

# 新能源汽车驱动电机定子用扁铜线焊接工艺探究及接头性能分析

王鑫 张林立 王晓秋 杨连富 陈城 沈连生

(中国第一汽车股份有限公司, 长春 130013)

**摘要:** 使用环形光斑激光焊及钨极氩弧(TIG)焊对新能源汽车驱动电机定子用扁铜线进行焊接试验, 并对焊接工艺及接头的性能进行探究与分析。研究发现, 扁铜线环形光斑激光焊的最佳工艺为中芯功率2 500 W、环芯功率1 500 W、焊接速度290 mm/s、离焦量+5 mm, 所得到的接头成型良好, 无气孔等焊接缺陷; TIG焊的最优工艺参数为焊接电流140 A, 焊接速度150 mm/s, 所得到的接头存在少量缩孔。环形光斑激光焊工艺得到的接头最大抗剪强度为132 MPa, 其接头硬度最大值出现在焊缝中心, 约为140 HV0.2; TIG焊得到的最大抗剪强度为110 MPa, 其接头硬度最大值出现在焊缝中心, 约为128 HV0.2。环形光斑激光焊获得的焊接接头在组织形貌及力学性能上均优于TIG焊, 是更适用于扁铜线焊接的工艺。

**关键词:** 新能源汽车 扁铜线 激光焊 TIG焊 力学性能

中图分类号: U465.2; TG442 文献标志码: B DOI: 10.19710/J.cnki.1003-8817.20230366

## Investigation on Welding Process and Mechanical Properties of Flat Copper Wire for New Energy Vehicle Drive Motor Stator

Wang Xin, Zhang Linli, Wang Xiaoqiu, Yang Lianfu, Chen Cheng, Shen Liansheng

(China FAW Corporation Limited, Changchun 130013)

**Abstract:** Welding tests are carried out on flat copper wires for stator of new energy vehicles' drive motors by using two processes, ring spot laser welding and TIG welding. Moreover, the welding process and the performance of the joints are investigated and analyzed. The results show that the optimal process of flat copper wire laser welding is 2 500 W for the center core power, 1 500 W for the ring core power, 290 mm/s for the welding speed, and +5 mm for the defocusing amount, and the obtained joints are well formed without weld defects such as pores, etc.; the optimal process parameters of TIG welding are 140 A for the welding current, 150 mm/s for the welding speed, and a small amount of shrinkage holes exists in the obtained joints. The maximum shear strength of the joint obtained by the ring spot laser welding process is 132 MPa, and the maximum hardness of the joint appears in the center of the weld, which is about 140 HV0.2; while the maximum shear strength obtained by TIG welding is 110 MPa, and the maximum hardness of the joint appears in the center of the weld, which is about 128 HV0.2. The welded joints obtained by ring spot laser welding are better than the TIG welded joints in the organization, morphology, and mechanical properties, and they are more suitable for the welding of flat copper wire.

**Key words:** New energy vehicles, Flat copper wire, Laser welding, TIG welding, Mechanical properties

## 1 前言

新能源汽车驱动电机对功率密度和结构的紧

凑性有着较高的设计要求。其中, 定子槽满率(指线圈放入槽内后占用槽内空间的比例)是影响电机功率密度的重要指标之一<sup>[1-4]</sup>。有数据显示, 在

作者简介: 王鑫(1999—), 男, 助理工程师, 学士学位, 研究方向为新能源电驱定子制造工艺开发。

参考文献引用格式:

王鑫, 张林立, 王晓秋, 等. 新能源汽车驱动电机定子用扁铜线焊接工艺探究及接头性能分析[J]. 汽车工艺与材料, 2024(8): 18-26.

WANG X, ZHANG L L, WANG X Q, et al. Investigation on Welding Process and Mechanical Properties of Flat Copper Wire for New Energy Vehicle Drive Motor Stator[J]. Automobile Technology & Material, 2024(8): 18-26.

