



大型直驱永磁风力发电机定子端环接线铜板焊接工艺研究

顾冬林 车三宏 李进泽 周迪生

【摘要】大型直驱永磁风力发电机定子端环焊接工序为发电机制作过程中的特殊工序，其中端环与端环接线铜板焊接尤为重要，其焊接质量的好坏直接影响焊接点的温升及焊接点处绝缘的寿命。本文采用三种不同的焊接工艺对端环与端环接线铜板进行焊接，即分别采用火焰钎焊（使用HL303）、火焰钎焊（使用HL204）、电阻钎焊（使用HL204）制作三组模拟试样和三组一字型样件，对模拟试样进行外观检查、宏观金相检测，对一字型样件进行外观检查、拉伸试验。对比分析外观检查、宏观金相、拉伸试验结果，结合焊接效率及焊接成本等因素，认为采用电阻钎焊（使用HL204）为合适的焊接工艺。

关键词：大型直驱永磁风力发电机；火焰钎焊；电阻钎焊；端环焊接

1. 概述

大型直驱永磁风力发电机在发电过程中，定子中电流的流向如下：线圈→端环→端环接线铜

板→电缆线接头→电缆线。线圈与端环、端环与端环接线铜板、端环接线铜板与电缆线接头的连接均为焊接，电缆线接头与电缆

线的连接为压接。其中端环与端环接线铜板焊接难度最大，主要原因如下：①焊接接头的搭接面积大，钎料不易填充。②端环与

缝，以此焊接完成后平面度能控制在2mm范围内（附表为现场焊接时所记录的数据），从而达到免调修状态。

当枕梁预置反变形量过小时，可通过在焊接工艺规程（WPS）规定范围内调节每道焊缝的焊接参数来保证枕梁焊接后的平面度。生产中发现某枕梁焊前预置反变形量不足3mm，通过增大1~3条焊缝焊接电流，使其热输入量增大，从而增大收缩量使反变形量增大；4~9条焊缝焊接时适当减小焊接电流，减小热输入，使收缩量减小，最终该枕

梁焊后平面度达到了设计要求。

4. 结语

本文根据焊接变形规律和工艺试验数据，综合利用工装夹具刚性固定，焊前预置反变形，焊接过程中选择适当的焊接参数等方法，最后成功制造出焊后平面度在2mm以内的枕梁。满足了加工及设计装配要求，同时也减少了调修量，缩短了生产周期并保证了产品质量，节约了生产成本。

参考文献：

[1] 贺地求，等．FSW与MIG

补焊的6005A-T6 铝合金型材FSW接头疲劳性能研究[J]．热加工工艺，2015，44(13)：20-23．

[2] 邹侠铭，唐衡郴，宋兴华．B型地铁车体枕梁制造工艺研究[J]．金属加工（热加工），2013(2)：61-63．

[3] 梁连杰，等．全焊接A型铝合金地铁底架组焊工艺研究与变形控制[J]．金属加工（热加工），2016（1）：718-721．

MW 20170910

端环接线铜板的规格大，单位面积需要热输入大。端环与端环接线铜板焊接可能出现未钎透的问题，产生质量隐患。

风力发电机定子端环焊接使用的连接方式为搭接形式，焊接设备为电阻钎焊机，我公司某一型号风力发电机定子端环和端环接线铜板的尺寸均为 $6.3\text{mm} \times 35.5\text{mm}$ ，端环与端环接线铜板的搭接长度为 35mm ，即搭接面积为 $35 \times 35\text{mm}^2$ 。为保证焊接质量，需选择合适的焊接工艺。工艺验证时分别采用方案1-火焰钎焊（使用HL303）、方案2-火焰钎焊（使用HL204）、方案3-电阻钎焊（使用HL204）进行焊接，对比焊接样件的外观检查、宏观金相、拉伸试验结果。试验结果表明，3种方案的外观检测、宏观金相及拉伸试验均合格，而方案3的焊接质量、焊接时间、焊接成本、焊接安全性、焊接难易程度等综合指标均优于方案1和方案2。此次验证结果对各类大型直驱永磁风力发电机定子端环焊接具有一定的理论参考价值及实际意义。

2. 试验材料、设备及方法

(1) 试验材料 试验所用焊接母材为T1铜，截面尺寸为 $6.3\text{mm} \times 35.5\text{mm}$ 。试验所用的钎料规格为 $0.3\text{mm} \times 36\text{mm} \times 36\text{mm}$ 的HL204箔片、 $\phi 1.5\text{mm}$ HL204焊丝和 $\phi 3\text{mm}$ HL303焊丝，QJ101粉状焊剂，母材成分如表1所示。

