

新能源扁线电机 hairpin 激光焊接头组织与性能分析

李远远, 唐峰, 柯凯

(华域汽车电动系统有限公司, 上海 201323)

摘要: 以新能源汽车扁线驱动电机为主体, 探究了扁线电机制造过程中 hairpin 连接线的激光焊接工艺。通过焊点金相、高速摄像、拉力测试、硬度测试、扫描电镜等测试手段, 验证了扁线电机连接线激光焊的制造工艺可行性和焊接质量可靠性。结果表明: 最佳焊接工艺参数为: 激光功率 3 000 W、焊接速度 200 mm/s、离焦量 0 mm, 焊接轨迹为 $\phi 2.5$ mm 的圆形、轨迹重复次数为 5。无保护气体条件下激光焊接 hairpin, 焊点内部会出现气孔。能谱测试表明, 气孔主要由氧元素引起。金相结果显示, 焊点内部气孔率为 0.5 %, 最大气孔直径为 0.1 mm。拉力测试表明, 拉力可达 1 414 N, 远超标准要求。显微硬度测试结果显示, 不同焊接热输入下激光焊 hairpin 接头焊缝区域和热影响区域均有一定程度的软化现象, 但对焊缝区域的软化影响更为明显。

关键词: 扁线电机; hairpin; 激光焊; 组织; 力学性能

中图分类号: TG456.7 文献标识码: A doi: [10.12073/j.hj.20220802002](https://doi.org/10.12073/j.hj.20220802002)

Microstructure and properties analysis of hairpin laser welded joints for new energy vehicles flat wire motors

Li Yuanyuan, Tang Feng, Ke Kai

(Huayu Automotive Electric Drive System Co., Ltd., Shanghai 201323, China)

Abstract: Taking the flat wire drive motor of new energy vehicles as the main body, the laser welding process of hairpin connecting wires in the manufacturing process of flat wire motors was studied. The manufacturing feasibility and welding quality reliability of laser welding for flat wire motor hairpins had been verified through testing methods of metallography, high-speed photography, tensile testing, hardness testing, and scanning electron microscopy. The results showed that the optimal welding process parameters were laser power of 3 000 W, welding speed of 200 mm/s, defocus distance of 0 mm, and welding trajectory $\phi 2.5$ mm circle with 5 repetitions. Under unprotected gas conditions, laser welding of hairpins might result in porosity inside hairpin welding joints. EDS testing showed that pores were mainly caused by oxygen elements. The metallographic results showed that the internal porosity of the joint was 0.5%, and the maximum porosity diameter was 0.1 mm. The tensile test showed that the tensile force could reach 1 414 N, far exceeding the standard requirements. The micro-hardness test results showed that under different welding heat inputs, both the weld area and heat affected area of hairpin joints softened to a certain extent, but the softening effect on the weld area was more significant.

Key words: flat wire motor, hairpin, laser welding, microstructure, properties

0 前言

近年来, 国内外新能源汽车市场逐步由政策驱动型转向市场驱动型。市场对于驱动电机的需求逐渐向着高功率密度、高效率、高转速及平台化的方向发

展, 而扁线绕组电机凭借其在效率、散热和性能等方面的明显优势, 逐渐替代圆线绕组电机, 成为新能源汽车驱动电机的发展趋势^[1]。

扁线电机, 是指定子绕组采用截面积为矩形的扁状漆包线代替传统的圆形漆包线^[2]。因其单根“U”形

外观的漆包线形状像发卡(hairpin), 又称为发卡电机或 hairpin 电机^[3]。在扁线电机制造组装过程中, 首先将各个扁线发卡插入到定子槽内, 经过扭头、切头工序后, 最后将各个发卡末端焊接起来, 从而实现线路的连接。

随着电动车动力需求的增加, 电机的转速越来越高, 扁线电机 hairpin 绕组的层数也由最初的 2 层、4 层升级到最新的 8 层。对于扁线电机制造过程中的焊接工艺环节来说, 绕组层数的增加造成 hairpin 焊接数量的成倍增加, 而现有的 hairpin 焊接方法 TIG 焊和 CMT 焊效率较低, 因此需要同步升级一种更高效的焊接方法以满足多层扁线电机量产节拍要求。

