

铁素体-奥氏体异种钢接头 高温失效原因的分析

丛欣滋高级工程师

(上海发电设备成套设计研究所)

摘要

通过用镍基合金、奥氏体和铁素体填充材料焊接的铁素体-奥氏体异种钢接头的蠕变断裂试验结果表明,材料之间的蠕变强度不匹配是异种钢接头高温运行中过早失效的主要原因。为了改善铁素体钢和奥氏体钢之间蠕变强度差别太大的问题,接入一段蠕变强度介于两者之间的过渡段,结果可使异种钢接头的蠕变断裂强度(寿命)达到铁素体同种钢接头的水平。

主题词 yí hàn ru
异种金属焊 焊接接头 蠕变

0 序 言

在电站锅炉的过热器和再热器及气冷反应堆和快中子反应堆中有很多铁素体-奥氏体异种钢接头,因为异种钢接头失效要强迫停机,经济损失很大^[1],所以这些在蠕变条件下运行的异种钢接头过早失效是一个引人注目的问题。异种钢接头失效的主要特征是沿焊缝界面产生无塑性开裂^[2]。虽然国外在这方面进行过大量的分析研究,但对失效的根本原因至今没有统一的认识。长期以来,人们普遍认为材料间热膨胀系数差别大和热影响区产生脱碳是失效的主要原因^[3],但有很多失效用这些机理不能解释。通过12Cr1MoV-18-8Ti异种钢接头蠕变断裂试验认为,材料之间蠕变强度不匹配是异种钢接头过早失效的主要原因。

为改善12Cr1MoV钢与18-8Ti钢之间蠕变强度差别太大的问题,在它们之间接入一段蠕变强度介于它们之间的过渡段,再选择两种不同蠕变强度的焊接材料分别焊接两条焊缝,结果可使铁素体-奥氏体异种钢接头的蠕变强度达到铁素体同种钢接头的水

半。

1 接近工况的蠕变断裂试验

异种钢接头失效是在长期蠕变工况下产生的，因此认为蠕变断裂试验是接近工况的试验方法，它能使失效特征在试验室里再现。另外它也是一种比较苛刻的方法，这一部分的试验就是利用这种方法，从试样的断裂规律寻找失效的主要原因。

1.1 试验材料——试板和焊接材料

试验材料的化学成分列于表1，12Cr1MoV钢板为30mm厚，切成 $30 \times 100 \times 200$ mm的块，然后进行 $1000^{\circ}\text{C} \times 1\text{h}$ 正火， $700^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$ 回火处理。热处理后加工成 $20 \times 85 \times 200$ mm。18-8Ti钢板为20mm厚，供货状态，也分割加工成 $20 \times 85 \times 200$ mm的块，两块板的对接坡口为 60°V 形。

试验用焊条除Inconel182， $\phi 3.175\text{mm}(1/8")$ 为美国进口的外，其他焊条均系作者试制的，低氢型药皮，直径4mm。

1.2 蠕变断裂试样的制备

将12CrMoV和18-8Ti试板坡口留 $2 \sim 3$ mm间隙点固在一起后，预热 150°C 后焊接，焊后进行 $730^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$ 回火，然后分割加工成蠕变断裂试样。各组试样都按同样方法制备。

1.3 蠕变断裂试验和试验结果

试验采用RB-4型蠕变试验机，试验温度均为 $580^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ，各组试样在不同应力下的断裂寿命和断裂情况列于表2。断在焊缝界面，试样的延伸率和断面收缩率都很低，通常接近于零。

1.4 讨 论

首先要指出的是，蠕变断裂试验与一般的常温抗拉和瞬时高温抗拉有原则区别，材质的均匀性对蠕变断裂寿命（强度）影响很大，而事实上，工业用的一般金属材料都达不到理想的均匀程度，所以蠕变断裂试验的试验点往往比较分散。因为焊接区是一个组织和性能的不均匀区，故焊接接头蠕变断裂试验点通常更为分散，特别是热影响区，通常是蠕变断裂的薄弱区^[4, 5]，其断裂强度（寿命）比基本金属明显地低。而异种钢接头的情况更为复杂，整个接头是一个不均匀体，其中包括化学成分、组织、抗氧化性、热膨胀系数和蠕变断裂强度等都存在巨大差异，正是这些差异使异种钢接头问题变得复杂。蠕变断裂不仅对形状突变非常敏感，对上述一些差异引起的突变同样非常敏感，所以异种钢接头的强度（寿命）更低（短）。图1是母材、同种钢接头和异种钢接头蠕变断裂曲线的示意图，从图1中可以看出，异种钢接头不仅远低于母材而且也远低于同种

