

引文格式:孙咸.焊丝中稀土金属对纯CO₂保护气体GMAW熔滴过渡形态的影响[J].太原理工大学学报,2023,54(3):432-442.

SUN Xian. Effect of rare earth metals added to wire on droplet transfer mode in GMAW with pure CO₂ shielding gas[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2023, 54(3): 432-442.

焊丝中稀土金属对纯CO₂保护气体GMAW 熔滴过渡形态的影响

孙 咸

(太原理工大学 材料科学与工程学院, 太原 030024)

摘 要:综述了焊丝中稀土金属对纯CO₂保护气体GMAW熔滴过渡形态的影响。结果表明,含稀土金属的焊丝以正极性纯CO₂保护气体焊时,由于电弧中阴极斑点面积扩大(位于熔滴上方的电弧呈圆锥形),被细化的熔滴形成轴向喷射过渡形态,飞溅很小,工艺性优良。稀土金属降低了阴极电子逸出功,同时高的电磁夹持力使熔滴以更小的尺寸轴向过渡,还有作用在熔滴上的主导力方向有利熔滴过渡,最终纯CO₂保护气下完全满足了熔滴喷射过渡形成条件。含有稀土金属的焊丝在电流波形控制新型电源中的应用,使J-STAR®焊接方法在一个较宽电流范围内实现了超低飞溅,拓宽了该工艺的应用范围。

关键词:稀土金属;熔滴过渡形态;纯CO₂保护气体GMAW;阴极斑点;轴向过渡

中图分类号:TG422.3;TG444⁺.73;TG403 **文献标识码:**A

DOI:10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2023.03.005 **文章编号:**1007-9432(2023)03-0432-11

Effect of Rare Earth Metals Added to Wire on Droplet Transfer Mode in GMAW with Pure CO₂ Shielding Gas

SUN Xian

(College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The effect of rare earth metals added to wire on droplet transfer mode in GMAW with pure CO₂ shielding gas was reviewed. The results show that when the welding wire containing rare earth metals is welded with DCEN pure CO₂ shielding gas, owing to the expansion of the cathode spot area in the arc (the arc above the droplet presents a conical shape), the refined droplets form an axial spray transfer mode, the spatter generation is very small, and the usability is excellent. The rare earth metals reduce the work function of the cathode electrons, at the same time, the high electromagnetic pinch force allows the droplets to transition axially in a smaller size, and the direction of the dominant force acting on the droplets facilitates the droplet transfer, and finally the formation conditions of droplet spray transfer are fully satisfied under pure CO₂ shielding gas. The application of welding wire containing rare earth metal in new power supply with current waveform control makes the J-STAR® welding method realize ultra-low spatter in a wide current range, which widens the application range of the process.

收稿日期:2022-04-05;修回日期:2022-06-17

通信作者:孙咸(1941—),教授,主要从事焊接材料及金属焊接性方面的研究,(E-mail)sunxian99@163.com

Keywords: rare earth metal; droplet transfer mode; GMAW with pure CO₂ shielding gas; cathode spot; axial transfer

CO₂ 气体保护电弧焊以其设备简单、操作简便、气体容易获得、价格便宜等优势,在普通钢结构制作中获得了广泛应用,并积累了丰富的生产经验。这种方法的缺点是焊接过程中会产生大量飞溅。产生飞溅的主要原因与所用焊丝熔滴过渡形态有关。在 CO₂ 气体保护焊现场生产中,通常主要采用熔滴的短路过渡形态,熔滴的滴状过渡形态用的较少,熔滴的喷射过渡形态没有应用。数十年以来,通过焊接电源和焊接材料的各种改进,在控制焊接飞溅方面取得了一些阶段性成果,但在具有高熔敷速率的纯 CO₂ 气体保护焊喷射过渡研究方面未见重大突破。近年来,由于技术的进步,采用含有稀土金属(REM)元素的实心焊丝,进行纯 CO₂ 保护气体焊接时获得了喷射过渡形态试验结果^[1]。日本的 JFE 钢铁公司针对造船业中中厚板对接接头,开发了采用含有稀土金属焊丝的“J-STARTM welding”窄间隙焊接工艺,将优质、高效的“J-STARTM welding”工艺创造性地用于造船施工领域中^[2]。有关含有稀土金属焊丝采用纯 CO₂ 焊接实现喷射过渡的报道,国内比较罕见。考虑到稀土金属与纯 CO₂ 保护气体焊接熔滴过渡形态间关系的复杂性,继续深入研究含有稀土金属焊丝纯 CO₂ 保护气体焊接熔滴过渡形态及其机理,对于推动该工艺广泛成功应用仍然是迫切的。为此,论文从纯 CO₂ 保护气体 GMAW 熔滴过渡形态及工艺质量入手,以相关研究文献为分析对象,将稀土金属对纯 CO₂ 保护气体 GMAW 熔滴过渡形态影响与纯 CO₂ 保护气体 GMAW 喷射过渡形成条件相联系,探讨稀土金属对纯 CO₂ 保护气体 GMAW 工艺质量的影响及含有稀土金属焊丝纯 CO₂ 保护气体 GMAW 实现喷射过渡的机理。该项工作对于进一步揭示稀土金属与纯 CO₂ 保护气体 GMAW 熔滴过渡形态间的关系,推动相关理论发展,促进工程应用,具有一定参考价值和研究意义。

1 纯 CO₂ 保护气体 GMAW 熔滴过渡形态及工艺质量

1.1 纯 CO₂ 保护气体 GMAW 熔滴过渡形态

纯 CO₂ 保护气体 GMAW 时,随工艺参数的变化,焊接电弧呈现了 2 种熔滴过渡形态(表 1):1) 熔滴的短路过渡形态。当弧长比较短时(如 300 A, 33 V),由于阳极斑点面积小,位于熔滴下方的电弧呈集中状态,而且斑点在不停移动,呈活动型。此时,熔滴的非轴向性倾向略有弱化,因为电弧较短,电弧电压较低,熔滴活动的空间和时间受到限制,熔滴很快就与液态熔池接触短路,电弧瞬间熄灭再引燃(断续电弧),如图 1(a)所示。熔滴的短路过渡是熔滴的向下表面张力(与熔池金属熔合后)克服向上的表面张力的结果。因此,该种促进熔滴过渡的主导力应当是熔滴的下表面张力。2) 熔滴的非轴向粗熔滴排斥过渡形态。当弧长比较长时(如 300 A, 35 V),电弧在熔滴下方呈现连续、活动、集中型(图 1b^[3])。这是由 CO₂ 气体在电弧中的理化特性决定的。由于 CO₂ 高温分解吸热,对电弧产生冷却作用,造成电弧和斑点面积收缩(热收缩效应),电流密度提高,电场强度也提高。熔滴粗大、不规则,呈非轴向排斥过渡形态,且过渡频率较低。这都源于电弧中熔滴上的作用力。首先是熔滴下方的斑点压力,由于熔滴下方的弧根面积小,斑点压力方向向上;还有 CO₂ 高温分解体积膨胀产生的向上的气动力,2 种向上的作用力再加上熔滴的表面张力,把正在长大的熔滴推离焊丝轴线(图 1(b))。非轴向大熔滴排斥过渡,是熔滴的重力克服了若干向上反作用力的结果。因此,该种熔滴过渡的主导力应当是熔滴的重力。总之,纯 CO₂ 气体保护焊熔滴过渡可归纳为 3 大特点:①弧根面积小,电弧集中;②大熔滴非轴向排斥过渡;③氧化性电弧,焊接飞溅大。

