

# 氩-氦-二氧化碳混合气体电弧行为及其对焊缝成形的影响

Study on the Physical Characteristic of Argon-helium Arc and Its Effects on the Weld Shaping

李国栋, 栗卓新, 魏 琪, 王英杰

(北京工业大学 材料科学与工程学院, 北京 100022)

LI Guo-dong, LI Zhuo-xin, WEI Qi,

WANG Ying-jie (College of Material Science and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

**摘要:** 采用钨极氩弧焊对不同比例氩-氦-二氧化碳混合气体的电弧物理特性及其焊缝成形进行了实验。结果表明, 三元混合气体的电弧形态中可观察到柱状中心区。混合气体中氦气的体积百分比小于 45% 时, 其电弧特性与氩弧差别不大。氦的体积分大于 75% 时, 其电弧形成具有氦弧的性质。随着混合气体中氦气比例的增加, 熔深和熔宽均增加, 但熔深增加得更明显一些。

**关键词:** 氩-氦混合气体; 电弧物理; 焊缝成形; TIG 焊

中图分类号: TG409 文献标识码: A 文章编号: 1004-4381(2007)03-0038-04

**Abstract:** The arc physical characteristic of mixed gases (Ar+ He+ CO<sub>2</sub>) and its effects on weld shaping were discussed. The results show that columnar center zone was observed in the tri-mixed gas arc shape. When the helium content is less than 45%, the character of tri-mixed gas has no evident difference compared with that of argon. When the helium content in the tri-mixed gas exceeds 75%, the arc presents the characteristic of helium. With the increasing of helium content in the mixed gases, the arc voltage increase, and the weld width broaden, especially the weld penetration deepens obviously.

**Key words:** Ar+He+CO<sub>2</sub> mixed gas; arc physics; weld shaping; TIG welding

不锈钢管道钨极氩弧焊打底时, 常常用单一的氩气作为正面和背面的保护气体。采用这种工艺进行不锈钢打底焊接时, 焊前准备工作较多, 并不适用于现场高空或长距离管道固定口的施工<sup>[1]</sup>。在氩气中加入一定量的氦气后, 可在提高电弧稳定性, 改善熔深和润湿性以及提高电弧温度等方面获得满意结果。文献[2]使用 Ar+ He+ CO<sub>2</sub> 三元混合气体配合实芯焊丝成功进行了背面不充氩的不锈钢管道打底焊接, 因此, 研究三元混合气体。

Ar+ He+ CO<sub>2</sub> 的物理特性及其对焊缝成形的影响对于进一步探讨背面不充氩的不锈钢管道打底焊具有重要意义。本工作对不同比例的上述三元混合气体的电弧形态及其对焊缝成形的影响进行了研究。

## 1 实验方法和材料

选取四种不同比例的混合气体进行不填充丝的

TIG 焊。钨钨极直径为 3.2mm。混合气体的配比如下(体积分, 下同): M1: Ar7.5% + He90% + CO<sub>2</sub>2.5%; M2: Ar22.5% + He75% + CO<sub>2</sub>2.5%; M3: Ar37.5% + He60% + 2.5% CO<sub>2</sub>; M4: 52.5% Ar + 45% He+ 2.5% CO<sub>2</sub>; M5: 100% Ar。在相同的焊接条件下, 固定氩弧焊枪高度, 对混合气体的电弧形态进行拍摄, 焊接电流为 100A。使用汉诺威分析仪对焊接过程中电弧电压和焊接电流信号进行采集, 预设焊接电流为 100A, 焊接速度为 100mm/min, 测试时间 3s, 采取平焊方式。在平板上堆焊焊缝并测量焊缝的熔深。采用 OLYMPUS SZ61 体式显微镜观察焊缝的宏观金相组织。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 混合气体电弧形态的分析

M1- M4 四种不同混合气体的电弧形态如图 1

所示。由图 1 可以看出,混合气体中氦气含量不同时,电弧呈现不同的形态。随着氦气含量的增加,电弧形态由“椭圆”形向“钟罩”形转变;在阴极附近,电弧半径变小,尤其是当氦气的比例达到 90% 时,阴极附近电弧收缩严重,与氦气含量为 45% 时的电弧形态相比有了明显的改变,说明混合气体中随着氦气含量的增加,

