

电 磁 作 用 焊 接 技 术

[苏] M. A. 阿勃拉洛夫 著
P. Y. 阿勃杜拉赫曼诺夫

韦福水 路登平 译
霍立兴 校

本专著介绍了利用外磁场控制电弧的可能性和它对结晶温度条件改变的影响,提出了在外磁场作用下焊缝一次组织细化的机理以及装置和电磁线圈的安置方法,阐明了对焊缝金属组织的要求。

本书可供焊接、冶金、机械行业的科技人员以及有关专业的研究生和大学生参考。

СВАРКА
С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ
М. А. АБРАЛОВ, Р. У. АБДУРАХМАНОВ

ТАШКЕНТ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ФАН» УЗССР

1984

电磁作用焊接技术

[苏] **М. А. 阿勃拉洛夫** 著
Р. У. 阿勃杜拉赫曼诺夫
韦福水 路登平 译
霍立兴 校

责任编辑: 方婉莹 武江
封面设计: 王伦

机械工业出版社出版 (北京阜成门内百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京龙华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经营

开本 850×1168¹/32·印张 4 5/8·字数 113千字

1988年6月北京第一版·1988年6月北京第一次印刷

印数 0,001—6,700 ·定价: 2.15元

ISBN 7-111-00667-4/TG·164

目 录

译者的话

符号名称对照表

绪论

(1)

第一章 外磁场与电弧、焊丝金属、焊接熔池熔体的相互作用 (3)

第一节 焊接采用的磁场类型 (3)

第二节 电弧放电和焊丝金属过渡的特点 (5)

第三节 焊接熔池液态金属运动的特点 (13)

第四节 焊接熔池熔体的温度状态 (18)

第二章 在外磁场作用下焊缝的一次结晶过程 (20)

第一节 焊接熔池金属一次结晶的特点 (20)

第二节 结晶前沿的结构和它的运动特点 (26)

第三节 等轴晶和柱状晶的形成 (40)

第四节 一次晶粒的内部结构 (50)

第五节 焊缝的化学不均匀性 (54)

第六节 对焊缝金属组织的要求和外磁场对其作用的可能性 (58)

第三章 在外磁场作用下,二次晶界的形成和多晶形转变 (60)

第一节 铸态金属和合金中的二次晶界 (60)

第二节 二次晶界形成的特点 (63)

第三节 金属和合金中的多晶形转变 (81)

第四节 焊接情况下多晶形转变的特点 (82)

第四章 电磁作用对焊缝缺陷和焊接接头物理-化学性能的影响 (89)

第一节 气孔的产生 (89)

第二节 热裂纹的萌生和扩展 (97)

第三节 冷裂纹的产生和延迟断裂 (105)

第四节 非金属夹杂物的污染 (106)

VI

第五节	焊缝和接头金属的机械性能和耐蚀性	(108)
第五章	电磁作用焊接的设备 和 工艺	(115)
第一节	电磁作用装置	(115)
第二节	氩弧焊时电磁作用参数的选择	(125)
参考文献		(128)
附录	本书中的部分苏联钢号与相同的或相近的中国钢号 对照表	(136)

绪 论

在第十一个五年计划中,拟定要加速科学技术进步,把经济纳入高速发展的轨道,更合理地利用国家的生产潜力,全面节约各种各样的资源和改善工作质量。

不发展和完善一系列生产,其中包括应能保证运用新的工艺过程、现代结构和焊接材料来保证快速发展焊接结构专业化生产能力的焊接生产,要加速科学技术的进步是不可思议的。

某些现代结构材料,象铁镍合金、钛合金、铝合金、铁素体和奥氏体类型的高合金钢以及其它这样一些材料,其可焊性欠佳,这导致它们的焊接工艺复杂化,并对焊接结构的可靠性和寿命产生不利的影响。

改善焊缝金属一次组织是提高焊接接头质量的途径之一。现有的改善一次组织的方法可以分为三类。与调节焊接热循环和焊接熔池形状有关的方法属于第一类。人为地加快焊接熔池的冷却速度或减小其体积,能够细化焊缝金属的柱状组织。改变熔池形状能保证有利的结晶方式。第二类包括与冶金作用和改变焊缝金属化学成分有关的方法。象合金化、微合金化、变质处理和精炼等这样一些方法,可归为这一类。与对焊接熔池熔化金属施加外加作用的有关方法,例如机械振动、超声波振动和磁场等方法,列为第三类。

