

引用格式:高东,李永利,邓颖,等.旁路耦合电弧 TIG 焊原理及工艺研究[J].热加工工艺,2025,54(1):65-69.

DOI: 10.14158/j.cnki.1001-3814.20223453  
http://www.rjggy.net rjggy@vip.163.com

# 旁路耦合电弧 TIG 焊原理及工艺研究

高东<sup>1</sup>,李永利<sup>1</sup>,邓颖<sup>1</sup>,周好斌<sup>2</sup>

(1.西部宝德科技股份有限公司,陕西西安710299;2.西安石油大学材料科学与工程学院,陕西西安710065)

**摘要:**对单电源双电极旁路耦合电弧焊接方法进行了研究,主路电极是钨极,旁路电极是焊丝。首先剖析了旁路电弧产生及分流机理,利用搭建的焊接试验装置对双电极组合几何参数进行研究,再采用 H08Mn2Si 焊丝在 Q235 钢板表面进行平板堆焊试验,对旁路送丝速度与旁路电流、焊接过程稳定性、基体金属热输入的影响关系进行了研究,得到了不同总电流下稳定焊接过程的旁路送丝速度区间;最后对焊缝宏观形貌、微观形貌特征进行了分析。结果表明:当总电流一定时,随着旁路电流逐渐增大,基体金属热输入逐渐降低,焊缝宽度明显减小,焊缝高度增大,焊缝截面宽高比减小;旁路电流的增大使得焊缝过热区宽度、熔深及晶粒直径显著减小。

**关键词:**旁路耦合电弧;TIG 焊;堆焊;旁路电流

中图分类号:TG444+.7

文献标识码:A

文章编号:1001-3814(2025)01-0065-05

## Study on Principle and Process of Bypass Coupled Arc TIG Welding

GAO Dong<sup>1</sup>, LI Yongli<sup>1</sup>, DENG Ying<sup>1</sup>, ZHOU Haobin<sup>2</sup>

(1. Western Baode Technology Co., Ltd., Xi'an 710299, China; 2. School of Material Science and Engineering, Xi'an Shiyu University, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The single-power double-electrode bypass coupled arc welding process was studied. The main electrode is tungsten and the bypass electrode is wire. Firstly, the generation and shunt mechanism of bypass arc was analyzed, and the geometric parameters of double electrode combination were studied by using the built welding test device. Then, H08Mn2Si welding wire was used to conduct surfacing test on the surface of Q235 steel plate. The influence relationship between bypass wire feeding speed and bypass current, welding process stability and heat input of base metal was studied, and the bypass wire feeding speed interval was obtained at different total currents. Finally, the macro-morphology and micro-morphology characteristics of the welds were analyzed. The results show that when the total current is constant, as the bypass current increases gradually, the heat input of the base metal decreases gradually, the weld width decreases significantly, the weld height increases, and the width to height ratio of the weld decreases. The increase of the bypass current makes the width of the weld overheat zone, the penetration depth and the grain diameter decrease significantly.

**Key words:** bypass coupled arc; TIG welding; surfacing; bypass current

在常规焊接过程中,经过焊丝和工件的焊接电流相等,当需要增大焊丝的熔化速度时,也要考虑到对工件的热输入与电弧作用力也会随着增大,因此该矛盾似乎不能解决。国内外焊接领域的研究人员一直被这个矛盾困扰着,直到美国肯塔基大学的张裕明教授提出了一种双电极旁路耦合电弧 GMAW 方法,简称(DE-GMAW)<sup>[1-2]</sup>。该焊接方法与其他的降低热输入方法原理完全不同,将旁路焊枪与基体金属并联,即在主路焊枪处增加一个分支,分流了一部分流入基体

金属的电流,形成了包含旁路电弧与主路电弧的双电弧,同时实现了高焊丝熔敷率和低工件热输入,且作用于焊丝和工件的热量可以通过改变旁路电弧参数进行调节<sup>[3-4]</sup>。国内一些高校将此类旁路耦合电弧焊方法引入到电弧增材制造研究中,分析了主/旁路电流比对熔敷成形和热输入的影响<sup>[5-7]</sup>。

近年来,研究者对旁路耦合电弧焊方法做了大量探索。根据旁路的不同分为单旁路、双旁路、脉冲旁路、双丝旁路耦合电弧焊接方法,大多研究采用了两个或三个焊接电源<sup>[8-11]</sup>,只有少量研究者运用单电源进行分析<sup>[12]</sup>,对于分流机理与工艺参数方面的研究也较少。与多电源相比,采用单个电源可以使焊接成