阴极附近电弧压缩程度增加,弧柱电流密度增大;靠近母材表面,随着氦气含量的增加,弧柱半径增大,但弧柱扩展到一定程度后不再扩展,而是向内收缩,形成中部向外凸,底部向内收缩的腰鼓形电弧,这与电弧在熔池表面受到阳点斑点的粘滞作用不可能向外扩展有关<sup>[3]</sup>。

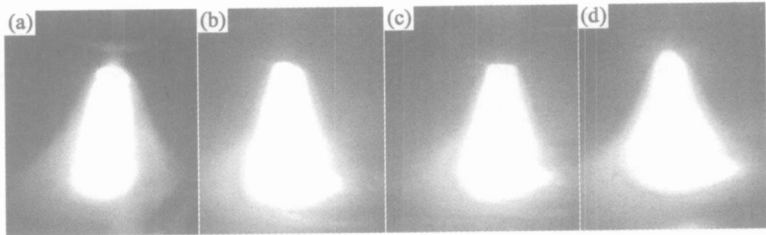


图 1 不同混合气体的电弧形态 (a) Ar52.5% + He45% + CO<sub>2</sub>2.5% ; (b) Ar37.5% + He60% + CO<sub>2</sub>2.5% ; (c) Ar22.5% + He75% + CO<sub>2</sub>2.5% ; (d) Ar7.5% + He90% + CO<sub>2</sub>2.5%

Fig. 1 Arc shape of different mixed gases (a) Ar52.5% + He45% + CO<sub>2</sub>2.5% ; (b) Ar37.5% + He60% + CO<sub>2</sub>2.5% ; (c) Ar22.5% + He75% + CO<sub>2</sub>2.5% ; (d) Ar7.5% + He90% + CO<sub>2</sub>2.5%

实际焊接时发现,与纯氩气作为保护气相比,根据弧柱颜色的不同,混合气体的电弧形态主要分为两部分,如图 2 所示,一部分为集中于电弧轴线附近的高亮度的柱状中心区,靠近钨极附近的弧柱亮度最高,颜色呈白色,弧柱半径较小,受压缩的程度较高。电弧弧长为 4mm 时,这种柱状中心区可一直伸到母材;另一部分为分布在柱状中心区周围的扩散电弧,弧柱半径较大,电弧颜色呈浅绿色。电弧中出现柱状中心区,是由于氩气和氦气电弧空间导电机构及不同的物理性质造成的。与氩气相比,氦气的导热系数大,原子的质量小,在电弧空间运动速度大,从电弧中带走的热量多,对电弧的冷却作用加强,电磁收缩力增大,弧柱中气体压力梯度增加,产生从紧挨阴极正下方的弧柱吹向离开阴极的弧柱区的等离子流,电弧受气流喷吹而形成弧柱中心区<sup>[4]</sup>。电弧呈现不同的颜色则与混合气体中加入氦气之后,电弧中的氦原子发生电离、复合,其谱线的相对强度不同有关<sup>[5]</sup>。

2.2 混合气体对电弧电压的影响

钨极氩弧焊过程中,由于外界条件及内部因素的作用,任何一个瞬间的电弧电压都是变化的。汉诺威分析仪能够自动生成电弧电压的概率密度分布图,提供电弧电压的平均值、最大值和最小值的精确数据。图 3 为由汉诺威分析仪实际统计得到的电弧电压概率密度分布图,从图中可以看出,随着混合气体中氦气比例的增加,电压概率密度分布曲线依次从左到右,即电弧电压依次增大。这是由于与氩气相比,使用氦气时作为保护气时,热损失大,因此输入功率  $IE$  也应大一些,由最小电压原理可知,如果给定电流和周围条件一