选择控制一次组织的方法,取决于焊接方法、接头材料的成分、产品的结构特征、与此相关的诸因素等等。

用外磁场对熔池熔体施加作用是控制焊缝金属一次组织的较新方法之一。外磁场作用或电磁作用是比焊接文献中流行的电磁搅拌概念更为广义。电磁搅拌,它是电磁作用的效果之一。改变电弧形态和活性斑点^①以及焊丝金属过渡特性等,是电磁作用的

① 正极性焊接时,工件上的活性斑点即为阳极斑点。——译者注

另外一些效果。众所周知，在没有搅拌时，也会产生金属组织的细化。在盛钢桶中熔体的电磁加工，液态金属沿通有外部磁场的沟槽中流动，或钢锭模中的熔化加工，就是这方面的例子。

熔化焊时采取的电磁作用，与象焊接工件机械振动和焊接熔池熔化金属超声波加工这样一些外部作用的方法相比较，借助于少量辅助器具就能保证焊接过程为无噪声和振动的非接触控制，并明显地减少了电能的需求量。

近年来的研究，不仅在冶金、焊接生产和铸造生产中，而且也在象热能、农业、微生物学、医学、化工生产等一些部门中，显示出应用磁场的前景。尽管磁场应用具有广泛性，但是对它的作用机理，人们尚没有彻底理解。当然，电磁对焊缝金属组织形成过程的作用机理也不例外。这使得在由各种结构材料制造焊接产品时，广泛采用电磁作用的焊接工艺造成困难。

本书总结和概括了现有的文献资料以及近年来作者本人完成的研究成果。我们的目的不是收集电磁作用的全部现有资料，而仅仅是阐明了这些方法在控制焊缝金属组织形成过程和提高焊接接头质量方面的可能性。如果能为读者构出在焊接条件下电磁作用的完整概念，那末我们将认为达到了自己的目的。

第一章 外磁场与电弧、焊丝金属、 焊接熔池熔体的相互作用

第一节 焊接采用的磁场类型

把电磁作用理解为是，进行电弧放电的条件、焊丝金属过渡特性和焊接熔池金属一次结晶条件的变化过程。焊接条件下的外磁场由螺线管和电磁线圈形成。依据其对电弧轴线的相对位置，能够获得各种类型的外磁场，纵向的和横向的。纵向磁场的磁力线平行于焊接电弧轴线；而横向磁场的磁力线则与其垂直。在焊接条件下，要获得接近理想的纵向和横向磁场实际上是困难的，要获得均匀的磁场就更加困难。对控制焊接电弧和焊缝金属成型来说，横向磁场具有最大的可能性。而对控制焊缝金属一次结晶过程来说，纵向磁场则具有最大的可能性。

为了建立纵向磁场，通常采用一个电磁线圈（螺线管），很少采用二个、三个或四个。在采用一个电磁线圈时，将其安置在焊枪喷嘴上，或安置在焊枪喷嘴附近的焊接熔池表面上方。在按上述方式安置电磁线圈时，磁场对电弧过程行为施以最大的作用和对改变焊接熔池熔化金属的运动和焊缝金属一次结晶过程施以最小的作用 [129、130]。

为了有效地控制一次结晶过程，我们研制了一种焊接条件下的电磁作用新方法 [22]。这种方法是把电磁线圈安置在焊缝的背面。采用这种装置时，电磁场对焊接熔池金属的作用强度较大，而对电弧放电的作用强度较弱，这是因为在该情况下，电磁线圈距熔体比与电弧的距离更近^①。

① 原著为：“熔体距电磁线圈比与电弧距离更近。”这不确切。——译者注

采用两个线圈时，其中之一可安置在焊枪喷嘴上方，而另一个则可相对于第一个线圈同轴地或稍许偏移地安置在焊缝根部一侧。在该种情况下，提高了外磁场的均匀性。电弧焊时几种可行的电磁线圈安置方法如图1所示。