室温 22 ℃ 时, 紫铜对近红外激光的吸收率很低, 约为 5%, 因此紫铜对激光的高反射特性限制了激光在紫铜焊接中的应用。近年来优质光束、高功率激光器的大幅度市场化, 为紫铜激光焊提供了很大可能。扁线电机中 hairpin 激光焊, 存在对激光高反射率、对表面漆皮残留敏感、焊接工艺参数窗口小等特点, 对焊接质量调试有很大挑战。

已有国外供应商将激光焊应用于 hairpin 焊接, 并实现了量产。因此, 研究 hairpin 激光焊参数、掌握核心焊接工艺, 对提高国内扁线电机厂商技术积累和竞争力提升有较大价值。

1 试验过程

1.1 试验设备

试验用激光发生器为 IPG 光纤激光器, 最大功率 8 000 W, 输出激光波长 1 070 nm, 属于近红外激光, 已有研究证实了近红外波长的激光焊接铜的可行性^[4]。激光镜头采用 2D 高功率振镜头, 配套视觉相机及相机识别处理软件, 用于铜线 hairpin 位置识别和角度补偿。激光焊接扁线电机 hairpin 连接线的试验设备原理图如图 1 所示。焊接过程为: ϕ 夹具对待焊铜线进行定位; κ 相机对待焊铜线进行拍照; λ 识别软件对铜线 pin 位置 x, y 坐标, 传递给振镜; μ 激光器发出激光, 通过振镜到达铜线 pin 脚位置, 进行焊接。

1.2 试验材料

试验材料为电工用扁状漆包线, 成分为 TU2 无氧紫铜, 满足国标 GB/T 3952—2016《电工用铜线坯》。铜线截面尺寸为 3.5 mm×1.7 mm, 焊前使用刮漆设备对扁铜线待焊接部位 4 个面的漆皮进行剥除, 剥除要求为露出裸铜, 铜材表面及 R 角处无漆皮残留。

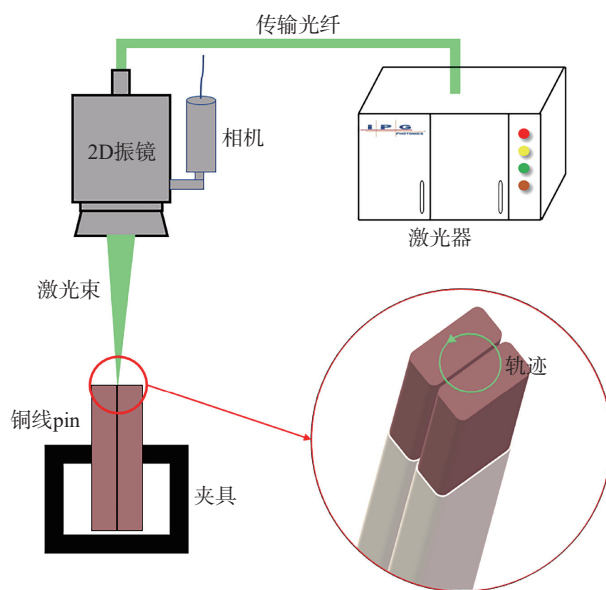


图1 hairpin 激光焊试验设备原理图

1.3 试验方法

在 hairpin 激光焊试验中, 影响焊点成形的因素很多, 有激光功率、焊接速度、激光轨迹尺寸、激光轨迹重复圈数及离焦量等。基于前期已有的工艺探索试验经验, 该研究选用激光功率、焊接速度这 2 个对焊点成形影响较大的因素作为变量, 激光轨迹、重复圈数和离焦量保持一致。激光功率设置范围为 2 500 ~ 3 500 W, 焊接速度设置范围为 100 ~ 300 mm/s, 旨在找到最优焊接工艺参数。课题共设置了 9 组参数进行对比, 编号为 1 ~ 9 号, 其焊接工艺参数见表 1。