表1 试验材料的化学成分(%)

材	料	种	类	C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	V	Ni	Nb	Ti	Bs*	Cu	Fe
母	12Cr1MoV			0.10	0.23	0.52	0.011	0.021	1.18	0.30	0.25					余	
材	18-8Ti			0.06	0.62	1.62	0.006	0.033	18.17	0.10		9.70		0.45		余	
	Inconel 182			<0.10	<0.10	5.0/9.0	<0.015	<0.03	13.0/17.0			余	1.0/2.5	<1.0	<0.5	<10.0	
母	Cr8Mn16MoVNbB-18			0.12	0.09	15.58			8.57	0.80	0.15	0.12			0.008	余	
母	Cr10Ni2Mo2V-25			0.06	0.14	0.62	0.013	0.019	9.64	1.66	0.40	2.36				余	
母	Cr10Mo2VNb-38			0.12	0.38	0.90			10.0	1.65	0.50	0.82	0.27			余	
母	Cr2Mo1VNbB-3			0.12	0.34	0.70	0.013	0.021	2.19	1.09	0.57	0.34			0.01	余	
母	Cr5MoVNb-12			0.06	0.26	0.94	0.009	0.020	4.73	0.76	0.41	0.19				余	
母	Cr4Ni4Mo1V-19			0.05	0.14	0.22	0.020	0.016	4.04	1.16	0.33	3.95				余	

* Bs—固溶剂

表 2 12Cr1MoV-18-8Ti接头580℃蠕变断裂试验结果

序号	接头种类	应力(MPa)	断裂寿命(h)	断裂情况
1	Inconel 182	140	156	断12Cr1MoV母材, 12Cr1MoV焊缝界面开裂
		120	501	断12Cr1MoV焊缝界面
		110	982	"
		100	1548	"
2	Cr8Mn16MoVNbB-18	140	142	"
		120	512	"
		110	521	"
		100	1021	"
3	Cr10Ni2Mo2V-25	140	258	"
		120	648	"
		110	1191	"
		100	1378	"
4	Cr10Mo2VNb-38	140	750	"
		120	1377	"
		110	2010	"
		100	2927	"
5	Cr2MoVNbB-3	140	197	断12Cr1MoV母材
		140	228	"
		120	610	断12Cr1MoV焊缝界面
		110	942	"
		100	1966	"
6	Cr5MoVNb-12	140	275	断18-8Ti焊缝界面
		120	979	断12Cr1MoV焊缝界面
		110	667	断18-8Ti焊缝界面
		100	2221	"
		90	3038	断12Cr1MoV焊缝界面
7	Cr4Ni4Mo1V-19	140	48	断焊缝, 18-8Ti焊缝界面开裂
		130	121	断焊缝
		120	152	断焊缝, 18-8Ti焊缝界面开裂
		80	1350	断焊缝

钢接头, 特别是低应力断裂寿命降低更多, 这就是异种钢接头高温长期运行容易失效的原因^[6]。所以要防止异种钢接头高温失效, 就要设法将异种钢接头的蠕变断裂寿命提高到等于同种钢接头的水平。

根据试验焊条的化学成分, 和现在生产上使用的各种热强钢焊条比较, 就大致可以判断出其蠕变强度的水平。图2是试验焊条和12Cr1MoV、18-8Ti 580℃蠕变断裂强度比较的示意图。将表2的试验结果结合图2加以分析可以看出, 异种钢接头的薄弱部位与材料