表 1 纯 CO₂ 保护气体 GMAW 熔滴过渡形态

Table 1 Droplet transfer mode in GMAW with pure CO₂ shielding gas

焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊丝直径 φ/mm	保护气体 类型	电源极性	电弧外观 及部位	电弧形态	促进熔滴过渡 主导力	熔滴过渡 形态
30~200	16~22	0.60~1.10	100%CO ₂	直流反接	圆柱形位于 熔滴下方	断续、活动、 集中型	方向向下的 熔滴表面张力	粗熔滴 短路过渡
200~500	25~35	0.9 或更粗	100%CO ₂	直流反接	圆柱形位于 熔滴下方	连续、活动、 集中型	熔滴的重力	非轴向粗熔滴 排斥过渡

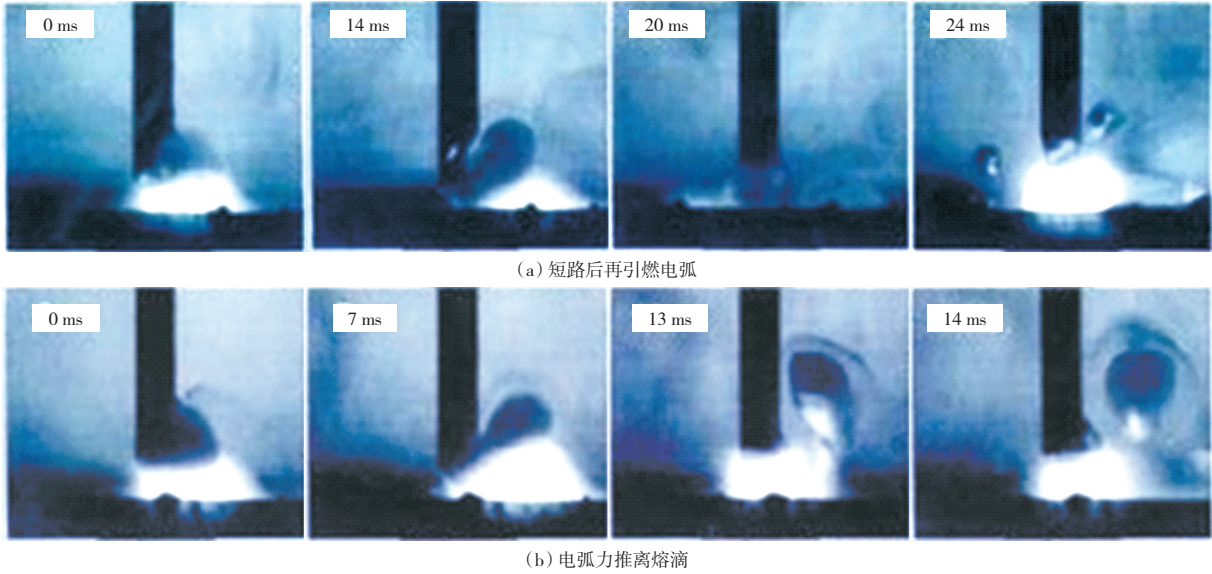


图 1 CO₂ 焊中的电弧和熔滴过渡行为(100%CO₂,300 A,40 cm/min)

Fig.1 Behavior of arc and droplet transfer in CO₂ welding(100%CO₂, 300 A, 40 cm/min)

1.2 纯 CO₂ 保护气体 GMAW 工艺质量

从表 2 可以看出,短路过渡形态(30~200 A、16~22 V)的优势是低热输入、适于全位置和薄、厚板焊接,获得了广泛应用。不足之处是焊丝的熔敷速率相对较低、厚板焊接可能产生未熔合缺陷,以及焊接飞溅较大(图 1(a)第 4 帧)等问题。滴状过渡形态(200~500 A、25~35 V)的优点是电流大、焊丝粗、熔化速率高,适于厚板焊接。但全位置焊接工艺性相对较差,仅适于平焊或平角焊接,且飞溅大

(图 1(b)第 3、4 帧)、气孔敏感,工程应用受限。滴状过渡形态的焊接电流范围 200~500 A 较宽,对于直径 1.0~1.6 mm 或更粗一点的焊丝,随焊接电流增大,熔滴尺寸未被细化,工艺性明显变差。特别是电弧的氧化性及大熔滴非轴向排斥过渡的特点难以改变。为此,有多篇文献明确指出,纯 CO₂ 保护气体焊时,随焊接电流增大,没有转变电流出现,难以实现喷射过渡形态^[4-5]。

表 2 纯 CO₂ 保护气体 GMAW 的工艺质量

Table 2 Process quality in GMAW with pure CO₂ shielding gas

焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊丝直径 ϕ /mm	保护气体类型	热输入	电源极性	母材板厚 δ /mm
30~200	16~22	0.60~1.10	100%CO ₂	较低	直流反接	0.9~3.18
200~500	25~35	0.9 或更粗	100%CO ₂	较高	直流反接	3.18 或更厚
焊接飞溅	气孔敏感性	焊缝熔深	焊缝外观成形	焊接位置适应性	坡口装配要求	焊接成本
较大	敏感	较浅	比较满意	全位置	稍低	较低
很大	敏感	较深	一般满意	平焊或平角焊	高	较低

2 纯 CO₂ 保护气体 GMAW 喷射过渡形成条件

表 3 列出了 2 种保护气体的 GMAW 熔滴喷射过渡形成条件对比分析。可以看出,Ar 或 80%Ar+20%CO₂ 保护气体 GMAW 喷射过渡的实现取决于 3 个要素:1) 富氩混合保护气体。该电弧的特性使阳极斑点的面积始终大于载流截面面积,即电弧始终处在熔滴上方,从而导致熔滴过渡的轴向性^[6]。2) 电磁力作用方向向下。电磁力作用方向与阳极斑点面积大小有关,当阳极斑点面积大于载流截面面积时其方向向下(图 2^[6])。在强电磁收缩力作用下,比焊丝直径小得多的熔滴被分离,非常有利于喷

射过渡。3) 焊接电流等于或大于转变电流。此时熔滴的表面张力变得足够小,电磁力足够大,电磁夹持力对焊丝铅笔尖的极细熔滴不断挤压分离。速度非常快,间隔非常小,熔滴来不及长大,迅速形成“金属流”,穿越电弧进入熔池。1)是必要条件,2)和 3)是充分条件。三者缺一不可。