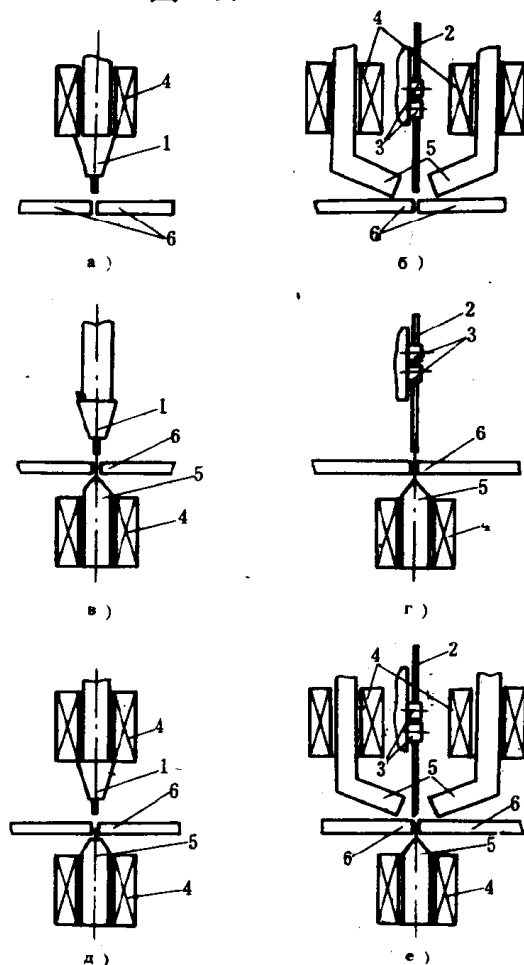


图1 焊接用外磁场线圈的安装

а、б—线圈安装在焊接接头的上方

б、г—线圈安装在焊接接头的下方

д、е—在焊接接头的上下方都安装线圈

1—焊枪喷嘴 2—焊丝 3—送丝导电轮 4—电磁线圈

5—线圈铁芯 6—焊接工件

根据供给线圈电流的种类, 可得到各种不同类型的磁场: 恒定的、正弦变化的或其它形式的。

第二节 电弧放电和焊丝金属过渡的特点

外磁场与等离子体和电弧自身磁场要发生相互作用。在磁场中等离子体的作用与抗磁物质一样 [27]。在均匀的横向磁场中, 带电粒子沿圆形轨迹运动, 它的半径称为拉尔曼罗夫斯基(ЛЯР-МОРОВСКИЙ)半径。电子和质子的拉尔曼罗夫斯基半径(r_e 和 r_p), 可按下列公式计算 [27]:

$$r_e = \frac{3.4\sqrt{W}}{H} \quad \text{和} \quad r_p = \frac{143\sqrt{W}}{H} \quad (1)$$

式中 W ——带电粒子的能量 (eV);

H ——磁场强度 ($O_e^\ominus$)。

在非均匀磁场中, 带电粒子在垂直于磁场强度矢量的平面内漂移。当具有方向一致的电场和磁场存在时, 带电粒子沿螺旋线轨迹运动, 其轴线平行于磁场强度矢量。在交叉的电、磁场中, 带电粒子沿摆线和次摆线的轨迹运动。

在横向磁场中, 焊接电弧本身成为在电动力作用下偏向一侧的柔性导体。如果使横向磁场作用在直流电弧上, 那末电弧就会摆动。依据文献 [85], 电弧摆动的幅度与磁场的频率成反比关系。

当给电弧施加纵向磁场时, 电弧围绕自己的轴线进行旋转 [44]。旋转的方向与电流的种类和极性无关, 而是由磁力线的方向确定。这与纵向外磁场和弧柱中的与电流种类、极性无关的由浓度梯度引起的扩散所产生径向迁移的带电粒子之间的相互作用有关。纵向外磁场赋予焊接电弧大的刚性和稳定性, 并由于磁压增高的结果, 提高了弧柱中心的温度 [131]。更全面的分析表明 [44], 当施加外磁场时, 能产生三种形式的特征电弧: а) 围绕轴线旋转; б) 具有均匀空心锥体形式的锥柱形; в) 其柱体在旋转时描绘出锥形表面的锥体。

