

T92/Super304H 异种钢焊接接头的组织结构和力学性能

张 祺¹, 王家庆², 陈国宏², 刘俊建², 化 建³, 余新海³, 张 涛², 张建华¹, 汤文明¹

- (1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院, 合肥 230009;
2. 安徽省电力科学研究所, 合肥 230601;
3. 合肥津利能源科技发展有限公司, 合肥 230601)

摘 要: 采用钨极氩弧焊(GTAW)技术, 采用 ERNiCr-3 和 ERNiCrMo-3 两种镍基焊丝实施 T92/Super304H 异种钢焊接, 并对接头的显微组织结构及力学性能进行测试分析。结果表明: T92 侧热影响区(HAZ) 中粗晶区析出大量的第二相颗粒, 细晶区则为细小的索氏体组织; Super304H 侧 HAZ 奥氏体晶粒长大, 晶界析出明显; ERNiCr-3 焊接的焊缝组织呈胞状结构, 晶粒粗大; ERNiCrMo-3 焊接的焊缝组织呈柱状晶组织特征。ERNiCrMo-3 焊接的接头强度、塑性及硬度较大, 拉伸断裂位于 Super304H 母材; 而 ERNiCr-3 焊接的接头强度、硬度较低, 但冲击韧性较高, 拉伸断裂位于焊缝。

关键词: T92 钢; Super304H 钢; 异种钢焊接接头; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG14; TG115

文献标志码: A

Microstructures and mechanical properties of T92/Super304H dissimilar steel weld joints

ZHANG Qi¹, WANG Jia-qing², CHEN Guo-hong², LIU Jun-jian², HUA Jian³, YU Xin-hai³,
ZHANG Tao², ZHANG Jian-hua¹, TANG Wen-ming¹

- (1. School of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Anhui Institute of Electric Power Science, Hefei 230601, China;
3. Hefei Jinli Power Science and Technology Co., Ltd., Hefei 230601, China)

Abstract: T92/Super304H dissimilar steel joints were produced through gas tungsten arc welding (GTAW) technique, using two Ni-based welding wires of ERNiCr-3 and ERNiCrMo-3, respectively. The microstructures and mechanical properties of the joints were then studied. The results show that in the heat-affected zone (HAZ) of the T92 side, lots of second-phase particles precipitate along the grain boundaries and inside the grains of the prior austenites. The fine grain zone of the T92 side HAZ is of a sorbite structure. In the Super304H side HAZ, the austenitic grains grow up rapidly with lots of precipitates along the grain boundaries. The ERNiCr-3 welding seam in the joint is of a coarse cellular structure. Comparatively, the ERNiCrMo-3 welding seam is of dense columnar grains. The ERNiCrMo-3 welded joints have higher strength, ductility and hardness, however, the ERNiCr-3 welded joints have a higher impact toughness value. Moreover, the tensile fracture of the formers takes place in the Super304H base metal, while that of the latters happens in the welding seam.

Key words: T92 steel; Super304H steel; dissimilar steel weld joint; microstructure; mechanical properties

国内外火力发电厂为了减少 NO_x、SO_x 和 CO₂ 等有毒、有害气体的排放, 节约能源以及提高热效率, 建设大容量超(超)临界机组是必然的趋势。我国将超(超)临界机组主要工作参数设定为蒸汽压大于 25 MPa, 蒸汽温度高于 580 ℃^[1], 因此, 对超(超)临界机组电站锅炉用金属材料也提出了更高的要求。以 T92、Super304H 为代表的新型马氏体、奥氏体耐热钢是建设超(超)临界机组过热器、再热器的主要管材。T92 钢是在 T91 钢的基础上, 用 W 部分取代 Mo 而得到的新型 Cr-Mo 低合金耐热钢, 具有更高的许用应力、高温强度和蠕变强度^[2]。Super304H 钢是在 TP304 钢的基础上发展起来的, 其中较高的 Cr 和 Ni 含量保证了基体单向奥氏体组织状态, 并具有良好的抗氧化性能, 同时, 通过添加 3% 的 Cu 及少量的 Nb 和 N, 析出纳米级富铜相、MX 以及 M₂₃C₆ 碳化物相以进一步提高其高温强度^[3]。