纯 CO₂ 保护气体 GMAW 时,电弧电场强度高,热收缩效应大,弧柱电位梯度大,致使阳极斑点面积小,呈现明显的集中型电弧形态(图 3^[7])。向上的电弧作用力(斑点压力 F_b 、气动力 F_q 以及熔滴表面张力 F_σ),导致严重的非轴向排斥过渡。同时,由于阳极斑点的面积远小于载流截面面积,电磁力 F_{em} 方向向上。再有,随焊接电流增大(200~500

A),飞溅陡增、氧化严重、成形恶化,但熔滴始终未被细化,没有出现所谓的转变电流,更不用说实现熔滴的喷射过渡形态了。

比较上述喷射过渡形态形成条件,纯 CO₂ 保护气体 GMAW 时,在必要条件上不仅不具备,而且背

道而驰,即阳极斑点的面积远小于载流截面面积(图3),熔滴的轴向过渡难以实现,其余2项充分条件也不可能具备。纯 CO₂ 保护气体 GMAW 实现喷射过渡需要重点解决的是电弧氛围问题。

表3 2种保护气体 GMAW 熔滴喷射过渡形成条件分析

Table 3 Analysis of formation conditions of droplet spray transfer in GMAW with two shielding gases

保护气体	电弧氛围	作用在熔滴上的电磁力 F_{em} 方向	转变电流	喷射过渡形成条件评估
Ar 或 80% Ar+20% CO ₂	保护气体特性决定的阳极斑点面积始终大于载流截面面积(图2),电弧爬升到熔滴上方,致使熔滴呈轴向性过渡	阳极斑点面积始终大于载流截面面积,电磁力 F_{em} 方向向下(图2)	随焊接电流增大,当电磁力 F_{em} 足够大、表面张力 F_{σ} 足够小时,熔滴尺寸小于焊丝直径,出现了明显的转变电流	满足喷射过渡形成条件,可以实现熔滴喷射过渡形态
纯 CO ₂	保护气体特性决定的阳极斑点面积始终小于载流截面面积(图3),电弧位于熔滴下方,向上斑点压力和熔滴表面张力大,致使熔滴呈非轴向排斥性过渡	阳极斑点面积始终小于载流截面面积,电磁力 F_{em} 方向向上(图3)	随焊接电流增大,熔滴尺寸始终不小于焊丝直径,不出现转变电流	不能满足喷射过渡形成条件,难以实现熔滴喷射过渡形态

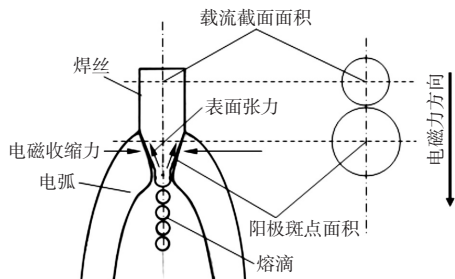


图2 GMAW 熔滴喷射过渡机理示意图

Fig.2 Schematic diagram of mechanism of droplet spray transfer in GMAW

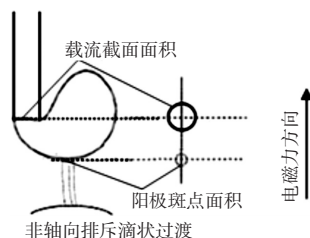


图3 使用纯 CO₂ 滴状过渡规范时,作用在熔滴上电磁力的方向

Fig.3 Direction of electromagnetic force acting on the droplet when using pure CO₂ with globular transfer specification welding

3 稀土金属对纯 CO₂ 保护气体 GMAW 工艺质量的影响

文献[1]采用包括高速摄像机、电弧等离子体源及单色仪等在内的发射光谱试验装置、相关焊接设

备和表4所示工艺参数,对2种实心焊丝(见表5)进行了纯 CO₂ 保护气体 GMAW 焊接试验,观察电弧现象,检测工艺质量。从图4和表6试验结果可以看出,①对于不含稀土金属的 MG50 焊丝反接性时,电弧不稳、飞溅较大、焊接工艺性一般,如图4(a)所示。这是由于电弧中阳极斑点面积小(位于熔滴下方的电弧呈圆柱形)、且急速移动,电弧不太稳定,粗熔滴非轴向排斥过渡所造成。②对于不含稀土金属的 MG50 焊丝正接性时,电弧很不稳、飞溅较大、焊接工艺性很差,如图4b所示。这是由于电弧中阴极斑点面积小(熔滴下方电弧呈圆柱形)、移动更频,电弧更不稳定,粗熔滴非轴向排斥过渡所致。③对于含稀土金属的 KC500 焊丝反接性时,其工艺性与不含稀土金属的 MG50 焊丝反接性时接近,如图4(c)所示,造成原因亦相近。④对于含稀土金属的 KC500 焊丝正极性时,电弧稳定、飞溅很小、工艺性优良,如图4d所示。这是由于电弧中阴极斑点面积扩大(位于熔滴上方的电弧呈圆锥形),且迁移率很小,电弧相当稳定,被细化的熔滴呈轴向喷射过渡的结果。含稀土金属的 KC500 焊丝实现了纯 CO₂ 保护气体 GMAW 的喷射过渡形态,可以认为是纯 CO₂ 保护气体 GMAW 工艺方法的重要进展和突破。

表4 2种焊丝 GMAW 中使用的工艺参数

Table 4 Process parameters used in GMAW completed with two kinds of welding wires

焊丝	母材	板厚 δ /mm	焊丝直径 ϕ /mm	保护气体	气体流量 $Q/(L \cdot \min^{-1})$	干伸长 L_e /mm	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	电源极性
MG-50 (无稀土金属)	SS400	10	1.2	100%CO ₂	20	20	300	33	DCEP DCEN
KC-500 (加稀土金属)	SS400	10	1.2	100%CO ₂	20	20	300	33	DCEP DCEN

表 5 焊丝的化学成分(质量分数)
Table 5 Chemical composition of welding wire %

焊丝	C	Si	Mn	P	S	Ti	其他
MG-50	0.04	0.73	1.58	0.01	0.01	0.22	—
KC-500	0.05	0.70	1.60	0.01	0.01	0.20	REM