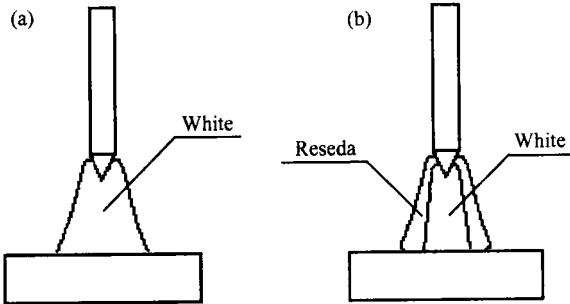


图 2 混合气体电弧形态示意图

(a) 氩弧形态示意图 ; (b) 氩氦混合气体电弧形态示意图

Fig. 2 Sketch of arc shape of mixed gases (a) sketch of argon arc shape; (b) sketch of argon-helium arc shape

定的条件下,每厘米弧柱的电压降  $E$  即电位梯度就要大一些,这就意味着弧长一定时,电弧电压增大,另一方面也表明,工件热输入增加,弧柱扩展,熔宽也会略有增加。

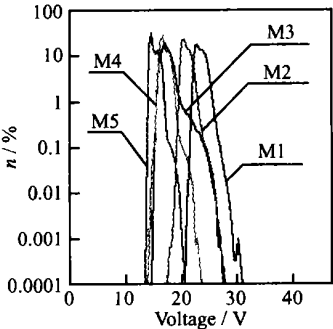


图 3 电弧电压概率密度分布图

Fig. 3 Probability density distribution of arc voltage

图 4 为由根据图 3 所得到的不同混合气体电弧电压平均值绘出的电弧电压随氦气含量变化的示意图。由图中可以看出,混合气体中氦气的比例小于 60% 时,电弧空间的带电粒子将由氙气的电离过程来提供,电弧气氛的电离电压也将由氙气的电离电压来决定,与纯氙保护气相比,电弧电压变化不大,电弧特性仍呈现为明显的氙弧特性。氦气比例大于 60% 时,随氦气的增加,电弧电压几乎呈线性增加,说明混合气体中相当一部分氦气开始发生电离。文献[4]认为,氦气的比例达到 80% 时,混合气体的电弧特性明显地呈现为氦气的电弧特性,这是由于惰性气体可以处于亚稳态,只要达到最小激发电位(氦的激发电位为 19.5V),就能以累积电离的方式发生电离的缘故。从图 4 中也可以看到,氦气的比例大于 75% 以后,其电弧电压超过氦气的最小激发电位,电弧电压的变化率变缓,表现为明显的氦弧特性,与文献[4]中所提到的理论基本相符。