(2) 试验设备 试验所用焊接设备为定制的QS-80TW电阻焊机(电阻钎焊用)和氧乙炔气焊设备(火焰钎焊用)，拉伸试验

检测设备为ETM104B型万能试验机。

(3) 试验方法 每组试样含三个平行试样。模拟试样、一字型试样的接头形式均为搭接，搭接长度为 35mm 。模拟试样的结构与产品上的结构一致，模拟试样用于外观检查、宏观金相检测。一字型试样用于拉伸试验。

首先，火焰钎焊（使用HL303）：用夹具夹紧相端环与相端环接线铜板，然后用氧乙炔火焰加热，使用 $\phi 3\text{mm}$ HL303焊丝蘸取焊剂进行钎焊。制作两个相端环与相端环接线铜板焊接的模拟试样，编号为A1、A2。按照同样的焊接方法，制作3个相端环与相端环焊接的一字型试样，编号为A3、A4、A5。

其次，火焰钎焊（使用HL204）：先在相端环与相端环接线铜板之间放置一片 $0.4\text{mm} \times 36\text{mm} \times 36\text{mm}$ 的焊片，用夹具夹紧相端环与相端环接线铜板，然后用氧乙炔火焰加热，使用 $\phi 1.5\text{mm}$ HL204焊丝钎焊。制作两个相端环与相端环接线铜板焊接的模拟试样，编号为B1、B2。按照同样的焊接方法，制作3个相端环与相端环焊接的一字型试样，编号为B3、B4、B5。

最后，电阻钎焊（使用HL204）：先在相端环与相端环接线铜板之间放置一片 $0.4\text{mm} \times 36\text{mm} \times 36\text{mm}$ 的焊片，然后用电阻焊机的焊枪加持进行焊接，使用 $\phi 1.5\text{mm}$ HL204焊丝钎焊。电阻焊机参数：焊接电流

90A，焊接周期22s，休止周期6s。制作两个相端环与相端环接线铜板焊接的模拟试样，编号为C1、C2。按照同样的焊接方法，制作3个相端环与相端环焊接的一字型试样，编号为C3、C4、C5。

3. 试验结果与分析

(1) 接头外观检查 接头外观检查评定方法：参照《JB/T 6966—1993钎焊外观质量评定方法》，观察接头钎料填充是否饱满，焊缝是否存在焊瘤、开裂、密集气孔等缺陷，是否有钎料流失，以上都满足要求则为外观检测合格。

经检查，各试样表面无裂纹、无气孔，焊缝成形良好（见表2），接头外观检查合格。

(2) 宏观金相检测 接头宏观金相评定方法：将接头沿厚度方向切开，观察焊缝截面成形情况，焊缝填充饱满且无裂纹、夹杂、密集气孔等缺陷为宏观金相检测合格。图中黑线处为宏观金相的切割位置。

方案1焊接的试样A1、A2宏观金相合格，但是试样A1、A2钎料填充量较少。原因如下：搭接面积大，钎料不易填充；两工件之间的间隙不容易控制，间隙过大或过小均影响钎料填充效果，A1、A2试样两工件的间隙过小，不利于钎料的填充。

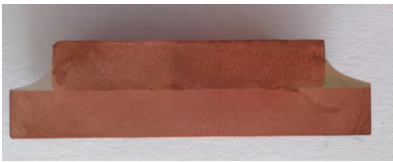
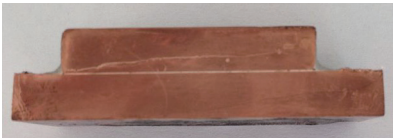
方案2焊接的试样B1、B2宏观金相合格。

方案3焊接的试样B1、B2宏观

表1 母材成分（质量分数） (%)

材料	Cu+Ag 最小值	P	Bi	Sb	As	Fe
T1铜	99.95	0.001	0.001	0.002	0.002	0.005

表2 外观检查与宏观金相检测结果

焊接方法	试样 编号	外观检查		宏观金相检测	
		照片	检验结果	照片	检验结果
火焰钎焊- 使用HL303	A1		表面无裂 纹、无气孔、 焊缝成形良好		间隙填充 良好，但钎 料填充量较 少
	A2		表面无裂 纹、无气孔、 焊缝成形良好		间隙填充 良好，但钎 料填充量较 少
火焰钎焊- 使用HL204	B1		表面无裂 纹、无气孔、 焊缝成形良好		间隙填充 良好
	B2		表面无裂 纹、无气孔、 焊缝成形良好		间隙填充 良好
电阻 钎焊- 使用HL204	C1		表面无裂 纹、无气孔、 焊缝成形良好		间隙填充 良好
	C2		表面无裂 纹、无气孔、 焊缝成形良好		间隙填充 良好