相同的空间内,扁线电机多填充20%~30%的导线,从而使整机最高效率提高2%左右<sup>[5-7]</sup>。

扁线定子的加工生产困难是阻碍扁线电机大规模应用的主要因素。在定子加工过程中,扁铜线线端(PIN角)的焊接尤为重要。驱动电机上所用的扁铜线的截面积一般不超过20 mm<sup>2</sup>,用于焊接的端面细小,焊前定位和焊接加工均存在一定难度。焊接接头的形貌、接头缺陷等因素会影响铜线的导热及导电性能,进而影响电机的功率、电机转化效率、运转速度、寿命等性能参数。在焊接工艺的选择上,定子端部的结构复杂、焊点较多,因此,对焊接效率有较高的要求,为此,应选择热输入较高,同时对夹具或环境条件要求较低的焊接工艺<sup>[8-10]</sup>。满足这种要求的焊接方法多为熔焊,其中电子束焊接具有很高的效率,但需要在真空室内完成焊接,工件运送进入真空室的工艺节拍较长;熔化极电弧(Melt Inert-Gas, MIG)焊的热输入很高,但电弧作用面积较大,不适合扁铜线这种小型焊接接头的焊接工作<sup>[10-12]</sup>;此外,针对扁铜线的冷金属过渡(Cold Metal Transfer, CMT)焊接也在开发中,但尚不成熟,难以进行大规模应用<sup>[13-15]</sup>。钨极氩弧(Tungsten Inert Gas, TIG)焊相比MIG焊具有电弧稳定、飞溅小、热输入面积小等特点,目前,已经有TIG焊应用于扁铜线焊接的相关报告<sup>[16-17]</sup>。

为了进一步优化扁铜线焊接的接头性能、提高生产效率,本文提出环形光斑激光焊接工艺。传统的高斯光源激光在焊接铜材时,往往会出现严重的焊接飞溅,而环形光斑激光能够有效抑制铜材的飞溅。

环形光斑焊接利用激光束在试件上形成一个环形的光斑,将光斑中心的金属材料加热到熔点并进行焊接。对于激光焊主要的能量吸收位置在匙孔,匙孔内部能量的吸收无法准确分析,外界环境的影响极易引起熔池的变化,从而带动匙孔的变化,极易出现匙孔坍塌、匙孔开口堵塞现象,导致匙孔内部的高温高压金属蒸气溢出,引起大量的飞溅、凹坑等现象。但环形光斑很好地缓解了匙孔不稳定问题,环形光斑的外圈会扩大匙孔开口,避免外界环境的波动影响匙孔<sup>[18-20]</sup>。

选择TIG焊及环形光斑激光焊对扁铜线进行

焊接试验,分别探究2种工艺用于扁铜线焊接的工艺参数,从组织形貌、力学性能等角度考察焊接接头的性能,从而分析得出最佳的工艺。

## 2 试验设计

### 2.1 试验材料

试验所用扁铜线材料为纯铜,表面带有漆皮,宽度为2.94 mm,厚度为1.93 mm。试验开始前,将铜线截取成长度为200 mm的小段。铜线的焊接端需进行去漆处理,去漆深度为90 mm,去漆段长度为10 mm,确保焊接位置没有漆皮和氧化膜残留,保证焊接质量,如图1所示。随后,将铜线垂直夹持在专门设计的夹具上,用于模拟PIN角的接头形式,夹具如图2所示。夹持得到的铜线焊点尺寸为2.94 mm×3.86 mm。

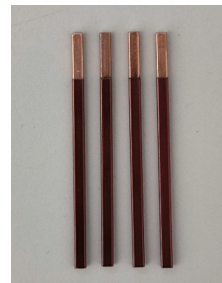


图1 焊接用扁铜线

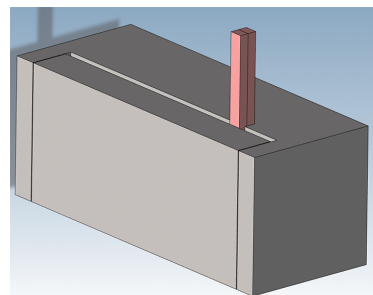


图2 扁铜线焊接夹具

### 2.2 焊接设备

所用激光器为锐科RFL-4000/2000-ABP光纤激光器,最大输出功率为6 kW,支持环形光斑中芯、环芯功率独立调节,其中中芯功率最高为4 kW,环芯功率最高为2 kW,支持连续或准连续出光。环形光斑激光在焊接时,光斑的外圈先接触到试件,使试件温度升高,能更好地吸收激光,紧接着环形光斑的中心产生深熔孔,环形光斑后半部分的外圈则会为熔池提供支撑,使熔池内部的高温高压气体溢出。与普通激光相比,环形光斑匙孔

更大、更稳定,溢出的金属蒸气动能较小,飞溅得到很好的抑制,甚至可以实现高质量的无飞溅焊缝。图 3 所示为环形光斑防飞溅机理<sup>[21]</sup>。为了进一步发挥激光焊接精度高的优势,使用菲镭泰克激光振镜头作为激光出光手段。振镜头可以使激光在面积极小的线端平面上做圆周运动,通过圆周式摆动的焊接工艺,可以进一步改善焊缝的质量。