通过观察接头的金相组织、缺陷来推测接头力学性能。接头经过镶嵌、水磨、机械抛光, 按照 GB/T 13298—2015《金属显微组织检验方法》标准, 用 4% 的 FeCl₃ 酒精溶液进行腐蚀, 腐蚀时间为 10 ~ 15 s。用 WMJ-9638 系列倒置金相显微镜对接头组织形态、缺陷特征进行观察。使用金相显微镜配套的图像分析软件, 对焊缝中的最大气孔直径、孔隙率、焊缝横截面积进行测量、统计。

采用 Regulus8230 扫描电子显微镜对气孔位置的微观形貌进行观察, 并使用 Escalab 250Xi X 射线电子能谱分析测试仪, 对气孔位置进行点分析和面分析。

按照《GMW17143 电机扁铜线拉力测试程序》制取拉力试样, 每组焊接参数取 3 个试样, 测试结果取三者平均值。用 SANS CMT 5205 型电子万能拉伸机进行拉力试验, 速率为 30 mm/min。

参照 GB/T 4340.1—2009《金属材料 维氏硬度试

表1 激光焊工艺参数

序号	激光功率 P/W	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	能量 E/J	重复圈数 $n/\text{圈}$	离焦量 d_f/mm
1	2 500	100	196.3	5	0
2	2 500	150	130.8	5	0
3	2 500	200	98.1	5	0
4	3 000	150	157.0	5	0
5	3 000	200	117.8	5	0
6	3 000	250	94.2	5	0
7	3 500	200	137.4	5	0
8	3 500	250	109.9	5	0
9	3 500	300	91.6	5	0

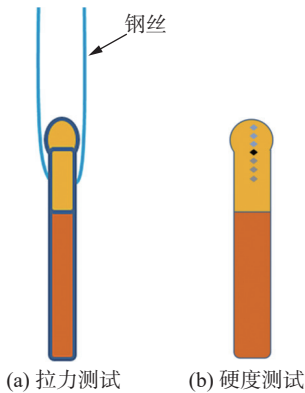


图2 hairpin 焊点拉力及硬度测试示意图

验》的要求,对试样进行打磨抛光后,在 Evernote MH-5 显微维氏硬度仪上测量各个焊接接头母材、焊接热影响区及焊缝金属区域的维氏硬度,所用载荷为 1.96 N,加载时间为 5 s。焊点拉力测量及硬度测量如图 2 所示。

2 试验结果及分析

2.1 hairpin 激光焊焊点成形原理分析

激光焊的光斑较小(一般在 0.2 mm 以下),而铜线截面相对较大,因此激光光斑必须摆动、形成一个覆盖铜线截面的重复轨迹,才能有充足的时间和热量熔化足够多的母材金属进而形成饱满的焊球。试验中的激光波长为 1 070 nm,根据铜材对 1 070 nm 波长激光的吸收率特点,室温下吸收率低于 10%,温度提升至 400 ℃ 时,对激光的吸收率增至 40% 左右,而后温度继续增加,吸收率稳定在 50% 左右,而不会继续提升^[5-6]。

图 3 展示了某一焊接工艺参数下, hairpin 激光焊

焊点成形过程的高速相机照片。可以看出, hairpin 焊点成形的过程为:激光出光→铜材逐渐熔化→激光轨迹循环→铜材持续熔化→激光停止→熔池凝固→焊点成形。如图 3(b) 所示,在第 1 圈结束时,由于热输入较小且铜对激光的吸收率较低,铜线 pin 之间未形成熔合,此时激光仅熔化了部分母材及对其余母材起到了预热作用。如图 3(c) 所示,在第 2 圈结束时,母材进一步熔化,而在图 3(d) 的第 3 圈结束时,母材的熔化量基本能覆盖两根铜线的截面。激光轨迹第 5 圈结束时,铜材持续吸收了更多的激光能量,熔化量足够多,在表面张力的作用下,熔融金属形成一个焊球形状,并随之凝固成形。

