

# 核电蒸汽发生器管板镍基合金自动堆焊技术

中广核工程有限公司(深圳市 518124) 刘鸣宇 徐文镜  
上海电气核电设备有限公司(201306) 张茂龙 孙志远

**摘要** 蒸汽发生器管板镍基合金堆焊是蒸汽发生器制造的基本工序,也是关键工序,堆焊质量直接影响设备制造进度和后续工艺质量。CPR1000 项目是中广核集团自主知识产权的二代加核电站,EPR 项目是欧洲第三代核电站,两个项目蒸汽发生器管板大面积堆焊采用了不同的工艺方法,CPR1000 项目管板采用带极电渣堆焊,而 EPR 项目管板采用热丝 TIG 堆焊。通过对两种不同的管板堆焊工艺进行阐述,分析和总结了焊接过程中容易出现的问题,为蒸汽发生器管板堆焊工艺的改进和设备监造提供参考。

**关键词:** 蒸汽发生器 管板 带极电渣堆焊 热丝 TIG 堆焊  
**中图分类号:** TL374+.5

## 0 前言

在国家大力发展低碳经济、开发清洁能源的背景下,中广核集团作为中国核电建设和运营的排头兵,积极推进具有自主知识产权的 CPR1000 型二代加百万千瓦核电机组和 EPR 三代 160 万千瓦核电机组。上海电气核电设备有限公司是国家重点核岛主设备制造企业,同时承担了两个项目的蒸汽发生器的设备制造任务。

蒸汽发生器是核电站核岛关键设备之一,通过热交换产生蒸汽推动汽轮机做功,并且起到隔离一回路和二回路的重要作用。管板一回路一侧长期接触带有放射性和腐蚀性的载热剂介质,所以按照产品技术要求,管板一回路侧必须全表面堆焊镍基合金,以保证有效的耐蚀性。传统的堆焊工艺主要是带极埋弧堆焊技术,一般需堆焊 3 层以保证达到产品技术要求中的镍基合金堆焊层厚度和化学成分要求。

蒸汽发生器管板镍基合金堆焊是蒸汽发生器制造的关键工序,堆焊质量直接影响到设备制造进度、后续工序,特别是管子管板焊接的质量,从而影响设备使用寿命。大亚湾核电站蒸汽发生器由法国阿海珐公司制

造,管板大面积堆焊采用了带极埋弧堆焊工艺。东方重机在岭澳一期和二期承担了部分蒸汽发生器的制造,管板堆焊也采用了带极埋弧堆焊工艺。上海电气核电设备有限公司在 CPR1000 项目蒸汽发生器的制造过程中的管板大面积堆焊工艺上,采用了带极电渣堆焊技术。对于第三代核电技术的 EPR 项目,法国阿海珐公司对管板堆焊采用了热丝 TIG 工艺,上海电气核电设备有限公司也采用热丝 TIG 工艺对 EPR 项目蒸汽发生器的管板进行大面积堆焊。带极电渣堆焊和热丝 TIG 堆焊工艺方法都已经在制造厂实际生产中得到了应用,并且得到了符合技术要求的蒸汽发生器管板镍基合金堆焊层。文中介绍了蒸汽发生器管板镍基合金带极电渣堆焊和热丝 TIG 堆焊。

## 1 管板母材及焊接材料

### 1.1 管板尺寸及性能指标

CPR1000 项目和 EPR 项目的管板材料及尺寸要求如表 1 所示。可以看到,EPR 项目的管板厚度和直径都大于 CPR1000 项目的管板,但在堆焊层尺寸的最终要求上,两者一致。

表 1 管板基本形状和尺寸

项目	材料	参照标准	管板厚度 B/mm	管板直径 D/mm	堆焊层厚度 δ/mm
CPR1000	18MND5	RCC - M M2115(版本 2000 + 2002 补遗)	557	3 485	≥8
EPR	20MND5	RCC - M M2115(版本 2007)	620	3 816	≥8

表 2 是管板母材的化学成分,EPR 管板与 CPR1000 管板所用的母材有所不同,20MND5 对有害元素 P,S 含

量的控制提出了更高的要求,其它元素含量变化不大。

CPR1000 管板相比,抗拉强度(室温,高温),断后伸长率,0 °C 冲击性能的要求都有不同程度的提高。

表 3 是管板母材的力学性能比较,EPR 管板与

表 2 18MND5 和 20MND5 化学成分(质量分数,%)

