

铁素体—奥氏体异种钢接头的 界面组织及力学性能^{*}

孟庆森 韩培德 杨世杰

(太原工业大学)

梁军

(山西电力试验研究所)

摘要 为提高电站锅炉过热器铁素体—奥氏体异种钢焊接接头的高温蠕变断裂强度和服役寿命,设计了专用的镍基填充材料及组合焊接接头。通过对不同焊缝接头的高温蠕变力学试验、焊缝界面组织变化分析、碳扩散和热应力的测试分析,认为在高温低应力的条件下,接头焊缝界面及热影响区碳元素扩散迁移和碳化物聚集是影响接头蠕变断裂强度的重要原因;用镍基焊缝作为过渡段的组合接头具有较小的界面热应力和较高的持久强度。

关键词: 异种钢接头 蠕变 碳迁移 热应力

0 序言

随着高参数大型火电设备的日益发展和应用,高温下服役的铁素体^{**}—奥氏体异种钢焊接接头的早期失效问题已成为热动力工程中急需解决的问题之一。近年来的研究普遍认为,铁素体钢侧熔合区和热影响区是接头的薄弱环节。其破坏原因主要是材料间热膨胀系数差别而造成运行时的热应力;材料间蠕变强度不匹配而在低强材料侧产生的拘束;高温下接头碳迁移而形成软化区的加速蠕变等^[1~3],但对于工况条件下哪个因素对接头的失效起主导作用,研究结果尚不明确。本文针对神头第二发电厂捷产 500M W 发电机组锅炉过热器管接头早期失效的问题,设计研制了专用的镍基填充材料及以其为过渡段的组合焊接接头。通过对比分析不同材料在高温高压条件下接头界面组织和力学性能的变化特征,探讨了接头失效的主要原因和解决方案。

1 试验条件和方法

1.1 试验材料

试验母材采用捷产耐热钢 15128.5(Cr—Mo—V 系)和不锈钢 17341.4(Cr—Ni—Mo 系)。焊接材料选用不锈钢丝 EB—427(捷产)和自制镍基焊丝 EN—317, 规格 $\varnothing 2.5\text{ mm}$ 。各材料化学成分及力学性能列于表 1。

EN317 焊条是在 Inconel—182 焊条基础上改进的。为增强焊缝抗裂性及高温强度,除严格限制 C、S、P 含量外, Nb 含量限于 1.5% 以下,加入 Mo 及微量 B 元素。

1.2 试件的制备与试验

接头力学性能试验分常温力学性能及高温持久强度两种,分别参照《金属拉伸试验法》YB899

^{*} 山西省 1993 年技术攻关项目。1996 年通过山西省科委鉴定。

^{**} 铁素体钢(Ferritic steel),即低合金耐热钢,我国称珠光体耐热钢。

表 1 试验材料的化学成分及力学性能

Table 1 Composition and mechanical properties of tested metals

Metals	Composition(%)												σ_b (MPa)	σ_s (%)	δ_5 (%)
	C	S	P	B	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Ti	V	Nb			
17341.4	0.06	0.02	0.014	—	0.47	0.96	16.9	2.81	13.5	—	—	—	583	269	51
15128.5	0.11	0.02	0.02	—	0.35	0.65	0.69	0.59	—	—	0.38	—	535	380	35
EB427	0.08	0.01	0.02	—	0.30	2.0	19.0	2.3	10.1	—	—	0.5	550	280	32
EV317	0.015	0.01	0.03	0.01	0.02	3.5	18	3.5	—	0.4	—	1.5	668	420	32.5
						25	4.5	Balance							

—77 及 GB2651—89 标准所规定参数制做了平板对接和管对接拉伸试件。试件分别采用两种焊条进行 TIG 焊, 对接坡口 $65^\circ \sim 79^\circ$, 钝边 1mm, 焊接电流 80~100A, 双面氩气保护, 层间温度 $\leq 50^\circ\text{C}$, 焊接线能量 $\leq 9 \text{ kJ/cm}$ 。焊后全部经荧光着色和 X 射线探伤, 保证焊缝和 HAZ 无缺陷。