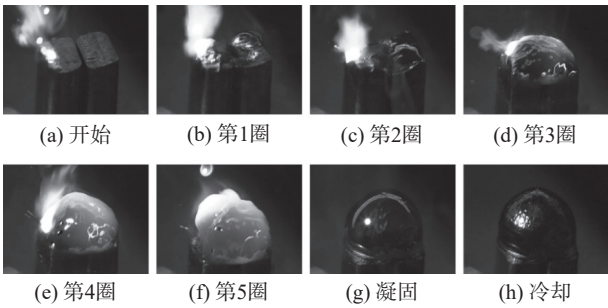


图3 高速相机下的激光焊 hairpin 焊点成形过程图

由此得出的结论是, hairpin 激光焊的过程是激光与铜材作用的过程。初始阶段,激光的主要作用为预热母材,提高母材对激光的吸收率。中间阶段,激光的主要作用为熔化足够多的母材,覆盖在两根铜线截面上。最后阶段,熔融母材在自身表面张力的作用下形成焊球。因此,对 hairpin 激光焊工艺而言,

光斑轨迹的圈数、路径大小是一个关键参数,其对焊点成形、焊球大小起着至关重要的作用。

值得注意的是,激光焊接烟尘是 hairpin 激光焊过程中的显著现象。由文献 [7] 可知,大功率激光深熔焊过程中,激光对铜材金属表面的高能作用,导致材料剧烈汽化,在母材激光作用的区域形成了“匙孔”。高能激光束使大量的金属蒸汽从匙孔中向外喷射,喷射出的部分金属气体发生电离,形成了“光致等离子体”。等离子云会对激光光束产生吸收、散射等损耗,导致实际到达母材表面的能量减弱,从而可能导致焊接成形不良。因此,采取一定的措施,消除等离子云的损耗效应,是 hairpin 激光焊的关键之一。

2.2 hairpin 激光焊焊点成形对比

该章节考查了激光焊接参数对焊点成形的影响。采用表 1 中的焊接工艺参数,对 hairpin 进行激光焊接试验,并通过金相法获得不同焊接工艺参数下 hairpin 焊点的成形图,如图 4 所示。图 4(a)~图 4(c) 是 2 500 W 功率、100~200 mm/s 焊接速度下的焊点成形照片,可以看出由于激光功率(2 500 W)不足,铜材熔化量很少,两根铜线刚刚熔合在一起,未实现可靠连接。同时可以看出,在激光功率一定的情况下,随着激光速度的增加,输入到铜材上的热量逐渐降低,导致铜材的熔化量越来越少,未形成有效的熔深、熔宽。此外,图 4(b) 焊缝内部出现了直径约为 240 μm 的气孔。

图 4(d)~4(f) 是 3 000 W 功率、150~250 mm/s 焊接速度下的焊点成形照片。可以看出,3 种焊接参数

下焊球均能够成形,原因是激光焊接的方式为深熔焊,焊缝的熔池产生了匙孔,使激光束能量吸收率大大增加。但图 4(d) 由于激光功率大、焊接速度慢,单位时间的热输入过大导致焊球过大,相对来说图 4(e) 的焊球尺寸饱满,满足要求。而图 4(f) 虽然焊球已成形,但是焊球相对较小。同时可以看出,图 4(d)~图 4(f) 均出现了不同程度的小气孔,相对来说图 4(e) 的气孔较少。

图 4(g)~图 4(i) 展示了激光功率 3 500 W、焊接速度 200~300 mm/s 参数下的成形情况。可以看出,保持激光功率 3 500 W 不变,接头的熔深、熔宽及饱满程度与焊接速度呈反相关。图 4(g) 焊点饱满,图 4(h) 焊点相对较为饱满。图 4(i) 由于焊接速度过大,热输入量不足导致母材熔化量不足,无法形成有效焊点。

对比分析图 4(c)、图 4(e)、图 4(g),可以看出,激光轨迹速度一定(200 mm/s)的情况下,随着激光功率地增加,焊缝的熔深不断增加,焊接时产生的气孔直径越来越大且数量增加。原因可能是在激光功率增加时铜材焊缝熔池反应剧烈程度增加,使得气孔产生的可能性增大,且熔深越深越不利于气孔的溢出^[8]。

