

# 直流磁场作用下铜蒸气对电弧特性的影响

李德全<sup>1</sup>, 樊丁<sup>1,2</sup>, 黄健康<sup>1,2</sup>, 姚兴龙<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学, 兰州, 730050; 2. 兰州理工大学, 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州, 730050)

**摘要:**为研究直流纵向磁场作用下金属蒸气对熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW)电弧特性的影响, 将钨铜复合材料制成特殊钨极代替熔化极产生铜蒸气, 利用高速摄像法、光谱测温法以及小孔探测法对其进行测试研究。结果表明, 铜蒸气进入电弧等离子体后, 电弧出现分层, 随铜蒸气含量的增加, 弧芯外围区域半径随之增加, 弧芯区的尺寸减小。当铜含量为0%时, 外加直流磁场后, 电弧在阴极区收缩阳极区扩张, 其轴向最高温度明显上升; 电弧压力峰值偏离轴线, 在外加磁场强度为0.015 T时呈现双峰分布, 电流密度与电弧压力分布趋势相似; 随着铜蒸气的介入, 弧芯区电弧表现为阴极区收缩, 阳极区扩张, 弧芯周围的铜蒸气则明显收缩, 电弧轴向最高温度上升的幅度明显降低。随着铜含量的增加, 电弧的导电面积增加, 环向电磁力作用减弱, 电弧中心压力下降幅度显著降低, 阳极电流密度的分布趋势逐渐趋于扁平化。

**创新点:**测试研究了直流磁场与金属蒸气共同作用对电弧温度、电弧压力和电流密度等基本特性的影响规律。

**关键词:**熔化极气体保护焊; 直流磁场; 铜蒸气; 电弧特性

中图分类号: TG 444

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20220701002

## 0 序言

电弧等离子体本身作为一种满足电磁规律的导电流体, 可通过外加磁场来调节电弧形状, 提高稳定性, 从而优化焊缝外观, 改善接头性能, 提高焊接效率<sup>[1-3]</sup>。而在磁控焊接过程中, 当焊接电流提高到一定程度后, 对熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW)而言, 金属蒸气在电弧中的运输对电弧等离子体的物理性质有着显著的影响, 如净辐射系数和电导率等, 且随着焊接电流增大, 金属蒸气的影响越发明显<sup>[4-6]</sup>。因此, 研究金属蒸气在磁场作用下对电弧特性的影响对磁控焊接方法有着重要意义。

当前, 对于外加磁场与金属蒸气共同作用对电弧特性影响的报道很少。由于钨极惰性气体保护焊(gas tungsten arc welding, GTAW)电弧稳定, 测量过程无熔滴干扰, 现有研究大多集中在单一因素对GTAW电弧的影响。肖磊等人<sup>[7]</sup>研究了直流纵向磁场对GTAW电弧行为的影响, 研究表明, 在施

加直流纵向磁场后会使电弧变成高速旋转的“钟罩”形电弧, 阳极表面的电流密度和电弧压力呈双峰分布。Schupp等人<sup>[8]</sup>研究了横向磁场对电弧行为的影响, 认为施加横向磁场后电弧挺度随电弧长度的增加而降低, 随着焊接电流的上升而增强, 电弧的端面则随着磁场强度的增加由圆形趋于椭圆形。Murphy<sup>[9]</sup>研究了金属蒸气对电流密度和热流密度分布的影响, 结果表明, 金属蒸气的存在提高了阳极附近区域的电导率, 降低了阳极的电流密度和热流密度。Tanaka等人<sup>[10]</sup>研究了金属蒸气在GTAW电弧中的行为, 结果发现, 金属蒸气进入到电弧等离子体中沿着径向进行扩散, 电弧电流路径发生扩展。而在磁控焊接过程中, 电弧特性的变化实际上则是外加磁场与金属蒸气共同作用的结果。

由于电弧中金属蒸气主要由焊丝熔化形成的金属熔滴过热产生, 且GTAW电弧中金属蒸气远小于GMAW, 为了避免熔滴过渡对测量的干扰, 并考虑到钨铜电极制作相对容易, 铜蒸气与铁蒸气特性相近<sup>[8]</sup>。利用铜含量为0%, 10%, 20%和30%的钨铜复合材料制成特殊钨极代替熔化极产生不同浓度的铜蒸气, 测试研究了直流磁场作用下不同浓度的铜蒸气对电弧形态、电弧温度、电弧压力和电

流密度的影响规律,为磁控焊接方法的应用提供了试验支撑.