$\ominus 1 O_e = (1000/4\pi) A/m$

除了其它原因之外，电弧放电行为特征的改变导致焊缝金属成型和它的几何尺寸的变化。而许多实验研究资料常常提供截然相反的外磁场影响的结果和焊缝几何尺寸。文献 [24] 的作者在给电弧施加交变横向磁场时，得到的是焊缝熔宽增加和熔深减小；而文献 [44] 的作者在给电弧施加恒定的横向磁场情况下，观测到了焊缝熔深和熔宽同时减小的结果。文献 [44] 指出，在纵向磁场中，随着磁场强度增强，熔深增大。文献 [82] 发现，在增大外部纵向磁场的磁感应强度时，熔深减小。

考虑到缺乏关于外磁场对电弧燃烧过程和焊缝金属成型影响的统一见解，我们进行了有关粗丝埋弧自动焊 [18]、细丝二氧化碳气体保护焊 [19] 和非熔化极（钨极）氩弧焊 [12] 的专门研究。焊接电弧由直流电源和交流电源供电。埋弧焊在由 ТСД-1000-3 型弧焊变压器和 ВС-600 型整流设备供电的 АБС 型自动焊接装置上进行；二氧化碳气体保护焊在由 ВС-300 型整流设备和 ПСГ-500 型变流器供电的 АДПТ-500 型自动焊机上进行；氩弧焊在由 ИПК-350-4 型焊接装置以及由 ВД-302 型焊接整流设备以反极性供电的 АДФ-500 型自动焊机上进行。实验在 СТЗ 低碳钢、12Х18Н10Т 不锈钢、1420 和 АМГ 6 及 АМЦ 铝合金上进行。纵向磁场由安置在焊缝根部一侧的电磁线圈造成。

氩弧焊的焊缝熔宽和熔深的变化与埋弧自动焊的结果（见表）基本一致。作为例子，在图 2 中示出了具有脉冲交变纵向外磁场作用的 ИПК-350-4 型电源供电的钨极氩弧焊时，1420 铝合金焊缝几何尺寸变化曲线。

正如所进行的研究表明那样，在电磁作用下，焊缝的熔宽和熔深能够减小和增大以及变化不大。焊缝的几何尺寸取决于焊接电流的种类、焊接方法、外磁场的种类和形式。

在电磁作用下，焊缝熔宽和熔深的改变证明了电弧燃烧的变化。对在二氧化碳和氩气中的电弧放电进行直接观察，可得出如下结论：

- 1) 直流电流焊接时，在横向恒定的磁场中，弧柱产生偏移，

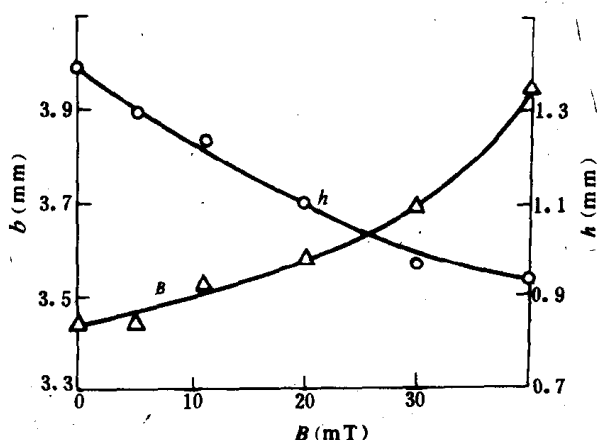


图2 1420铝合金焊接时,电磁作用对焊缝熔宽(b)和熔深(h)的影响 ($t_n = 50\text{ms}$, $t_n = 180\text{ms}$)

焊接规范 $I_{CB} = 100\text{A}$, $U_g = 9\text{V}$, $V_{CB} = 21.7\text{m/h}$

定。在直流电流焊接和交变磁场(或者相反)的情况下,电弧和工件上的活性斑点会摆动。摆动的频率取决于磁场或焊接电流的频率。在交流焊接和交变磁场的情况下,弧柱和加热斑点的偏移取决于焊接电流曲线和磁感应强度曲线之间的相位移。

