

CICC 型超导导体外壳制作工艺研究

Research on Process Technology of CICC Superconductive Conductor Crust

宝鸡钛业股份有限公司 刘文革 颜 苏

[摘要] 通过焊接参数的选定(焊接电流 $I = 150\text{A}$, 电压 $U = 8.8\text{V}$, 焊接速度 $0.7\sim 1\text{m/min}$), 保证单根导体长度不小于 300m , 焊缝无气孔, 裂纹等焊接缺陷。使焊接后的 CICC 超导导体内部最接近焊缝位置的温度低于 183°C , 确保导体导电性能, 导体焊缝耐压试验不低于 5MPa , 且氦气密性能良好, 研制出的产品满足相关技术标准的质量要求。

关键词: CICC 超导导体 焊接 焊缝

[ABSTRACT] Better weld quality is received by choosing technical parameter of weld (weld current is 150A , weld voltage is 8.8V , weld speed is $0.7\sim 1.0\text{ m/min}$). There is no pore and flaw in weld seam of the product, the temperature of proximal weld seam in welded CICC conduct is less than 183°C , so the electric is better. Compression resistance of weld seam is more than 5 MPa , and airproof capability is better. Product can meet demands of specification.

Keywords: CICC superconductive conductor Welding Weld seam

人类赖以生存的煤、石油等资源枯竭, 能源出现严重危机。开发新的能源成为人们研究的重要课题, 世界各国为此作出了许多努力。热核聚变反应作为一种新能源, 来源广泛取之不竭, 其难度在于可控技术的约束方式。世界上现有的约束方式有 2 种: 一种是惯性约束; 另一种是磁约束。

“九五”期间, HT-TU 超导拖卡马克聚变试验装置成为我国启动实施的五项重大科学工程之一, 国家投入了大量的人力、物力、财力。20 世纪 90 年代至今, 成功的建成我国第一个超导拖卡马克 HT-TU 装置, 使我国成为继俄、法、日之后的第 4 个拥有拖卡马克装置的国家, 使我国的核聚变研究进入世界核聚变的前沿, CICC (Cable In Conduit Conductor) 超导导体作为受控核聚变反应研究装置中的关键部件, 其核心是用 CICC-NbTi 超导导体绕制的本体绕圈。在线圈内通以大电流产生强磁场产生

磁约束, 其截面形状为在不锈钢方管内复合 NbTi 超导导体, 长度大于 300m , 如图 1 所示, 经过多次的焊接试验, 不断优化比较焊接电流及焊接速度, 最终确定出合理的焊接工艺参数, 在长达 7 个多小时的 CICC 超导导体的焊接过程中未出现异常现象, 焊接平稳可靠。并且能够满足导体的超导性能。焊接过程中电缆表面温度 $\leq 200^\circ\text{C}$, 机械强度, 导体焊缝耐压试验 $\geq 5\text{MPa}$, 且氦气密性能良好。CICC 超导导体的研制成功对超导应用及超导材料工程化研究技术具有重大意义。

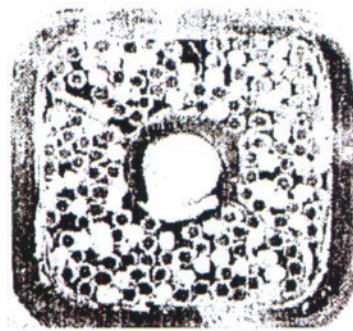


图1 超导导体截面形状

Fig.1 Section shape of superconductive conductor

1 试验材料与工艺

1.1 试验材料

试验采用 $1.5\text{mm} \times 61.5\text{mm} \times L$ 的 316L 不锈钢带, Sn、Pb 和 PbSn 合金 3 种低熔点带条, NbTi 超导导线。316L 不锈钢材质化学成份如表 1 所示。

试验设备采用从美国引进的 T&H 公司生产的直缝焊管生产线上应用的焊接设备焊接复合 CICC 型导体, 焊接前需先按工艺路线进行组装。

1.2 试验方法

1.2.1 CICC 超导导体研制工艺路线

CICC 超导导体研制工艺路线如图 2 所示。

表1 316L不锈钢材质化学成份检验

成分	C _{max}	Mn _{max}	P _{max}	S _{max}	Si _{max}	Gr	Ni	Ti	其他
含量/%	0.030	2.00	0.045	0.030	0.75	16~18	10~14	—	—