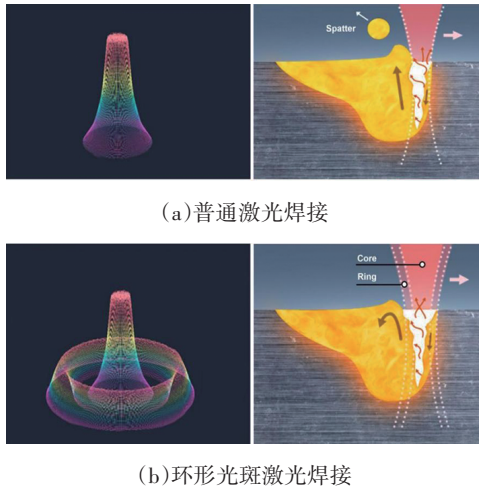


图 3 环形光斑激光焊接防飞溅机理<sup>[21]</sup>

TIG 焊机选用福尼斯 TT 1750 焊机,使用全数字化微处理器控制,数字微处理器监控整个焊接过程,并快速对任何变化做出反馈调整。焊接电流最高为 185 A,焊接电压最高为 16 V,搭配福尼斯弧焊枪,可用于焊接不锈钢、镁合金、铝合金等。

2.3 试验方案

焊接工艺如图 4 所示。使用激光或电弧在铜线线端的端面上进行环焊缝焊接,通过热源环形运动,使熔融的铜发生搅动并在重力作用下形成焊球,焊接圈数为 3 圈。

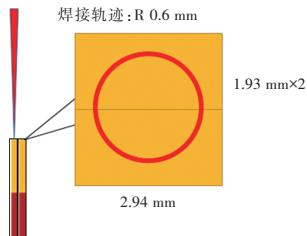


图 4 焊接工艺示意

表 1 为环形光斑激光焊接的参数选取,激光焊主要考察不同激光功率、功率分布及焊接速度对接头性能的影响;表 2 为 TIG 焊接的参数选取,TIG 焊主要考察不同焊接电流与焊接速度对接头性能

的影响。焊后对接头进行表征试验,从接头组织形貌、焊后孔隙率、剪切强度、显微硬度 4 个方面考察接头性能,得出最优的焊接工艺参数,并对比分析得出最合适的焊接工艺方法。

表 1 环形光斑激光焊接参数

中芯功率/W	环芯功率/W	焊接速度/mm·s <sup>-1</sup>	离焦量/mm
2 300	1 300	290	+5
2 400	1 400	290	+5
2 500	1 500	290	+5
2 600	1 600	290	+5
2 700	1 700	290	+5
3 500	500	290	+5
3 000	1 000	290	+5
2 000	2 000	290	+5
2 500	1 500	270	+5
2 500	1 500	280	+5
2 500	1 500	300	+5

表 2 TIG 焊接参数

焊接电流/A	焊接速度/mm·s <sup>-1</sup>
100	150
120	150
140	150
160	150
140	130
140	140
140	150
140	160

3 结果与分析

3.1 环形光斑激光焊接工艺参数对接头形貌的影响

图 5 为不同功率得到的扁铜线环形光斑激光焊接试件,其中焊缝位于试件的顶部,为端接焊缝。由于本文的焊接部位尺寸较小,为了保证焊接精度,使用正离焦量进行焊接,离焦量为+5 mm。可以看出,随着激光总功率的增大,焊球的体积逐渐增大。当总功率为 3 600 W 时,焊点没有完整的球形轮廓,这是因为此时铜线的熔融量不足,在激光的搅动作用下没能形成球状堆积。随着功率增大,焊球体积有所提高,当焊接功率达到 4 000 W 时,已经得到了成型理想的球形焊接接头,球体尺寸

与铜线线宽基本一致。继续提升功率,接头体积继续增大,当功率达到4 400 W时,其尺寸超出铜线线宽的20%。因此,4 000 W是一个较为理想的激光功率。

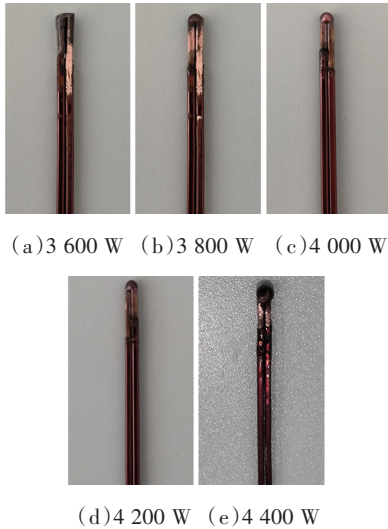


图5 不同功率的扁铜线环形光斑激光焊接试件

使用金相显微镜对焊缝的剖面进行观察分析,图6为总功率为4 000 W时环形光斑激光焊接扁铜线得到的接头宏观形貌。对宏观形貌的考察主要包括焊球是否饱满、焊球的最大宽度是否过大以及焊点中是否存在较为明显的孔隙、裂痕、未焊合区域等缺陷。若激光功率过低会导致熔池温度不足,液态金属的流动不够充分,引起局部偏析并在冷却中产生孔隙或未焊合区域;而激光功率过高则会引起烧蚀,在冷却过程中会出现裂纹,还可能出现焊球过大,甚至焊球滚落的现象。由图6可知,当总功率达到4 000 W时,得到了焊球完整,且无裂纹、孔洞等缺陷的焊点。