材料	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Cu	Al
18MND5	≤0.22	1.15 ~ 1.60	≤0.012	≤0.012	0.10 ~ 0.30	0.50 ~ 0.80	≤0.25	0.43 ~ 0.57	≤0.01	≤0.20	≤0.04
20MND5	≤0.23	1.11 ~ 1.59	≤0.008	≤0.008	0.15 ~ 0.30	0.37 ~ 1.03	≤0.25	0.43 ~ 0.62	≤0.01	≤0.20	≤0.04

表 3 18MND5 和 20MND5 力学性能

材料	拉 伸					冲击吸收能量 KV/J				
	室温			350 °C		0 °C		-20 °C		20 °C
	$R_{p0.2}$ /MPa	$R_m$ /MPa	A (%)	$R_{p0.2}$ /MPa	$R_m$ /MPa	最小平均值	个别最小值	最小平均值	个别最小值	最小值
18MND5(轴向)	—	—	—	—	—	≥56	≥40	≥40	≥28	≥72
20MND5(轴向)	—	—	—	—	—	≥80	≥60	≥40	≥28	≥72
18MND5(周向)	≥420	580 ~ 700	≥18	≥350	≥522	≥56	≥40	≥40	≥28	≥72
20MND5(周向)	≥420	620 ~ 795	≥20	≥350	≥560	≥80	≥60	≥40	≥28	≥72

EPR 核电站装机容量要高于 CPR1000,因此对蒸发器管板材料的要求,无论厚度、化学成分、力学性能要求均高于 CPR1000,以确保设备质量满足实际设计的技术指标和运行寿命要求。

EPR 项目管板堆焊采用的是直径 1.2 mm 的镍基合金焊丝,而 CPR1000 管板堆焊采用的是 60 mm × 0.5 mm 的镍基合金焊带,CPR1000 采用的是 INCONEL 600 焊接材料,而 EPR 采用了 INCONEL 690 焊接材料。其化学成分见表 4 和表 5。

1.2 焊接材料

表 4 焊材的化学成分(质量分数,%)

焊材	C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
INCONEL600	≤0.040	≤0.010	≤0.010	≤0.25	2.50 ~ 3.50	≥67	18.00 ~ 22	—
INCONEL690	≤0.040	≤0.008	≤0.020	≤0.50	1.00	余量	28.00 ~ 31.5	≤0.50
焊材	Co	Cu	Nb + Ta	Ti	Fe	Al	N	其他
INCONEL600	≤0.10	≤0.30	2.30 ~ 3.00	≤0.75	≤3.00	—	提供数据	≤0.50
INCONEL690	≤0.020	≤0.30	≤0.10	≤1.00	8.00 ~ 12.00	≤1.10	≤0.030	提供数据

表 5 熔敷金属的化学成分(质量分数,%)

焊材	C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr	Mo
INCONEL600	提供数据	≤0.010	≤0.010	≤0.40	提供数据	提供数据	提供数据	—
INCONEL690	提供数据	≤0.015	≤0.020	≤0.65	提供数据	提供数据	提供数据	—
焊材	Co	Cu	Nb + Ta	Ti	Fe	Al	N	其他
INCONEL600	≤0.10	≤0.30	≥2.00	≤0.75	≤10.00	—	提供数据	≤0.50
INCONEL690	≤0.06	提供数据	0.25 (Max)	提供数据	15.00 (Max)	—	—	—

## 2 堆焊工艺

### 2.1 CPR1000 项目管板堆焊工艺

CPR1000 项目管板堆焊传统上采用带极埋弧堆焊工艺,而最新采用的带极电渣堆焊,在使用相同焊带的情况下熔敷效率比埋弧堆焊高约 50%,并且熔深浅而均匀,母材稀释率低,比埋弧焊小一倍<sup>[1-2]</sup>。因此合金元素烧损和有害元素增量极少,堆焊层的塑性和韧性高于埋弧焊,堆焊层更容易满足化学成分及性能要求。