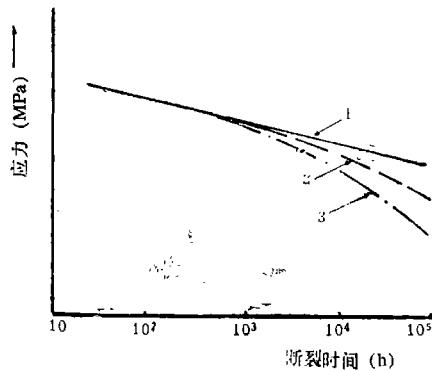


图1 母材1、同种钢接头2和异种钢接头3的蠕变断裂曲线比较

之间的蠕变强度匹配有着明显的关系, 图3是这种关系的示意图。利用该图可以判断出异种钢接头的薄弱部位, 也可用来寻找提高异种钢接头蠕变断裂寿命的途径。

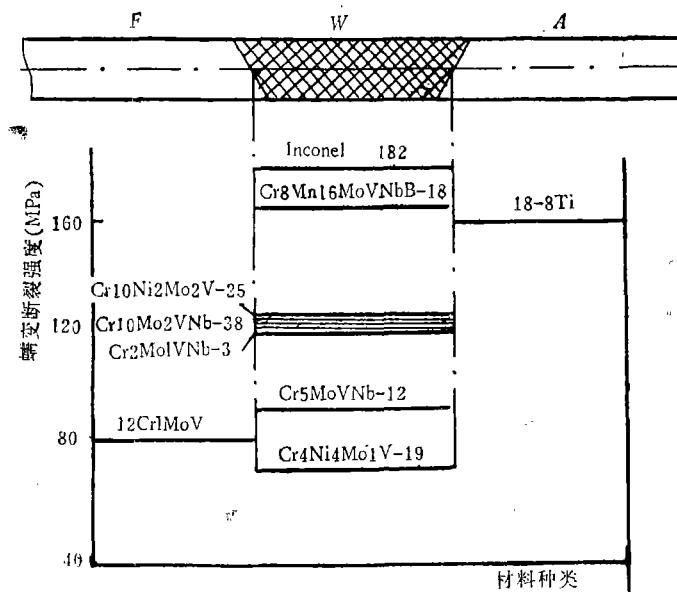


图2 12Cr1MoV、18-8Ti钢和试验用焊条580℃蠕变断裂强度水平比较示意图
F—铁素体钢 W—焊缝 A—奥氏体钢

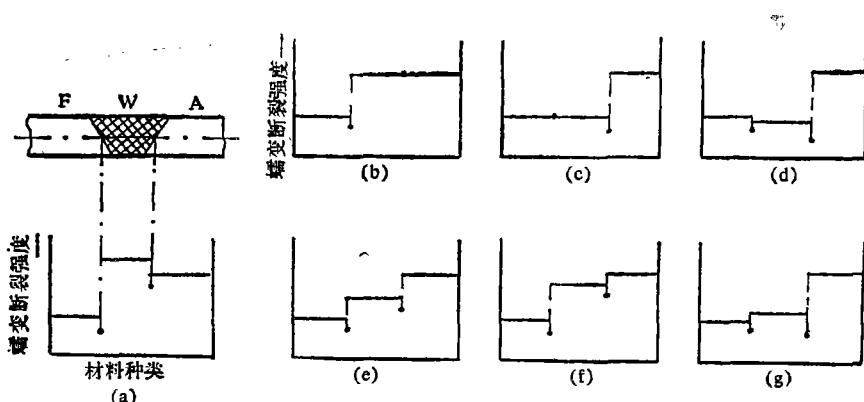


图3 铁素体-奥氏体异种钢接头材料之间蠕变强度匹配与接头薄弱部位关系示意图
F—铁素体钢 W—焊缝 A—奥氏体钢 ●—焊缝界面蠕变断裂强度

- (a) 焊缝的蠕变强度高于铁素体和奥氏体钢, 薄弱部位在铁素体钢一边的焊缝界面处;
- (b) 焊缝的蠕变强度等于奥氏体钢, 薄弱部位也在铁素体钢一边的焊缝界面处;
- (c) 焊缝的蠕变强度等于铁素体钢, 薄弱部位在奥氏体钢一边的焊缝界面处;
- (d) 焊缝的蠕变强度低于奥氏体和铁素体钢, 薄弱部位在奥氏体钢一边的焊缝界面处;
- (e) 焊缝的蠕变强度恰好界于铁素体和奥氏体钢之间, 薄弱部位在铁素体钢一边的焊缝界面处;
- (f) 焊缝的蠕变强度略低于奥氏体钢, 远高于铁素体钢, 薄弱部位在铁素体钢一边的焊缝界面处;
- (g) 焊缝的蠕变强度略高于铁素体钢, 远低于奥氏体钢, 薄弱部位在奥氏体钢一边的焊缝界面处。