1.3 接头力学性能试验及碳元素分布

接头高温蠕变试验采用 NT—2 试验机, 试验温度 $560 \pm 3^\circ\text{C}$, 载荷为 $17 \sim 22 \text{ kg/mm}^2$, 时间 3000 小时。试验数据经最小二乘法外推出 10^5 h 的持久强度; 试件经光镜和电镜分析断口形貌和接头失效区域的组织特征; 采用英国 SUPER—ATW 超轻元素能谱分析系统分析接头碳、铬、硼及其它合金元素的变化和分布。

1.4 接头热应力分析

为对比两种接头形式的高温热应力分布特征, 采用 SUPER—SAP. 有限元复合模型对管接头耐热钢侧熔合区应力进行有限元分析。单元为板单元, 三部分材料用 262 个单元描述, 总结点数 240 个。边界条件: 管状对接接头, (100mm 内)一端拘束, 试验温度 560°C , 管内压力 10MPa。计算中忽略了熔合区, 组织变化及焊接残余应力的影响, 各材料的物理常数(热膨胀系数 α 、弹性模量 E 及泊松比 ϵ)列于表 2。模拟分析结果表明, 在接头耐热钢 HAZ 产生—高应力区, 不锈钢焊缝接头 σ_{\max} 比镍基焊缝接头高 $7 \sim 10 \text{ MPa}$, 应力区宽度大 2 倍以上。

表 2 计算用各材料的物理常数⁴

Table 2 Physics constants of tested metals

Matel	$E(\text{GPa}, 593^\circ\text{C})$	$\alpha(\text{mm/mm}/0170 \times 10^{-6})$	593°C	ϵ
Ferritic steel	140.7	14.22		0.3
Stainless steel	149.6	18.70		0.3
Ni—base matel	179.3	16.12		0.3

2 试验结果及分析

2.1 接头高温蠕变性能

接头高温持久强度试验结果如图 1 示。不锈钢焊缝的接头持久强度 $\sigma_{10^5}^{560} = 6.47 \text{ kg/mm}^2$, 用镍基焊条焊接的组拿妆头 $\sigma_{10^5}^{560} = 10.01 \text{ kg/mm}^2$ 。前者主要断裂于耐热钢 HAZ 靠近熔合线处, 断口平行于熔合线, 且形貌为晶界低塑性断裂; 后者多断裂于熔合线焊缝侧, 断口为韧窝+准解理的混合

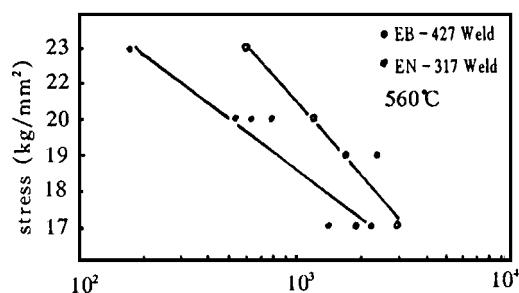


图 1 两种接头的持久断裂曲线
Fig. 1 Creep rupture curves of two kinds of joints

形貌(图2)。断裂特征的变化表明二者断裂机理的不同,薄弱区由 HAZ 转向焊缝界面。较高拉伸载荷的试件,镍基焊缝金属可见程度不同的滑移带,而热影响区蠕变特征不明显,表明其高塑性和高温强度对缓解接头应力有贡献。