带极电渣堆焊的焊接速度较低,焊接电流较大,热输入较大,特别对于管板镍基合金堆焊,由于堆焊层与母材成分及性能差异较大,容易造成母材热影响区晶粒粗大,堆焊层抗剥离性能较差。目前使用的高速带极堆焊是在常规带极电渣堆焊的基础上,通过优化参数、提高焊接速度发展而来的。由于焊接速度的提高,使电弧发生率增加,因此使焊接的导电过程由单一的电渣导电变为电渣和电弧的联合导电过程,但仍以电渣导电过程为主。通过提高焊接速度可降低焊接热输入,同时管板带极电渣堆焊一般为 3 层,后续层堆焊对前一层的回火作用,使得电渣堆焊的母材热影响区的晶粒细化,可以获得符合技术要求的堆焊层。

由于堆焊使用 60 mm × 0.5 mm 的焊带,在焊接过程中熔池形态和常规丝极焊接明显不同,电磁力对熔池形态的影响比较明显,使得熔池中液态金属收缩,不易铺展和脱渣,很容易出现咬边缺陷,从而影响堆焊层质量。为了改善这种不利状况,在焊机机头安装磁控装置,抑制电磁力的不利影响,改善焊缝成形<sup>[2]</sup>。管板带极电渣堆焊过程如图 1 所示。



图 1 CPR1000 管板带极电渣堆焊过程

### 2.2 EPR 项目管板堆焊工艺

EPR 项目管板大面积堆焊采用热丝 TIG 焊,在普通 TIG 焊的基础上,加入一个热丝系统,焊丝在送进熔

池之前被单独的热丝电源通电预热,达到提高熔敷效率、改善焊缝质量的效果。系统包括 TIG 焊电源、热丝电源、送丝系统以及焊枪和控制系统,如图 2 所示。

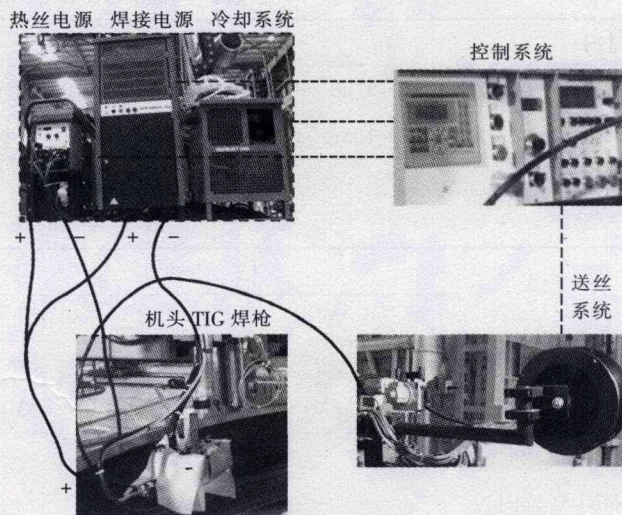


图 2 热丝 TIG 焊接系统

如图 3 所示,主要设备为两套 Air Liquid Welding France 公司的 SAF - FRO 热丝 TIG 焊接设备,彼此相对布置。操作架上的横臂可沿管板直径纵向移动,测量系统可确定横臂的位置。焊接过程中管板水平放置在专用的非速度控制型转台上,该转台可以通过在控制面板上输入焊接位置数据来自动调节焊接速度,比传统的速度型变位器更为灵活和准确。EPR 项目管板镍基合金堆焊共 4 层,使用热丝 TIG 堆焊,中心区域采用直道堆焊,每层热丝 TIG 堆焊的厚度约为 3 mm。

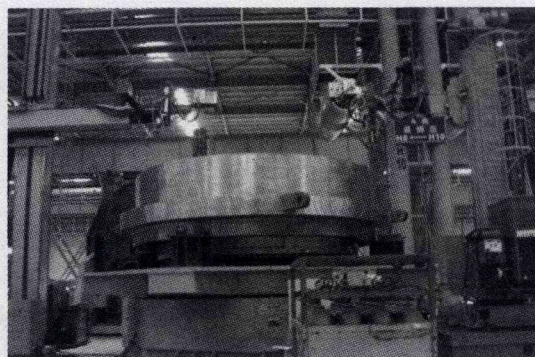


图 3 EPR 项目管板热丝 TIG 堆焊示意图

### 2.3 焊道外观

带极电渣堆焊为环形焊道,如图 4 所示。宽度约 65 mm,堆焊层表面成形良好,表面不平度小于埋弧堆焊层。但是在实际焊接过程中发现,位于焊道搭接的一侧会出现连续的点状凹坑,这些凹坑中往往残留有