2 采用过渡段的试验

接近工况的蠕变断裂试验结果表明, 异种钢接头过早失效的主要原因是由于材料之间的蠕变强度不匹配。要解决异种钢接头蠕变强度的巨大差异和其他方面存在的差异, 最理想的办法是在铁素体钢和奥氏体钢之间接入一段一端的蠕变强度、热膨胀系数和抗氧化性能和铁素体钢接近, 而另一端的蠕变强度、热膨胀系数和抗氧化性能与奥氏体钢接近的过渡段, 两条焊缝再分别选择与之匹配的填充材料焊接, 见图4。显然这仅是一种理想, 这种短接在生产实际中是很难制造出来的。从改善材料蠕变强度不匹配的角度出发, 另外一种可供选择的办法是在铁素体钢和奥氏体钢之间, 接入一段蠕变强度介于两者之间的过渡段, 两条焊缝再分别选择蠕变强度不同的焊接材料焊接, 这样就形成一个蠕变强度阶梯过渡的过渡接头, 如图5所示。这在生产实际中是不难做到的。根据提出的要求, 对 $2\frac{1}{4}\text{Cr1Mo}$ 和 12Cr1MoV 等钢的异种钢接头, 12Cr3MoVSiTiB , $12\text{Cr}_2\text{MoWVTiB}$ 和T91等钢都是适合做过渡段的材料。在 $540\sim 580^\circ\text{C}$ 的范围内, 这些钢的蠕变断裂强度均比 $2\frac{1}{4}\text{Cr1Mo}$ 和 12Cr1MoV 钢高50%左右, 比奥氏体钢低30%左右。对两条焊缝填充材料的选择, 原则上要求焊后每条焊缝两侧的焊缝界面的蠕变断裂强度相等, 见图5。从图5中的配匹可以看出, 在5种材料(3种基本金属2种填充金属)中, 铁素体 F_1 钢的蠕变强度最低, 对整个接头而言, 最薄弱的部位是焊缝 W_1 两侧的焊缝界面, 这说明这条焊缝填充材料的选择是考虑问题的重点。而焊缝 W_2 接头的强度余度要比焊缝 W_1 接头大得多, 因此焊缝 W_2 填充材料的选择余地较大, 试验使用的是一种奥氏体两种铁素体焊条。试验选择 12Cr2MoWVTiB 钢作过渡段材料, 根据图5, 以下简称为 F_2 钢。