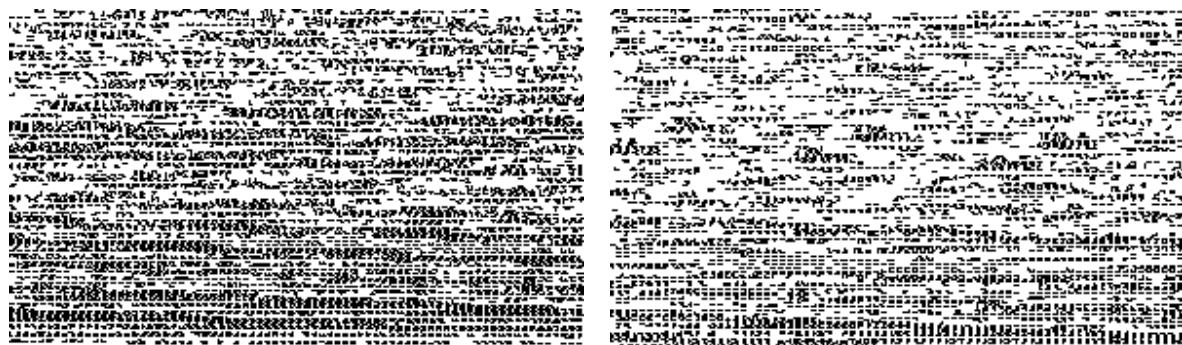
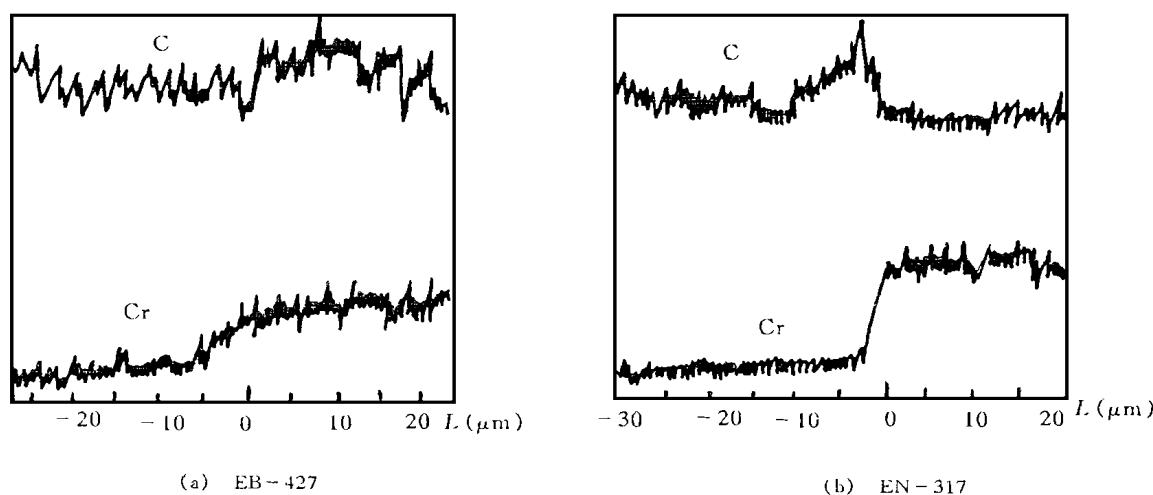
(a) Joint of EB427 weld $\times 200$ (b) Joint of EN317 weld $\times 500$

图2 两种接头的断口形貌
Fig. 2 Fractographs of two kinds of joints

2.2 焊缝界面及 HAZ 碳扩散情况

接头金相分析可见耐热钢侧熔合区有一条黑色区带(SEM 下为白亮带),其显微硬度显著高于其它区域,该区带在焊态下即存在。不锈钢焊缝接头的“黑带”宽度为 $5 \sim 20 \mu\text{m}$,随高温时间的延长而扩大;镍基焊缝接头“黑带”宽度仅 $2 \sim 3 \mu\text{m}$,且在试验中基本不变。毗邻“黑带”的区域为铁素体粗晶区,其显微硬度低于外侧的珠光体粗晶区。铁素体粗晶区宽度基本对应于“黑带”宽度的变化。

焊缝熔合区两侧区域的 SEM 元素能谱分析结果表明,“黑带”为增碳富铬区,铁素体区为脱碳区,其特征与传统认识的“不均匀混合区”相似,其在焊接过程已形成,后在高温长时间运行中又有扩展。EB-427 试件的增、脱碳两区域碳峰值均量相差约 10 个计数单位(图3),HAZ 粗晶区晶界高温下富集 C、Cr 元素,并有大量碳化物形成。



(a) EB-427 welded joint $\times 2500$, 2150h. $L=50\mu\text{m}$ (b) EN-317 welded joint $\times 1770$, 2990h. $L=50\mu\text{m}$

图3 接头界面碳元素EPMA能谱分析

Fig. 3 EPMA analysis and carbon distributed over joints (L—Length of scanning line)

据 M. Hillert 的多元素扩散理论³, 焊缝中提高 Ni 含量可利于提高合金系统的碳活度, 阻碍焊接过程及高温运行下碳由耐钢热影响区向焊缝界面的扩散和聚集。接头各区域组织和性能保持高温稳定, 有利于减小蠕变速率和延缓失效过程。