## 1 试验方法

试验采用 WSE-250 型 TIG 焊机,保护气体为 99.9% 氩气,阳极为水冷铜,焊接参数如表 1 所示. 试验系统由焊接系统、磁场发生装置、高速摄像系统、压力/电流传感系统和光谱采集系统组成,如图 1 所示.

表 1 焊接工艺参数  
Table 1 Welding process parameters

焊接电流 $I/A$	钨极直径 $D/mm$	钨极角度 $\theta/(^\circ)$	弧长 $L/mm$	氩气流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$
100	3.2	60	4	10

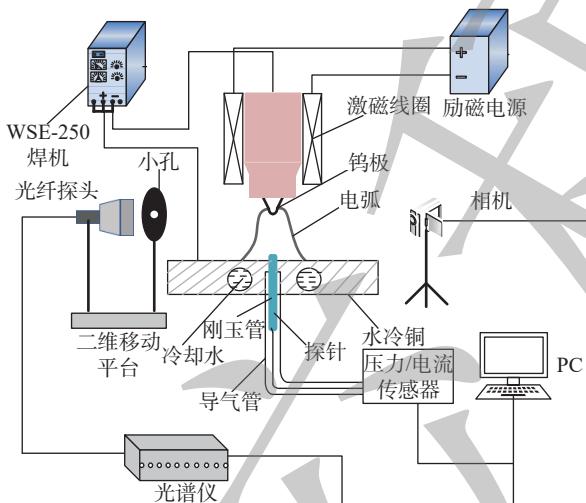


图 1 试验装置示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the test device

磁场发生装置由励磁电源与激磁线圈组成,激磁线圈轴向嵌套在焊枪上,在电弧区域产生纵向磁场. 采用尼康 D810 单反相机获取电弧外观形貌,使用的镜头由单焦点镜头、减光片和窄带滤光片组成. 光谱仪采集电弧不同位置处的光谱信号,利用 Boltzmann 法对电弧温度进行计算<sup>[1]</sup>. 利用小孔法对阳极表面电弧压力的分布进行测量,在水冷铜上加工一个直径为 1 mm 的小孔,用导气管将 GT/P08H 型压力传感器与该小孔相连,得到关于电弧压力的电信号,通过标定将其转化为压力值,多次测量取平均值,并绘制压力分布曲线<sup>[2]</sup>. 采用探针法对阳极表面电流密度的分布进行测量,在水冷铜上加工一个直径为 2.5 mm 的小孔,刚玉管穿过小孔以确保与水冷铜绝缘,将探针置于刚玉管内,

测量端与阳极表面平齐. 使用 CHV-25P 型闭环霍尔电流传感器通过数据采集卡和 LabVIEW 软件进行实时电流采集,此时电弧以平稳的速度经过探针,每一点的电流密度就等于通过该点时的电流值与探针截面积的比值,并绘制电流密度分布曲线.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 电弧形貌

对铜含量为 0%, 10%, 20%, 30% 的特殊钨极平均蒸发率进行测定,以模拟不同焊接电流下产生的金属蒸气,测量结果如表 2 所示.

表 2 平均蒸发率  
Table 2 Average evaporation rate

铜含量 $w(\%)$	蒸发率 $E/(mg \cdot s^{-1})$
0	0
10	0.173 5
20	0.566 7
30	1.315 3

图 2 为铜含量分别为 0%, 10%, 20% 和 30% 的特殊钨极在不同的磁感应强度下使用 ( $510 nm \pm 5 nm$ ) 窄带滤光片得到的电弧形貌. 对于普通钨极,外加纵向磁场后电弧绕轴向做定向旋转,在阴极区收缩,阳极区扩展. 当外加磁场强度为 0.015 T 时,电弧中心开始形成一个中空的“钟罩”形区域,磁场强度进一步增加,“钟罩”形区域也随之扩张. 而对于铜含量大于 0% 的钨极,在无外加磁场时,电弧有明显分层,即高亮度的弧芯区和弧芯周围的铜蒸气区. 随着铜含量的增加,分层现象逐渐消失. 外加纵向磁场后,弧芯和铜蒸气同时绕轴线做定向旋转,弧芯区域电弧依旧表现出在阴极区收缩,阳极区扩展,而弧芯周围的铜蒸气则在阴极区、阳极区以及弧柱区均表现出明显的收缩,其扩张半径明显小于无外加磁场作用时扩张半径.