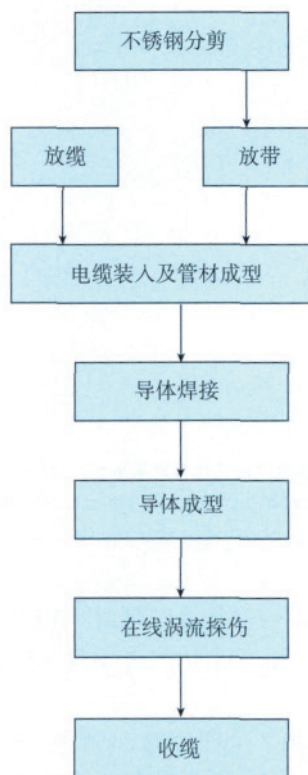


图2 CICC超导体研制工艺路线

Fig.2 Process technology of CICC Superconductive conductor

1.2.2 焊接工艺参数的选择

CICC 超导导体的焊接属于超长焊接,其长度大于 300m,焊接时间大于 7h,在此过程中不得出现任何缺陷、停机现象。焊接温度对管内超导电缆的热辐射温度不能超过 200℃。原则是:在保证焊透的前提下,保证焊接过程的稳定,选择小的焊接线能量以确保管内超导电缆的性能。焊接工艺参数选定为焊接电流 $I=150A$,电压 $U=8.8V$,焊接速度 $(0.7\sim 1)m/min$ 。

1.2.3 温度的定性测量

实验中模拟真导体的尺寸和状态^[1],在一截用 Cu 线绕制的电缆上复绕上尺寸分别为 $0.4mm \times 18mm \times L$, $0.3mm \times 13mm \times L$ 和 $0.3mm \times 27mm \times L$ 的 Sn, PbSn 合金及 Pb 带最后再包复一层 $0.1mm \times 27 \times L$ 的不锈钢带制备出尺寸为 $\phi 16.3mm$ 的模拟电缆,通过放缆,成型,焊接制备成 CICC 型导体。焊接完成后从 316L 不锈钢管中取出模拟电缆剖分 3 种材料是否熔化以确定 CICC 导体内部温度。

1.2.4 超导性能分析

把制备的 NbTi 超导导线在相邻的位置取 3 个样品,一个样品放入模拟电缆中心,一个放在表面,另一个放入电缆中,其样品的参数及位置情况如表 2 所示。

表2 超导性分析3样品参数及放入电缆位置

样品号	线径/mm	芯径/mm	芯数	芯导比	扭矩	位置
1#	0.5	1.7	24462	0.28	3.5	中心
2#	0.5	1.7	24462	0.28	3.5	表面
3#	0.5	1.7	24462	0.28	3.5	没放

2 结果与讨论

2.1 TIG 焊接不锈钢焊缝性能

焊缝金属金相检验照片如图 3、图 4、图 5 所示,从金相显微组织来看:焊缝组织良好、无气孔、夹杂、微裂纹及其他缺陷。

而 TIG 焊接不锈钢的焊缝性能(强度、耐压、氦气密)解析如表 3、表 4 所示。

从表 3、表 4 所示的力学性能检验结果中的 2 个重要指标: σ_b 、 δ ,可以看出其变化,经过成型焊接后,抗拉强度增加,断面伸长率降低,这符合材料成型后的客观



图3 焊缝

Fig.3 Weld seam

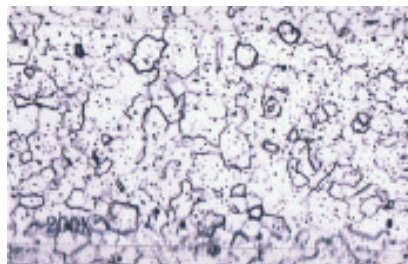


图4 母材

Fig.4 Base Material

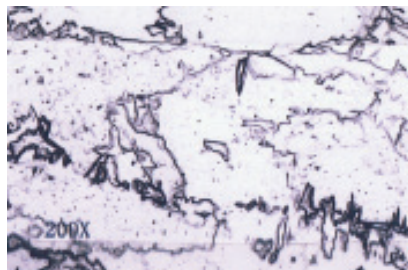


图5 热影响区

Fig.5 Heat-affected zone

表3 316L材料力学性能

试验温度 /℃	σ_t /MPa	σ_s /MPa	δ /%	硬度
20	485	170	40	B (217)