4 含有稀土金属焊丝纯 CO₂ 保护气体 GMAW 实现喷射过渡机理

4.1 保护气体成分对 2 种焊丝电弧形态的影响

表 7 列出了 2 种焊丝在不同保护气时 GMAW

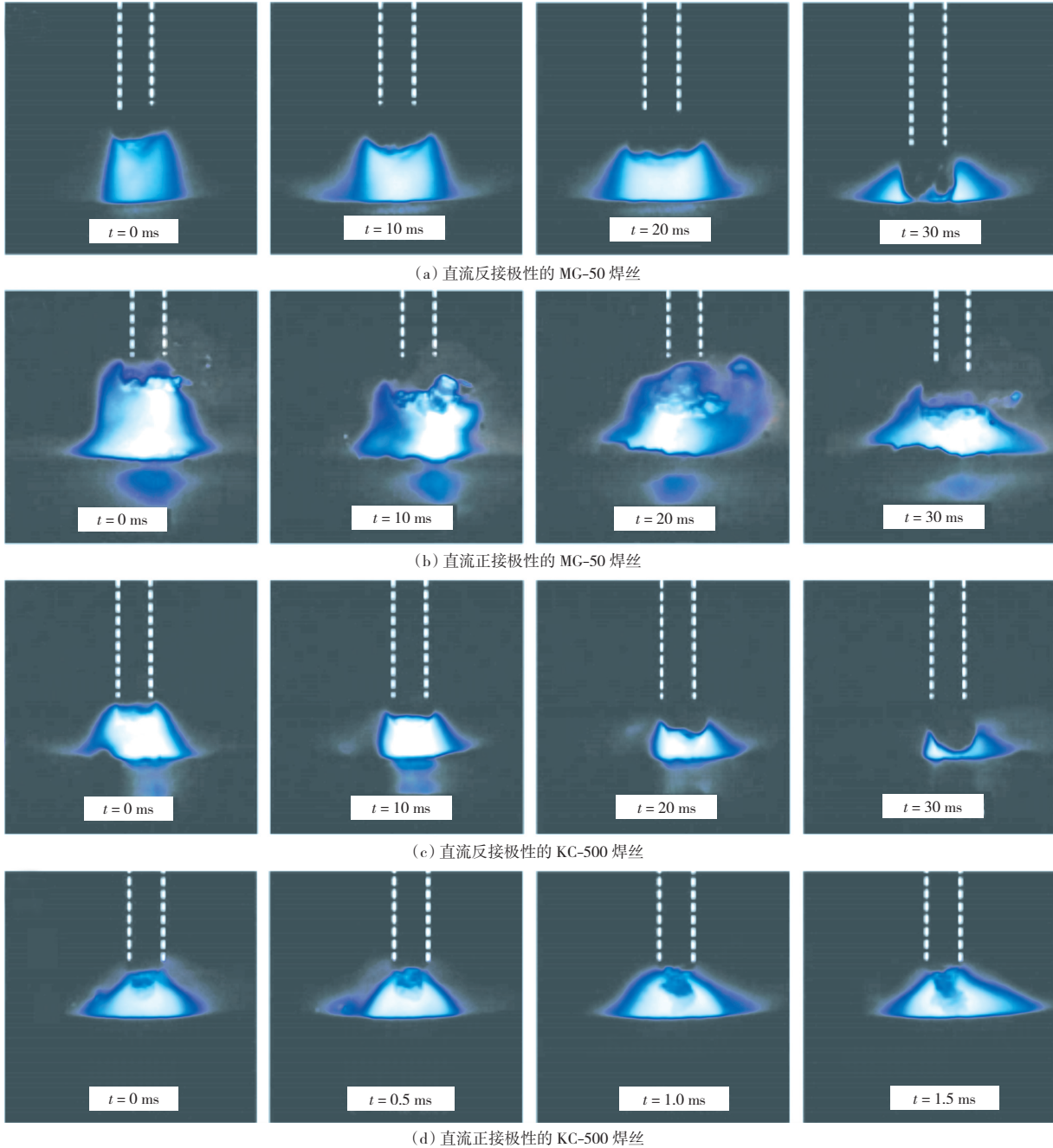


图 4 不同极性与焊丝 GMAW 的电弧外观

Fig. 4 Arc appearance of GMAW of difference welding polarity and welding wire

电弧形态的对比。可以看出,采用 MG-50 焊丝、直流反接焊接时,随保护气中 Ar 含量增加,熔滴尺寸减小,大致以 80%Ar+20%CO₂ 保护气体为界,电弧形态发生了较大变化(见图 5)。①随保护气中 Ar 含量增加,熔滴的非轴向性被逐渐减弱,当 80%

Ar+20%CO₂ 和 100%Ar 保护气体时实现了轴向喷射过渡(图 5e、图 5f)。②随保护气中 Ar 含量增加,熔滴尺寸逐渐减小,当 80%Ar+20%CO₂ 保护气体时熔滴尺寸小于焊丝直径。③随保护气中 Ar 含量增加,当 80%Ar+20%CO₂ 保护气体时,电弧

表 6 2 种焊丝纯 CO₂ 保护气体 GMAW 电弧行为及工艺质量测试结果Table 6 Test results of arc behavior and process quality in GMAW with pure CO₂ shielding gas with two kinds of welding wires

焊丝牌号	电源极性	电弧行为	熔滴过渡形态	焊接飞溅	工艺质量综评	高速图像
MG-50	DCEP 直流反接	熔滴下方电弧呈圆柱形, 阳极斑点面积小, 电弧迁移率较小, 电弧不太稳定	粗熔滴非轴向排斥过渡	飞溅较大	工艺性一般	图 4(a)
MG-50	DCEN 直流正接	熔滴下方电弧呈圆柱形, 阴极斑点面积小, 电弧迁移率大, 电弧不稳	粗熔滴非轴向排斥过渡	飞溅很大	工艺性很差	图 4(b)
KC-500	DCEP 直流反接	熔滴下方电弧呈圆柱形, 阳极斑点面积小, 电弧迁移率较小, 电弧不太稳定	粗熔滴非轴向排斥过渡	飞溅较大	工艺性与 MG-50 (EP) 接近	图 4(c)
KC-500	DCEN 直流正接	熔滴上方电弧呈圆锥形, 阴极斑点面积扩大, 电弧迁移率小, 电弧稳定	轴向喷射过渡	飞溅很小	工艺性优良	图 4(d)

外形由圆柱形变为圆锥形(图 5e)。(4)随保护气中 Ar 含量增加, 当 80%Ar+20%CO₂ 保护气体时, 电弧的部位由熔滴下方变为熔滴上方。这些变化是 Ar 保护气体等离子体特性所决定的。由于纯 Ar 气的电离能较高 (Ar 电离电位 15.7 V, Fe 的电离电位

7.9 V), 使得 Ar 气电弧等离子体的电导率较低, 随着保护气体中氩含量的增加, 阳极斑点 (附着区) 面积逐渐扩展, 电弧不仅覆盖了整个熔滴, 甚至爬升到熔滴上方, 改变了熔滴过渡的轴向性, 并在电磁力的夹持、挤压作用下, 熔滴细化, 最终导致喷射过渡。