在超(超)临界机组(USC)建设中, T92、Super304H 同种钢、异种钢焊接不可避免。目前, 国内外已开展了较多的关于 T92、Super304H 同种钢焊接的研究工作^[4-7], 研究集中在接头的蠕变及疲劳失效机制以及接头的运行可靠性方面^[8-10]。但有关 T92/Super304H 异种钢焊接的研究非常少, 既制约了电站机组异种钢焊接技术的发展, 又给电站金属监督及安全管理工作带来不便。本文作者针对 USC 建设常用的 T92、Super304H 新型马氏体、奥氏体耐热钢管材, 选用 ERNiCr-3 和 ERNiCrMo-3 两种镍基焊丝, 采用 GTAW 技术, 实施 T92/Super304H 异种钢的焊接。通过开展焊接接头的显微组织结构、接头熔合区成分分布和接头的力学性能等的研究, 比较两种焊丝焊接接头的差

异, 为制定合理的 T92/Super304H 异种钢焊接工艺提供重要的数据支持。

1 实验

实验选用规格为 d 45 mm×11 mm 的 T92 和 Super304H 钢管。焊接材料选用规格为直径 2.4 mm 的 ERNiCr-3 和 ERNiCrMo-3 两种型号的镍基焊丝。母材及焊材的化学成分见表 1, T92、Super304H 钢的常温力学性能见表 2^[11-12]。

T92 和 Super304H 钢的异种钢焊接采用 ERNiCr-3 和 ERNiCrMo-3 两种镍基焊丝焊接, GTAW 多层多道焊接工艺, 工艺参数见表 3。

焊接接头经外观检查和 X 射线无损检验合格后, 按 SD340—89 《火力发电厂锅炉、压力容器焊接工艺评定规程》的规定切取试样。采用 5 mm×10 mm×120 mm 带头非标试样, 按 GB/T 2651—89 焊接接头拉伸试验方法, 在 CMT5105 型微机控制电子万能试验机上进行拉伸试验; 采用 5 mm×10 mm×55 mm 夏比缺口非标试样, 焊缝、热影响区中缺口位置均符合 GB/T 2650—2008 焊接接头冲击试验方法的要求, 接头的室温冲击试验在 JB300C 冲击试验机上进行; 用 HMV-2 型硬度计测定熔合线两侧的维氏硬度分布; 接头经研磨、抛光后, 再用 Nital 试剂(T92 侧接头)、Marble 试剂(Super304H 侧接头)、王水(焊缝金属)腐蚀, 采用 JSM-6490 扫描电镜(SEM)观察接头的显微组织结构特征, INCA 能谱仪测量接头熔合线附近的元素成分分布(EDS); SEM 观察接头的断口形貌。

表 1 焊材及母材的化学成分

Table 1 Chemical compositions of welding wires and base metals (mass fraction, %)

Material	C	Mn	Si	Cr	Mo	W	V	S	P	Ni	Nb	N	Cu	Al	B	Fe
T92	0.13	0.6	0.5	9.5	0.6	2.0	0.25	0.01	0.02	0.4	0.09	0.05	—	—	—	Bal.
Super304H	0.08	0.66	0.2	18.30	—	—	—	0.004	0.017	8.72	0.52	0.10	3.02	0.008	0.005	Bal.
ERNiCr-3	0.02	3.2	0.09	20.65	0.04	—	—	0.001	0.003	73.62	2.6	—	0.003	—	—	Bal.
ERNiCrMo-3	0.01	0.02	0.06	21.8	6.6	—	—	0.006	—	64.8	3.69	—	0.10	—	—	Bal.

表 2 T92 和 Super304H 钢的常温力学性能^[11-12]

Table 2 Mechanical properties of T92 and Super304H steels at room temperature^[11-12]

Material	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	A_{KV} /J	Hardness, HB
T92	≥440	≥620	≥20	≥40	≤250
Super304H	≥235	≥590	≥35	—	—

表 3 焊接工艺参数

Table 3 Procedure for welded joints

Item	Parameter
Groove	V type groove with 32.5° angle for each side
Welding current/A	95–100
Arc voltage/V	9–10
Interpass temperature/K	373–423
Welding speed/(mm·min ⁻¹)	75–90
Ar gas flowing rate/(L·min ⁻¹)	9
Post weld heat-treatment (PWHT)	1 033 K for 30 min
Heating-cooling rate/(K·h ⁻¹)	200