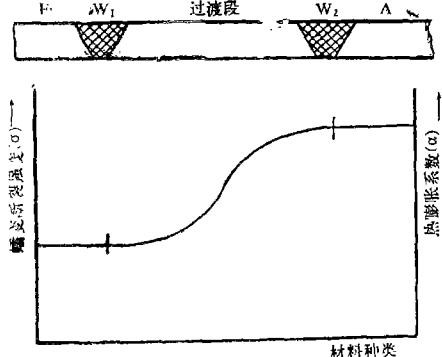


图4 接入蠕变断裂强度和热膨胀系数具有理想变化的过渡段的异种钢接头

F —铁素体钢 A —奥氏体钢

W_1, W_2 —两种填充金属的焊缝

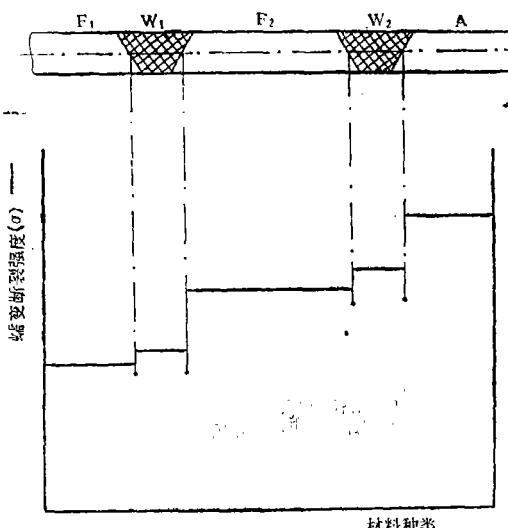


图5 铁素体-奥氏体异种钢接头改善材料之间蠕变强度配匹示意图

F_1, F_2 —铁素体钢 W_1, W_2 —焊缝

A —奥氏体钢 ●—焊缝界面强度

2.1 试验材料——试板和填充材料

试验材料的化学成分列于表3,其中12Cr1MoV和18-8Ti与接近工况的蠕变断裂试验相同,12Cr1MoV焊前热处理也相同。F2钢是用 $\phi 100\text{mm}$ 的管坯锻成 $20 \times 200 \times 600\text{mm}$ 的板,再分割成 $20 \times 85 \times 200\text{mm}$ 的块,然后进行 $1020^\circ\text{C} \times 1\text{h}$ 正火, $750^\circ\text{C} \times 3\text{h}$ 回火。试验用焊条除奥102,热317是市场商品焊条外,其他焊条是作者试制的,低氢型药皮,试验用焊条直径均为4mm。Cr3Mo1VNb-8和Cr3Mo1VNb-5焊条成分基本一样,与热417焊条相当;Cr1MoVNb-2和Cr1MoVNb-1焊条成分基本一样均与热337焊条相当。

表3 试验材料的化学成分(%)

材料种类		C	Si	Mn	S	P	Cr	Mo	V	Nb	Ti	Ni
母材	12Cr1MoV	0.10	0.23	0.52	0.011	0.021	1.18	0.30	0.25	W 0.47	0.15 0.45	B 9.7
	12Cr2MoWVTiB(F ₂)	0.12	0.65	0.55	0.005	0.015	1.91	0.58	0.37			
	18-8Ti	0.06	0.62	1.62	0.006	0.033	18.17	0.10				
焊条	Cr1MoVNb-2	0.07	0.26	0.74	0.011	0.014	1.28	0.75	0.23	0.16		
	Cr3MoVNb-8	0.08	0.30	0.83	0.012	0.018	3.15	1.08	0.48	0.41		
	热317	0.07	0.40	0.88	0.010	0.021	0.97	0.60	0.25			
	奥102	0.05	0.35	2.35	0.004	0.020	19.46	0.03	0.03		<0.01	8.8
	Cr1MoVNb-1	0.07	0.20	0.85	0.011	0.015	1.18	0.75	0.22	0.15		
	Cr3MoVNb-5	0.08	0.37	0.90	0.009	0.015	3.10	1.04	0.49	0.46		

2.2 蠕变断裂试样制备

制作步骤是先将F2和18-8Ti预热 150°C 点固在一起,然后焊接。焊好后按图6的尺寸将F2钢多余部分去掉并开坡口,然后再与12Cr1MoV一起预热 150°C 点固并焊接在一起,焊好后试样进行 $730^\circ\text{C} \times 2\text{h}$ 回火处理,然后分割加工成如图6的蠕变断裂试样,试验的3组试样均按同样方法制作。

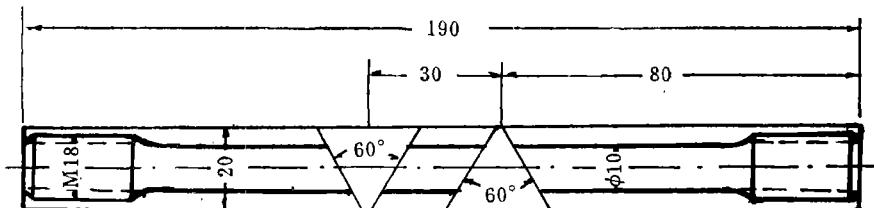


图6 接有过渡段的蠕变断裂试样尺寸

2.3 蠕变断裂试验和试验结果

蠕变断裂试验温度选为 580°C ,该温度是12Cr1MoV钢使用温度的上限。3组试样

在不同应力下的断裂寿命和断裂情况列于表4, 所有试样高应力都断母材, 低应力断12Cr1MoV热影响区, 没有一根试样断在18-8Ti一边的焊缝界面。图7是3组试样的蠕变断裂曲线, 用最小二乘法分别外推 10^5 h的蠕变断裂强度是, 表4序号1——52MPa, 序号2——61MPa, 序号3——57MPa。事实上这是12Cr1MoV同种钢接头的强度。

