿氢产业发展成熟后,氢气将取代天然气成为更合适的还原气,在碳达峰碳中和的大背景要求下,直接还原氢基竖炉必将会有大发展,取代部分高炉产线。选用哪种方案的阀门作为氢基竖炉项目的出料阀门对于积累氢基竖炉产线设计经验具有重要意义。

(编辑:苗运平)

Selection of Discharge Valve for Direct Reduction Hydrogen Based Vertical Furnace Project

Gao Feng, Jin Feng, Fu Yanpeng, Wang Zhenlin, Sun Fengru, Zhang Xiaofei, Bai Xiaokang

(Sinosteel Equipment & Engineering Co., Ltd., Beijing 100080, China)

Abstract: This article briefly introduces the operating requirements of the core equipment high-temperature sealing valve required for the direct reduction hydrogen based vertical furnace project, as well as three different valves that meet this operating condition. Outline the differences in valve design and structure, as well as the current main application scenarios of three types of valves.

Key words: low-carbon metallurgy; hydrogen based vertical furnace; ball valve; disc valve

(上接第 102 页)

[9] A. D. Watkins, H. B. Smartt, and J. A. Johnson. A dynamic model of droplet growth and detachment in GMAW [C]//Proceeding of the 4th International Conference Gatlinburg, Tennessee USA. 1995.

[10] 李士凯,陈茂爱,武传松.脉冲 GMAW 熔滴过渡动态过程的解析模型[J].焊接学报,2004(2):47-51.

(编辑:武倩倩)

Research Status and Progress of Dynamic Simulation of Droplet Transition in GMAW Welding

Li Shikai, Yang Rongxiang

(Shandong Labor Vocational and Technical College, Jinan Shandong 250300, China)

Abstract: This paper discusses the forms of droplet transfer in GMAW welding and their impact on welding quality. It points out that the pulse jet droplet transfer form has better welding processability and controllability than the conventional droplet transfer form. Through the analysis of the theoretical model of droplet transition, it can be concluded that fluid dynamics theory has advantages in dynamic simulation of droplet transition in the low current range. The "mass spring" theory fully considers the influence of oscillation speed during droplet detachment process, and has a wider applicability for dynamic simulation of droplet transition process. It can also be used for the analysis and exploration of active control mode of droplet transition in pulse current GMAW welding.

Key words: droplet transition; GMAW welding; theoretical model; dynamic simulation