2.3 hairpin 激光焊焊点气孔区域能谱分析

金相试验发现 hairpin 焊点内部存在较多的气孔。为分析气孔的类型和产生原因,在扫描电子显微镜下采用能谱仪(EDS)对接头中的气孔区域进行成分测试,如图 5 所示。

气孔区域能谱点分析如图 5(a) 所示,对应的成分分析结果见表 2。可以看出,气孔边缘和中心区域成分均为 Cu 和 O 元素,其中边缘区域的 O 元素相对较高。

图 5(b) 为气孔区域的面分析结果,同样表明了 O 元素在气孔边缘含量高的特点。由此可以推断 hairpin 焊接过程中气孔是由 O 元素引起,其来源主要是空气、绝缘漆层及铜材污染。气孔形成的过程是,焊接高温条件下铜与氧亲和力大,生成 Cu_2O 。 Cu_2O 与溶解在液态铜中的氢发生反应,形成的水蒸气不溶于铜中。由于铜的导热性强,熔池凝固较快,反应生成的水蒸气来不及溢出而形成气孔^[9]。因此,防止上述反应型气孔的主要途径为:严控铜材的含氧量,保证焊前铜材不受污染,同时保证线成形过程中漆皮去除的洁净程度。

2.4 hairpin 激光焊焊点熔深、熔宽及气孔情况

熔深和熔宽对焊缝成形以及焊点力学性能具有

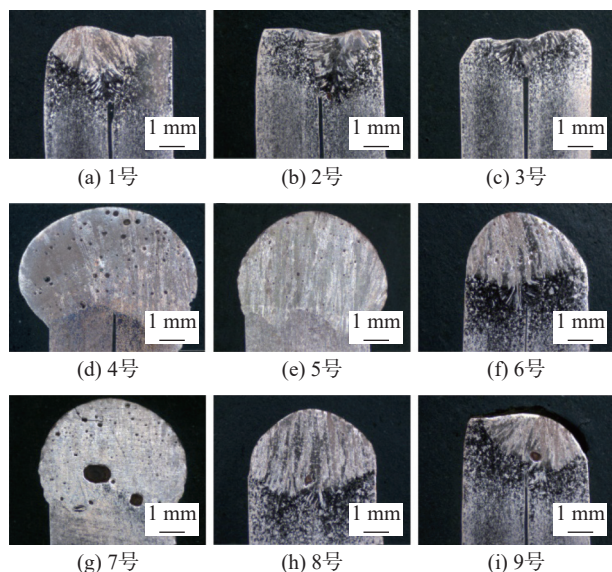


图 4 不同工艺参数下激光焊 hairpin 焊点宏观形貌

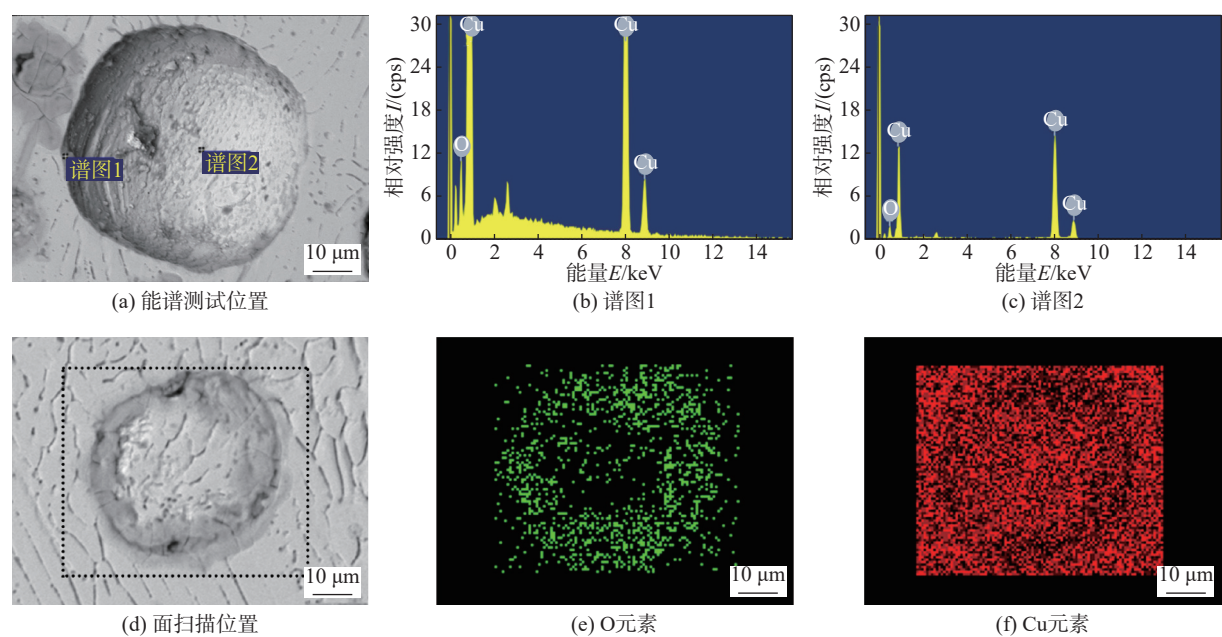


图5 焊点气孔区域的能谱点分析、面分析结果

表2 气孔区域能谱点分析成分结果

元素	位置			
	谱图 1		谱图 2	
	质量分数 $w(\%)$	原子分数 $a(\%)$	质量分数 $w(\%)$	原子分数 $a(\%)$
O	5.20	17.88	1.41	5.36
Cu	94.80	82.12	98.59	94.64

较大的影响。熔深是指母材的熔化深度,其直接决定了焊缝区域与母材之间的结合强度,也决定着焊点的承载能力。熔宽是指焊缝宽度,其同样影响着焊点强度和导电面积。试验所采用铜材的截面尺寸