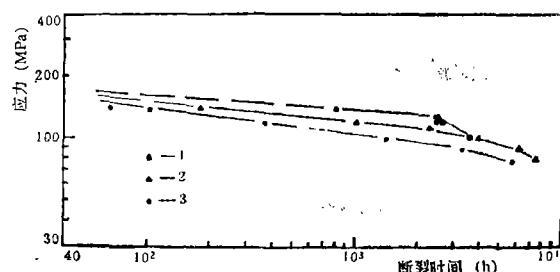


图7 3组异种钢接头580°C蠕变断裂曲线
(曲线低应力有下拐趋势)

表4 12Cr1MoV—F₂—18-8Ti异种钢接头580°C蠕变断裂试验数据

序号	接头种类	应力 (MPa)	断裂寿命 (h)	断裂情况
1	Cr1MoVNb-2—F ₂ —Cr3MoVNb-3	140	799	断12Cr1MoV母材, 远离焊缝
		120	2458	断12Cr1MoV热影响区
		110	2466	"
		110	2648	"
		100	3728	"
2	317—F ₂ —奥102	140	182	断12Cr1MoV母材, 远离焊缝
		120	1028	" "
		110	2345	" "
		100	3922	断12Cr1MoV热影响区
		90	6168*	"
		80	7350	"
		70		
3	Cr1MoVNb-1—F ₂ —Cr3MoVNb-5	140	66	断12Cr1MoV母材, 远离焊缝, 明显塑性变形
		140	104	" "
		120	361	" "
		100	1399	" "
		90	3261	断12Cr1MoV热影响区, 12Cr1MoV明显变形
		80	5709	" "

* 超温60°C × 1h左右两次

2.4 讨 论

试验结果表明, 为改善12Cr1MoV与18-8Ti之间蠕变强度差别太大, 在它们之间接入具有中间强度的12Cr2MoWVTiB钢过渡段, 不仅提高了接头的蠕变断裂寿命而且改变了接头的断裂位置。这个结果与图5所作的分析很吻合。这足以表明在这种形式的匹配中, F2—18-8Ti接头选用奥氏体焊条和铁素体焊条焊接强度余度都很大。由于加入过渡段后的异种钢接头薄弱部位是在12Cr1MoV钢一边的热影响区。根据这种情况, 对加入过渡段后的异种钢接头, 考虑问题的重点应集中在蠕变强度低的钢的焊缝界面和热影响区, 所以为了避免由于材料之间蠕变强度不匹配给这个界面带来损害, 故认为选择图5中焊接F1同种钢的焊接材料焊接W1焊缝是适当的。

很多研究者的试验结果是，在蠕变工况下的同种钢接头，焊缝热影响区通常是蠕变断裂的薄弱部位，所以同种钢接头的蠕变断裂强度通常要低于母材，有的钢甚至达不到母材的70%。另外同种钢接头蠕变断裂试验蠕变断裂曲线低应力都有下拐趋势，而对异种钢接头来说，低应力曲线下拐倾向更为严重，这就是异种钢接头容易过早失效的问题所在的内部原因。这也说明，对异种钢接头用最小二乘法的直线法外推出来的蠕变断裂强度与实际强度值会相差甚远。

以上主要是从材料之间蠕变强度角度进行的分析，而从材料之间热膨胀系数差异和碳迁移的情况看，在加过渡段的试样中（表4），热膨胀系数差别大和主要碳迁移的界面，分别是Cr3MoVNb-8—18-8Ti，Cr3MoVNb-5—18-8Ti和F2—奥102焊缝界面，此外这些界面处还存在一定程度的蠕变强度的不匹配，而试验结果没有一根试样断在这些界面处。热膨胀系数不匹配对异种钢接头会产生有害的影响，但试验表明它不是失效的主要原因。同样，试样的断裂情况与焊缝界面两侧的碳迁移也没有紧密的联系。虽然18-8Ti一边的焊缝两侧也存在一定程度的蠕变强度不匹配，但这一边的焊接接头的蠕变强度比12Cr1MoV一边的焊接接头的蠕变强度要高出一个等级，也就是说在同样温度同样应力下它有更大的强度余度，从图5中也可以清楚地看出这一点。