对电弧等离子体而言,外加直流磁场使电弧在环向电磁力作用下高速旋转,随着磁感应强度的增加环向速度增加,电弧中心出现了低压的空腔,在低压的作用下部分等离子体流动形成回流旋涡,使得电弧最大速度增加,阴极附近巨大的压力差形成的压缩力导致阴极区的电弧明显收缩. 当电弧温度高于 15 000 K 时,铜离子在电弧等离子体中的电场扩散系数和普通扩散系数降至最低<sup>[13-14]</sup>,所以铜离子以

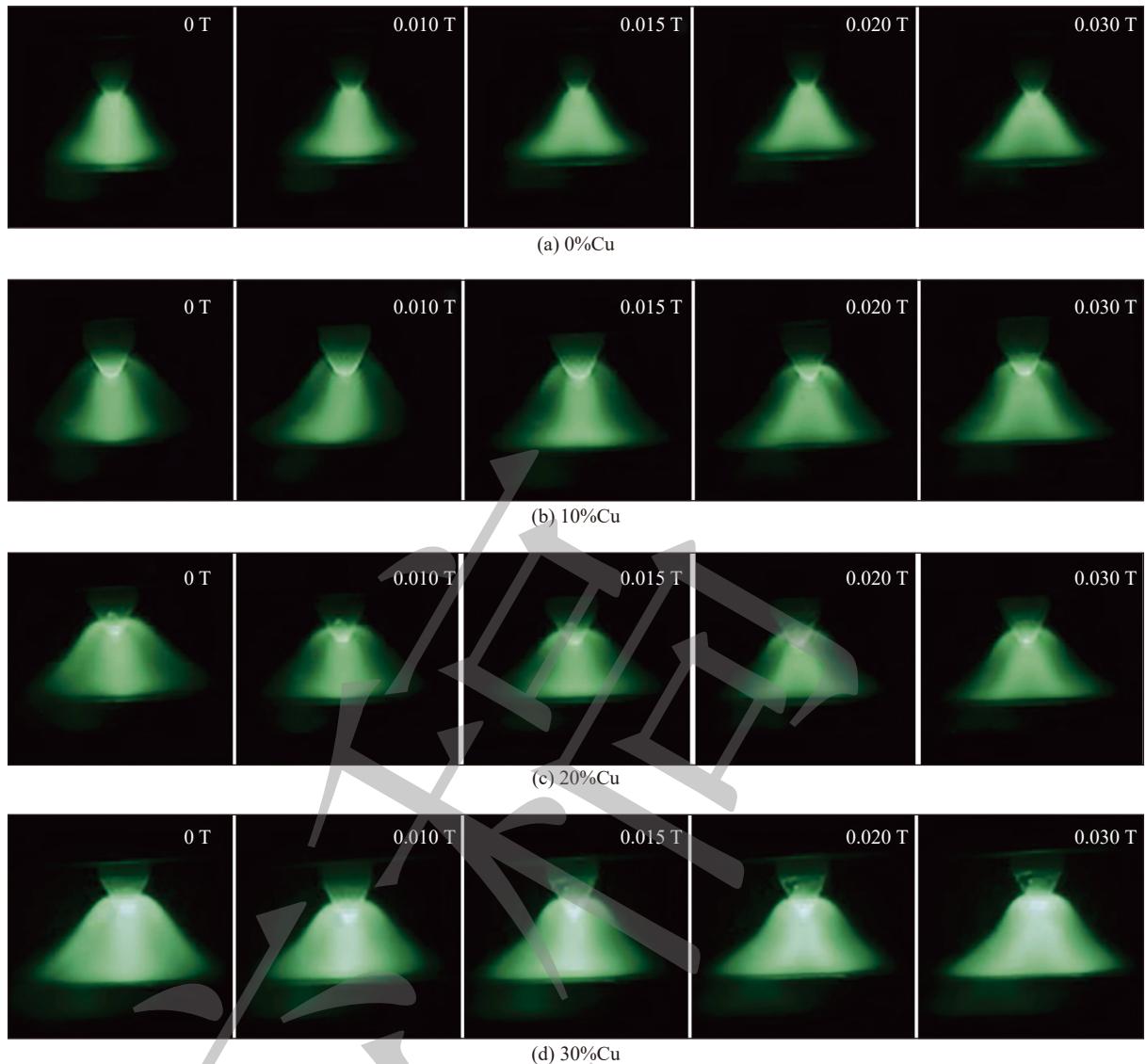


图2 外加直流磁场作用下铜蒸气对电弧形貌的影响

Fig. 2 Effect of copper vapor on arc morphology under external DC magnetic field. (a) 0%Cu; (b) 10%Cu; (c) 20%Cu; (d) 30%Cu

