



汽轮机9%Cr钢喷嘴与喷嘴室整体焊接工艺研究

张良华 张爱臣 李国庆

【摘要】 本文对改良型9%Cr钢进行焊接性试验，得到规范的适合喷嘴的最佳电子束焊接参数，保证了产品焊接质量，满足了设计和实际生产制造的要求。

1. 概述

为优化300MW、600MW亚临界机组喷嘴室和喷嘴组产品结构设计，节省结构空间，我公司将原来的装配后采用螺栓固定结构改为焊接结构。由于更改后部件的结构空间非常狭小，所以采用常规焊接方法焊后无法清根，并且受结构限制不能进行双面焊。另外，常规焊接方法都需要开坡口，在这种结构喷嘴上也难以实现，并且喷嘴材料选用的是改良型9%Cr钢，其焊接性较差，这些因素都成为产品的制造的瓶颈。因此考虑采用电子束焊的焊接方法，通过试验研究得到规范电子束焊接的最佳参数，以满足实际生产制造的需求。

2. 试验方法

(1) 试件选材 喷嘴材料为1Cr9MoVNbN钢，即所说的9%Cr钢，属于耐热系高合金马氏体钢。该钢除具有较高的抗拉强度及屈服极限外，还具有良好的抗高温氧化和抗蠕变性能，同时热强性较好，热膨胀系数低，但作为一种碳当量较高

(Ceq=5.29%)的马氏体钢，焊接时存在冷裂纹、接头脆化等问题，焊接性较差。1Cr9MoVNbN化学成分如表1所示，力学性能如表2所示。

(2) 焊接设备及方法 由于高能电子束焊接焊缝的宽度仅有5~6mm，焊缝成形美观，一次焊透厚度大，焊缝质量高，因此电子束焊接可实现改型喷嘴的焊接。

焊接设备为进口中压真空电子束焊机，加速电压70kV，电子

束具有10种扫描波形，最大焊接厚度为100mm，直径为3m的工作台最大承重15t，可焊接最大直径3m、高2.5m的工件。

(3) 焊接参数 电子束焊接时可变参数有7个，为得到一套最佳的焊接参数，必须通过试验匹配各参数，才能得到最佳组合。用不同的加速电压、焊接速度、电子束流、聚焦位置、扫描波形及扫描频率等进行匹配，得到焊缝外观成形美观，反面成形均匀，起弧、收弧正常的焊缝。

表1 1Cr9MoVNbN钢化学成分(质量分数) (%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	
标准值	0.09~0.13	≤0.70	≤0.80	≤0.03	≤0.01	9.10~10.00	0.65~1.00	0.13~0.20	
实测值	0.12	0.40	0.60	0.010	0.003	9.98	0.67	0.16	
Ni	Nb	N	Al	Cu	As [*]	Sn [*]	Sb [*]	H [*] (ppm)	O [*] (ppm)
0.40~0.70	0.03~0.07	0.03~0.07	≤0.025	≤0.10	≤0.005	≤0.005	≤0.001	≤3	≤70
0.51	0.048	0.035	0.001	0.050	0.001	0.002	0.001	0.14	77

注：带*的元素值为参考值。

表2 1Cr9MoVNbN钢的力学性能

	R _{p0.2} /MPa	R _m /MPa	A ₄ (%)	Z(%)	A _{KV} /J	FATT50/℃(目标值)
标准值	≥550	670	≥18	≥40	66	≤14
实测值*	585	710	20.50	63.00	91、100	12.5

注：带*的进行725℃×10h热处理。

表3 1Cr9MoVNbN的最佳焊接参数

工序	电压/kV	束流/mA	聚焦电流/mA	扫描摆幅/mm		枪距/mm	焊接速度/mm·min ⁻¹
				V _x	V _y		
预热	55	30	1550	0	0	400	200
点焊	55	80	2100	1.8	2.0	220	200
焊接	55	260	2100	1.8	2.0	220	200
修饰	55	80	2000	0	0	220	200

最佳的焊接参数如表3所示。

3. 试验结果与分析

(1) 试件解剖 对试件解剖，进行宏观金相检查，发现切口焊缝成形较理想，呈钉子形状，上宽下窄，焊缝内部未发现空洞、未熔合等缺陷。通过对焊缝宏观检查，说明在最佳的焊接参数下焊缝成形良好，能满足产品的焊接。

经过热处理后，焊接接头组织得到明显的改善，成为性能较佳的回火索氏体，焊缝及铸件侧热影响区的硬度值可以满足设计

和使用要求，结果如表4所示。

(2) 焊缝化学成分 对采用最佳参数焊接的试板进行X光射线探伤，参照乌克兰И 255.105.111标准中Ⅲ级标准要求，通过评定，焊接试板符合И 255.105.111标准中Ⅲ级标准要求。焊缝化学成分如表5所示。

(3) 力学性能 为了能更好地了解接头的性能，我们对焊接接头铸件、锻件及焊缝分别进行了力学性能测试，试验结果如表6所示。

表4 热处理后的金相组织和硬度

	铸件		焊缝	锻件	
	基材	热影响区		基材	热影响区
组织	回火索氏体	回火索氏体	回火索氏体	铁素体+碳化物	回火索氏体
硬度(HV)	218、228、221	250、238、257	347、351、341	193、189、188	261、238、265

表5 焊缝的化学成分(质量分数) (%)

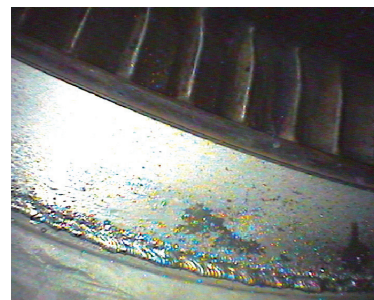
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	V	Mo	Al	N	Nb
实测值1	0.11	0.19	0.27	<0.010	0.010	0.12	9.16	0.23	0.89	<0.010	0.026	0.057
实测值2	0.11	0.48	0.63	<0.010	<0.002	0.51	9.08	0.17	0.68	<0.010	0.040	0.033

表6 焊接接头力学性能

	R _{p0.2} /MPa	R _m /MPa	A ₄ (%)	A _{KV} /J	断裂位置
铸件基材	425	600	27.0	68、72	正常
锻件基材	545	695	21.0	74、83、78	正常
焊缝	435	585	11.5	47、118、153	基材

4. 产品件焊接

对两份某机组喷嘴进行焊接，按照试件的最佳焊接参数进行焊接，得到了成形美观、焊缝质量优良的焊件。通过窥视镜观察焊缝反面成形如附图所示。清理后进行磁粉和着色检查，检测结果未发现超过标准要求的缺陷，符合设计要求。



焊缝反面成形情况

5. 结语

通过试验，得到1Cr9MoVNbN钢的最佳电子束焊接参数，在最佳焊接参数下进行焊接的喷嘴和喷嘴室，可以得到满足设计、制造要求的焊缝。此参数在洛阳热电厂的两台机组上得到应用，优化了产品结构设计的同时，焊接效率也大大提高，从装配到完成焊接仅需要两天，产品按期焊接制造完成，产品质量符合合同及规范要求，得到用户的认可及好评。

参考文献:

- [1] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册. 北京: 机械工业出版社, 1993.

作者简介: 张良华, 哈尔滨汽轮机厂有限责任公司; 张爱臣、李国庆, 大庆油田工程建设有限公司培训中心。

MW 20160425