熔渣。由于带极电渣焊熔深较浅,以及其特殊的熔池特性,这些熔渣有可能无法漂浮到熔池表面而产生夹渣缺陷。在焊道搭接边缘局部区域还能观察到轻微的咬边,在焊接过程中应该注意打磨去除或者通过合理的焊接参数控制这些不良成形。

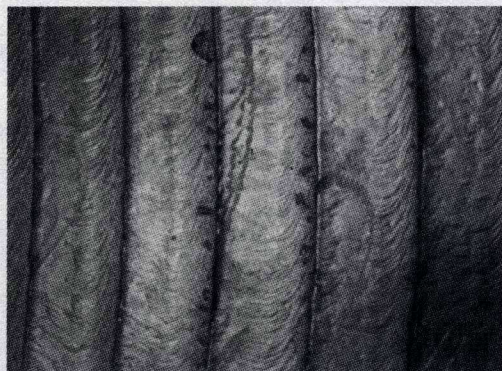


图4 带极电渣堆焊焊缝成形

热丝 TIG 焊焊道如图 5 所示,宽度约为 24 mm,与带极电渣堆焊相比,明显的优点是焊道间搭接位置过渡平滑、均匀,焊道表面光洁,无咬边现象,清洁度较好。焊道搭接位置基本不需要打磨就可以进行下一道的焊接。

#### 2.4 堆焊层的检验

CPR1000 项目电渣堆焊工艺评定的检验包括无损检测、弯曲试验、化学成分分析、金相检验、硬度测定、晶间腐蚀试验;管板产品堆焊检验仅有无损检测和化

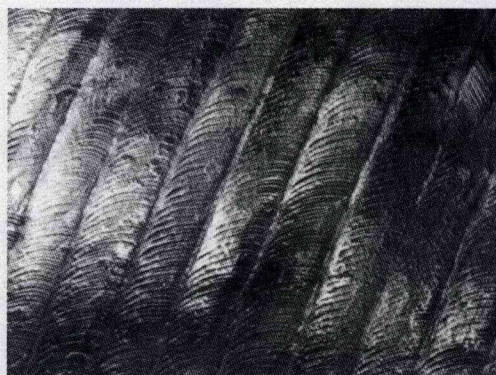


图5 热丝 TIG 堆焊焊缝成形

学成分分析。EPR 项目热丝 TIG 堆焊工艺评定检验和 CPR1000 项目相比略有区别,减少了晶间腐蚀试验,硬度测定也只是检测了热影响区和母材的硬度,并没有检测焊缝金属。在检验项目中,堆焊层化学成分指标变化较为明显,其它项目的对应技术指标相同。

由表 6 和表 7 可以看出,由于采用了不同牌号的焊接材料,实际产品堆焊层熔敷金属化学成分出现了明显的不同。特别是 Ni 和 Cr 的比例,以及 Nb + Ta, Mn, Fe 的含量,变化显著。镍基焊缝易于产生热裂纹,特别是热影响区液化裂纹。研究表明,C, Ti, Nb 是增加液化裂纹敏感性的元素<sup>[3]</sup>,但是仅仅根据试验数据很难评估对应两种焊材的热裂纹敏感性。另一方面,热裂纹通常是以显微裂纹状态存在,在实际制造过程

表 6 电渣堆焊堆焊层熔敷金属化学成分(质量分数,%)

项目	C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr
技术要求	提供数据	≤0.015	≤0.020	≤0.65	提供数据	提供数据	提供数据
实测典型值	0.025	0.002	0.011	0.25	3.26	70.93	20.83
项目	Co	Cu	Nb + Ta	Ti	Fe	N	其它
技术要求	≤0.15	≤0.30	≥1.80	≤0.75	≤15	提供数据	≤0.50
实测典型值	0.055	0.010	3.14	0.19	1.26	0.008	0.029

表 7 热丝 TIG 堆焊堆焊层熔敷金属化学成分(质量分数,%)