为 3.5 mm×1.7 mm,根据仿真分析及振动试验验证,针对此线型的焊接要求为:熔深≥1.7 mm,熔宽 1.7~2.2 mm,截面积≥10 mm²。

表3 对 1~9 号焊接参数下的焊点熔深、熔宽、

表3 焊点熔深、熔宽、截面积统计

序号	激光功率 P/W	焊接速度 $v/(mm\cdot s^{-1})$	能量 E/J	熔深 h/mm	熔宽 w/mm	截面积 s/mm^2
1	2 500	100	196.3	1.93	0.99	3.39
2	2 500	150	130.8	1.68	1.11	2.61
3	2 500	200	98.1	1.06	0.94	1.49
4	3 000	150	157.0	2.82	2.32	13.11
5	3 000	200	117.8	2.83	2.07	10.41
6	3 000	250	94.2	1.94	1.72	4.93
7	3 500	200	137.4	2.55	2.06	10.08
8	3 500	250	109.9	2.21	1.73	6.02
9	3 500	300	91.6	1.34	1.21	2.91

最大气孔直径进行了统计。可以看出,1~3号参数下焊点的熔宽和截面积达不到要求。4号焊点熔深和截面积满足要求,但由于熔宽过大,超过2.2 mm的标准,因此判定为不合格。5号和7号焊点在熔深、熔宽和截面积3个方面均满足要求。而6号、8号和9号焊点横截面积均不满足要求。

孔隙率,是指在焊点中所有气孔比例占截面积的百分比,通常借助金相分析软件进行像素占比分析。对于hairpin焊点而言,孔隙率影响着焊点的承载能力和导流面积。孔隙率大,电流的导流面积小,造成焊点局部发热严重。最大气孔直径,是考核焊点中最大气孔的直径大小。过大的气孔,易成为焊点强度的薄弱环节,在产品动态服役周期中容易形成裂纹,造成产品失效。因此除了规定焊点的孔隙率上限外,还要规定最大气孔直径的上限。经电机整体的仿真分析和实际验证得出,对于hairpin焊点孔隙率标准 $\leq 2.0\%$,最大气孔直径标准 ≤ 0.5 mm。