2 结果与讨论

2.1 T92/Super304H 异种钢焊接接头的 PWHT 态组织
ERNiCr-3 焊接的 T92/Super304H 接头的 T92 侧 HAZ 及母材的组织结构如图 1(a)和(b)所示。T92 侧

HAZ 大致可分为过热区、粗晶区和细晶区。在过热区中形成了块状 δ 铁素体相, 这种大块状 δ 铁素体的形成对接头的力学性能, 特别是高温力学性能, 将产生不利影响^[13–14]; 焊缝前沿的 HAZ 在焊接过程中发生了完全奥氏体化(T92 钢的奥氏体化温度为 1 040~1 080 °C^[15]), 且奥氏体(γ)晶粒长大, 形成粗晶区。粗晶区中回火马氏体(M)分解, 板条形态消失, 在原 M 板条间析出细小的碳化物颗粒, 同时大量的 $M_{23}C_6$ 型碳化物及 MX 型化合物颗粒从基体中析出, 并弥散分布于晶内, 起到了弥散强化的作用^[16](见图 1(a))。在远离焊缝的 HAZ 中, 焊接过程的热效应使得原 γ 晶粒中的 M 板条发生回火分解, 形成了细小的索氏体组织, 为细晶区(见图 1(b))。Super304H 侧的显微组织结构如图 1(c)和(d)所示。焊缝与过热区之间有 3~5 μm 厚的熔合区, Super304H 侧 HAZ 晶粒长大明显, 晶粒尺寸为 10~20 μm (见图 1(c)), 细晶区中晶内及晶界处析出细小而弥散的第二相颗粒, 晶界明显宽化, 晶界析出相呈半连续状分布^[17](见图 1(d))。焊缝组织为奥氏体铸态组织, 呈胞状结构, 晶粒粗大(见图 1(e))。在胞状组织的枝间位置有冶金夹杂物和析出相, 同时, 胞状

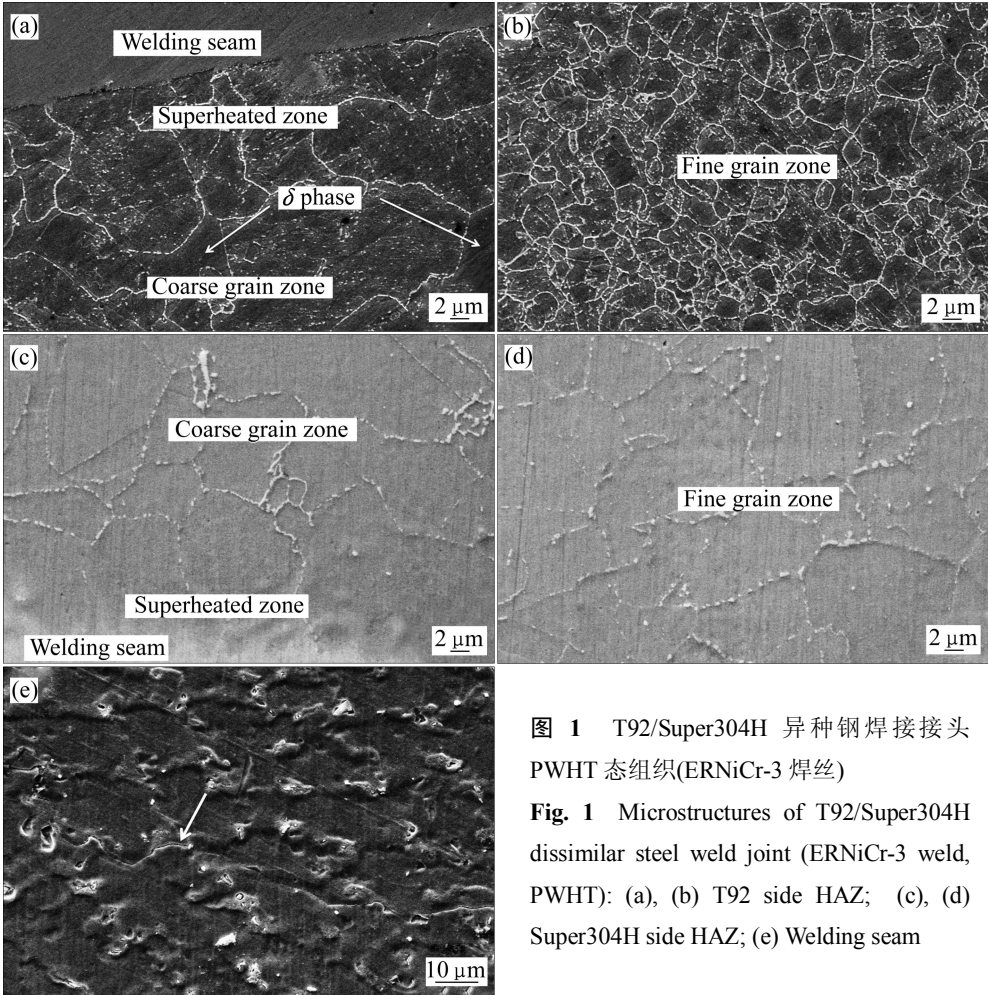


图 1 T92/Super304H 异种钢焊接接头 PWHT 态组织(ERNiCr-3 焊丝)
Fig. 1 Microstructures of T92/Super304H dissimilar steel weld joint (ERNiCr-3 weld, PWHT): (a), (b) T92 side HAZ; (c), (d) Super304H side HAZ; (e) Welding seam