2) 在纵向磁场中,弧柱和加热斑点发生转动。弧柱在二氧化碳气体介质中略有压缩,而在氩气介质中则扩张。加热斑点在氩气中同样也发生扩张。在焊接电流和磁场都处于交变的情况下,前述的弧柱和加热斑点结构的变化具有周期性的特点。同样也观察到了电弧电参数的变化,在纵向磁场中,其电弧电压的变化可达 $2 \sim 3\text{V}$;而在横向磁场中,则可达到 $5 \sim 8\text{V}$ 。显然,除了其它原因之外,电压的变化与电弧在偏移和转动时的长度增加有关。此时,不仅电弧电压,而且焊接电流也应变化。分析一下各种焊接方法(各种电弧静态伏-安特性)和各种电源伏-安外特性的弧长与电弧电压和电流的关系,可以得出如下结论:弧长增加时,焊接电流始终减小,而电弧电压则可增加(在陡降电源外特性时)、不变(在水平电源外特性时)或者减小(在上升电源外

特性时)。电压变化值与弧长改变值有关,而焊接电流的变化值,除此之外,还与电源外特性的陡度有关。

焊接电流减小和其中包括氩弧焊在内所观测到的加热斑点沿熔池表面的扩张,导致电弧气动压力的降低。

电弧的气动压力可按式[⊖]计算^[139]：

$$P_r = 10^{-7} \frac{I^2}{\pi r_s^2} \left(1 - \frac{r^2}{r_s^2} \right) \quad (2)$$

式中 P_r ——盈余的电弧气动压力;

I ——电弧电流;

r_s ——活性斑点半径;

r ——从活性斑点中心到需测压力点面积的距离。

因为在公式(2)中电弧电流和活性斑点半径均是平方值,所以甚至在电流减小和活性斑点半径增加都不大时,就会导致电弧气动压力的明显降低。最终无论是电弧电流减小,还是加热能量分散,都是导致电磁作用焊接时熔深减小的原因。

在熔化极焊接时,除了高电离气体(等离子体)外,弧柱中还存在着焊丝金属熔滴。外磁场作用于电弧时,就应对电弧中的金属过渡产生影响。为了研究纵向外磁场对电弧中金属过渡特性的作用,曾用СКС-1М型摄影机高速拍摄了用直径为1.6mm的СВО8Х19Н10Б焊丝焊接12Х18Н10Т不锈钢时的二氧化碳介质中的电弧燃烧过程。摄影速度为每秒钟536帧。

金属熔滴形成和脱落连续过程(图3和图4)的分析表明,在电磁作用的条件下,与纵向磁场的种类无关,熔滴尺寸和它们在焊丝端部的存在时间平均减小了三分之一至二分之一。这同样地导致了熔滴经过电弧区的过渡频率增加,这一点被电弧电压和电流的波形所证实。在电磁作用焊接时,电流和电压曲线中峰值数量的增多,表明了过渡频率的增加。在熔滴脱落瞬间,电弧区间长度急剧减小,导致电弧电压降低和电弧电流增加。具有电磁作用的电弧电压和电流的波动小于无电磁作用时的波动。这是因为