观金相合格。

通过宏观金相检测可以看出，方案2、3焊接试样的宏观金相优于方案1。在两工件之间预先放置一片0.4mm×36mm×36mm HL204焊片，然后使用 ϕ 1.5mm HL204焊丝进行钎焊，可以焊接出合格的试样。因为HL204为自钎性焊料，可以预置在两工件之间。HL303在焊接时需要配合钎剂进行使用，如果在两工件之间使用钎剂，则后续焊接时钎剂无法排出，会产生焊接缺陷。

(3) 拉伸试验检测 拉伸试验评定方法：对于纯铜搭接试样，参考《GB/T 11363—2008 钎焊接头强度试验方法》，拉伸试验检测合格标准如下：若焊缝断裂，为拉伸检测不合格；若热影响区母材断裂，强度值不低于母材退火状态下规定最低值的95%，T1铜技术条件要求最低强度为210MPa，因此试验强度值

不低于199.5MPa为拉伸性能检测合格。

从表3可以看出，各试样的拉伸试验检测结果均合格。

(4) 三种焊接工艺综合指标对比 从表4可以看出，方案3的焊接质量合格，且方案3的焊接时间、钎料成本、安全性、焊接难易程度指标均优于方案1和方案2，因此电阻钎焊（使用HL204）为端环接线铜板的合适焊接工艺。

表3 拉伸试验检测

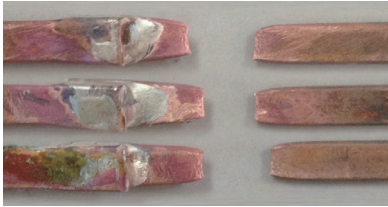
焊接方法	样件编号	照片	抗拉强度 /MPa	检验结果
火焰钎焊-使用HL303	A3		212.3	断热影响区合格
	A4		213.3	断热影响区合格
	A5		209.8	断热影响区合格
火焰钎焊-使用HL204	B3		202.5	断热影响区合格
	B4		208.6	断热影响区合格
	B5		207.3	断热影响区合格
电阻钎焊-使用HL204	C3		207.8	断热影响区合格
	C4		211.6	断热影响区合格
	C5		209.3	断热影响区合格

表4 三种焊接工艺综合对比

焊接工艺	焊接质量	每台焊接时间 /min	每台钎料成本/元	安全性	焊接难易程度
火焰钎焊-使用HL303	合格	60n	300	使用氧乙炔火焰焊接，存在一定的安全隐患	难
火焰钎焊-使用HL204	合格	48n	80		较难
电阻钎焊-使用HL204	合格	12	60	使用电阻焊机焊接，较安全	容易

4. 结语

大型直驱永磁风力发电机定子端环接线铜板焊接是定子制作过程中的特殊工序，本文采用三种焊接工艺对端环与接线铜板的焊接进行研究。通过对比分析，

三种工艺的焊接质量、焊接时间、焊接成本、焊接安全性、焊接难易程度等综合指标，确定该种发电机定子端环接线铜板的焊接工艺为电阻钎焊（使用HL204）。

本文的研究内容为大规模铜板（截面尺寸6.3mm×35.5mm）、大搭接面积（35mm×35mm）钎焊接头的焊接工艺，对各类大型永磁直驱风力发电机定子端环接线铜板焊接具有一定的参考价值及实际意义。

参考文献：

[1] 张启运，庄鸿寿. 钎焊手册[M]. 北京：机械工业出版社，2008. 6：120-122.

[2] 车三宏，曾美扬. 大型永磁直驱风力发电机定子并头电阻钎焊工艺研究[J]. 电焊机，2011，42(10)：77-82.

[3] Datta A. Rapidly solidified copper-phosphorus base brazing foils[J]. Welding Journal, 1984(10)：14.

[4] Sim R F, Willingham J A. Copper-phosphorus based (self-fluxing) brazing alloys used for joining copper and its alloys[J]. Founding Welding Production Journal, 1987, 27(7)：33-34.

作者简介：顾冬林，等，江苏中车电机有限公司。

MW 20170910

《金属加工（冷加工）》2017年第20期要目

伊达新技术电源（昆山）有限公司	1925	封面	北京金威焊材有限公司	1161	前彩2
金属加工APP	8000	封二	法国液化空气焊接公司上海代表处	1404	前彩3
梅塞尔切割焊接（中国）有限公司	1126	封三	金属加工杂志社	8000	前彩4
昆山京群焊材科技有限公司	5123	封底	金属加工杂志社	8000	I
泰佰亿（山东）工业有限公司	5032	前彩1	凯天环保科技股份有限公司	5028	III