收稿日期:2022-12-09

作者简介:高东(1993-),男,陕西西安人,工程师,硕士,主要研究方向:金属材料成型工艺;E-mail:1142670810@qq.com

本更低,控制过程简化,因此本文主要对单电源旁路耦合电弧 TIG 焊的分流机理及工艺参数进行研究。

## 1 试验装置及原理

### 1.1 试验装置

单电源旁路耦合电弧 TIG 焊接工艺试验装置包括 TIG 电源及焊枪、旁路送丝机、电流采集部分、工件温度采集部分、自动焊接小车,工作原理如图 1 所示,主要试验装置如图 2 所示,其中钨极作为主路电极接在 TIG 焊机的负极,焊丝作为旁路电极和地线均接在焊机的正极。

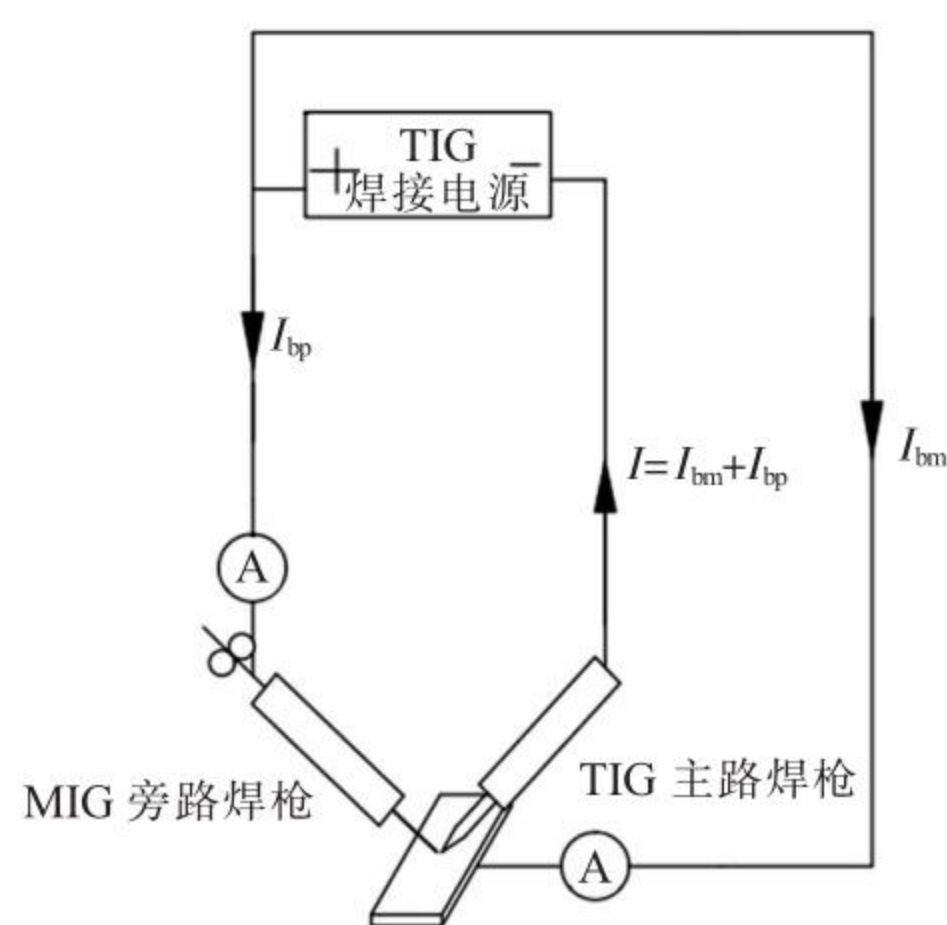


图 1 单电源旁路耦合电弧 TIG 焊原理图  
Fig.1 Schematic of single power bypass coupled arc TIG welding



图 2 主要试验装置  
Fig.2 The main test device

电流采集部分包括上限值为 300 A 的直流分流器与量程为 75 mV~300 A 的直流电流表,如图 3 所示。将直流电流表的正负极并联接在分流器的两端,在试验中用于采集旁路电流和工件电流数值。温度采集部分由热电偶、4 通道的无纸记录仪以及配套的温度采集软件组成,如图 4 所示。采用电容储能点焊机将热电偶端头焊在工件背面的测温点,再把热电偶的接线端连接在无纸记录仪上。在焊接过程中,无纸记录仪会实时记录工件温度,记录间隔时间为 2 s,且将温度数据储存下来。



图 3 电流采集部分  
Fig.3 The current acquisition part



图 4 温度采集部分  
Fig.4 The temperature acquisition part

### 1.2 旁路耦合电弧 TIG 焊原理

在接通焊接电源时,主路电极与基体金属之间有一定强度的电场,促使主路电弧中气体介质发生场致电离和电子的场致发射而产生大量的带电粒子。旁路电弧的正极正是主路电弧空间里的正离子,主路电弧弧柱区的温度较高,旁路焊丝与主路电弧相遇后,旁路焊丝在快速熔化的同时,形成了大量的金属蒸汽,提供了足够的带电粒子促使旁路电弧的形成。