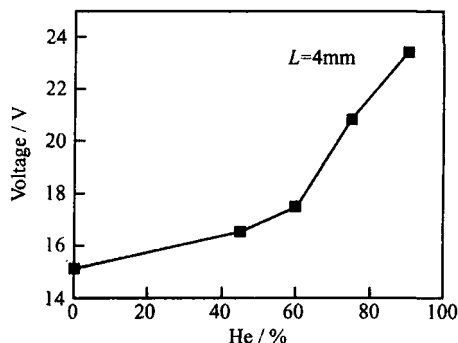


图 4 氦气对电弧电压的影响

Fig. 4 Influence of Helium on arc voltage

## 2.3 混合气体对焊缝成型的影响

### (1) 混合气体对焊缝熔深的影响

氦气对焊缝成型的影响如图 5 所示,由该图可以看出,随着氦气含量的增加,熔池底部由“指状”熔深逐渐向“圆弧状”过渡。氦气的含量较低时,由于等离子

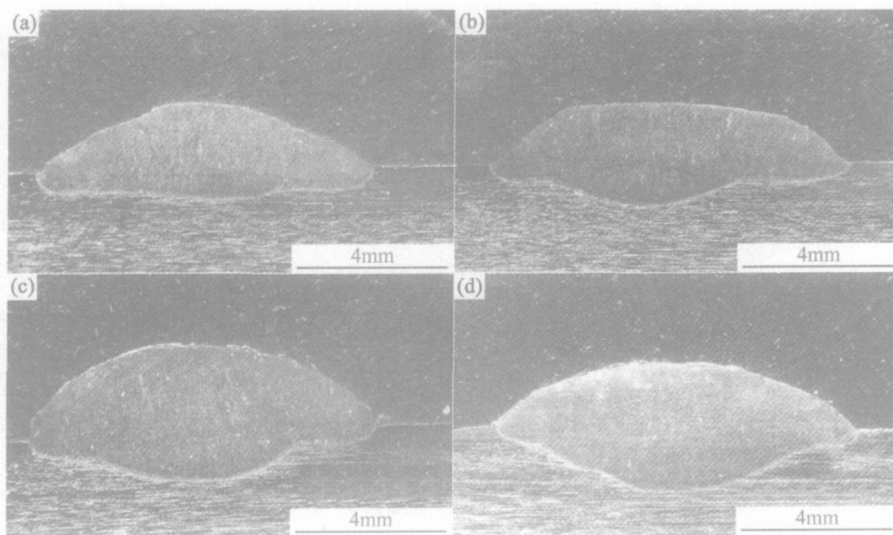


图 5 不同保护气体时焊缝的宏观金相组织 (a) Ar100%; (b) Ar37.5% + He60% + CO<sub>2</sub> 2.5%;

(c) Ar22.5% + He75% + CO<sub>2</sub> 2.5%; (d) Ar7.5% + He90% + CO<sub>2</sub> 2.5%

Fig. 5 Macrostructure of weld with different shielding gases (a) Ar100%; (b) Ar37.5% + He60% + CO<sub>2</sub> 2.5%;

(c) Ar22.5% + He75% + CO<sub>2</sub> 2.5%; (d) Ar7.5% + He90% + CO<sub>2</sub> 2.5%

流的作用,在熔池中心集中了大部分电弧能量,同时产生很大的下冲力,而熔池的两侧的电弧热较分散,熔池中心形成“指状”熔深。随着氦气含量的增加,电弧能量增大,电磁径向分力增大,弧柱中心区扩展,熔池底部呈现为圆弧形<sup>[6]</sup>。由图 5 也可以看出,弧柱中出现的柱状中心区的形成对焊缝的成形起着主要的作用。

不同保护气体时焊缝的几何尺寸表 1 所示。从中可以看出,随着氦气含量的增加,焊缝熔深增大。由氦气的物理性质可知,氦气的电弧集中程度高,弧柱空间高速运动的等离子流的动能将转换为压力,对熔池形

成附加的电磁动压力,使熔池受到强烈挖掘作用,导致母材凹陷,焊缝熔深增大。氦气含量越多,这种作用也越强,He 气的比例达到 90% 时,熔深明显增大,与电弧呈现氦弧特性,引起较大的等离子流力有关。

### (2) 混合气体对焊缝几何成型的影响

由图 4、5 及表 1 可知,随着氦气含量的增加,熔深增大的同时,熔宽也增大,但熔深增加的更明显一些,从图 5 还可以看出,氦弧焊缝的熔深并不像氙弧焊的一样均匀,而是中间熔深大,两边熔深浅,这主要是因为混合气体氦弧焊时,电弧轴线附近电弧集中程度高,

能量密度大,等离子流力大,对熔池的挖掘作用增强,因而焊缝中心附近熔深增大;随着氦气的增加,电弧电

压增加,在工件表面附近弧柱半径增大,作阳极的母材受热面变宽,因而熔宽增大。

表 1 不同混合气体下的焊缝成形系数  
Table 1 Physical dimension of weld in different shielding gases

Shielding gases	Welding current/ A	Welding voltage/ V	Welding speed/ (mm • min <sup>-1</sup> )	Fusion width/ mm	Fusion depth/ mm	Reinfor cement/ mm
Ar100%	120	18	110	9.00	1.00	1.58
Ar37.5% + He60% + CO <sub>2</sub> 2.5%	120	18	110	9.55	1.20	1.7
Ar22.5% + He75% + CO <sub>2</sub> 2.5%	120	18	110	9.62	1.38	1.74
Ar7.5% + He90% + CO <sub>2</sub> 2.5%	120	18	110	9.70	1.98	2.00

3 结论

(1) 多元混合气体( Ar+ He+ CO<sub>2</sub>) 氩弧焊时, 弧柱柱状中心区等离子流力较大, 对焊缝的几何成形起着主要的作用。

(2) 随着混合气体中氦气含量的增加, 焊接电压增高, 氦气的比例大于 60% 以后, 随着氦气的增加, 电弧电压几乎呈线性增长。氦气的比例大于 75% 以后, 电弧具有氦弧的特性。