电泳的形式被传输到电弧周围而不是电弧中心附近,导致电弧导电半径增加,在环形电磁力作用下铜蒸气进入低压的空腔,使得靠近空腔位置的弧柱区也出现了明显的收缩。同时,随着铜含量的增加,同一磁场强度下环向电磁力作用减弱使得电弧环向速度减小,进而使得弧芯区域低压的空腔面积减小。

## 2.2 电弧温度

图3为铜含量为0%, 10%, 20%和30%的特殊钨极在不同外加磁场作用下电弧轴向最高温度变化曲线。从图3可以看出,对于铜含量为0%的电弧轴向最高温度随着磁感应强度的逐渐增加,在施加磁感应强度为0.010 T的直流磁场时,电弧轴向最高温度为22 132.6 K,磁感应强度增加至0.030 T时,轴向最高温度上升为24 015.3 K。这是

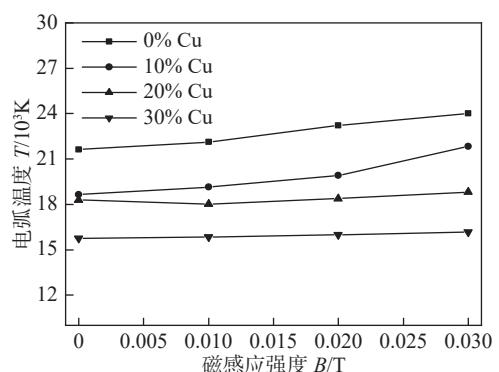


图3 外加直流磁场作用下铜蒸气对电弧温度的影响

Fig. 3 Effect of copper vapor on arc temperature under external DC magnetic field

由于在直流磁场作用下,电弧绕轴线附近高速旋转,使得电弧在阴极附近收缩,在阳极表面扩展,电弧在近钨极区电流密度增加,从而导致电弧温度进

一步上升。特殊钨极所产生的电弧其轴向最高温度随着外加磁场强度的增加而升高,但随着铜含量的增加最高温度上升的幅度明显减小。这主要是由于特殊钨极产生的电弧主要由弧芯和周围的铜蒸气组成,在外加直流磁场后阴极区开始收缩,大量的铜蒸气进入“钟罩”区域使得电弧中心辐射作用增强,导致电弧中心轴线方向的温度上升幅度降低,而且随着特殊钨极中铜含量的增加,这种现象越发明显。

### 2.3 电弧压力

利用压力传感装置,研究了直流磁场作用下不同浓度铜蒸气对阳极表面电弧压力的影响,得到的曲线图如图 4 所示。图 4a 为铜含量为 0% 的钨极在阳极表面上电弧压力的分布曲线,从图 4a 可以看出,随着磁感应强度的增加,电弧压力的峰值逐渐远离电弧中心轴线附近,中心处的电弧压力由 386 Pa 下降到 -104 Pa,两者相差 490 Pa,而在偏离轴线的径向位置处压力值逐渐增加。在  $B = 0.015$  T 时,阳极表面上电弧压力分布呈现双峰分布,而且随着磁感应强度的增加,双峰的位置越来越远,这与试验中拍摄到铜含量为 0% 钨极的电弧形貌随外加磁场强度的变化趋势相同。图 4b 为铜含量为 10% 的钨极在阳极表面上电弧压力的分布曲线。从图 4b 可以看出,当  $B = 0$  T 时,中心处的压力值和压力分布半径明显小于铜含量为 0% 的钨极。随着磁场强度的增加,在阳极表面上电弧压力的峰值逐渐远离电弧中心轴线附近,中心处的电弧压力由 298 Pa 下降到 -80 Pa,两者相差 378 Pa,在偏离轴线的径向位置处压力值逐渐增加。在  $B = 0.015$  T 时,阳极表面电弧压力开始出现双峰分布。图 4c 为铜含量为 20% 的钨极在阳极表面上电弧压力的分布曲线,随着外加磁场强度的增加,中心处的电弧压力由 273 Pa 下降到 -70 Pa,两者相差 343 Pa,在  $B = 0.015$  T 时,阳极表面电弧压力不再呈双峰分布。图 4d 为铜含量为 30% 的钨极在阳极表面上电弧压力的分布曲线。随着磁场强度的增加,中心处的电弧压力由 229 Pa 下降到 -47 Pa,两者相差 276 Pa,这与拍摄的电弧形貌变化规律相一致。