最小电压原理:在焊接过程中,保持电流和其他参数不变的条件下,稳定燃烧的焊接电弧能够自主变换其导电断面,并挑选一个合适的断面以保持电弧具有最低的电场强度,即固定弧长的电位梯度最小,这说明电弧一直可以维持最低的能量消耗。

相比旁路焊丝尖端与基体金属之间的距离,旁路焊丝尖端和主路钨极尖端之间的距离更小。依据最小电压原理,为了确保最低的能量消耗,旁路电弧只会在旁路焊丝尖端与主路电弧弧柱区间最小的距离内燃烧。以下为焊接过程中的电流分配关系:

$$I_{bm} = I - I_{bp} \quad (1)$$

式中: $I$  为主路电流; $I_{bm}$  为经过工件的电流; $I_{bp}$  为流过旁路焊枪的电流。该焊接方法的根本机理为采用双焊枪形成的电弧进行耦合,流过主路电极的电流  $I$ ,在主路电极端部处分成了两路,一路是旁路电流  $I_{bp}$ ,另一路为熔化工件电流  $I_{bm}$ 。旁路电流是主路电流中分流的一部分,也作用于焊丝,因此较高的电流作用于焊丝,而进入基体金属的电流较低。故旁路耦合电弧方法不仅能保证基体金属热输入较低,而且能够满足高焊丝熔化率,可应用于高速焊接、电弧增材制造等方面。

## 2 试验方案

本次工艺试验选择了尺寸为 150 mm×50 mm×5

mm 的 Q235 低碳钢板为工件,采用了直径为 1mm 的 H08Mn2Si 焊丝, TIG 焊接电源,选择氩气作为保护气体,气体流量为 10L/min,焊接方法为平板堆焊。

试验前处理过程如下:

(1) 采用角磨机将工件表面打磨光亮,避免表面油污、铁锈及杂质等影响焊缝成型及焊接质量。

(2) 在工件正面作焊缝中心线,背面作特征点。以工件背面中心线为基准,沿夹角  $30^\circ$  方向,距离中心线 0、10、20mm 处分布 3 个特征点,如图 5 所示。此 3 个特征点作为热电偶温度测试点。

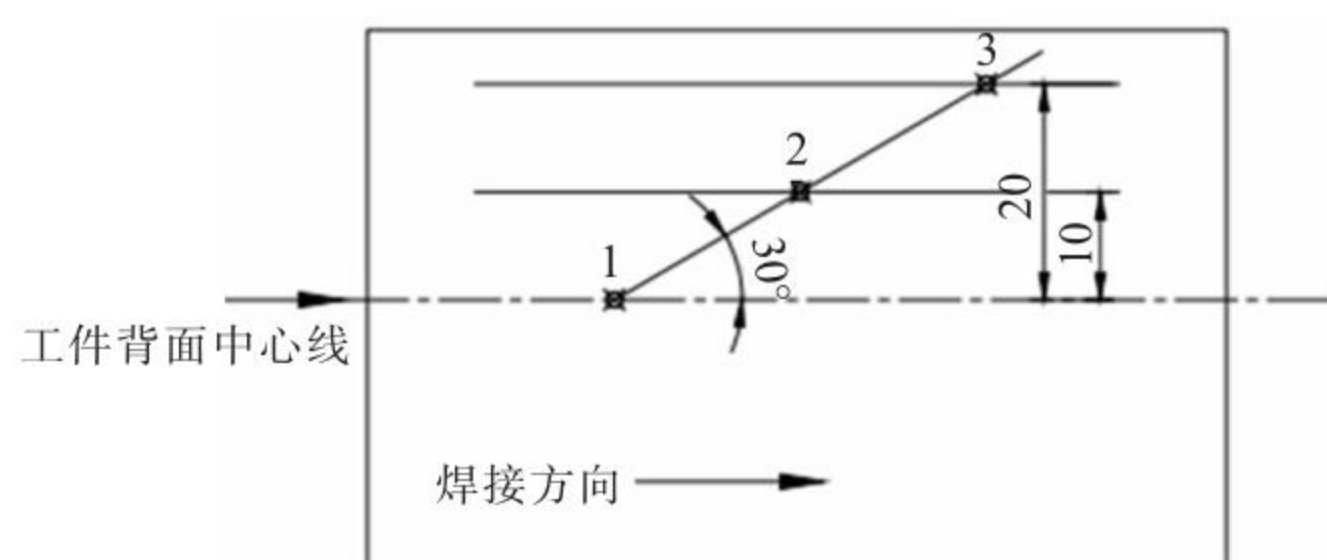


图 5 温度测试点分布  
Fig.5 Distribution of temperature test points

### 3 焊接试验结果分析

#### 3.1 焊枪组合几何参数研究及结果

单电源旁路耦合电弧 TIG 焊的双焊枪几何参数如图 6 所示。 $d_1$  为主路钨极端部与工件之间的距离; $d_2$  为旁路焊丝尖端与工件之间的距离; $d_3$  为钨极端部和旁路焊丝尖端的距离; $\theta$  为主路与旁路之间的焊枪夹角。