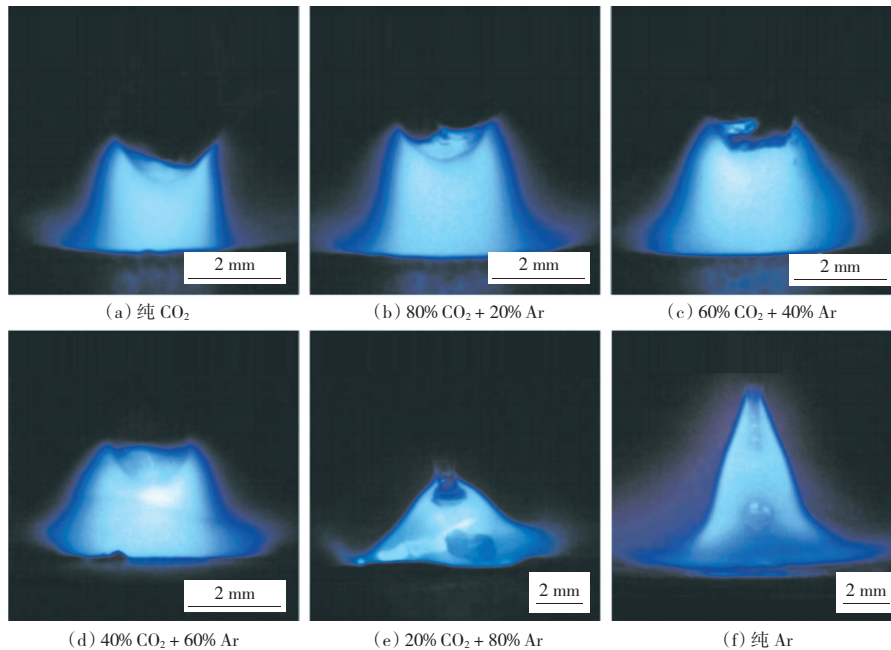


图 5 使用 YGW11MG-50、直流反接极性时不同保护气体成分 GMAW 的电弧外观

Fig. 5 Arc appearance of GMAW with different shielding gas compositions with YGW11 MG-50 and DCEP polarity

表 7 2 种焊丝不同保护气体成分时 GMAW 电弧形态对比

Table 7 Comparison of arc shape in GMAW with different shielding gas for two kinds of welding wires

焊丝	100%CO ₂ (300 A, 33 V)	80%CO ₂ +20%Ar (300 A, 33.5 V)	60%CO ₂ +40%Ar (300 A, 33.5 V)	40%CO ₂ +60%Ar (300 A, 35.3 V)	20%CO ₂ +80%Ar (270~370 A, 29~38.5 V)	100%Ar (300 A, 35.7 V)
MG-50 直流 反接	①熔滴非轴向倾向; ②熔滴直径>焊丝直径; ③圆柱形电弧; ④电弧位于熔滴下方(图 5(a))	①熔滴非轴向倾向; ②熔滴直径>焊丝直径; ③圆柱形电弧; ④电弧位于熔滴下方(图 5(b))	①熔滴非轴向倾向减弱; ②熔滴直径>焊丝直径; ③圆柱形电弧; ④电弧位于熔滴下方(图 5(c))	①熔滴非轴向倾向减弱; ②熔滴直径>焊丝直径; ③圆柱形电弧; ④电弧位于熔滴下方(图 5(d))	①熔滴轴向过渡; ②熔滴直径<焊丝直径; ③圆锥形电弧; ④电弧位于熔滴上方(大电流喷射)(图 5(e))	①熔滴轴向过渡; ②熔滴直径<焊丝直径; ③细圆锥形电弧; ④电弧位于熔滴上方(大电流喷射)(图 5(f))
KC-500 直流 正接	①熔滴轴向过渡; ②熔滴直径<焊丝直径; ③圆锥形电弧; ④电弧位于熔滴上方(喷射)(图 6(a))	①熔滴轴向过渡; ②熔滴直径<焊丝直径; ③圆锥形电弧; ④电弧位于熔滴上方(喷射)(图 6(b))	①熔滴轴向过渡; ②熔滴直径<焊丝直径; ③圆锥形电弧; ④电弧位于熔滴上方(喷射)(图 6(c))	①熔滴轴向过渡; ②熔滴直径>焊丝直径; ③圆锥形电弧; ④电弧位于熔滴上方(滴状)(图 6(d))	①熔滴轴向过渡; ②熔滴直径>焊丝直径; ③圆锥形电弧; ④电弧位于熔滴上方(滴状)(图 6(e))	①熔滴轴向过渡; ②熔滴直径>焊丝直径; ③圆锥形变异电弧; ④电弧位于熔滴上方(疑似双层电弧)(滴状)(图 6(f))

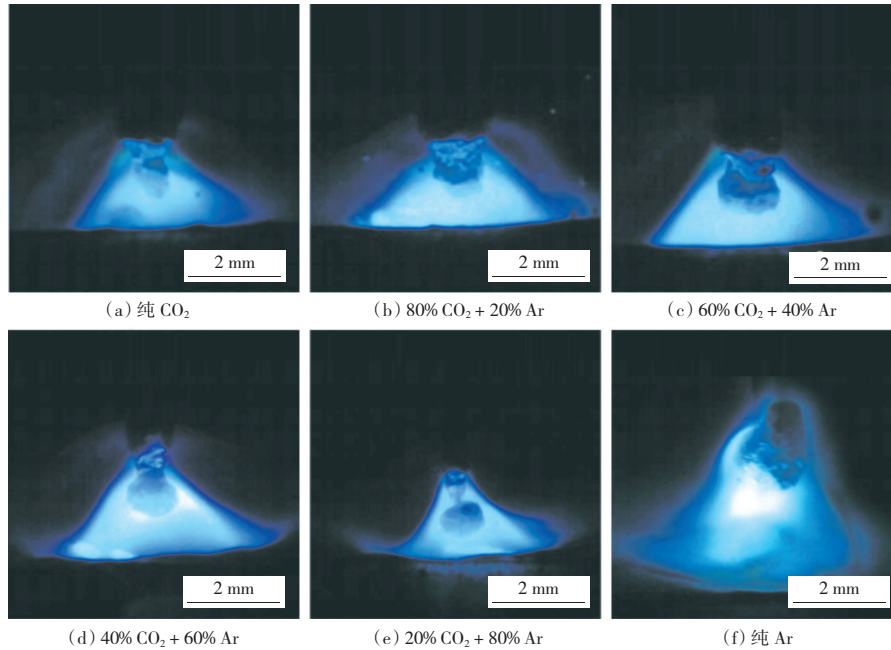


图 6 使用 YGW11KC-500、直流正接极性时,不同保护气体成分的 GMAW 电弧外观

Fig. 6 Arc appearance of GMAW with difference shielding gas compositions with YGW11 KC-500 and DCEN polarity

采用 KC-500 焊丝、直流正接焊接时,随保护气中 Ar 含量增加,熔滴尺寸增大,大致以 60% Ar + 40% CO₂ 保护气体为界,电弧形态发生了较大变化(见图 6). ①保护气中 Ar 含量小于或等于 40% 时,电弧呈圆锥形,位于熔滴上方;以轴向过渡的熔滴尺寸小于焊丝直径,熔滴呈喷射过渡形态(见图 6a、b、c). ②保护气中 Ar 含量等于或大于 60% 时,虽然电弧外观仍为圆锥形,电弧仍位于熔滴上方,但熔滴的轴向过渡在减弱,纯 Ar 保护气时表现出了非轴向倾向,而且熔滴尺寸大于焊丝直径,熔滴呈滴状过渡形态(见图 6d、e、f). 前者(保护气中 Ar 含量小于或等于 40% 时),熔滴呈喷射过渡形态,是由于填充焊丝中 REM 元素的电子逸出功较低(约为 3 V),使电子发射更有效,稳定电弧—阴极连接区域,电弧导电通路爬升至熔滴上方所致. 后者(保护气中 Ar 含量等于或大于 60% 时),熔滴呈滴状过渡形态,则是由于阴极斑点快速移动使电弧飘逸不定,以及该处许多复杂反应的结果^[1].