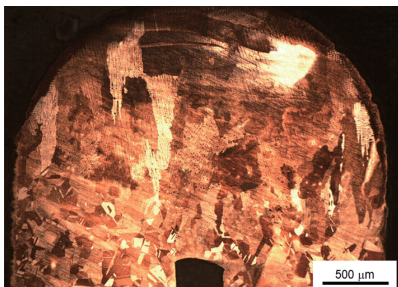


图6 环形光斑激光焊接接头宏观形貌

图7为环形光斑激光焊接得到的焊缝组织。焊接得到的接头部位可以大致分为热影响区、熔合区和焊缝中心。热影响区存在较为粗大的片状晶粒,这是因为铜线的热导率很高,当进行激

光焊接时,处于热影响区的晶粒受热而不熔化,出现明显的晶粒长大现象,冷却后得到晶粒粗化的过热组织。到熔合区时,可以看到另一种细长的晶粒,这是铜在激光作用下熔化并随后冷凝形成的,由于激光的搅动作用,这些晶粒表现出明显的方向性。观察焊缝中心,可以发现更多的细长晶粒,并夹杂有少量等轴晶粒。这是因为在焊后的冷却过程中,晶粒沿激光照射形成的温度梯度生长,当晶粒进入温度较高的区域,其前段晶粒发生重熔,并重新结晶形成新的晶粒,进而形成等轴晶区。

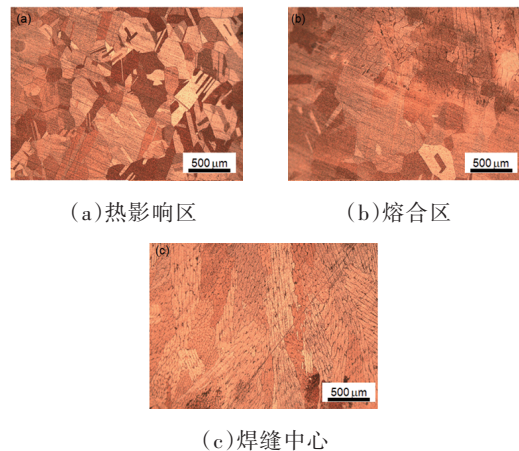


图7 环形光斑激光焊缝不同区域的组织形貌

### 3.2 环形光斑激光焊接工艺参数对接头力学性能的影响

图8为不同的激光中芯/环芯功率比下的焊接试件孔隙率,使用X射线无损检测仪检测焊球部位缺陷,定义缺陷面积与焊球截面积的比值为孔隙率。图8可以看出,当中芯功率明显高于环芯功率时,孔隙率较高,这是因为此时的热输入集中在中心点,接头的内外部位温差大,导致焊缝出现明显的应力集中,在冷却过程中可能出现裂纹、气孔等,孔隙率较大。随着中芯/环芯功率比下降,接头的孔隙率也逐渐下降,接头质量逐渐提升,当中芯功率为2 500 W、环芯功率为1 500 W时,孔隙率降低为0。当中芯/环芯功率比减小至1时,熔池的传热及流动方向已转变为由熔池两侧向熔池中心流动,形成多层熔合区和热影响区,影响焊缝中心的等轴晶形成,并难以控制片状晶及柱状晶的生长,可能会降低力学性能,并在冷却过程中形成缩孔,使孔隙率回升。

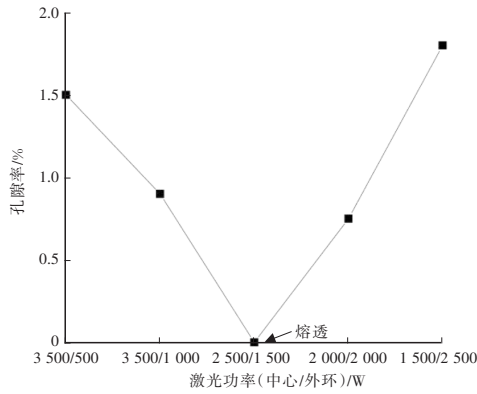


图 8 不同激光功率比的焊接试件孔隙率

图 9 为不同焊接速度的焊接试件孔隙率。焊接速度主要影响激光在单位长度上的作用时间,进而影响热输入的分布及熔池流动。当焊接速度为 275 mm/s 时,焊缝孔隙率低于 1%,约为 0.8%,因此时焊接速度较慢,激光在焊缝中的停留时间较长,致使焊缝的温度较高,热量累积,气体难以扩散而形成较多的孔隙,同时晶粒粗化,造成接头脆性增加、力学性能下降。随着焊接速度的提高,接头的孔隙率逐渐下降,接头质量逐渐提升,当焊接速度为 290 mm/s 时,孔隙率降低至 0。当焊接速度为 300 mm/s 时,单位长度上的热输入不足,熔池里的元素不能充分流动,焊缝处的接头成型不理想,存在缩孔、气孔等缺陷,使孔隙率回升。

