

ITER TF 铠甲焊缝力学性能研究*

金 环 武 玉 韩奇阳

中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031

收稿日期: 2010-02-05; 修回日期: 2010-03-17

【摘要】 ITER TF 线圈的 CICC 导体套管由 316LN 不锈钢管采用氩弧焊自熔对焊连接而成. 选择三种不同的 316LN 不锈钢管为研究对象, 它们分别为母材管、焊接未变形管和焊接后经过 8% 的冷作变形和 650 °C 下 200 小时的老化处理的 316LN 不锈钢管, 在室温下对这三种型号的不锈钢管进行拉伸试验, 对前两种材料进行冲击试验, 同时在 4.2K 下对焊接变形并经过老化处理的管子进行了拉伸试验, 研究了母材与焊缝在室温和 4.2K 下的力学性能. 采用 SEM 对拉伸断口形貌进行了观察, 并采用金相显微镜对焊接未变形管的焊缝进行了观察. 结果表明, 断后伸长率、屈服强度、抗拉强度、杨氏模量均满足 ITER 要求, 其中 4.2K 下屈服强度 > 950MPa, 断后伸长率 > 20%. 从拉伸断口形貌的扫描电镜图片可以看出, 断口是由大量的韧窝组成, 属韧性断裂. 室温下焊接未变形管的冲击韧性与母材的相当, 焊缝的塑韧性与母材的相当.

关键词: 316LN 不锈钢, 冷变形, 断后伸长率, 屈服强度, 冲击韧性

PACC: 7470, 6220, 6220F

STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF WELDING PART OF ITER TF JACKET*

JIN Huan WU Yu HAN Qiyang

Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031

Received date: 2010-02-05; Revised manuscript received date: 2010-03-17

【Abstract】 The conduit of ITER TF coils' CICC conductor was made of modified stainless steel 316LN (SS316LN) using TIG welded from the melting to connect. Three different 316LN stainless steel conduits were measured. They were base metal, weld metal and the weld metal after 8% cold deformation at 650 °C for 200 hours aging heat treatment. At room temperature tensile tests were conducted on these three kinds of stainless steel conduits, impact tests were conducted on the first two materials. At the same time the tensile test at 4.2K was conducted on the weld materials after 8% cold work at 650 °C for 200 hours aging heat treatment, the mechanical properties of base metal and welding part were studied at room temperature and 4.2K. The tensile fracture surfaces were observed by Scanning Electron Microscope (SEM), and the welding part was observed by Metallographic Microscope. It was found that the elongation, yield strength (0.2% offset), ultimate tensile strength and Young's modulus were all satisfied the requirements of ITER. The yield strength is more than 950 MPa, and the elongation is more than 20% at 4.2K. The SEM images show the typical fracture surfaces of the tensile specimen. The dimples, which represent ductile failure. The impact strength of welded conduit is the same as the base metal at room temperature, so they had same plastic.

* ITER 超导体及校正场线圈的设计与关键技术研究(批准号: 2008GB101000)项目基金资助的课题.

* Project Supported by the Design and Research of IRER Superconducting Conductors and Correction Coils (Grant No. 2008GB101000).

Keywords: 316LN stainless steel, cold deformation, Elongation at failure, yield strength, impact strength

PACC: 7470, 6220, 6220F

1 引言

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) 是国际合作建造的热核聚变试验反应堆, 现在正处于试验堆的建设阶段. ITER 磁体系统由四个主要的子系统组成, 其中就包括有 18 个纵场线圈, 简称为 TF 线圈. TF 线圈由中心冷却螺管, 超导电缆和 TF 铠甲组成, 即 TF 导体采用的是 CICC (cable in conduit conductor) 结构, 超导线选用的是 Nb_3Sn , 如下图 1 中所示. 中国科学院等离子体所承担 TF 线圈的导体长度是 760m, 这就需要有等长度的铠甲, 但是由于受生产中各种因素的限制, 不能一次性制造出等长度的不锈钢管, 所以采用氩弧焊自熔对焊的焊接技术将多根不锈钢管连接起来以达到长度上的要求. 由于 316LN 奥氏体不锈钢具有优良的力学性能, 是热核聚变反应堆的理想材料, 所以它被广泛的用于 ITER 纵场磁体线圈 CICC 导体的套管^[1-4], 尽管其在经过热处理后表现出脆性, 但是已经有试验证明^[4-6] 添加微量的合金元素能够提高热处理后的 316LN 不锈钢管的力学性能. 按照 ITER 工艺要求, TF 铠甲在穿入超导电缆后需要经过 8% 的冷作变形, 又因为 Nb_3Sn 超导线需要经历 650℃ 下 200 小时的热处理, 在这个条件下对于奥氏体不锈钢来说就相当于一种老化处理^[7,8]. 因为 CICC 的运行是在 4.2K 的液氦环境下所以还必须测试 TF 铠甲在 4.2K 下的力学性能.