组织间结合较脆弱,甚至产生了晶界微裂纹(图1(e)中箭头所示)。

ERNiCrMo-3 焊接的 T92/Super304H 接头的焊缝和 T92 侧 HAZ 界面清晰,HAZ 同样由过热区、粗晶区及细晶区构成(见图2(a)和(b))。过热区中 δ 相的形成、长大促使碳化物等析出相在焊缝与过热区界面富集;粗晶区中原奥氏体晶界清晰可见,晶界析出相较多,晶内碳化物较少,且碳化物沿 M 板条间界分布的特征已不明显;细晶区晶粒尺寸小,大多在 $5\ \mu\text{m}$ 以下,晶界内大量析出相颗粒均匀弥散分布,起到弥散强化作用(见图2(b))。Super304H 侧 HAZ 中的 γ 晶粒长大明显,为 $20\sim 40\ \mu\text{m}$;晶内及晶界析出相的尺寸较大,且分布均匀;HAZ 及焊缝间存在约 $10\ \mu\text{m}$ 的熔合区(见图2(c))。Super304H 侧 HAZ 的细晶区晶粒细小,晶内与晶界分布着大量细小的第二相颗粒(见图2(d))^[18]。此外,经 EDS 分析,图2(c)和(d)中箭头所示

的块状物可能为固溶处理过程中未溶于基体的 NbC(见图2(e))。焊缝组织致密,呈典型的柱状晶特征,尺寸分布均匀,同一个焊层内的树枝晶枝干的位向较为一致(见图2(f))。

2.2 T92/Super304H 异种钢焊接接头的力学性能

2.2.1 拉伸力学性能

表4所列 T92/Super304H 异种钢焊接接头室温拉伸性能。由表4可见,ERNiCr-3 焊接接头的断裂位置为焊缝,焊缝金属的强度低于两侧母材的强度,为整个接头的薄弱点;相反,ERNiCrMo-3 焊接接头的断裂位置在 Super304H 母材,焊缝金属的强度相对较高。ERNiCrMo-3 焊接接头的强度和塑性指标也都优于 ERNiCr-3 焊接接头的。