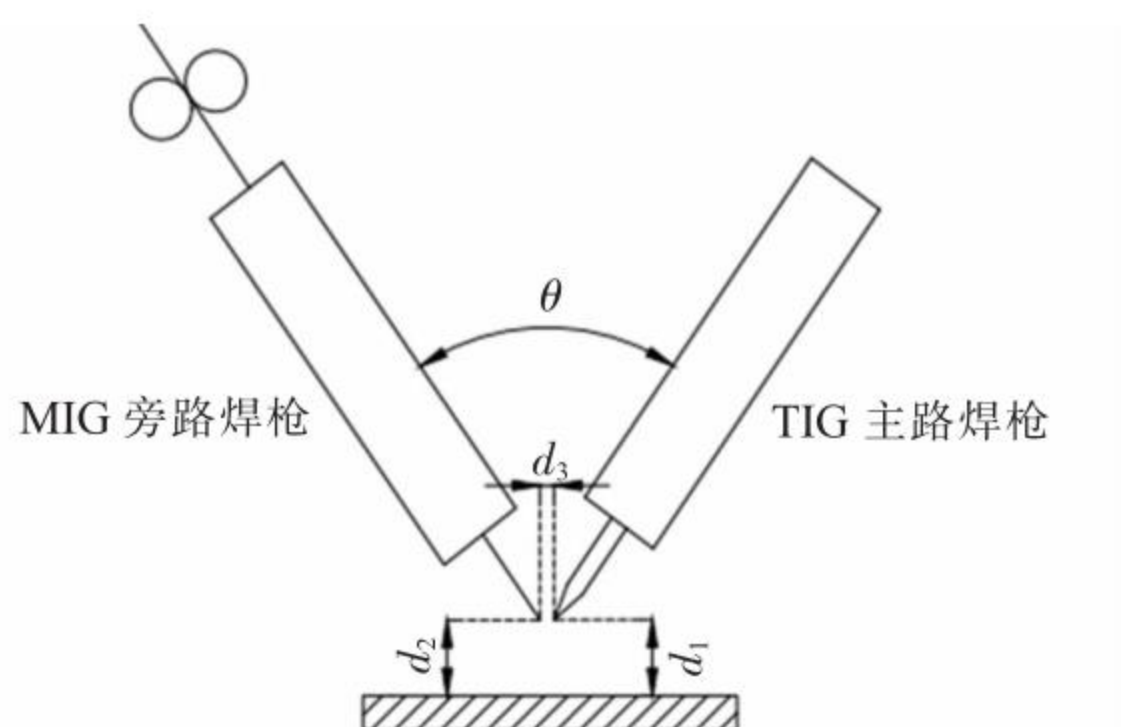


图 6 焊枪组合几何参数  
Fig.6 Combined geometric parameters of welding torches

##### 3.1.1 主路钨极尖端与工件之间的距离 $d_1$

主路钨极尖端与工件之间的距离  $d_1$  取决于焊接时设定的电源电压。根据试验结果得知:

(1) 当  $d_1$  小于  $d_2$  时,旁路电弧不能引燃,旁路焊丝从主路钨极斜侧穿过。

(2) 当  $d_1$  大于  $d_2$  时,旁路电弧不能引燃,且旁路焊丝插入熔池。

(3) 当  $d_1$  等于  $d_2$  时,且  $d_1=d_2=8$  mm 时,旁路电弧可以稳定引燃,旁路电流大小也基本稳定,能够得到稳定的电弧与焊接过程。

##### 3.1.2 主路钨极尖端和旁路焊丝尖端的距离 $d_3$

根据最小电压原理,只有两焊丝尖端之间的距离  $d_3$  远小于旁路焊丝与工件间的距离  $d_2$ ,使得旁路电弧能够维持最低的能量消耗,才可能引燃旁路电弧。

在其他参数一定时,将  $d_3$  在 1~4 mm 取值进行工艺试验,结果表明,当  $d_3$  约为 2 mm 时,旁路电弧易于引燃,而且焊接过程稳定。

##### 3.1.3 主路与旁路的焊枪夹角 ( $\theta$ )

当主路焊接电压与电流一定时, $d_1$  和  $d_2$  均为 8 mm,且  $d_3$  为 2 mm,主路与旁路的焊枪夹角  $\theta$  分别取  $35^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$  和  $55^\circ$  时进行试验。试验结果表明,当  $\theta=35^\circ$  时,旁路电弧不稳定,使得焊丝熔化也不稳定。当  $\theta=50^\circ$  和  $\theta=55^\circ$  时,旁路电弧会使钨极尖端烧损,使得钨极无法稳定维持尖端形状,从而使得焊接电弧飘动,焊接过程不稳定。只有当  $\theta=45^\circ$  时,旁路电弧稳定燃烧,也能得到良好的焊缝成型。