⊖ 该式为数值关系——译者注

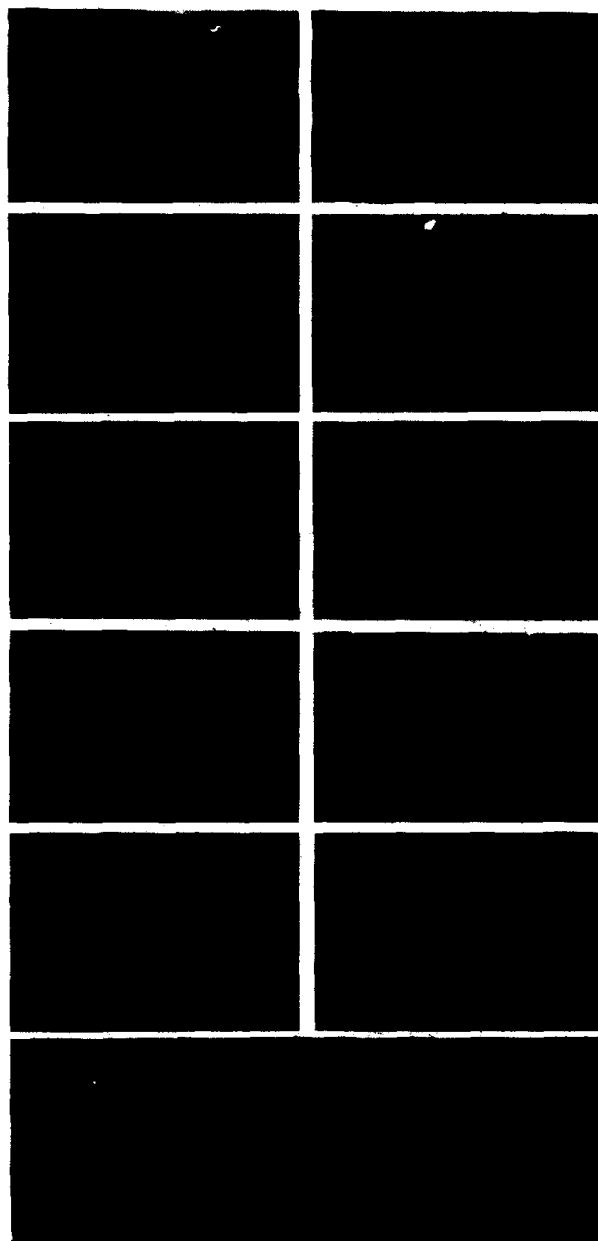


图3 无电磁作用二氧化碳气体保护
焊时的焊丝金属熔滴过渡顺序

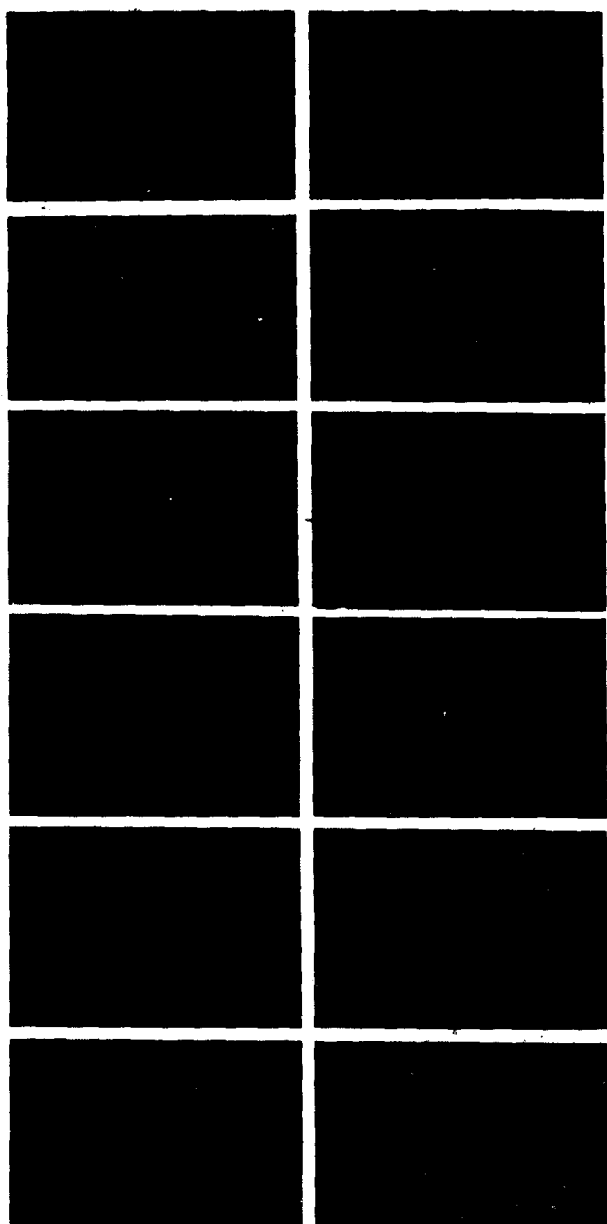


图4 有电磁作用 ($B = 8 \text{ mT}$)
二氧化碳气体保护焊时的焊丝金属熔滴过渡顺序

在第一种情况下, 由于熔滴尺寸减小, 因而在焊丝端部形成金属熔滴时的弧长波动幅度较小。电磁作用对熔化焊丝金属熔滴过渡频率影响的效果, 随着焊接电流的提高而增加(图5)。

显然, 在焊丝端部金属熔滴尺寸和存在时间的减小, 与作用在焊丝端部和熔滴之间的缩颈上的力有关。其上的作用力, 除了由于电磁收缩效应引起的电动力外, 还有纵向外磁场产生的磁致压力。