ERNiCr-3 焊接的 T92/Super304H 异种钢接头拉伸断裂发生于焊缝,其断口特征如图3(a)和(b)所示。该

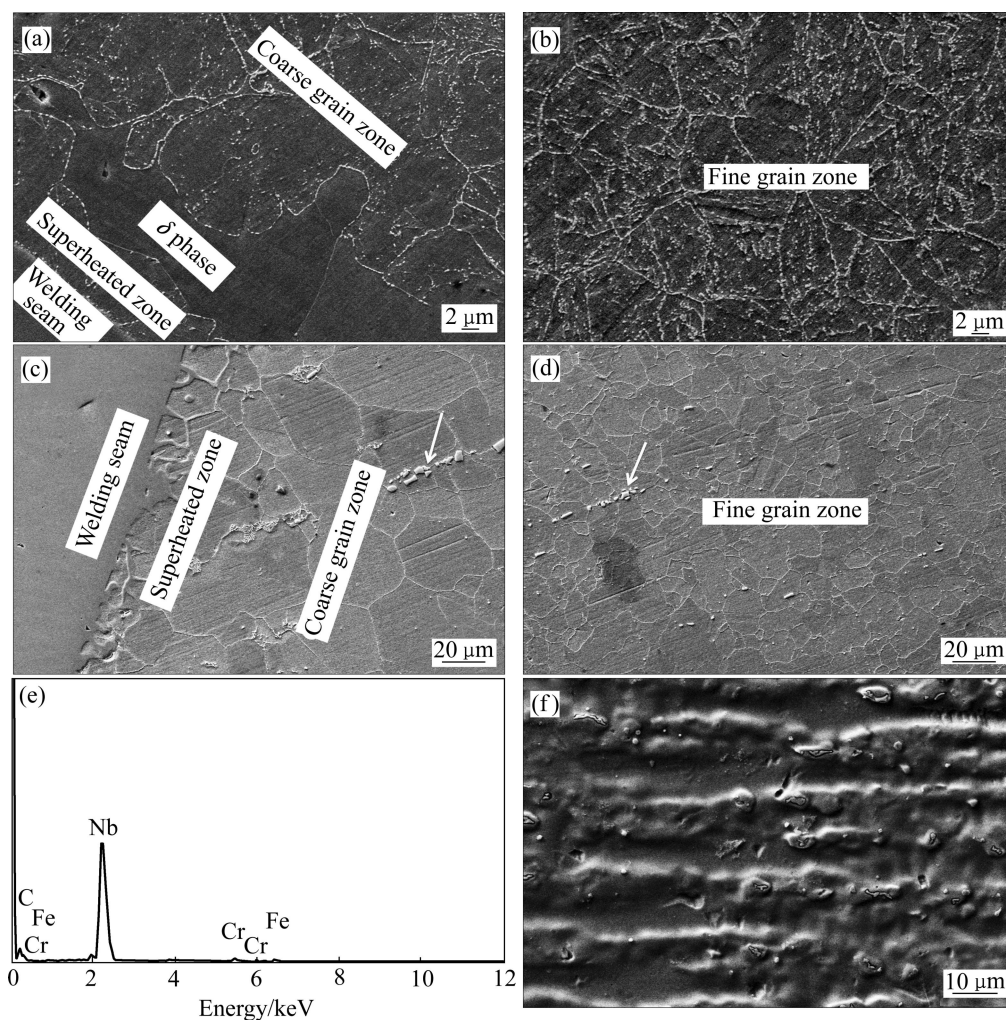


图2 T92/Super304H 异种钢焊接接头的焊后热处理态组织(ERNiCrMo-3 焊丝)

Fig. 2 Microstructures of T92/Super304H dissimilar steel weld joint (ERNiCrMo-3 weld, PWHT): (a), (b) HAZ in T92 side; (c), (d) HAZ in Super304H side; (e) EDS spectrum of large particle in Fig. 2(c); (f) Welding seam

表 4 T92/Super304H 异种钢焊接接头室温拉伸性能

Table 4 Tensile properties of T92/Super304H joints at room temperature

Heat treatment state	$\sigma_{0.2}$ /MPa	σ_b /MPa	δ /%	Ψ /%	Fracture position
PWHT(ERNiCr-3)	450	741.4	22.1	45.6	Welding seam
PWHT(ERNiCrMo-3)	450	781.2	24.5	63.6	Super304H base metal

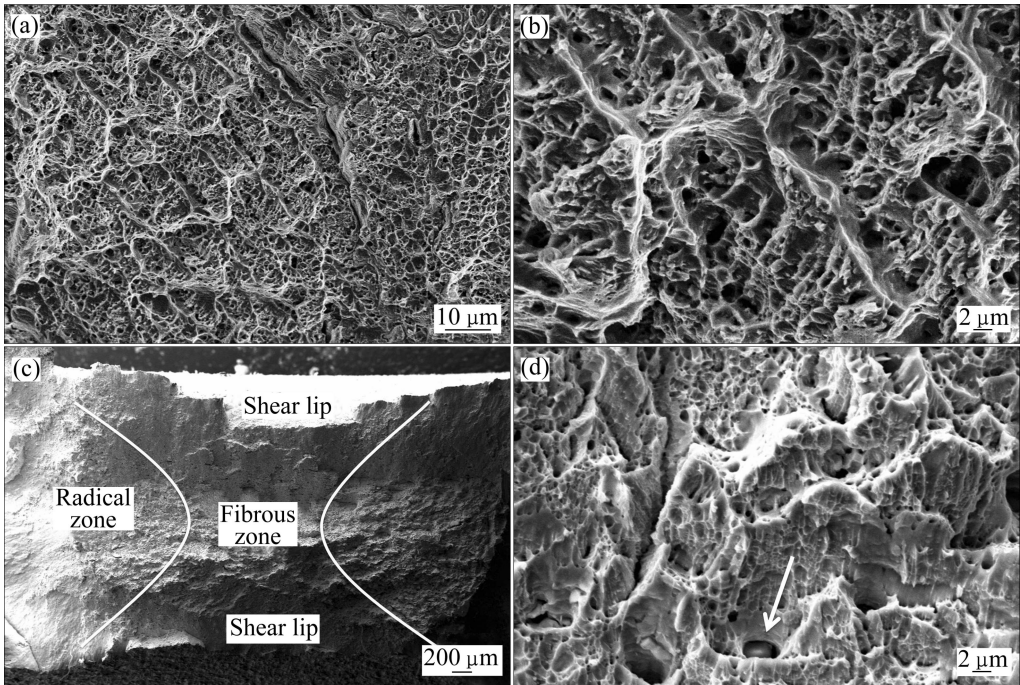


图 3 T92/Super304H 异种钢焊接接头拉伸断口 SEM 像

Fig. 3 SEM tensile fractographs of T92/Super304H dissimilar steel weld joints: (a), (b) ERNiCr-3 weld; (c), (d) ERNiCrMo-3 weld