(3) 随着混合气体中氦气含量的增加, 熔深和熔宽均增加, 但熔深增加得更明显一些。

参考文献

[1] 栗卓新. 不锈钢管打底工艺的进展[J]. 兵器材料科学与工程, 2001, 24(6): 54- 57.  
[2] BARRY MESSER, GREG LAWRENCE. Welding stainless steel

    piping with no backing gas[J]. Welding Journal, 2002, 81(12): 32- 34.  
[3] 邢丽, 艾盛, 张赋升, 等. Ar+ O<sub>2</sub> 混合气体熔化极脉冲焊时的旋转喷射过渡特征[J]. 机械科学与技术, 1998, 17(4): 103- 105.  
[4] 安藤弘平, 长谷川光雄. 焊接电弧现象[M]. 北京: 机械工业出版社. 1985. 138- 152.  
[5] 李明利, 刘占明. 大电流钨极氩-氦混合气体电弧行为分析[J]. 焊接学报, 2005, 26(8): 39- 42.  
[6] 于彦东, 刘伯全. 混合气体配比对焊缝成形的影响[J]. 哈尔滨科学技术大学学报, 1994, 18(4): 30- 33.

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技发展基金资助项目 (J303002)  
收稿日期: 2006-02-13; 修订日期: 2006-09-15  
作者简介: 李国栋(1974- ) 男, 助教, 硕士, 从事焊接材料、金属焊接性及焊接工艺研究, 联系地址: 北京工业大学材料学院(100022)。

(上接第 30 页)

SiO<sub>2</sub> 介电性能的主要因素分别为: 在室温至 600℃, 影响介电性能的主要因素为吸附水和物理水, 在 600℃至 1200℃, 影响介电性能的主要因素是碳、结构水和碱金属离子。

(2) 运用有效媒质理论, 建立了计算实际 SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 介电参数的经验模型, 模拟并预测了室温至 1500℃温度范围, SiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 介电性能的变化规律, 且模拟结果与实验结果基本相符。

参考文献

[1] 黎义, 李建保, 张大海, 等. 航天透波多功能复合材料的介电性能分析[J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(6): 4- 9.  
[2] 李金刚, 曹茂盛, 张永, 等. 国外透波材料高温电性能研究进展[J]. 材料工程, 2005, (2): 60- 61.  
[3] 黎义, 张大海, 陈英, 等. 航天透波多功能材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2000, 30(5): 1- 5.  
[4] 李金刚. 石英纤维增强二氧化硅复合材料高温物态及高温介电性能研究[D]. 北京理工大学硕士学位论文, 2006. 14- 20.  
[5] GIORDANO S T. Effective medium theory for dispersions of die-

lectric ellipsoids[J]. Journal of Electrostatics, 2003, 58: 59- 76.  
[6] MACKAYA T G, LAKHTAKI A B, WEIGLHOFER W S. Homogenisation of isotropic, cubically nonlinear, composite mediums by the strong permittivity. fluctuation theory: third-order considerations[J]. Optics Communications, 2002, 204: 219- 228.  
[7] ADRIAN D, THOMAS W. T-matrix method for electromagnetic scattering from scatters with complex structure[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2001, 70: 663 - 673.  
[8] CHYLEK P, VIDEEN G. Scattering by a composite sphere and effective medium approximations[J]. Optics Communications, 1998, 146: 15- 20.  
[9] 杜昊, 肖金泉, 谭明辉, 等. 利用有效媒质理论对纳米金属薄膜介电函数的初步分析[J]. 金属学报, 2000, 36(11): 1165- 1169.

基金项目: 973 计划(5131803) 资助项目  
收稿日期: 2006-05-28; 修订日期: 2006-10-20  
作者简介: 房晓勇(1963- ), 男, 教授, 主要从事电磁功能材料研究, 北京理工大学材料科学与工程学院(100081)。  
\* 李仲平, “973” 技术首席, 先进功能复合材料国防科技重点实验室