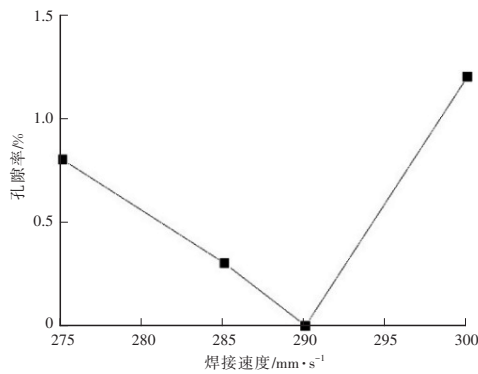


图 9 不同焊接速度的焊接试件孔隙率

对焊接试样进行强度测试,图 10 所示为强度测试试验方法示意,试验前将焊接试件加工为图 10 中的形状,使 2 根铜线的端部处于同一直线上,以便使用电子万能试验机进行测试。图 11 为试验完成后的焊点照片,可以看出,断口位于铜线上接近焊球的位置,说明断面平行于受力方向,所测强度属于剪切强度。

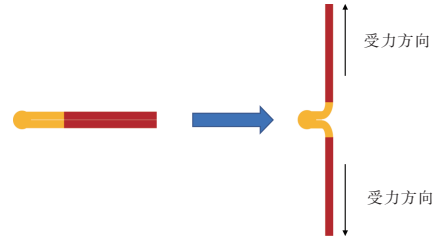


图 10 接头强度测试方法



图 11 强度测试后的环形光斑激光焊试件剪切强度的计算公式为:

$$T = \frac{F_s}{A} \quad (1)$$

式中: $T$ 为剪切强度, $F_s$ 为剪切力, $A$ 为受力面积。

图 12 为焊缝剪切强度与激光功率的关系,可以看出,随着中芯/环芯功率比例的降低,抗拉强度呈现先增大后减小的趋势,当功率为 2 500/1 500 W 时,剪切强度最大,为 132 MPa,此时接头具有最佳的力学性能。这与前面对接头形貌和孔隙率的分析一致,气孔及裂纹在剪切试验的过程中会成为裂纹源,当受到剪切应力时,裂纹就会从裂纹源沿晶界等结合力相对薄弱的位置在接头内扩展,宏观上表现为接头断裂。对于孔隙率较高的试件,由于裂纹源的密度增加,接头在剪切过程中的脆断倾向更明显,因此,其强度降低。

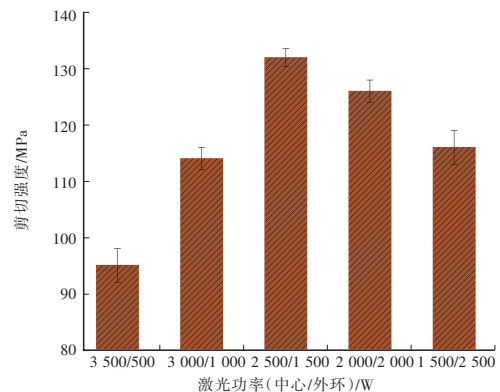


图 12 焊缝剪切强度与激光功率的关系

图 13 为焊缝剪切强度与焊接速度的关系,可以看出,随着焊接速度的提高,抗拉强度呈现先增大后减小的趋势,当焊接速度为 290 mm/s 时,剪切强度达到最大,为 132 MPa,此时接头具有最佳的力学性能。

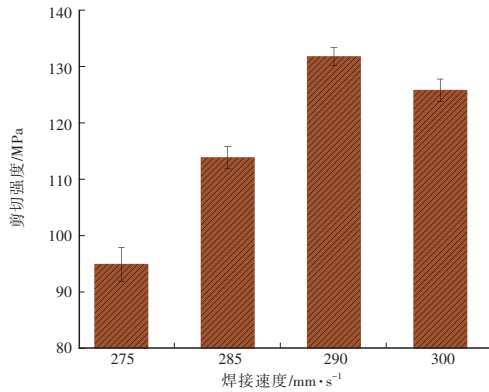


图 13 焊缝剪切强度与焊接速度的关系

对该接头的显微硬度进行测量,结果如图 14 所示。焊缝的硬度最高,为 140 HV0.2,热影响区硬度较低,约为 110 HV0.2,母材硬度约为 70 HV0.2,原因是随着母材到热影响区再到熔合区,晶粒在逐渐细化,晶界各向异性使位错等缺陷在组织中难以扩展,因此,强度与硬度呈上升态势。