本文主要通过通过对 316LN 不锈钢管母材和焊缝的力学性能进行测试分析, 从杨氏模量、屈服强度、抗拉强度、断后伸长率和冲击韧性这些力学性能参数上加以比较, 从而判断此焊接工艺是否合格.

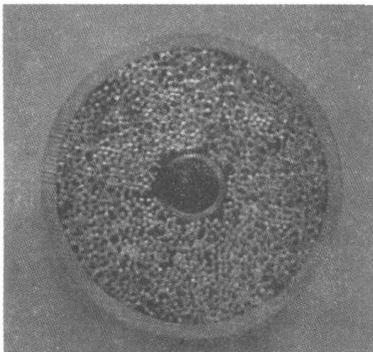


图 1 TF 导体截面图

2 实验材料及方法

实验采用宝钢生产的 316LN 不锈钢管, 其是通过电炉熔炼获得, 并且经过了真空氧化去碳 (VOD) 和电渣重熔 (ESR) 的精炼过程, 其化学成分见下表 1.

为了能够将焊缝的力学性能与母材的加以对比, 测试样品分为母材管, 焊接未变形管, 和焊接后经过 8% 的冷作变形并经过 650℃ 200 小时的热处理的不锈钢管 (以下简称焊接变形回火管), 其中冷作变形使用的是 TF 收管机, 变形量 8% 是计算的 316LN 不锈钢管纵向的伸长率, 并且所有样品的焊接都是采用氩弧焊自熔对焊而成. 焊接变形前 316LN 不锈钢管的尺寸为 $\phi 46.3\text{mm}$ (外径) $\times 2\text{mm}$ (壁厚).

表 1 TF 铠甲的化学成分

Element	Product analysis (wt%)	ITER requirement (wt%)
C	0.018	< 0.02 (目标 < 0.015)
Si	0.42	< 0.75
Mn	1.51	< 2.0
P	0.007	< 0.04
S	0.002	< 0.03
Cr	17.40	16.0- 18.0
Ni	12.20	11.0- 14.0
Mo	2.30	2.0- 3.0
Co	0.010	< 0.1
N	0.140	0.14- 0.18

2.1 拉伸试验

在母材管、焊接未变管、焊接变形回火管上分别取了两个试样, 按照标准 ASTM A370 进行了室温下的拉伸试验, 为了检验焊缝在低温下的性能, 同时在焊接变形回火管上取了四个试样在进行了 4.2K 下的拉伸试验. 所有试样取向都是沿着管子的纵向, 并且除母材管外所有焊接管所取试样均保证焊缝位于试样的中间部位, 取样形状以及尺寸如下图 1 中

所示. 拉伸试验在 MTS-SANS CMT5000 系列微机控制电子万能试验机上进行, 拉伸的位移速率为 2mm/min, 载荷-位移曲线在拉伸试验过程中同步记载.

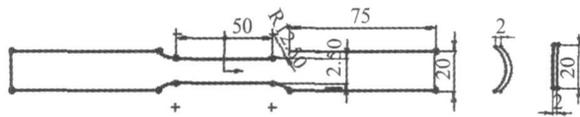


图 2 拉伸样品形状及尺寸图

2.2 冲击试验

对母材管和焊接未变形管按照国家标准 (GB2650-89) 取样进行了夏比冲击试验, 以测定其断裂能量. 冲击试验在 XJ300A 冲击试验机上进行, 图 3 示出了焊接未变管冲击试验的取样及样品尺寸, 另外母材管的取样及尺寸与焊接未变管的相同.

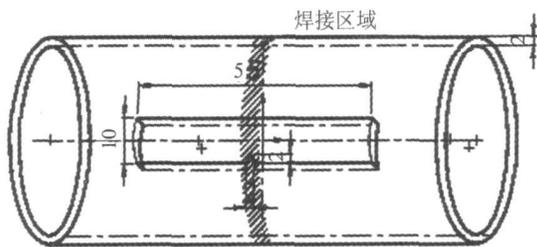


图 3 冲击试验取样

表 2 316LN 在 300K 和 4.2K 的拉伸试验数据

Tem.	NO.	YS ¹ (MPa)	YS ² (MPa)	UTS ¹ (MPa)	UTS ² (MPa)	EL ¹ (%)	EL ² (%)	YM ¹ (GPa)
300K	1 ^a	340	349.43	675	659.35	48	51.5±	195
	2 ^a	335	±1.85	670	±11.02	47	2.58	197
	3 ^b	320	285.38	610	541.31	37	22.01±	196
	4 ^b	325	±5.85	600	±8.00	34	1.93	194
	5 ^c	500	508.11	730	689.55	22	19.28±	195
	6 ^c	495	±20.92	725	±18.72	23	6.01	196
	7 ^c	1155		1590		38		205
4.2K	8 ^c	1165	1077.53	1600	1531.9	37	25.28	207
	9 ^c	1165	±56.92	1610	±72.69	37	±1.57	206
	10 ^c	1170		1610		39		205