断口呈典型的韧性断口特征：枝间断口具细密的韧窝结构，韧窝底部有小的颗粒；而枝干呈撕裂状，塑性良好。ERNiCrMo-3 焊接接头拉伸断裂发生于 Super304H 母材一侧，因此，该拉伸断口反映出 Super304H 的断口特征。整个断面由纤维区、放射区及剪切唇 3 个部分构成(见图 3(c))。不论是纤维区还是放射区，其微观断口均呈韧窝聚集断裂特征，韧窝大小不一，大韧窝底部明显有较大的析出相颗粒存在(见图 3(d)中箭头所示)；另外，由图 3(d)还可见沿 Super304H 钢奥氏体晶界扩展的二次裂纹。

2.2.2 冲击性能

表 5 所列为 T92/Super304H 异种钢焊接接头室温冲击韧性。由表 5 可见，ERNiCrMo-3 焊接的接头各个区域，特别是焊缝两侧的 HAZ 的冲击韧性(a_K)都较 ERNiCr-3 焊接接头的低。这是因为采用 ERNiCrMo-3 焊丝焊接时，焊缝的热输入较高，促进了 T92 及 Super304H 侧 HAZ 中基体晶粒的长大及碳化物等第二相的析出长大，增加了对基体的割裂作用，导致其冲

表 5 T92/Super304H 异种钢焊接接头室温冲击韧性

Table 5 Impact toughness of T92/Super304H joints at room temperature

Heat-treatment state	Impact toughness/(J·cm ⁻²)		
	T92 side HAZ	Welding seam	Super304H side HAZ
PWHT (ERNiCr-3)	184	98	142
PWHT (ERNiCrMo-3)	167	94	121

击韧性降低。但不论采用哪种焊丝，T92/Super304H 异种钢焊接接头的冲击韧性均大于 DL/T 868—2004 《焊接工艺评定规程》中对合金钢焊缝冲击韧性不低于 27 J/cm² 的验收标准。

由图 4(a)和(b)可见，2 种接头焊缝冲击断口均呈枝干撕裂及枝间韧窝断裂的特征。但 ERNiCr-3 焊接接头的焊缝断面上韧窝细密，韧窝底部析出物少，而 ERNiCrMo-3 焊接接头焊缝断面上韧窝大而浅，韧窝底部密集地分布着大量的析出物。由于 ERNiCrMo-3

焊接金属中添加了 6.6 % 的 Mo, 导致大量 Mo 的金属间化合物及其碳化物颗粒的形成, 在提高焊缝强度的同时, 却也导致了其冲击韧性的降低。

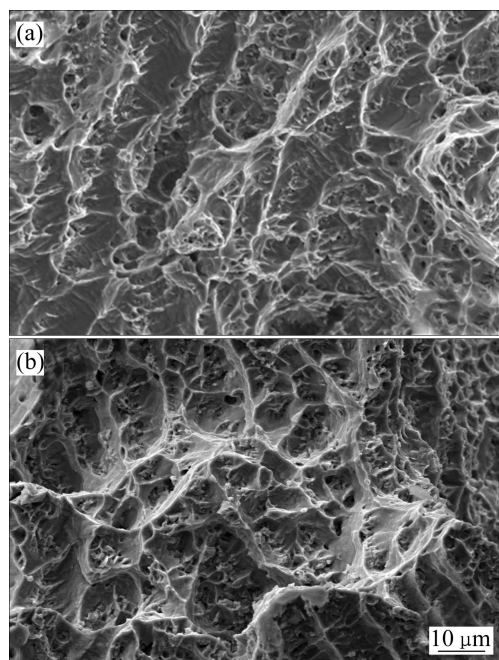


图4 T92/Super304H 异种钢焊接接头焊缝冲击断口 SEM 像
Fig. 4 SEM impact fractographs of T92/Super304H dissimilar steel weld joints: (a) ERNiCr-3 weld; (b) ERNiCrMo-3 weld