总结以上试验结果,得出单电源旁路耦合电弧 TIG 方法最合理的焊枪几何参数为:

(1)  $d_1$  和  $d_2$  相等,且  $d_1=d_2=8$  mm 时,耦合电弧和堆焊过程最为稳定。

(2) 钨极尖端和旁路焊丝尖端之间的距离  $d_3$  为 2 mm。

(3) 两路焊枪之间的夹角  $\theta$  为  $45^\circ$ 。

#### 3.2 稳定焊接过程的旁路送丝速度匹配区间

利用搭建的单电源旁路耦合电弧 TIG 焊接试验装置进行工艺试验,试验共分为三组:①焊接总电流为 100 A,电源电压为 18 V,焊接速度  $V_0$  为 1.21 mm/s;②焊接总电流为 150 A,电源电压为 23 V,焊接速度  $V_0$  为 1.51 mm/s;③焊接总电流为 200 A,电源电压为 26 V,焊接速度  $V_0$  为 2.28 mm/s。在这三组试验中,仅变化旁路送丝速度进行了多组工艺试验,从而获得稳定焊接过程的工艺参数匹配范围。

从图 7 可以看出,当焊接总电流为 100 A、电源电压为 18 V、焊接速度为 1.21 mm/s 时,旁路送丝速度在 1.85~2.30 m/min 的参数区间可以保证稳定焊接过程和较好的焊缝成型;保持其他条件不变,旁路焊枪从电源正极卸掉后,即无旁路分流,无论送丝速度多大,工件都被烧穿。在焊接总电流为 150 A、电