4.2 焊丝化学成分对电弧形态的影响

表 8^[8]列出了 2 种不同成分焊丝(表 9)采用表 10 焊接规范进行的焊丝与极性组合对电弧稳定性的影响测试结果. 可以看出,直流反接时,不含稀土金属焊丝的电弧属于正常电弧形态,其阳极斑点面积小,活动性不剧烈;含有稀土金属焊丝的电弧属于差评电弧形态,其阳极斑点面积有所扩展,电弧飘移不定. 直流正接时,不含稀土金属焊丝的电弧属于

差评电弧形态,其阳极斑点面积小,飘移不定;含有稀土金属焊丝的电弧属于良好电弧形态,其阴极斑点面积扩展,爬升至熔滴上方,稳定不飘移.

图 7 是飞溅发生率与焊丝中稀土金属含量的关系^[8]. 可以看出,鉴于使用不含 REM 的 W0 焊丝直流反接产生的飞溅为 0.058 g/s,而使用含有 330×10^{-6} (质量分数) REM 焊丝直流反接产生的飞溅是 0.127 g/s,大约为 W0 焊丝两倍. 使用直流正接,通过添加 REM 有稳定电弧的趋势,不含 REM 焊丝 W0 的飞溅产生为 0.072 g/s,但飞溅随着 REM 含量的增加而降低,因此当 REM 含量为 140×10^{-6} (质量分数)时飞溅产生为 0.042 g/s,当 REM 含量

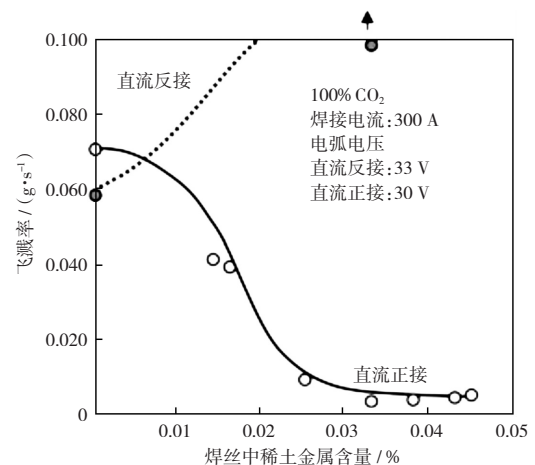


图 7 飞溅发生率与焊丝中稀土金属含量的关系

Fig. 7 Relationship between spatter generation and amount of REM in welding wire

为 250×10^{-6} (质量分数) 时飞溅产生为 0.010 g/s , 当 REM 含量为 $(330 \sim 450) \times 10^{-6}$ (质量分数) 时飞溅产生为 $0.005 \sim 0.007 \text{ g/s}$.

直流反接时, 使用 REM 含量为 330×10^{-6} (质量分数) 的焊丝 (W5) 在 CO₂ 电弧焊过程中产生的飞溅增加到 0.127 g/s , 大约是使用不含 REM 的焊丝 (W0) 时的两倍, 但使用直流正接时它明显降低到 0.005 g/s . 特别是, 当使用不含 REM 的 W0 焊丝以直流反接极性使用时, 粒度为 0.5 mm 或更大的飞溅比例为 85% , 而使用直流正接极性时这一比例迅速下降至 5% .

从这些发现可以清楚看出, 用直流反接极性进行 CO₂ 电弧焊时, 焊接电弧变得不稳定, 因为电弧拉长导致电弧角度变化, 飞溅趋于增加, 但使用添加了 REM 的焊丝直流正接极性的 CO₂ 电弧焊实现了相当 MAG (Ar-20% CO₂) 焊接期间的细粒飞溅 (飞溅非常轻微).

图 7 所示的飞溅发生率与焊丝中稀土金属含量的关系, 很大程度上反映了焊丝中稀土金属含量与电弧形态之间的关系。①不含稀土金属的 W0 焊丝直流正接时的飞溅率比反接时高, 这是正接时斑点压力比反接时大, 电弧飘移不稳, 致使熔滴的非轴向倾向大的结果。②含有 330×10^{-6} (质量分数) 稀土金属的焊丝 (W5) 以直流反接进行 CO₂ 电弧焊时, 焊接飞溅为 0.127 g/s , 是不含稀土金属的焊丝

(W0) 以直流反接进行 CO₂ 电弧焊时焊接飞溅 0.058 g/s 的两倍, 这是 W5 焊丝阴极斑点面积小, 电弧未爬升至熔滴上方 (图 8c), 电弧不稳定所致。③直流正接时, 随焊丝中稀土金属含量增加, 飞溅率明显下降; 而直流反接时, 随焊丝中稀土金属含量增加, 飞溅陡升。这是焊接电弧形态变化的反映。直流正接时, 含有稀土金属焊丝的电弧扩展 (电弧爬升) 行为相当于富氩混合气体 ($80\% \text{ Ar} + 20\% \text{ CO}_2$) 的电弧特性, 飞溅明显降低。直流反接时, 没有焊丝尖端的电弧扩展 (电弧爬升) 行为, 电弧不稳, 飞溅增大。至于直流反接 W0 焊丝的大颗粒飞溅比例为 85% , 而使用直流正接极性时这一比例迅速下降至 5% 文献尚未给出合理解释。

表 8 焊丝与极性组合对电弧稳定性的影响

Table 8 Effect of welding wire and polarity combination on arc stability

电源极性	焊丝	
	Si—Mn—Ti	Si—Mn—Ti—REM
直流反接	正常 (阳极斑点面积小, 活动性不剧烈)	差 (阳极斑点面积扩展, 飘移不定)
直流正接	差 (阴极斑点面积小, 飘移不定)	良好 (阴极斑点面积扩展, 爬升至熔滴上方, 稳定不飘移)

表 9 焊丝的化学成分 (质量分数)

Table 9 Chemical composition of welding wire (mass fraction)

焊丝	C	Si	Mn	P	S	Ti	REM	Ca
W0	0.048	0.70	1.65	0.010	0.010	0.19	—	0.000 4
W5	0.032	0.71	1.72	0.012	0.009	0.18	0.033	0.000 2