3 结 论

根据接近工况蠕变断裂的试验：

1. 蠕变断裂试验能模拟异种钢接头运行中出现的开裂。
2. 12Cr1MoV（包括2½Cr1Mo）钢的异种钢接头用奥氏体或镍基合金焊接，其断裂寿命比低合金母材低很多，比同种钢接头也低很多，因此运行中的这种异种钢接头潜在着失效的危险。影响异种钢接头失效的因素很多，而其中主要原因是由于材料之间蠕变强度差别太大。
3. 提出的异种钢接头材料之间的蠕变强度匹配与接头薄弱部位关系示意图（图3），反映了异种钢接头产生失效部位的基本规律。
4. 在蠕变工况下，不仅铁素体-奥氏体异种钢接头焊缝界面附近容易产生开裂，蠕变强度差别的铁素体-铁素体异种钢接头也有这种倾向。

根据采用过渡段的试验：

1. 以材料之间蠕变强度不匹配是异种钢接头高温运行过早失效的主要原因为出发点，为改善这种不匹配的程度，在12Cr1MoV等钢与奥氏体钢之间接入一段蠕变强度介于两者之间的过渡段，则整个接头的蠕变断裂强度（寿命）可达到低合金同种钢接头的水平。
2. 加入过渡段后的两个接头，铁素体F2-奥氏体接头有较高的强度余度（图5），这些焊缝可以选用镍基合金焊接，也可以选择适当的铁素体焊条和奥氏体焊条焊接，这些选择都能满足整个接头蠕变断裂强度的要求。
3. 加入过渡段后的整个接头，其薄弱部位通常是在铁素体F1钢的热影响区，所

以铁素体 F_1 —铁素体 F_2 接头应选用铁素体 F_1 同种钢接头的填充材料焊接, 以避免由于蠕变强度不匹配对这个薄弱部位产生过大的损害。

4. 要提高异种钢接头寿命, 防止高温运行中过早失效, 材料之间热膨胀系数不匹配和碳迁移的问题要考虑, 但是更重要的是要设法改善材料之间蠕变强度的不匹配。

(1988年12月7日收到修改稿)

参 考 文 献

- 1 Viswanathan R., Jaffee R. I. and Dimmer J. Dissimilar metal welds in power plants. Joining Dissimilar Metal in Power plants AWS-EPRI Conference. August 1982.
- 2 Roberts D. I. and Viswanathan R. Dissimilar Weldments in Fossil-Fired Power Plant: Technical Overview. Proceedings: Seminar on Dissimilar Welds in Fossil-Fired Boilers. July 1985.
- 3 King J. F. Sullivan M. D. and Slaughter G. M. Development of an Improved Stainless Steel to Ferritic Steel Transition Joint. Welding Journal. 1977, 56(11)
- 4 平修二. 金属材料的高温强度. 北京:科学出版社, 1983.
- 5 Roy P. and Lauritzen. T. The Relative Strength of Base Metal and Heat-Affected Zone in $2\frac{1}{4}$ Cr1Mo Weldments — A Microstructural Evaluation. Welding Journal. 1986, 65(2)
- 6 Nath B. Creep Rupture and Creep Crack Growth Behaviour of Transition Joints. International Conference on Welding Technology for Energy Applications. May 1982.

AN ANALYSIS OF ELEVATED-TEMPERATURE
FAILURE OF FERRITIC/AUSTENITIC DISSIMILAR METAL WELDS

Senior Engineer Cong Xinzi

(Shanghai Power Equipment Research Institute)

Abstract

The creep rupture test results of ferritic/austenitic dissimilar metal welds by nickel base alloy, austenitic and ferritic fillers show that the mismatch of creep strength between different materials is the main cause of premature failure of dissimilar metal welds during elevated temperature service. In order to compromise the big difference of creep strength between ferritic steel and austenitic steel, a spool with medium creep strength may be added and joined between them. Thus the creep rupture strength (life) of the dissimilar metal welds can be raised to the same level of that of the ferritic similar metal welds.

Key words Welding of dissimilar metal Welded joint Creep