纵向外磁场在稳定电弧放电和减小焊丝金属熔滴尺寸的同时, 有利于减小液态金属的飞溅。在最佳外磁场参数时, 二氧化碳气体保护焊的金属飞溅系数减少了一倍(图6)。

埋弧焊时, 纵向磁场有利于焊丝更加强烈的熔化和焊丝金属熔滴的细化及熔滴沿熔渣孔壁过渡^[107]。埋弧焊电弧在磁场中的摆动, 导致焊丝熔化速度增加10~25%^[160]。

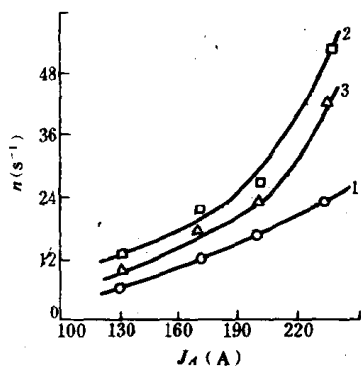


图5 在具有不同纵向外磁场磁感应强度值的二氧化碳气体保护焊时, 焊丝金属熔滴过渡频率(n)与电弧电流(I_a)的关系

1— $B=0$ 2— $B=7\text{ mT}$
3— $B=9.5\text{ mT}$

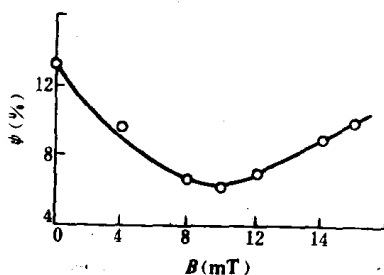


图6 在12x18H10T钢二氧化碳气体保护焊时, 金属飞溅系数(ψ)与纵向磁场磁感应强度(B)之间的关系

焊接规范: $I_a = 180\text{ A}$, $U_a = 23\text{ V}$

$L = 15\text{ mm}$ $v_{CB} = 40\text{ m/h}$

$v_{n \cdot n} = 220\text{ m/h}$ $d_{n \cdot r} = 1.6\text{ mm}$

$Q_{CO_2} = 14\text{ L/min}$

在交变（其中包括脉冲交变）磁场中焊接的情况下，电弧的结构、形式、长度，加热斑点在焊接熔池表面的形状、位置，熔池熔化金属循环的方向和液态金属的涡旋，都会发生周期性的变化，从而导致结晶前沿附近的热量状况产生周期性的变化。这些变化引起结晶前沿周期性的停顿；而在某些场合下还引起早已结晶的金属体发生周期性的熔化。正如实验所证实的那样，结晶前沿面停顿和熔化的频率依赖于脉冲磁场的跟随频率。

因此，交变磁场有利于焊缝金属附加层的形成。这一方面导致焊缝金属附加的化学不均匀性，另一方面则有利于降低基本（典型焊接的）结晶层的化学不均匀程度。考虑到电磁作用的上述两种后果，可以得出以下结论：焊缝附加层的出现，降低了宏观不均匀性，但也稍许提高了微观化学不均匀性。

第三节 焊接熔池液态金属运动的特点

焊接熔池熔化金属的电磁搅拌是电磁作用的效果之一。这种搅拌直接改变了质量和热量的迁移过程。但是，在电磁作用焊接条件下，液态金属运动的特点研究得还很少。因此，为了更加全面地理解电磁搅拌对一次结晶过程影响的机理，必须阐明焊接熔池熔化金属运动的特点。

在一般情况下，解析焊接熔池液态金属的运动是一个数学难题。为了借助一个能最简单明了地揭示熔化金属运动特性的模型，来简化该数学难题的解，让我们仔细研究一下图7所示的系统。所选择的模型是一个平面，这在一般情况下与焊接熔池的形状不相符合，但是它能够避开在分析三维难题时所产生的相当大的数学难度，并能揭示接近实际情况的电磁力分布。

对于按照图示所研究的线电极层中电流平面流散的情况，电位分布（ φ ）可以用拉普拉斯方程求出^[64]：

$$\Delta \varphi = 0 \quad (3)$$

其边界条件为：

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0,$$