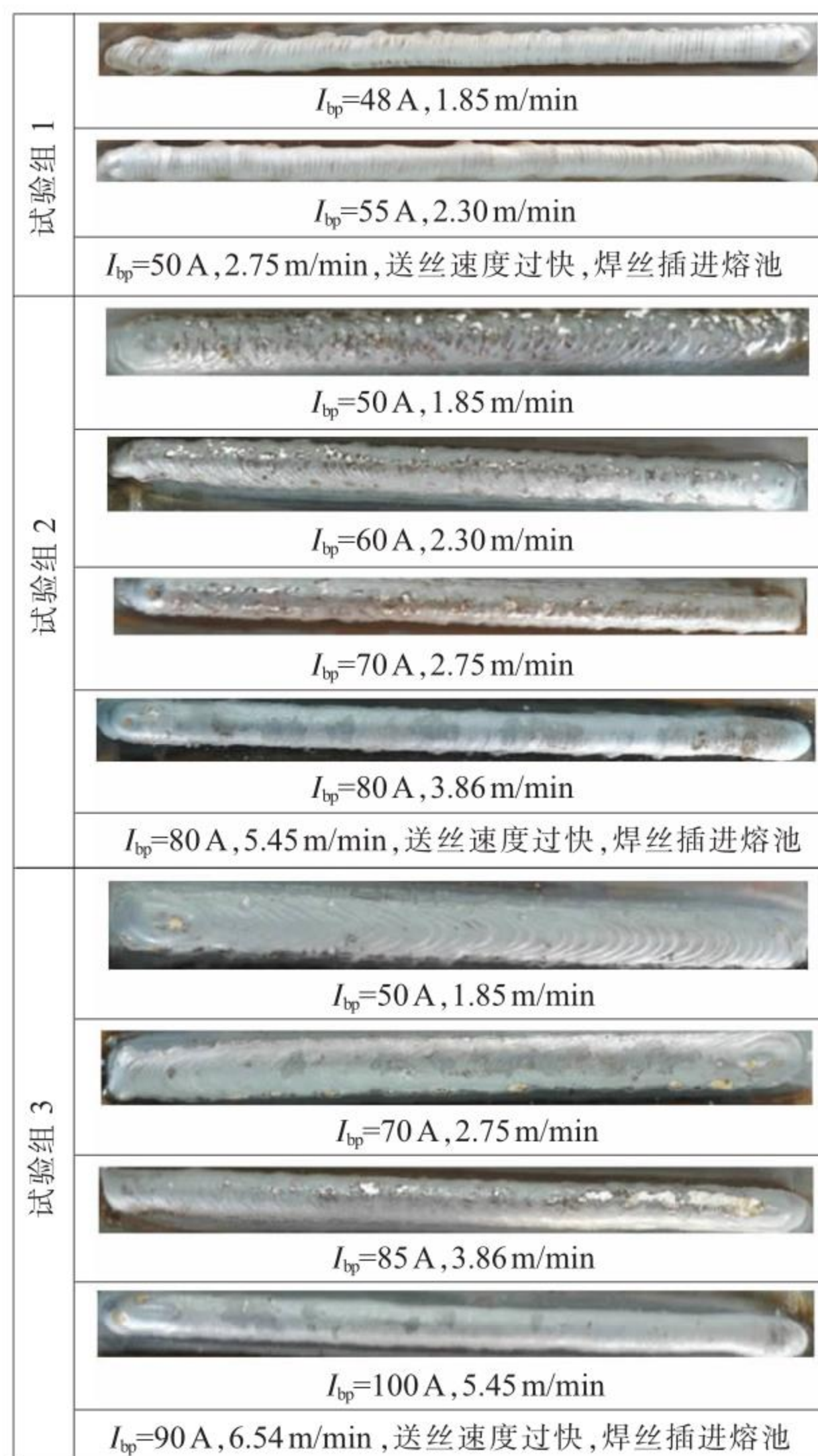


图7 不同试验组不同旁路送丝速度的焊缝形貌  
Fig.7 Weld morphologies at different bypass wire feeding speeds in different test groups

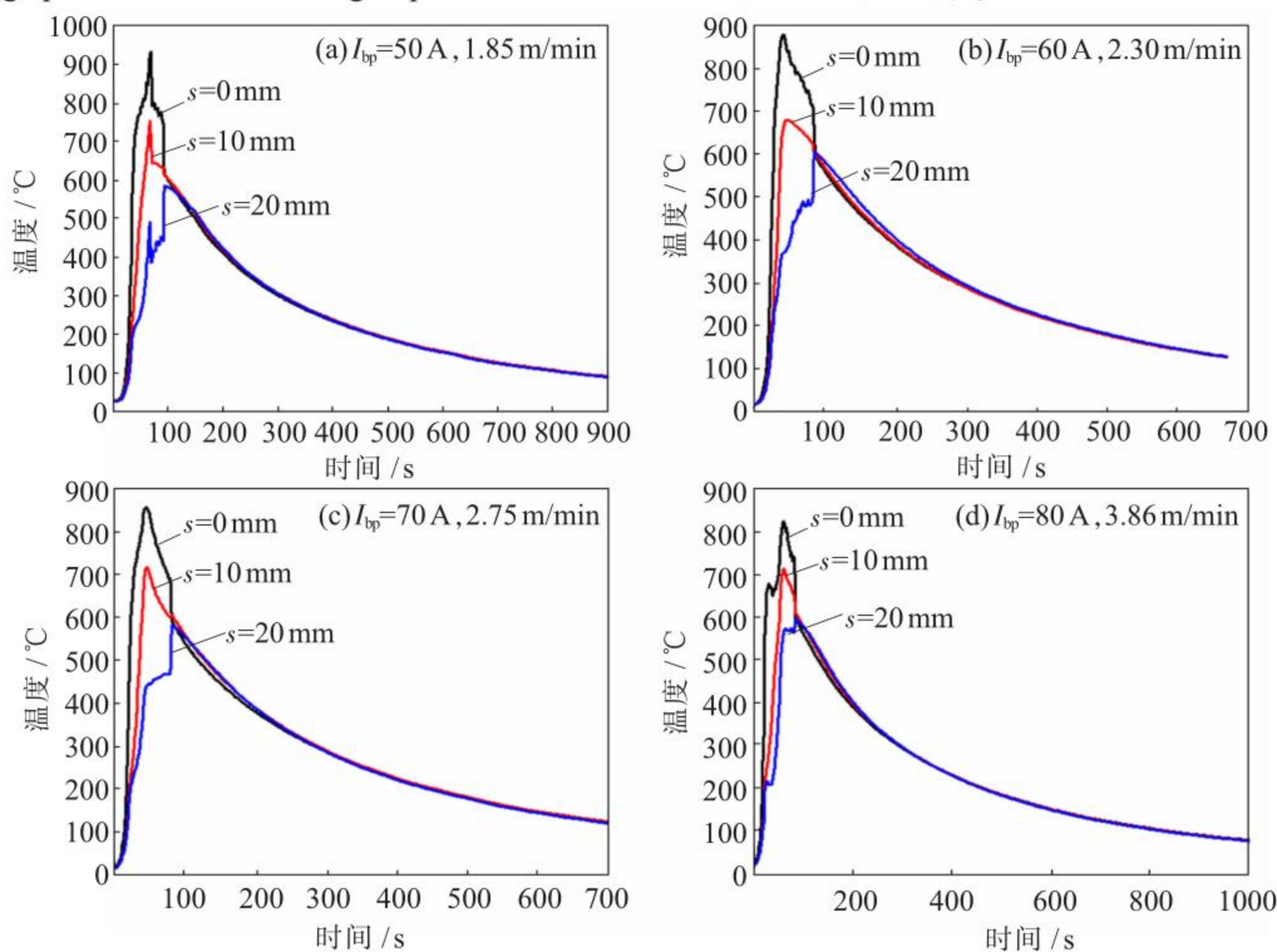


图8 试验组2中不同旁路送丝速度的温度热循环曲线图  
Fig.8 Temperature thermal cycle diagrams at different bypass wire feeding speeds in test group 2