2.2.3 维氏硬度

图 5 所示为 T92/Super304H 异种钢焊接接头的硬度分布。如图 5 所示, 两种焊接接头 HAZ 的硬度都大于相应母材的硬度, 这归因于 T92 及 Super304H 侧 HAZ 的析出强化。由于 ERNiCrMo-3 焊接金属中 Mo 的固溶强化及 Mo 碳化物的析出弥散强化作用, 其焊

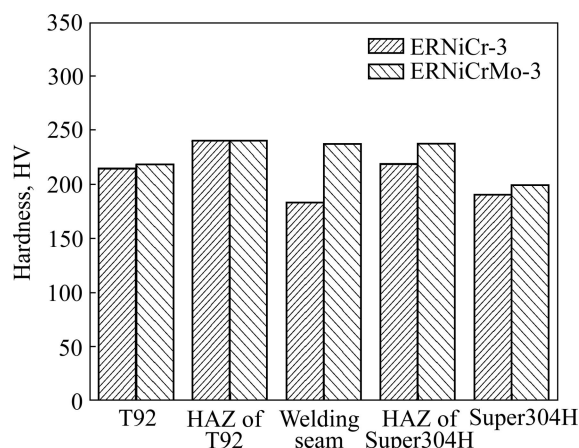


图5 T92/Super304H 异种钢焊接接头的硬度分布
Fig. 5 Vickers hardness values of T92/Super304H dissimilar steel weld joints

缝的强度、硬度均较 ERNiCr-3 焊缝有明显的提高。同时, ERNiCrMo-3 焊接接头的 Super304H 侧 HAZ 的硬度也较高, 这可能与在焊接过程中碳化物的过度析出长大有关, 在造成 Super304H 侧 HAZ 硬度增加的同时, 也导致其强度、冲击韧性的降低。相反地, 两种焊接接头 T92 侧 HAZ 的硬度相当。

3 结论

1) 采用两种不同焊丝焊接的 T92/Super304H 异种钢接头, 组织结构相差不大。T92 侧 HAZ 由块状 δ 铁素体和沿原 γ 晶界分布的碳化物颗粒构成, 细晶区为细小的索氏体组织。Super304H 侧 HAZ 中的 γ 晶粒长大明显, 细晶区中分布着大量的细小的第二相颗粒。ERNiCr-3 焊接的焊缝组织呈胞状结构, 晶粒粗大, 而 ERNiCrMo-3 焊接的焊缝组织则呈柱状晶特征, 同一焊层内树枝晶枝干的位向较为一致。

2) ERNiCr-3 焊接接头拉伸断裂发生于焊缝, 而 ERNiCrMo-3 焊接接头拉伸断裂发生于 Super304H 母材, 焊缝强度较高, 且塑性指标也优于 ERNiCr-3 焊接接头。

3) ERNiCrMo-3 焊接接头各微区的冲击韧性都较 ERNiCr-3 焊接接头的低。两种接头的焊缝冲击断口均呈枝干撕裂及枝间韧窝聚集断裂特征。

4) 两种焊丝焊接的接头 HAZ 的硬度都高于相应的母材, 归因于 T92 及 Super304H 侧 HAZ 的析出强化。ERNiCrMo-3 焊接接头的焊缝及 Super304H 侧 HAZ 的硬度较 ERNiCr-3 焊接接头的高, 而两种焊接接头 T92 侧 HAZ 的硬度相当。

REFERENCES

- [1] 杨 冬, 徐 鸿. 浅议超超临界锅炉用耐热钢[J]. 锅炉制造, 2006, 2: 6-8.
YANG Dong, XU Hong. Brief discussion on heat-resisting steel for ultra-supercritical boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2006, 2: 6-8.
- [2] RODAK K, HERNAS A, KIELBUS A. Substructure stability of highly alloyed martensitic steels for power industry[J]. Materials Chemistry and Physics, 2003, 81: 483-485.
- [3] 杨 岩, 程世长, 杨 钢. Super304H 锅炉钢的开发和研究现状[J]. 特殊钢, 2002, 23(1): 27-29.
YANG Yan, CHENG Shi-chang, YANG Gang. Present situation of exploiting and research of Super304H steel for boiler[J]. Spec Steel, 2002, 23(1): 27-29.