表4 316L方管力学性能

试验温度 /℃	σ_t /MPa	δ /%	式样尺寸 /mm
20	715	32	18 × 18 × 1.5 × 200

事实,其结果也能满足使用要求。

另外,我们对制备的方管按 ASTM B338 标准^[2]进行水压试验 > 17.2MPa,保压 5s,焊缝及母材为未出现异常;按 ASTM B338 标准进行气密试验 > 0.7MPa,保压 5s,未出现漏气现象。证明通过以上焊接工艺参数的选择,所制备的 CICC 型导体焊缝质量良好。

通过对 CICC 型导体的内部温度进行定性分析,Sn、Pb 和 PbSn 合金 3 种材料在焊接成 CICC 导体后都没有熔化,而导体内包覆 3 种材料的熔点分别为 Sn :232℃, PbSn 合金:183℃, Pb :317℃,说明焊接后 CICC 型导体内部最接近焊缝位置的温度低于 183℃,满足电缆表面温度 ≤ 200℃的设计要求。

2.2 导体焊接过程对超导性能的影响^[3]

按照以上工艺制备,3 个超导样品在不同背景磁场,温度场下的临界电流如表 5 所示,用表 5 数值结合表 2 内样品的参数计算 3 个样品的 I_c (临界电流密度)性能。

表5 样品的超导性能

样品号	背景场下临界电流 /A				
	3T	4T	5T	6T	7T
1#	138.6		63.3		29.3
2#	126.6	85	60	40	
3#	140	94	64	42.7	

从图 6 中可以看出,在低场区,3 个样品的性能很接近,其受热的影响较小。据分析产生这样的原因为:在低场下主要影响 NbTi 超导线 I_c 性能高低的是位错等缺陷,而在高场下主要影响 NbTi 超导线 I_c 性能高低的是二相粒子,对于以上 3 个加工热处理工艺均相同的样品来说,只是在 CICC 导体制备过程中在电缆中量的位置不同而已,即在焊接过程中受热辐射的影响不同,最靠近 CICC 导体表面的位置受热的影响最大,这样就会使位错移动减少,从而减少了 NbTi 超导线的钉扎中心,使 I_c 性能下降。而在高场区,起钉扎作用的是第二相粒子,在热处理过程中(低于再结晶温度)只会使 α -Ti

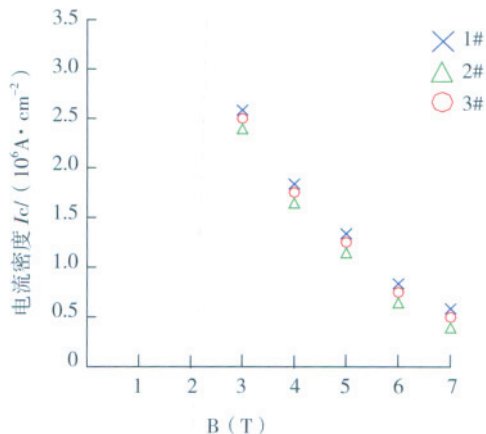


图6 3样品临界电流密度 I_c 与背景磁场 (B) 的变化曲线
Fig.6 Changing curve of 3 sample critical current density with background magnetic field

析出,而不会减少,在高场区,起钉扎作用的第二相粒子不会减少,因此,在高场区 I_c 性能下降到较慢,3 者近乎相同。

按表 5 所列出 3 个样品的 I_c 结果,在 5T,4.2K 下,把电缆内的二样品 I_c 取平均值,与没放入的样品相比较,计算超导性能的衰减,其结果如下:

$$I_c = (63.3 + 60) / 2 = 61.65A,$$

电缆中电流的下降率

$$[(64 - 61.65) / 64] \times 100\% = 3.67\%.$$

计算结果表明:焊接 CICC 导体对 NbTi 超导线超导性能衰减为 3.67%,完全达到在 5T,4.2K 下超导线的衰减率小于 5%的设计要求。

最后取 3000mm 方管,制作一个工装卡具进行氦气检漏试验,冲入氦气,压力 > 5MPa,保压 5s,未出现氦气漏气现象,证明氦气密性能良好。

3 结束语

通过对研制出的 CICC 超导体进行性能测试,表明许多的测试数值都超过了设计技术指标,且完全满足工艺要求。CICC 型超导导体的成功研制促进了我国超导应用技术和低温制冷技术的科技进步,推动了超导高技术产业化的进程。

参考文献

- [1] 中科院等离子所. HT-7U 模型导体的制作. 低温与超导, 1998(3):9-13.
- [2] 李宝增. CICC 超导体的设计及其稳定性. 低温与超导, 1995(2):17-22
- [3] 杜建通. 微型硅半导体低温温度计的特性及制作工艺. 低温与超导, 1998(2):37-41.

(责编 泰山)