源电压为 23 V、焊接速度为 1.51 mm/s 的条件下,当旁路送丝速度为 1.85~3.86 m/min 时,焊接过程相对稳定,焊缝表面光洁度好;当旁路送丝速度为 5.45 m/min 时,旁路送丝速率太快,焊丝插进熔池并搅拌熔池,导致焊缝成型差;保持其他条件不变,在无旁路分流情况下,只有送丝速度为 1.85 m/min 时,工件才未被烧穿。在焊接总电流为 200 A、电源电压为 26 V、焊接速度为 2.28 mm/s 的条件下,稳定焊接过程的旁路送丝速度匹配区间为 1.85~5.45 m/min;保持其他条件不变,在无旁路分流情况下,无论送丝速度多大,工件都被烧穿。

综上,该焊接方法可以同时实现提高金属熔敷率和降低工件热输入,且焊缝表面光洁度较好,焊接过程较为稳定。

### 3.3 热循环曲线测试

图8为当焊接总电流为 150 A、电源电压为 23 V、焊接速度为 1.51 mm/s 时,不同旁路送丝速度条件下的热循环曲线图。其中  $s$  表示工件背面温度测试点与焊缝中心线之间的距离。

在单电源旁路耦合电弧 TIG 焊接过程中,在焊接总电流、电源电压及焊接速度不变时,在一定范围内,旁路电流随着旁路送丝速度的增大而增大。从图8可以看出,工件背面3个测试点的峰值温度不断降低,且离焊缝中心线越远,温度越低,即基体金属热输入不断下降。

### 3.4 焊缝宏观及微观形貌分析

表 1 为 3 组试验的焊缝宏观形貌尺寸。从表中数据可以看出,采用该双电弧方法进行焊接时,当焊接总电流一定的条件下,随旁路分流逐渐增加,焊缝宽度明显减小,焊缝高度增大,导致焊道截面宽高比( $R$ )减小,这是焊丝进给量变大,而工件热输入变小的缘故。

表 1 单电源旁路耦合电弧 TIG 焊缝的截面尺寸  
Tab.1 Section sizes of single power bypass coupling arc TIG welds

总电流 /A	旁路电流 /A	焊缝宽度 /mm	高度 /mm	宽高比 $R$
100	48	6.22	4.66	1.33
	55	6.06	4.78	1.27
150	50	9.34	2.46	3.80
	60	8.94	2.68	3.34
	70	8.64	3.36	2.57
	80	7.89	4.24	1.86
200	50	10.40	1.02	10.20
	70	9.38	2.34	4.01
	85	8.08	3.20	2.53
	100	7.86	4.34	1.81

图 9 为焊接总电流为 150 A,不同旁路电流时的焊缝微观组织。从图中可以看出,当旁路电流为 50 A 时,焊缝过热区宽度为 1751  $\mu\text{m}$ ,晶粒粗大,熔深较大。当旁路电流增加到 80 A 时,焊缝过热区宽度约为 1019  $\mu\text{m}$ ,晶粒直径及焊缝熔深显著变小。