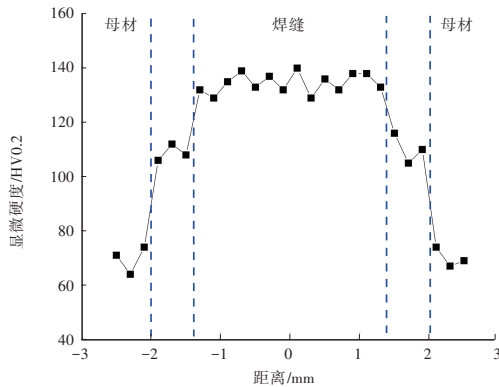


图 14 焊缝部位的显微硬度分布

### 3.3 TIG 焊工艺参数对接头组织及力学性能的影响

图 15 为不同焊接电流得到的扁铜线 TIG 焊接试件。TIG 焊的焊接电流是影响电弧热输入的主要因素,可以看出,随着焊接电流的增加,焊球的体积逐渐增大。当焊接电流为 100 A 时,焊点没有完整的球形轮廓,原因是此时铜线的熔融量不足,没能形成球状堆积。随着电流提高,焊球体积上升,当电流达到 140 A 时,能够得到尺寸较为理想的球形焊点。继续提升焊接电流,接头体积继续增大,当电流达到 160 A 时,其尺寸明显过大,且出现了偏坠现象。因此,可以认为 140 A 是较为理想的焊接电流参数。由于 TIG 焊电弧热输入较大,且电弧的焊接精度低于环形光斑激光焊,试件的漆

皮部分也出现了受热脱落现象,这表明焊点可能存在更多的过热组织,可能损害接头的力学性能。



(a) 100 A (b) 120 A (c) 140 A (d) 160 A

图 15 不同焊接电流的扁铜线 TIG 焊接试件

使用金相显微镜对焊缝的剖面进行观察分析,图 16 为焊接电流 140 A 时扁铜线 TIG 焊得到的接头宏观形貌。对于 TIG 焊的接头,若电流过小会导致熔池温度较低,熔池流动受阻,导致成分不均一而出现孔隙;电流过大则会增加接头的过热度,造成焊球体积过大,产生热裂纹等。当焊接电流为 140 A 时,得到的焊球完整,且未观察到明显的孔隙缺陷。

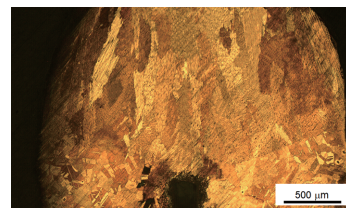
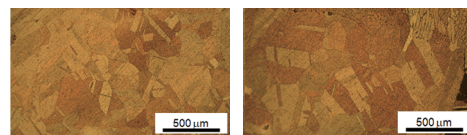
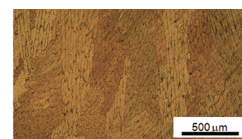


图 16 TIG 焊接头宏观形貌

图 17 为 TIG 焊试样的焊缝组织。TIG 焊接头也可分为热影响区、熔合区和焊缝中心。热影响区为粗大的过热组织,该组织的塑性和韧性较差,可能会成为焊缝的薄弱区域。熔合区可以看见明显的过热组织及细长晶粒的分界线,且存在少量的缩孔,其中,细长晶粒是焊缝中心的主要组织形貌。与环形光斑激光焊接接头相比,此时的接头处存在一定密度的孔隙缺陷,这些缺陷可能会发展成为裂纹源,降低接头力学性能。



(a) 热影响区 (b) 熔合区



(c) 焊缝中心

图 17 TIG 焊焊缝不同区域的组织形貌

图 18 为不同焊接电流焊接试件的孔隙率。当

焊接电流为 100 A 时,试件的孔隙率约为 1.3%,随着焊接电流的增大,孔隙率逐渐降低,当焊接电流达到 140 A 时,得到的接头孔隙率最低,约为 0.3%。继续增加焊接电流则会引起烧蚀和焊缝处元素的剧烈扩散,提高焊缝氧化的风险,在冷却过程中会出现裂纹,使孔隙率回升。