表 10 焊接条件

Table 10 Welding conditions

电源极性	焊丝直径 ϕ/mm	焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	保护气体	气体流量 $Q/$ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	干伸长 L_e/mm
直流反接	1.2	300	33	6.67	$100\% \text{ CO}_2$	20	20
直流正接	1.2	300	30	6.67	$100\% \text{ CO}_2$	20	20

4.3 稀土金属改变 GMAW 熔滴过渡形态机理

从表 11 可以看出, ①采用 MG-50 焊丝、无论正反极性焊接时, 阳极或阴极斑点面积小, 导电通路集中在悬垂熔滴底部电弧轴上, 电磁力 F_{em} 轴向分量方向朝上, 阻碍熔滴过渡, 致使熔滴呈非轴向排斥滴状过渡。②采用加有稀土金属的 KC-500 焊丝、反极性焊接时, 阳极斑点面积略微变宽, 但导电通路依然集中在悬垂熔滴底部电弧轴上, 电磁力 F_{em} 轴向分量方向仍朝上, 阻碍熔滴过渡, 致使熔滴呈非轴向排斥滴状过渡。③采用加有稀土金属的 KC-500 焊丝、正极性焊接时, 阴极斑点面积扩展 (爬升), 导电通路向上爬升至熔滴上方, 电磁力 F_{em} 轴向分量方向朝下, 促进熔滴过渡, 最终实现了轴向喷射过渡。

可以从以下 3 方面分析稀土金属改变 GMAW 熔滴过渡形态机理。

电弧氛围的变化。含有稀土金属的焊丝会降低阴极电子的逸出功, 表面金属熔滴具有最高的平均温度, 可以实现大电流密度热电子发射过程。同时高的电磁力或洛伦兹力可以在弧轴上产生强大的等离子体射流 (图 8(d)). 这些强大的等离子体射流可以在弧柱中产生 Fe 蒸气和 CO₂ 等离子体的分离。由于电弧等离子体由 2 层结构组成, 即远离电弧轴区域的 CO₂ 等离子体高温区和电弧轴区域的 Fe 等离子体低温区。最高电导率位于远离弧轴区域的 CO₂ 等离子体处, 并且电流在远离弧轴的区域通过电弧。高的电磁力可以挤压或夹持金属熔滴以更小

的尺寸轴向过渡^[1]。该效应相当于电弧氛围的改变,满足了 GMAW 喷射过渡形成 3 要素之保护气

体氛围条件^[6]。

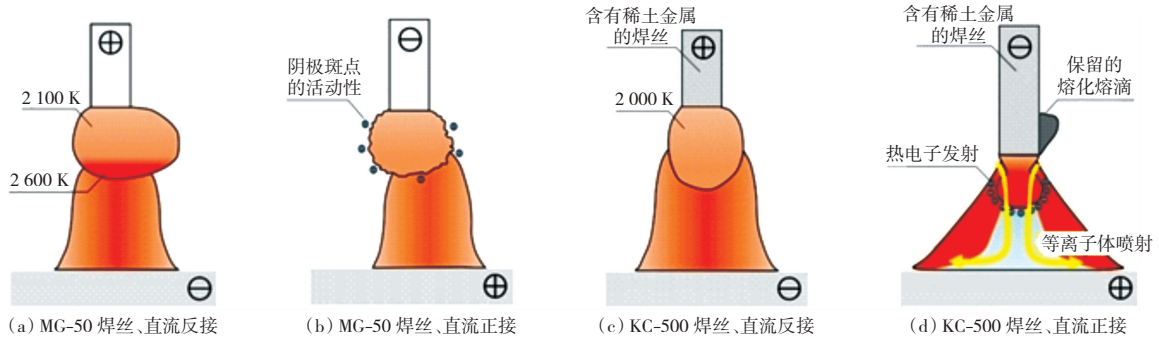


图 8 使用纯 CO₂ 保护气体 GMAW 等离子体特性与金属熔滴行为关系示意图

Fig. 8 Schematic illustration of the relationship of the plasma characteristic and metal droplet behavior in GMAW with pure CO₂ shielding gas

表 11 稀土金属改变熔滴过渡形态机理

Table 11 Mechanism of rare earth metals changing droplet transfer mode

焊丝	电源极性	电弧等离子体组成	极点面积变化	导电通路部位	电磁力 F_{em} 及其方向	熔滴尺寸及过渡频率	熔滴过渡形态
MG-50 (无稀土金属)	直流反接 DCEP	CO ₂ 等离子体和铁等离子体组成	阳极斑点面积小,集中在电弧轴附近	集中在悬垂熔滴底部电弧轴上通过电弧等离子体	电磁力 F_{em} 轴向分量方向朝上,阻碍熔滴过渡	熔滴粗大、过渡频率低	非轴向排斥滴状过渡(图 8(a))
	直流正接 DCEN	CO ₂ 等离子体和铁等离子体组成	阴极斑点面积小,且活动、飘移不稳定	集中在悬垂熔滴底部电弧轴上通过电弧等离子体	电磁力 F_{em} 轴向分量方向朝上,阻碍熔滴过渡	熔滴粗大、过渡频率低	非轴向排斥滴状过渡(图 8(b))
KC-500 (加稀土金属)	直流反接 DCEP	CO ₂ 等离子体和铁等离子体组成	阳极斑点面积略宽,仍集中在电弧轴附近	集中在悬垂熔滴底部电弧轴上通过电弧等离子体	电磁力 F_{em} 轴向分量方向朝上,阻碍熔滴过渡	熔滴粗大、过渡频率低	非轴向排斥滴状过渡(图 8(c))
	直流正接 DCEN	CO ₂ 等离子体和铁等离子体组成	阴极斑点面积扩展(爬升)	在悬垂熔滴附近向上方扩展,然后通过电弧等离子体	电磁力 F_{em} 轴向分量方向朝下,促进熔滴过渡	熔滴细小、过渡频率高	轴向喷射过渡(图 8(d))

作用在熔滴上力的变化。由于稀土金属的电子逸出功较低,阴极斑点面积扩展,电弧氛围发生了质的变化。随之,作用在熔滴上的力也发生了变化。除了熔滴的表面张力 F_s 和气体排斥力 F_g 是熔滴过渡的阻力之外,其余的如电磁力 F_{em} 、等离子体流力 F_d 、斑点压力 F_b ,甚至熔滴重力 F_g 均为熔滴过渡的驱动力,满足了电磁力作用方向向下的条件^[6]。

转变电流。由于稀土金属致使电弧中的导电通路爬升,作用在熔滴上的主导力呈现有利熔滴过渡的方向,熔滴被细化;随焊接电流增大,必然会出现熔滴直径小于焊丝直径的“转变电流”,满足了实现喷射过渡所需的存在转变电流条件^[6]。