### 2.4 阳极表面电流密度

图 5 为铜含量为 0%, 10%, 20% 和 30% 的特殊钨极分别在磁感应强度 0, 0.010, 0.020 T 和 0.030 T 的直流磁场作用下,采用探针法得到的阳极表面电流密度的分布图。从图 5 可以看出,阳极

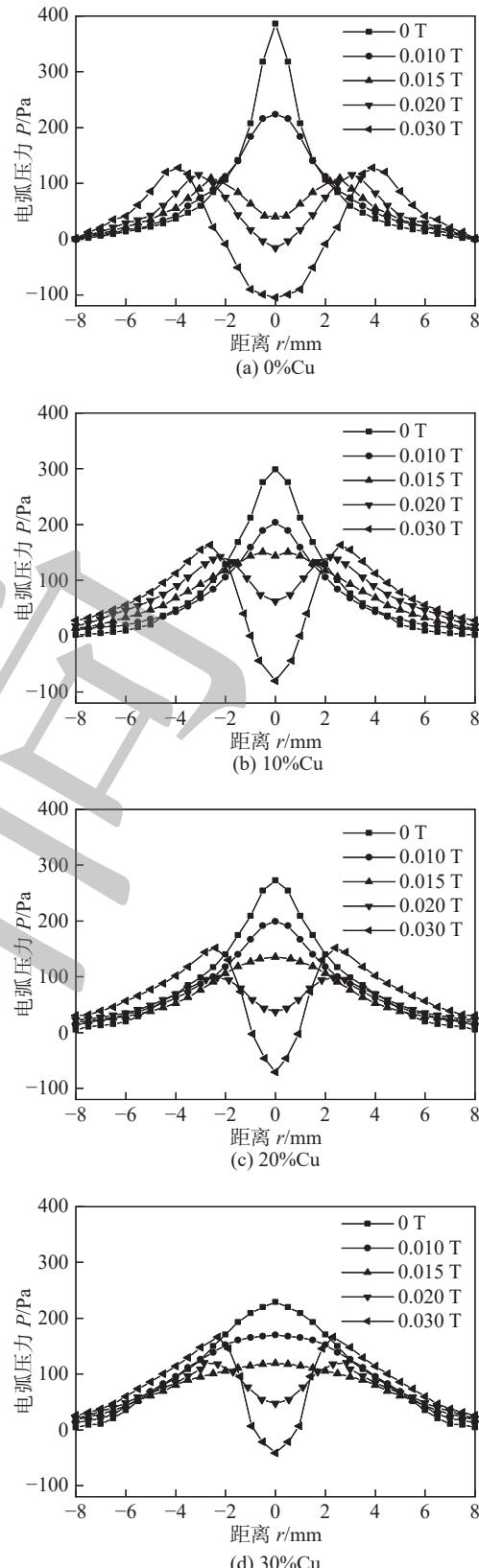


图 4 外加直流磁场作用下铜蒸气对电弧压力的影响

Fig. 4 Effect of copper vapor on arc pressure under external DC magnetic field. (a) 0%Cu; (b) 10%Cu; (c) 20%Cu; (d) 30%Cu