2.3 热影响区的蠕变情况

高温拉伸试验结果表明, 不锈钢焊缝接头热影响区的低塑性断裂均与蠕变断裂有关。距断口 0.2 mm 附近铁素体晶界已形成微观蠕变孔洞, 并逐渐在垂直于拉应力的方向扩展为链状孔(图 4)此即扩散蠕变损伤的早期特征(R型)。载荷较大的试件, 该区域可见沿三晶交界的枝状蠕变裂纹(W型)。镍基焊缝接头的试件断裂区未见蠕变损伤迹象。断口以韧窝为主并混合少量准解理面及延性撕裂岭, 表明该损伤与界面组织的不均匀混合有关。

尽管试验条件下, 接头可能同时承受 W 和 R 两种蠕变机制的作用, 但在高温低应力的工况条件下接头损伤的主要原因是 R 型扩散型蠕变。因此, 近缝区的碳元素偏聚成为不锈钢焊缝接头断裂的主要影响因素, 改变和提高材料对碳迁散、碳化物偏聚的制约作用可有效地减缓蠕变过程和延长接头服役寿命。此即采用镍基焊缝的组合接头高温持久强度提高的主要原因。

此外, 由于镍基焊缝金属的热膨胀系数与耐热钢差别小, 对缓减接头热应力和提高高温持久强度也有重要作用。

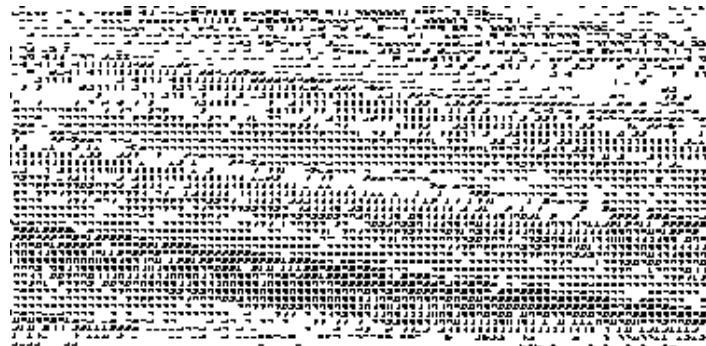


图4 不锈钢焊缝接头的蠕变裂纹

Fig. 4 Creep cracks of stainless steel welded joint $\times 250$

3 结 论

(1) 所设计的专用镍基焊接材料作为过渡段的焊接接头阻碍了焊缝界面的碳迁移和碳化物偏

聚,改善了接头应力分布,提高了接头高温持久强度。

(2)高温低应力条件下,铁素体—奥氏体异种钢接头蠕变损伤以扩散型蠕变为主,焊缝界面碳化物偏聚是影响接头蠕变断裂强度的主要因素。镍基材料焊接的组合接头主要沿耐热钢侧焊缝界面发生延性断裂,其损伤机理主要与界面组织不均匀性有关。

参 考 文 献

- 1 Roberf's D I, Viswanathan R. Dissimilar Weldments in Fossil— Fired Power plant: Technical Overview. Proc. Seminar on Dissimilar Welds in Fossil— Fired Boilers. July 1985. (USA)
- 2 Irving, R. Dissimilar metal welding Paves the way to new ventures. W.J. 1992, 71(5)
- 3 丛欣滋 铁素体—奥氏体异种接头高温失效原因的分析. 焊接学报, 1989, 10(1)
- 4 Lundin, C. D. High Temperature low— cycle Fatigue of Friction welded jointed Type—304 and Alloy 718 Jour. of Enge. Tech. 1993, (1) 115 (German)
- 5 李清斌译. 合金中的扩散性相变与合金热力学. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1984.

Interface Structure and Mechanical Property of F/A Dissimilar Metal Welded Joints

Meng Qingsen, Han Peide, Yang Shijie

(Taiyuan University of Technologh)

Liang Jun

(Shanxi Research Institute of Power Testing)

Abstract A special nickel— based weld transition joint has been designed for raising the creep strength and service life of the ferritic— austenitic dissimilar metal welded joints, which have been used in super— heaters of power plant boilers. The interface carbon diffusion, mechanical properties of joints and thermal stress on the interface area have been investigated by means of creep rupture tests, EDAX analysis, FE calculation. It is concluded that in the condition of elevant temperature and low stress, carbon migration and carbide precipitate in the fusion line and HAZ are important factors for effecting creep rupture and the nickel— based weld metal transiting joint can contribute to lower thermal stress and hig her creep strength.

Key words dissimilar metal welded joint, creep rupture, carbon migration, thermal stress