5 含有稀土金属焊丝纯 CO₂ 保护气体 GMAW 在新型电源中的应用

文献[9]开发了一种被称之为“J-STAR® welding”的焊接方法。“J-STAR® welding”是在纯 CO₂ 气体保护 GMAW 中使用含有稀土元素的焊丝,以直流正接性进行的、具有能在焊丝端形成圆锥形电

弧特征的焊接方法。当焊接电流大于 250 A 时实现了熔滴的喷射过渡形态;当焊接电流小于 200 A 时,应用电流的波形控制新电源,实现了周期性短路过渡,其飞溅减少到传统 CO₂ 焊接的 10% 以下。

图 9 是该工艺方法焊接电流与飞溅产生的关系^[9]。可以看出,焊接电流大于 250 A 时,熔滴为喷射过渡形态,飞溅很小(图中未标出试验数据点)。焊接电流小于 200 A 时,电流的波形控制大幅减少了飞溅的形成($I=200$ A 时,飞溅产生速率约为 0.5 g/min)。

图 10 是该工艺飞溅数量与飞溅颗粒直径分布^[9]。可以看出,如果以传统 CO₂ 气体保护焊接的(160 A、18 V、60 cm/min、直流反接)飞溅为 100%,其中,大颗粒(直径>0.85 mm)约占 38%,中等颗粒(直径 0.5~0.85 mm)约占 18%,细颗粒(<0.5 mm)约占 44%。含有稀土元素焊丝 J-STAR® 焊接的(260 A、27 V、155 cm/min、无波形控制)总飞溅约为传统 CO₂ 气体保护焊接的 49%,其中,大颗粒约占总飞溅的 50%,细颗粒约占总飞溅的 47%。含

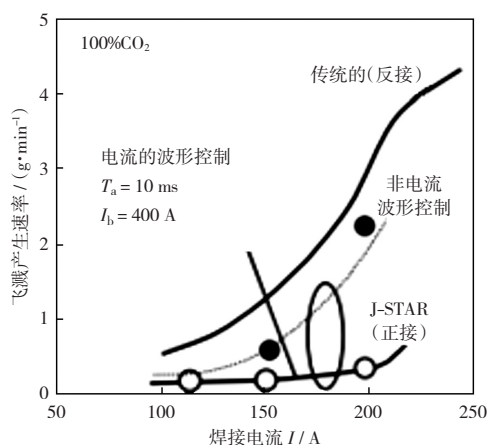


图9 焊接电流与飞溅产生的关系

Fig. 9 Relationship between welding current and spatter generation

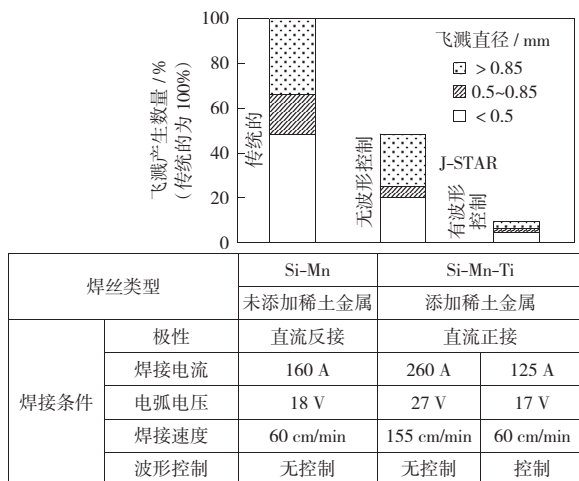


图10 飞溅颗粒直径和出现数量

Fig. 10 Spatter particle diameter and amount of emergence

有稀土元素、波形控制焊丝 J-STAR®焊接的(125 A、17 V、60 cm/min、波形控制)总飞溅约为传统 CO₂ 气体保护焊接的 10% 不到。

J-STAR® welding 的核心技术是小电流时的波形控制新电源,对于大电流时熔滴的喷射过渡形态的实现则是含有稀土元素焊丝所作的贡献。含有稀土元素焊丝在电流的波形控制新型电源中的应用,使 J-STAR® welding 方法在一个较宽电流范围内实现了超低飞溅,拓宽了该工艺的应用范围。

6 结论

1) 纯 CO₂ 保护气体焊熔滴过渡可归纳为 3 大特点:①弧根面积小,电弧集中;②大熔滴非轴向排斥过渡;③氧化性电弧,焊接飞溅大。

2) GMAW 喷射过渡的实现取决于 3 个要素:①富氩混合保护气体;②电磁力作用方向向下;③焊接电流等于或大于转变电流。①是必要条件,②和③是充分条件。三者缺一不可。

3) 含稀土金属的焊丝以正极性纯 CO₂ 气体保护焊时,由于电弧中阴极斑点面积扩大,被细化的熔滴呈轴向喷射过渡,飞溅很小,工艺性优良。

4) 稀土金属降低了阴极电子逸出功,同时高的电磁夹持力使熔滴以更小的尺寸轴向过渡,还有作用在熔滴上的主导力方向有利熔滴过渡,最终在纯 CO₂ 保护气下完全满足了熔滴喷射过渡形成条件。

5) 含有稀土元素焊丝在电流波形控制新型电源中的应用,使 J-STAR®焊接方法在一个较宽电流范围内实现了超低飞溅,拓宽了该工艺的应用范围。

参考文献:

- [1] METHONG T. Influence of rare earth metal added to electrode on plasma characteristics in gas metal arc welding[D]. Osaka: Osaka University, 2018.
- [2] SUMI H, KATAOKA T, KITANI Y. Application of narrow gap welding process with "J-STARTM welding" to shipbuilding and construction[J]. JFE Technical Report, 2014, 34(8): 44-49.
- [3] KATAOKA T, IKEDA R, YASUDA K. Influence of minor elements in electrode wire on spattering phenomena in CO₂ gas shielded arc welding[J]. Journal of the Japan Welding Society, 2007, 25(3): 410-415.
- [4] PRIMO J. Gas metal arc welding—GMAW best practices [EB/OL]. <https://www.pdionline.com/courses/m415/m415content>.
- [5] CHAUDHARY K. A study on metal transfer mechanism in gas metal arc welding[J]. International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology, 2017, 3(8): 82-93.
- [6] 孙威. GMAW 熔滴喷射过渡形态与保护气体的关系[J]. 电焊机, 2018, 48(9): 8-15.
- [7] YELISTRATOV A. Exploring the forces that shape droplets during gas metal arc welding[J]. Welding Journal, 2013, 92(5): 48-52.

-
- [8] KATAOKA T, IKEDA R, ONO M, et al. Effect of REM addition of wire on CO₂ gas shielded arc phenomenon[J]. *Welding International*, 2009, 23(7): 517-522.
- [9] KATAOKA T, IKEDA R, YASUDA K. Development of ultra-low spatter CO₂ gas-shielded arc welding process “J-STAR[®] Welding”[R]. Tokyo, Japan: JFE Steel Corporation, 2007: 31-34.

(编辑: 杨 鹏)