表面电流密度的分布与电弧压力分布趋势相似。对于铜含量为 0% 的普通钨极来说,随着磁感应强度

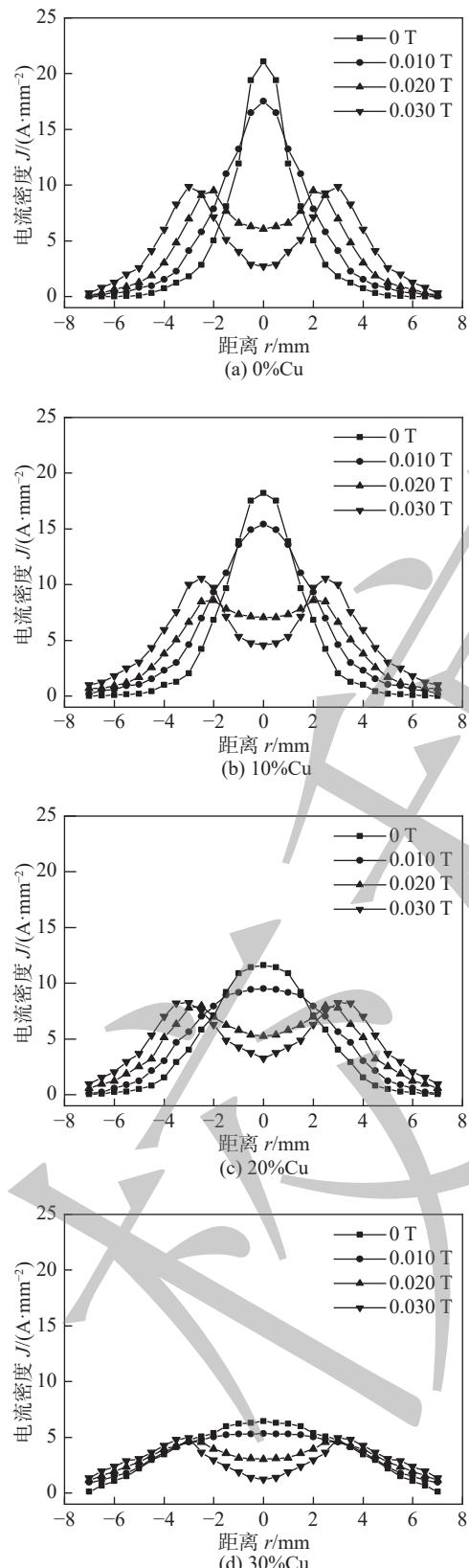


图5 外加直流磁场作用下铜蒸气对阳极表面电流密度的影响

Fig. 5 Effect of copper vapor on surface current density of anode under external DC magnetic field. (a) 0%Cu; (b) 10%Cu; (c) 20%Cu; (d) 30%Cu

的增加, 电流密度的峰值逐渐偏离电弧轴线位置,

中心处的电流密度逐渐降低, 两侧电流密度值逐渐增加, 分布由原来的单峰分布变成了双峰分布, 当磁场强度增加到 0.030 T 时, 电弧中心电流密度降至最低, 为  $2.73 \text{ A/mm}^2$ , 比起磁感应强度  $B = 0 \text{ T}$  时电流密度的大小, 两者相差  $18.36 \text{ A/mm}^2$ . 这主要是由于外加直流磁场后电弧绕中心轴线附近做高速旋转运动, 随着磁感应强度和环向速度的增加, 电流更多经过电弧外围进行传递, 所以导致电弧中心电流密度降低, 两侧电流密度增加.

对于铜含量为 10%, 20% 和 30% 的特殊钨极, 电流密度的分布与铜含量为 0% 的电弧分布趋势一致, 在  $B = 0.020 \text{ T}$  时, 电流密度的分布都由原来的单峰分布变为双峰分布. 随着电弧中金属蒸气浓度进一步增加, 电流密度分布整体开始呈现扁平化, 这主要是由于铜蒸气浓度的增加使电弧的导电面增加, 环向电磁力作用减弱, 电弧环向速度减小, 此时磁场对电弧的作用也减弱, 这与 Xiao 等人<sup>[15]</sup>计算外加磁场和金属蒸气作用得到电弧外围电流密度有扩展的趋势相一致.

### 3 结论

(1) 将钨铜复合材料制成特殊钨极代替熔化极产生铜蒸气, 对直流纵向磁场与金属蒸气共同作用下的电弧特性进行了测试研究. 铜蒸气进入电弧等离子体后, 电弧出现分层, 随着铜蒸气含量的增加, 弧芯外围区域半径随之增加, 弧芯区的尺寸减小.

(2) 铜含量为 0% 时, 外加直流磁场后, 电弧绕轴向定向旋转, 在阴极区收缩, 阳极区扩张. 随着铜蒸气的介入, 弧芯区域电弧表现为阴极区收缩, 阳极区扩张, 弧芯周围的铜蒸气则明显收缩, 电弧轴向最高温度呈明显上升趋势, 随着铜蒸气含量的增加, 电弧轴向最高温度上升的幅度则明显降低.