^a 母材管样品; ^b 焊接未变形管样品; ^c 焊接变形回火管样品; ¹ 本次试验结果; ² 引自文献^[9]

2.3 晶粒度

为了观察焊接和冷加工及冷加工后 650℃200 小时老化处理对晶粒度的影响, 本文分别对母材管, 焊接未变形管和焊接变形回火管的横向和纵向的晶粒度按照标准 ASTM E112-96(2004) e1 进行了检测.

3 实验结果

拉伸试验所得到的屈服强度¹、抗拉强度¹、断后伸长率¹ 和杨氏模量¹ 如表 2 中所示, 同时附上文献^[9] 中的数据作为参考, 对比可以看出所有力学性能参数随外在条件变化而变化的趋势相同. 但是由于试验条件存在差异, 所以下表中所列出的两次试验的结果无直接的对比性.

图 4 为试验样品的拉伸断口形貌, 从图中可以看出所有样品的拉伸断口形貌是由韧窝组成, 所以无论是 300K 还是 4.2K 下所有样品的断裂均是典型的韧性断裂, 未出现脆断现象, 并且未发现有明显的裂纹.

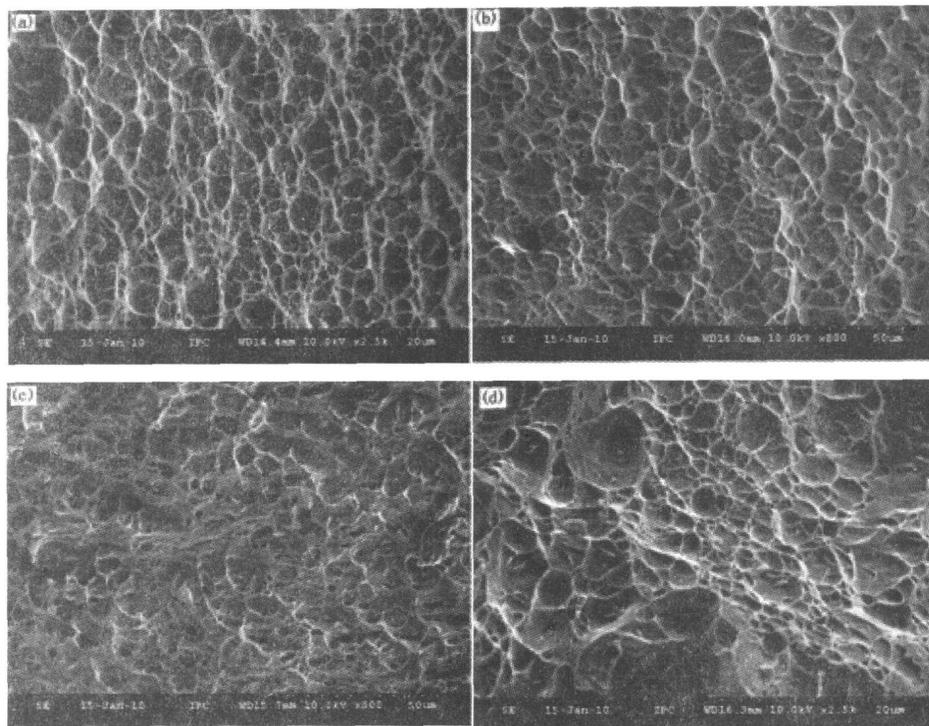


图 4 300K 和 4.2K 拉伸断口 SEM 形貌图

冲击试验所得到的冲击韧度如下表 3 所示:

表 3 316LN 300K 冲击试验结果

Test No.	Impact strength(kJ/m ²)
1 ^a	1687
2 ^a	1687
3 ^b	1656
4 ^b	1687

^a母材管样品; ^b焊接未变形管样品

4 分析讨论

从表 2 中我们可以看出, 室温下未经过任何处理的焊接接头的屈服强度要略低于母材管, 但同时抗拉强度也有所下降, 由抗拉强度和屈服强度可得到母材管和焊接未变形管的屈强比(屈强比=屈服强度/抗拉强度)分别为 0.5 和 0.534, 焊接未变形管的可塑性相对母材有所下降, 伸长率降低。经过 8% 的冷作变形并在 650℃ 下进行 200 小时的热处理后的焊接变形回火管, 其屈服强度和抗拉强度均有大幅度的提高, 同样可以得到其屈强比为 0.684, 很明显的室温下焊接变形回火管的可塑性最差, 与