- [4] 王根士, 栗卓新, 魏福军, 李红. P92 钢焊接接头性能及其焊接材料研究进展[J]. 机械工程材料, 2007, 31(8): 1-4.
WANG Gen-shi, LI Zhuo-xin, WEI Fu-jun, LI Hong. Progress in research of welding joint properties and welding consumables of P92 steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2007, 31(8): 1-4.
- [5] 朱平, 赵建仓, 柴晓岩, 牛锐锋, 赵军, 刘亚芬. Super304H 奥氏体耐热钢焊接材料匹配与接头性能研究[J]. 电力设备, 2007, 8(4): 43-46.
ZHU Ping, ZHAO Jian-cang, CHAI Xiao-yan, NIU Rui-feng, ZHAO Jun, LIU Ya-fen. Research on the matching of Super304H austenitic stainless steel welding material and the connector performance[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(4): 43-46.
- [6] VÝROSTKOVÁ A, HOMOLOVÁ V, PECHA J. Phase evolution in P92 and E911 weld metals during ageing[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 480: 289-298.
- [7] KIM B J, LIM B S. Microstructure and fatigue crack growth behavior of heat affected zone in P92 steel weldment[J]. Key Engineering Materials, 2004, 261/263: 1185-1190.
- [8] FALAT L, VÝROSTKOVÁ A, HOMOLOVÁ V. Creep deformation and failure of E911/E911 and P92/P92 similar weld-joints[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16: 2114-2120.
- [9] ABE F, MASAOKI T. Microstructure and creep strength of welds in advanced ferrite power plant steels[J]. Science and Technology of Welding & Joining, 2004, 9(1): 22-30.
- [10] BROZDA J. New generation creep-resistant steels, their weldability and properties of welded joints: T/P92 steel[J]. Welding International, 2005, 19(1): 5-13.
- [11] 王淦刚, 赵军, 赵建仓, 杨晓东, 迟鸣声, 甄佳威, 李建勇, 朱平, 刘非凡, 杨富. P92 新型耐热钢焊接接头的力学性能研究及其工程应用[J]. 电力设备, 2007, 8(5): 1-5.
WANG Gan-gang, ZHAO Jun, ZHAO Jian-cang, YANG Xiao-dong, CHI Ming-sheng, ZHEN Jia-wei, LI Jian-yong, ZHU Ping, LIU Fei-fan, YANG Fu. Mechanical performance study and engineering application of weld joint of P92 new type heat-resisting steel[J]. Electrical Equipment, 2007, 8(5): 1-5.
- [12] 李维钺. 中外不锈钢和耐热钢速查手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 347-349.
- LI Wei-yue. Handbook of the stainless and heat-resistant steels of China and foreign countries[M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 347-349.
- [13] 胡小强, 肖纳敏, 罗兴宏, 李殿中. 含 W 型 10%Cr 超超临界钢中 δ -铁素体的微观结构及其对力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2007, 28(增刊): 5-9.
HU Xiao-qiang, XIAO Na-min, LUO Xing-hong, LI Dian-zhong. Effects of δ -ferrite on the microstructure and mechanical properties in a tungsten alloyed 10%Cr ultra-supercritical steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2007, 28(suppl): 5-9.
- [14] 马力深, 钟约先, 马庆贤, 袁朝龙, 董岚枫. δ 铁素体对 12%Cr 超超临界转子钢冲击性能的影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(11): 1187-1190.
MA Li-shen, ZHONG Yue-xian, MA Qing-xian, YUAN Chao-long, DONG Lan-feng. Effect of δ -ferrite on impact properties of 12%Cr rotor steel for ultra-supercritical steam conditions[J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2008, 48(11): 1187-1190.
- [15] 吴军, 邹增大, 王新洪, 李清明. 控轧控冷 T92 耐热钢的显微组织结构研究[J]. 金属热处理, 2007, 32(9): 71-73.
WU Jun, ZHUO Zeng-da, WANG Xin-hong, LI Qing-ming. Microstructure of T92 heat resistant steel manufacturing by TCMP[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(9): 71-73.
- [16] 杨富, 章应霖, 任永宁, 李为民. 新型耐热钢焊接[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 158.
YANG Fu, ZHANG Ying-lin, REN Yong-ning, LI Wei-min. New heat resistant steel weldment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006: 158.
- [17] WANG T, ZHANG B G, CHEN G Q, FENG J C, TANG Q. Electron beam welding of Ti-15-3 titanium alloy to 304 stainless steel with copper interlayer sheet[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(10): 1829-1834.
- [18] CAO J, GONG Y, ZHU K, YANG Z G, LUO X M, GU F M. Microstructure and mechanical properties of dissimilar materials joints between T92 martensitic and S304H austenitic steels[J]. Materials and Design, 2011, 32: 2763-2770.

(编辑 龙怀中)