图6为1~9号焊接参数下的焊点的孔隙率和最大气孔直径统计情况。可以看出,7号样品的最大气孔直径不符合标准要求。6号和7号样品的孔隙率不满足标准要求。

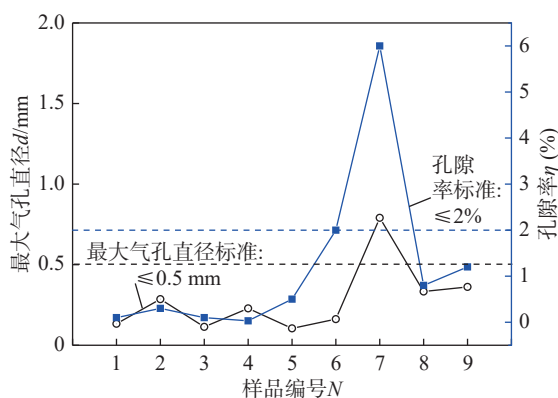


图6 不同激光焊 hairpin 焊点孔隙率及最大气孔统计

综合考虑焊点的熔深、熔宽、截面积、孔隙率和最大气孔直径等五个方面的考核因素,在1~9号样品中,仅有5号样品满足标准要求。

2.5 hairpin 激光焊焊点拉力性能分析

拉力数值是hairpin焊点最重要的考核性能指标之一,预示着电机产品在服役期间的寿命长短,影响着整车可靠性和耐久性。一般认为,拉力的大小取决于焊点的承载面积、焊点气孔和裂纹情况。测试采用钢丝法测试,焊点拉力要求为 ≥ 800 N。

图7为不同焊接工艺参数下激光焊hairpin焊点拉力性能的变化趋势。可以看出,对1号、2号、3号及9号样品,拉力数值均低于800 N,判断为不合格状态,原因是未熔化足够多的铜材形成有效焊点,导致焊点的承载面积过小。4~8号样品的拉力数值均超过了800 N,其中4号和5号样品拉力数值超过标准(800 N)的60%,7号和8号样品超过标准的约40%,而6号样品超过标准约25%。结合2.2节中的焊点金相照片可知,焊点成形饱满、内部无大气孔和裂纹,其承受负载的能力越大,抗拉强度越好。

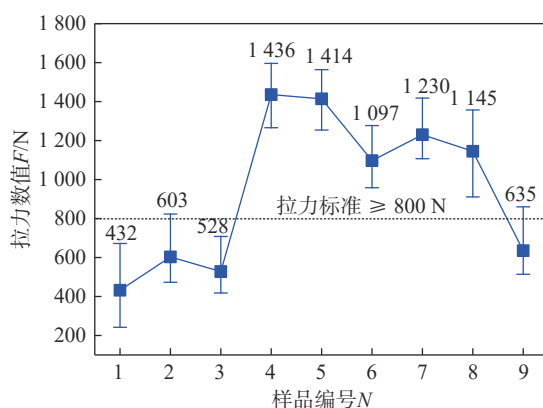


图7 不同激光焊参数下 hairpin 焊点拉力

2.6 hairpin 激光焊焊点显微硬度分析

焊接接头的硬度测试可以反映出焊接过程中的热输入对焊缝区域、热影响区域及母材的影响程度。在焊接过程中焊缝区域的热量较大,传导至与焊缝临近的母材区域,导致此区域过热而发生明显的组织和性能变化。通常情况下,组织变化表现为晶粒粗大,性能变化表现为塑性和韧性降低,通常称为“软化”^[10]。

为对实际生产应用起到指导作用,选用不同热输入量的组别(2号、4号和7号样品组)焊点不同区域(焊缝、熔合线和热影响区)进行硬度测试,硬度分布规律如图8所示。可以看出不同焊接热输入下激光焊hairpin接头硬度变化规律基本相同,即焊缝区域和热影响区域均有一定程度的软化现象。

不同的焊接热输入对焊缝区域的软化影响有较为明显的区别,表现为7号样品硬度值最低,2号样品硬度值最高。而不同的焊接能量对熔合线及热影响区的软化现象有一定程度的影响,但没有特别明显,硬度值基本稳定在53 HV左右。