项目	C	S	P	Si	Mn	Ni	Cr
技术要求	提供数据	≤0.008	≤0.020	≤0.65	提供数据	提供数据	提供数据
实测典型值	0.038	0.005	0.005	0.52	0.31	57.50	27.23
项目	Co	Cu	Nb + Ta	Ti	Fe	N	其它
技术要求	≤0.06	提供数据	≤0.25	提供数据	≤15	—	—
实测典型值	0.001	0.025	0.015	0.53	13.23	—	—

的检查很难发现。因此,要准确评估管板堆焊层的热裂纹敏感性,以及堆焊层的耐蚀性,有效控制对产品运行寿命存在潜在影响的不利因素,需要对不同堆焊工艺条件下的堆焊层进行显微裂纹分析和长寿命腐蚀试验,这也是下一步的研究方向。

虽然采用的焊接工艺和材料不同,但是初步分析发现,获得的堆焊层热影响区与熔合线附近的组织特征十分类似,如图6所示。熔合线以下母材铁素体组织呈亮色,碳化物呈暗色,基体组成贝氏体组织,晶粒均匀细密,未发生长大现象。在熔合线附近可以明显地看到“白亮”条带组织和垂直于熔合线的柱状晶组织。目前对于镍基合金堆焊层熔合线附近的晶界组织形态还没有统一的结论,对于这一区域合金元素的偏析扩散也没有详细的分析,因此还不能解释“白亮”条带组织和柱状晶的产生机理。因此,要进一步分析焊接材料和焊接工艺对管板堆焊层耐蚀、耐剥落、焊接性(管子管板焊接)的影响,就需要对管板堆焊层的组织形态和产生机理进行深入研究。

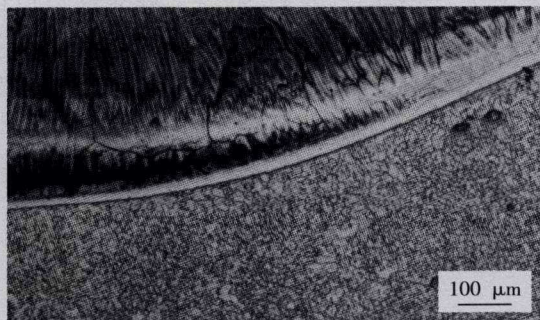


图6 热丝 TIG 堆焊层熔合线附近金相组织

### 3 典型问题和关键点控制

目前,国内核岛主设备制造厂带极电渣堆焊工艺基本成熟,并不存在技术上的操作难度,但是在具体工艺上还可以进一步优化,避免出现堆焊层的质量问题。在实际生产过程中出现的主要问题体现在以下几个方面:

(1) 某一 CPR1000 项目管板堆焊层粗加工后超声检查发现缺陷 19 处,每一环形焊道上均存在垂直于焊接方向的线状缺陷(长度约 55 mm),深度距管板表面约 10.5 mm,后经渗透检验确认为堆焊第一层焊道起弧和收弧搭接位置的未熔合缺陷,如图7所示。原因是在搭接位置打磨、清理不到位。

(2) 某 CPR1000 项目蒸汽发生器在管子-管板封口焊时产生多处外观缺陷,主要是焊瘤和气孔。在封

口焊缝射线检测中也发现了超标缺陷。分析原因是管口附件管板表面堆焊层中存在微小夹渣等缺陷,这些微小缺陷在焊接过程中被翻卷出来产生焊瘤或气孔。对于这一类微小缺陷,制造过程中的渗透检测和超声检测是很难发现的,而管子管板焊接对于管口附近表面质量非常敏感,这种微小缺陷极易引起焊缝的质量问题,造成返修、甚至堵管的质量问题,增加了设备整体质量风险。

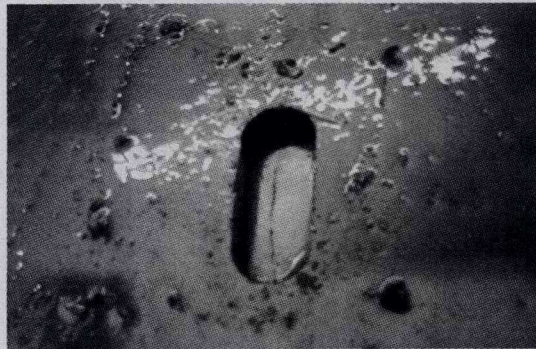


图7 带极电渣堆焊层下未熔合缺陷

因此,在有效控制焊接参数的前提下,焊接过程中的清洁度和焊道接头及搭边处的打磨也是影响管板堆焊层质量的关键因素,必须严格控制。在后续的管板电渣堆焊中,制造厂编制了专用堆焊规程,在管板堆焊过程中,严格控制清洁度和打磨,堆焊层一次合格率明显改善。EPR 项目由于采用了气体保护焊,没有焊剂及焊渣的影响,清洁度易于控制,在堆焊层无损检测中仅发现几处表面渗透探伤缺陷,没有发现未熔合及夹渣缺陷。