其断后伸长率最低相一致。根据文献^[9]中所述, 其强度的提高而塑韧性下降主要是由于 8% 的冷作变形使金属内部的位错密度增加, 产生加工硬化所致。

在 4.2K 下焊接变形回火管的屈服强度在 1165 MPa 左右, 满足 ITER 要求的 ≥ 50 MPa。抗拉强度在 1600 MPa 左右, 两者均是室温下的两倍还多, 同时断后伸长率相对室温下也有所增大, 所有试样的伸长率都达到了 37% 以上, 很好的满足了 ITER $\geq 20\%$ 的要求。在低温下屈服强度和抗拉强度的提高与低温下位错运动的阻力增加有关。由于在低温试验过程中断裂未发生在焊缝区域, 而是均断在了母材区域, 所以以上数据并不能完全代表低温下焊缝的性能, 但是可以充分的说明焊缝的强度要高于母材。同时从试验结果中可以看出无论是室温还是低温下各样品的杨氏模量均没有明显的变化。

表 3 中数据表明焊缝处的冲击韧性与母材相当, 没有出现明显的降低, 所以焊缝中没有夹杂物, 气泡, 内部裂纹和晶粒粗化等现象。以下图 5 中的焊接未变形管的金相照片和表 4 中的晶粒度检测结果也可以更加肯定的说明这一结论。从金相照片中未见明显裂纹、气孔和夹渣等, 但是焊缝区域可见有孪晶生成。由于焊缝区域的组织比较的复杂, 所以表 4 中所列出的晶粒度可能存在一定的偏差。

表 4 平均晶粒度

NO.	Dir.	AG
1 ^a	Vertical	6.5
Horizontal	6.5	
2 ^b	Vertical	7.6
Horizontal	8.5	
3 ^c	Vertical	7.2
Horizontal	7.5	

^a母材管样品; ^b焊接未变形管样品; ^c焊接变形回火管样品

5 结 论

ITER TF 铠甲的母材管, 焊接未变形管进行了

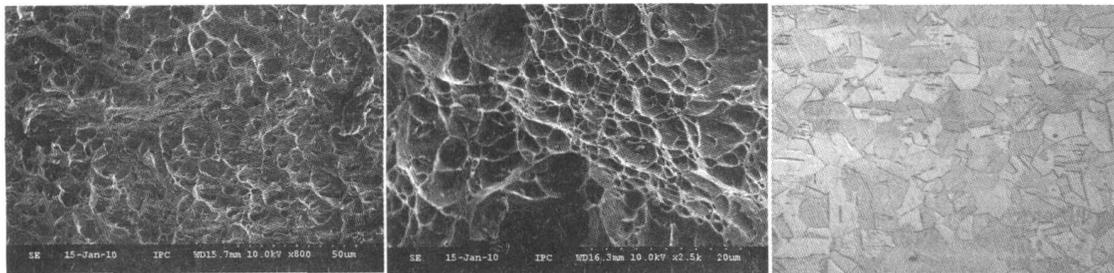


图 5 焊接未变形管焊缝金相照片

300K 下的拉伸试验, 同时在 300K 和 4.2K 下对焊接后经过 8% 冷作变形并经过 650℃200 小时的热处理的管子进行了拉伸试验, 在 300K 下所有样品均在焊缝处断裂, 而 4.2K 时所有样品均断在了母材区. 测得的伸长率、屈服强度、抗拉强度、杨氏模量均满足要求, 其中 4.2K 下屈服强度 > 950MPa, 断后伸长率 > 20%. 并且从拉伸断口形貌的扫描电镜图片可以看出, 断口是由大量的韧窝组成, 未出现脆断现象, 焊接接头在室温及 4.2K 下的塑性都很好.

母材和焊缝在室温下的冲击试验结果表明, 焊缝的冲击韧性和母材的相当, 也就是说未变形焊接管和母材的塑韧性相当.

参 考 文 献

- [1] W. J. Muster, *Cryogenics*, **30**(1990), 799.
- [2] Reed R P, Walsh R P, McCowan C N, *Adv. Eng. Mater.*, **38**(1992), 45.
- [3] L. T. Summers, R. P. Walsh, J. R. Miller, *Adv. Eng. Mater.*, **A42**(1996), 339.
- [4] R. L. Tobier, A. Nishimura, J. Yamamoto, *Cryogenics*, **37**(1997), 533.
- [5] M. Shimada, S. Tone, K. Works, *Adv. Eng. Mater.*, **34**(1988), 131.
- [6] M. Shimada, *Fus. Eng. Des.*, **20**(1993), 437.
- [7] M. Shimada, S. Tone, *Adv. Cryog. Eng. Mater.*, **34**(1988), 131.
- [8] M. Shimada, *Fusion Eng. Des.*, **20**(1993), 437.
- [9] J. H. Kim, J. Feng, *Adv. Eng. Mater*, **54**(2008), 92.