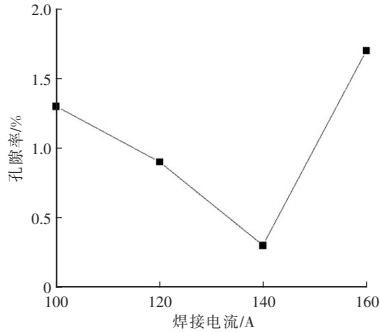


图 18 不同焊接电流的焊接试件孔隙率

图 19 为不同焊接速度焊接试件的孔隙率。当焊接速度为 130 mm/s 时,焊缝孔隙率约为 1.2%,此时的焊接速度较慢,金属的熔融量增加,熔池流动性过强导致焊缝成型不够均匀,在冷却过程中产生了较多的缩孔,同时晶粒粗化,造成接头脆性增加、力学性能下降。当焊接速度达到 150 mm/s 时,孔隙率约为 0.3%。当速度达到 160 mm/s 时,单位长度上的热输入不足,使熔池里的元素不能充分流动,焊缝处的接头成型不理想,存在缩孔、气孔等缺陷。对比 2 种焊接方法发现, TIG 焊要求的焊接速度更慢,因为电弧的焊接精度不如环形光斑激光,如果速度过快会导致电弧偏移,降低焊接质量。

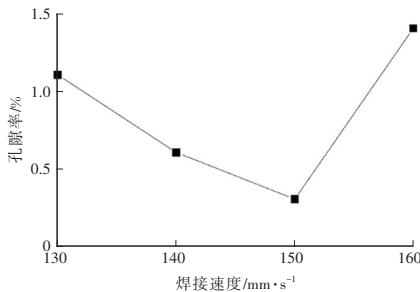


图 19 不同焊接速度的焊接试件孔隙率

对焊接试样进行力学性能分析,接头强度测试方法与环形光斑激光焊相同。图 20 为强度测试后的试件,其断口同样位于铜线上接近焊球的位置,说明断面平行于受力方向,所测强度属于剪切强度。图 21 为焊缝剪切强度与焊接电流的关系,可以看出,随着焊接电流的增大,剪切强度呈先上

升后下降的趋势,当电流为 140 A 时,剪切强度最大,为 110 MPa,此时接头具有最佳的力学性能,这一数值低于环形光斑激光焊接取得的最大抗拉强度,与前文对接头形貌和孔隙率的分析一致。



图 20 强度测试后的 TIG 焊试件

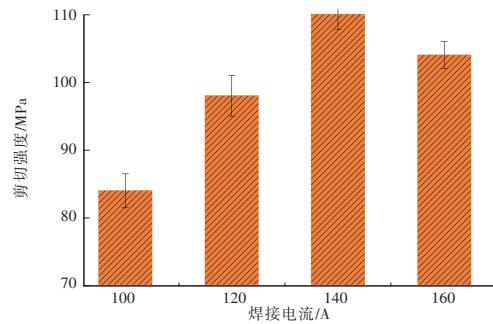


图 21 焊缝剪切强度与焊接电流的关系

图 22 为焊缝剪切强度与焊接速度的关系,可以看出,随着焊接电流的增大,剪切强度整体呈先上升后下降的趋势,当焊接速度为 150 mm/s 时,剪切强度最大,为 110 MPa,此时接头的力学性能最佳。TIG 焊接头的力学性能较环形光斑激光焊有所下降,原因是弧焊枪的电弧热输入面积较大,为了保持对线端的稳定焊接,弧焊枪不能摆动,使 TIG 焊熔池的流动状态难以控制,而环形光斑激光加工精度高,且能够通过调整中芯/环芯功率比改善熔池的热输入,因此,其焊接接头的形貌和力学性能更好。

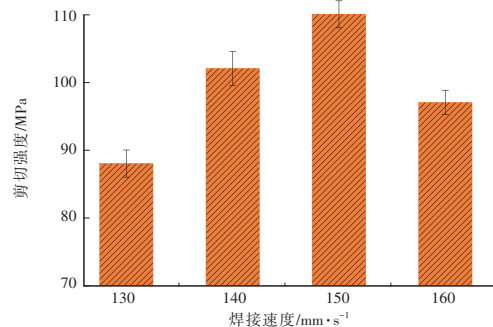


图 22 焊缝剪切强度与焊接速度的关系

对该接头的显微硬度进行测量,结果如图 23 所示。焊缝的硬度最高,最大值为 128 HV0.2,热影

响区硬度较低,约为 108 HV0.2,母材硬度约为 70 HV0.2,与环形光斑激光焊接接头一致。

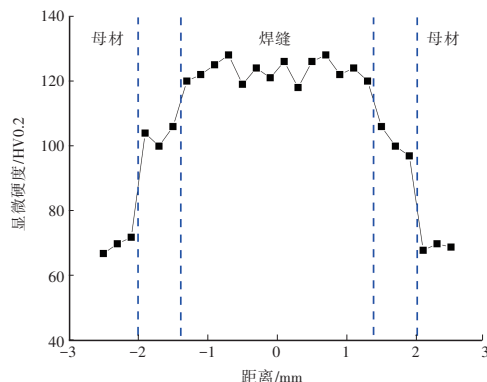


图 23 焊缝部位的显微硬度分布

#### 4 结束语

本文对扁铜线进行环形光斑激光焊接以及 TIG 焊接试验,结合组织形貌及力学性能测试,探究了焊接工艺与接头性能的关系,得出以下结论:

a. 扁铜线环形光斑激光焊接最佳工艺参数为中芯功率 2 500 W、环芯功率 1 500 W、焊接速度 290 mm/s、离焦量 +5 mm,此时焊接接头无气孔等焊接缺陷,接头最大剪切强度为 132 MPa;

b. 扁铜线 TIG 焊的最佳工艺参数为焊接电流 140 A,焊接速度 150 mm/s,此时焊接接头最大剪切强度为 110 MPa;

c. 扁铜线环形光斑激光焊及 TIG 焊的剪切断裂都发生在焊缝的热影响区处,其硬度分布为焊缝中心最高,热影响区次之,母材最低;

d. 由于环形光斑激光具有更高的加工精度,且通过调节中芯/环芯功率比能够改善熔池的热输入,因此,其焊接接头具有比 TIG 焊接头更好的组织形貌及力学性能,是更适合扁铜线焊接的工艺。

#### 参考文献:

[1] 曾凡林. Hairpin扁线电机定子工艺方法比较分析[J]. 机械设计与制造工程, 2021, 50(7): 117-121.  
 [2] 韩明达. 发卡式电机定子线圈成型方法研究[J]. 装备制造技术, 2020(5): 76-79.  
 [3] 姚学松. 基于扁铜线绕组的车用永磁同步电机性能分析[J]. 电子产品世界, 2020, 27(9): 38-41.  
 [4] 徐君贤. 电机与电器制造工艺学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.  
 [5] 潘敬涛. 新能源汽车用永磁同步电机设计[D]. 沈阳: 沈

阳工业大学, 2019.

[6] 郭晗. 电动汽车用永磁同步电机优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.  
 [7] 姜华. 扁铜线电机交流损耗的计算方法[J]. 微特电机, 2019, 47(12): 32-34.  
 [8] 王淑旺, 刘健, 马志林, 等. 基于 NEDC 的纯电动汽车两挡变速器传动比设计[J]. 机械传动, 2020, 44(1): 79-83.  
 [9] 赵韩, 冯永恺, 黄康. 纯电动汽车变速器传动比区间优化[J]. 中国机械工程, 2015, 26(5): 698-703+709.  
 [10] ZHOU Q, LI Y, DING S, et al. Design of a Permanent Magnet Assistant Synchronous Machine with Torque Improvement[C]// IEEE 6th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), 2023: 4135-4140.  
 [11] 黄康, 罗时帅, 王富雷. 纯电动汽车动力系统传动比优化设计[J]. 中国机械工程, 2011, 22(5): 625-629.  
 [12] WON H, HONG Y K, CHOI M, et al. Cost-Effectiveness Hybrid Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine for Electric Vehicle[C]// IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2021: 1-6.  
 [13] SURESH A, JINESH N, VARGHESE J, et al. Magneto-Static Analysis of A Shower Tray Trap[C]// Second International Conference on Next Generation Intelligent Systems(ICNGIS), 2022: 1-6.  
 [14] WANG W, FU L, WANG S, et al. Magnetic Pole Equivalence and Performance Analyses of Multi-Layer Flux Barrier Combined Pole Permanent Magnet Synchronous Machines Used for Electric Vehicles[J]. Energies, 2023, 16(11).  
 [15] CRĂCIUNESCU A. Current Concerns Regarding the Construction of High Power Density Electrical Machines for Electricity Transport Systems[J]. Electric Machines, Materials and Drives - Present and Trends, 2021(1): 1.  
 [16] HOFER M, SCHRODL M. Investigation of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machines for Traction Drives in High Power Flux Weakening Operation[C]// IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), 2020(6): 1-5.  
 [17] MA Q, EL-REFAIE A, LEQUESNE B. Low-Cost Interior Permanent Magnet Machine with Multiple Magnet Types[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1452-1463.

- [18] WON H, HONG Y K, LEE W, et al. Low Torque Ripple Spoke-Type Permanent Magnet Motor for Electric Vehicle[C]// IEEE International Electric Machine & Drives Conference, 2019(5): 1-6.
- [19] WON H, HONG Y K, CHOI M, et al. Cost-Effectiveness Hybrid Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Machine for Electric Vehicle[C]// 2021 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2021: 1-6.
- [20] LIN Y, SUN Y, WANG Y, et al. Axially Segmented PMASynRM with Hybrid Rotors[C]// 2020 IEEE 3rd Student Conference on Electrical Machines and Systems (SCEMS), 2020: 33-38.
- [21] IPG. Adjustable Mode Beam Lasers[EB/OL]. (2021-06-09) [2023-10-31]. <https://lasersystems.ipgphotonics.com/technology/adjustable-mode-beam>.