(3) 铜含量为 0% 时, 外加直流磁场使电弧压力峰值偏离轴线, 在  $B = 0.015 \text{ T}$  时, 由单峰变为双峰分布, 电流密度与电弧压力分布趋势基本一致. 随着铜蒸气含量的增加, 电弧导电面积增加, 环向电磁力作用减弱, 其中心压力下降幅度明显降低, 阳极表面电流密度分布则逐渐趋于扁平化.

### 参考文献

- [1] 闫飞, 周一凡, 唐本刊, 等. 基于磁控冶金的铝/钢异种金属焊接特性 [J]. 焊接学报, 2022, 43(5): 98–103.

- Yan fei, Zhou Yifan, Tang Benkan, *et al.* Welding characteristics of Al/steel dissimilar metals based on magnetically controlled metallurgy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(5): 98 – 103.
- [2] 孙雅杰, 常云龙. 磁控电弧焊接过程及新技术研究进展 [J]. *材料导报*, 2020, 34(21): 21155 – 21165.  
Sun Yajie, Chang Yunlong. Development of magnetically controlled arc welding process and new technology[J]. Materials Reports, 2020, 34(21): 21155 – 21165.
- [3] Wu Hong, Chang Yunlong, Lu Lin, *et al.* Review on magnetically controlled arc welding process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91(9-12): 4263 – 4273.
- [4] Fan Ding, Yao Xinlong, Hou Yingjie, *et al.* The study of arc behavior with different content of copper vapor in GTAW[J]. China Welding, 2022, 31(2): 1 – 14.
- [5] Tanaka K, Shigeta M, Tanaka M, *et al.* Investigation of transient metal vapour transport processes in helium arc welding by imaging spectroscopy[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(42): 1 – 8.
- [6] Xiang J A, Chen F, Phb C, *et al.* Numerical study of the metal vapour transport in tungsten inert-gas welding in argon for stainless steel[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 79: 713 – 728.
- [7] 肖磊, 樊丁, 黄健康, 等. 外加高频纵向磁场作用下的 TIG 焊电弧数值模拟 [J]. 焊接学报, 2017, 38(2): 66 – 70.  
Xiao Lei, Fan Ding, Huang Jiankang, *et al.* Numerical simulation of TIG welding arc with extra high-frequency longitudinal magnetic field[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(2): 66 – 70.
- [8] Schupp J, Fischer W, Mecke H. Welding arc control with power electronics[C]//8th International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives. London, 2000: 443–450.
- [9] Murphy A B. The effects of metal vapour in arc welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43(43): 434001.
- [10] Tanaka M, Yamamoto K, Tashiro S, *et al.* Time-dependent calculations of molten pool formation and thermal plasma with metal vapour in gas tungsten arc welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43(43): 434009.
- [11] 斯红, 华学明, 张旺, 等. 基于 Boltzmann 光谱法的焊接电弧温度场测量计算 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(9): 2311 – 2313.  
Si Hong, Hua Xueming, Zhang Wang, *et al.* Welding Arc temperature field measurements based on Boltzmann Spectrometry[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(9): 2311 – 2313.
- [12] 黄勇, 瞿怀宇, 樊丁, 等. 耦合电弧 AA-TIG 焊电弧压力测量与分析 [J]. 焊接学报, 2013, 34(3): 33 – 36.  
Huang Yong, Zhai Huaiyu, Fan Ding, *et al.* Arc pressure measurement and analysis of coupling arc AA-TIG[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(3): 33 – 36.
- [13] Murphy A B. A comparison of treatments of diffusion in thermal plasmas[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1996, 29(7): 1922 – 1932.
- [14] Gleizes A, Gonzalez J J, Liani B, *et al.* Calculation of net emission coefficient of thermal plasmas in mixtures of gas with metallic vapour[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1999, 26(11): 1921 – 1927.
- [15] Xiao L, Fan D, Huang J. Tungsten cathode-arc plasma-weld pool interaction in the magnetically rotated or deflected gas tungsten arc welding configuration[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 32: 127 – 137.

**第一作者:** 李德全, 硕士研究生; 主要研究方向为高效焊接方法及机理; Email: 1365078340@qq.com.

**通信作者:** 樊丁, 教授, 博士研究生导师; Email: fand@lut.edu.cn.

(编辑: 戴红)