由此可见,由于激光焊热量集中、焊接时间短

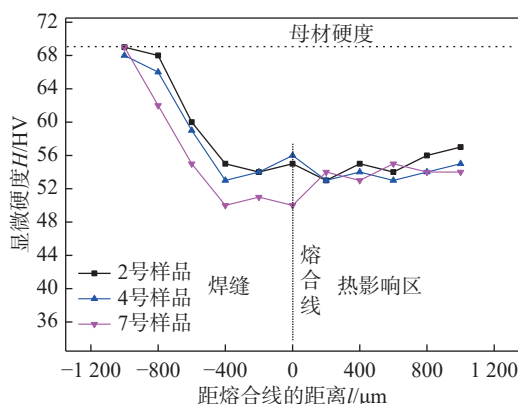


图8 不同焊接热输入下激光焊 hairpin 焊点显微硬度

的特点,其不同焊接热输入下对硬度的影响集中在焊缝区域,而对热影响区硬度的影响未见特别明显差异。

3 结论

(1)综合考虑焊点外观、金相、孔隙率、力学性能等因素,针对试验的最佳激光焊接工艺参数为5号:激光功率3 000 W、焊接速度200 mm/s、离焦量0 mm,焊接轨迹为 $\phi 2.5$ mm的圆形,轨迹重复次数为5。

(2)在无保护气体的条件下激光焊接 hairpin,焊点内部会出现一定程度的气孔。能谱测试结果显示,气孔主要为反应型气孔,由氧元素引起。需严格控制铜材中的氧含量及漆包线去漆皮工序的洁净度,以减少氧的来源。

(3)采用上述5号最佳焊接工艺参数,熔深、熔宽、横截面积高于标准要求。气孔率为0.5%,最大气孔直径为0.1 mm,焊点拉力可达1 414 N,远超标准要求。对于 hairpin 激光焊工艺而言,使用合理的工艺参数,即使是在无保护气条件下焊接,也可以得到满足产品使用要求的焊点。

(4)显微硬度测试结果显示,不同焊接热输入下激光焊 hairpin 接头焊缝区域和热影响区域均有一定程度的软化现象,但对焊缝区域的软化影响更为明显。

参考文献

- [1] Arzillo A, Braglia P, Nuzzo S, et al. Challenges and future opportunities of hairpin technologies[C]//2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Delft, Netherlands, 2020: 277 – 282.
- [2] Glaessel T, Seefried J, Franke J. Challenges in the manufacturing of hairpin windings and application opportunities of infrared lasers for the contacting process[C]//2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Würzburg, Germany, 2017: 1 – 7.
- [3] Ishigami T, Tanaka Y, Homma H. Development of motor stator with rectangular-wire lap winding and an automatic process for its production[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2014, 187(4): 51 – 59.
- [4] Liebl S, Wiedenmann R, Ganser A, et al. Laser welding of copper using multi mode fiber lasers at near infrared wavelength[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 591 – 600.
- [5] Ruettimann C, Bartlome R, Dury N. Reproducible copper welding[J]. *Industrial Laser Solutions*, 2013, 28(5): 24 – 27.
- [6] 陈君, 张群莉, 姚建华, 等. 金属材料的激光吸收率研究[J]. *应用光学*, 2008, 29(5): 793 – 798.
- [7] 陈彦宾. 现代激光焊接技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [8] 周锐, 李峰平, 洪明辉. 激光与物质相互作用及其精密工程应用 [J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2017, 47(2): 024201.
- [9] 李亚江. 焊接冶金学: 材料焊接性 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [10] 邹增大. 焊接材料、工艺及设备手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.

第一作者: 李远远, 硕士, 工程师; 主要从事新能源汽车扁线电机制造工艺和金属焊接工艺的工作; liyuan2505@163.com。

(编辑: 曲畅)

本文引用格式:

李远远, 唐峰, 柯凯. 新能源扁线电机 hairpin 激光焊接头组织与性能分析[J]. *焊接*, 2024(4): 74 – 80.

Li Yuanyuan, Tang Feng, Ke Kai. Microstructure and properties analysis of hairpin laser welded joints for new energy vehicles flat wire motors[J]. *Welding & Joining*, 2024(4): 74 – 80.