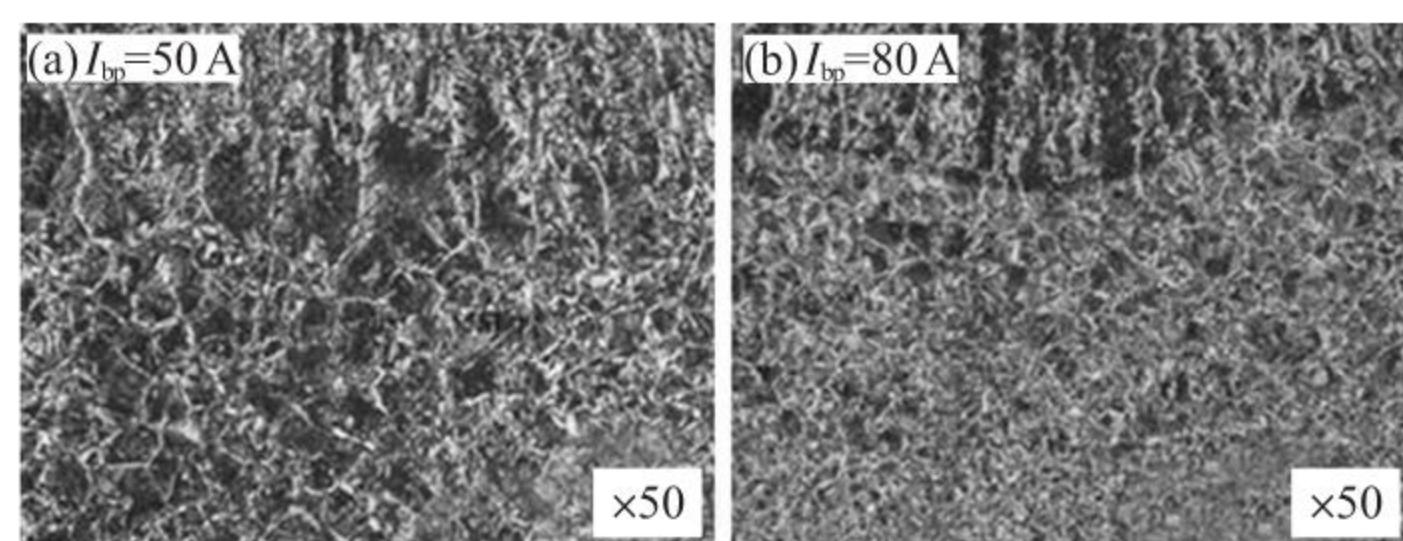


图 9 总电流 150 A,同旁路电流下的焊缝金相照片  
Fig.9 Metallographic photos of welds with different bypass coupling arc currents and total current of 150 A

## 4 结论

(1) 单电源旁路耦合电弧 TIG 方法的最合理的焊枪几何参数为:主路钨极尖端与工件之间的距离  $d_1$  和旁路焊丝尖端到工件之间的距离  $d_2$  相等,且  $d_1=d_2=8\text{ mm}$ ;钨极尖端和旁路焊丝尖端之间的距离

$d_3$  为 2 mm;两路焊枪之间的夹角  $\theta$  为  $45^\circ$ 。

(2) 利用搭建的单电源旁路耦合电弧 TIG 焊接试验装置进行了工艺试验,得到了在 100、150、200 A 焊接总电流时的稳定焊接过程的旁路送丝速度区间。通过热循环曲线测试图,得出一定范围内,旁路电流随着旁路送丝速度的增大而增大,母材热输入逐渐降低,且离焊缝中心线越远,温度越低。

(3) 通过对焊缝宏观尺寸统计得出,焊接总电流一定时,随着旁路分流逐渐增大,焊缝宽度明显减小,焊缝高度增大,焊缝截面宽高比  $R$  减小;根据焊缝微观图对比分析得知,旁路电流的增大,使得焊缝过热区宽度、熔深及晶粒直径显著减小。

### 参考文献:

- [1] Zhang Y M, Jiang M, Lu W. Double electrodes improve GMAW heat input control [J]. Welding Journal, 2004, 83(11): 39-41.
- [2] Li K H, Chen J S, Zhang Y M. Double-electrode GMAW process and control [J]. Welding Journal, 2007, 86 (7): 231-237.
- [3] Li K H, Zhang Y M. Metal transfer in double-electrode gas metal arc welding [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2007, 129(11): 991-999.
- [4] Shi Y, Liu X P, Zhang Y M, et al. Analysis of metal transfer and correlated influences in dual-bypass GMAW of aluminum [J]. Welding Journal, 2008, 87(9): 229-236.
- [5] 余淑荣,程能弟,黄健康,等.旁路耦合微束等离子弧焊增材制造的热过程[J].材料导报,2019,33(1):162-166.
- [6] 张天奕,张兆栋,王泽力,等.旁路耦合三丝间接电弧增材制造成形特性[J].焊接学报,2022,43(9):25-30.
- [7] 苗玉刚,李春旺,邵丹丹,等.碳钢旁路热丝 PAW 增材制造成形及组织和性能调控[J].焊接学报,2022,43(4):55-60.
- [8] 黄健康,韩日宏,石珏,等.双旁路耦合电弧 MIG 焊熔滴过渡受力分析[J].机械工程学报,2012,48(8):44-48.
- [9] 陈树君,门广强,宋亚修,等.旁路耦合电弧高速焊接工艺[J].焊接学报,2017,38(6):1-5.
- [10] 卢立晖,孙伟城,李磊,等.脉冲旁路耦合电弧 MIG 焊一体化专用电源建模及仿真 [J]. 上海交通大学学报,2016,50(S1): 1-5.
- [11] 张志豪.旁路耦合双丝间接电弧焊接工艺的研究[D].济南:山东大学,2018.
- [12] 王超,朱明,王雪宙,等.采用单电源双丝旁路耦合电弧高效 GMAW 方法的“碳钢-不锈钢”堆焊接头微观组织测试与分析 [J]. 热加工工艺,2016,45(15):180-182.