### 4 结束语

(1) 通过生产实践说明,对于百万千瓦级核电蒸汽发生器管板堆焊,目前应用于制造厂的带极电渣堆焊和热丝 TIG 堆焊都是可行的,能够获得满足技术要求的镍基合金堆焊层。

(2) 要获得质量优良的镍基合金堆焊层,优化的工艺参数、合理的焊道布置方式、清洁的焊接工作区域、良好状态的堆焊设备(外加磁控装置,电渣)的正确使用,以及技术娴熟的操作工都是不可忽视的。焊道间、层间的打磨以及焊接过程中的清洁是保证镍基合金堆焊十分重要的因素。

(3) 目前,对于不同的堆焊工艺方法对蒸汽发生器质量的影响还没有进行系统分析,因此对于产品堆焊过程的具体实施还未有明确、详细和标准化的规范。

这就导致在设备制造过程中存在多种工艺方法,多种考核标准,这样不利于制造厂和业主方对设备质量的控制。促进管板堆焊工艺的标准化、进一步提高管板堆焊技术水平和质量控制水平是今后管板堆焊工艺发展的方向和课题。

### 参 考 文 献

[1] 张茂龙,李双燕,钱旭辉. 核电蒸汽发生器管板——INCONEL 690 镍基合金带极电渣堆焊技术[J]. 装备制造,

2008(1):35-39.

[2] 顾永康,张仁刚. 核电蒸汽发生器管板大面积镍基合金电渣堆焊研究[C]. 南京:第五届全国压力容器学术会议, 2001. 337-342.

[3] 路文江,中尾嘉邦,筱崎贤二. 镍基合金焊接热影响区的液化裂纹敏感性[J]. 焊接学报,1993,14(3):186-193.

作者简介: 刘鸣宇,1983年出生,硕士研究生。目前为核岛主设备监造工程师。

## 核电焊接用奥氏体不锈钢组织中铁素体相的作用和定量

环境保护部核与辐射安全中心(北京市 100082) 孙海涛

**摘要** 一定比例的铁素体相存在于核电用奥氏体不锈钢组织,包括奥氏体不锈钢堆焊层、奥氏体不锈钢对接焊缝、铸造奥氏体不锈钢等。其中铁素体相的形态和含量对奥氏体不锈钢组织的性能有一定的影响,因此分析其影响机理和确定其比例限值是控制奥氏体不锈钢产品质量所必须的。

**关键词:** 奥氏体不锈钢 铁素体相 铁素体含量  $\sigma$ 相 热裂纹

**中图分类号:** TG457.11

### 1 奥氏体不锈钢与铁素体相

奥氏体相是碳溶于 $\alpha$ -Fe中所形成的面心立方晶格间隙固溶体,其塑性很好,强度较低,具有一定韧性。铁素体相是碳溶于 $\alpha$ -Fe的体心立方晶格间隙固溶体,相对于奥氏体相,铁素体相强度较高,塑韧性较低。奥氏体不锈钢是指在常温下具有稳定奥氏体相的不锈钢,主要含Cr, Ni, C元素。

奥氏体不锈钢具有高韧性和塑性、较好的耐腐蚀性能和加工性能,因此在核电站设备与部件中得到大量的使用。但因其对晶间腐蚀及应力腐蚀比较敏感,且强度较低,故在核电使用中需要通过适当添加合金元素(如Ti, Nb)及控制其加工工艺来改善其使用性能。

如果奥氏体不锈钢中各种合金元素成分控制合适,且经过固溶热处理,基本上可以获得单一的奥氏体相。但实际产品中,由于铁素体相稳定化元素(如Cr)

的作用,或奥氏体相形成元素(如Ni)的含量不够高,同时受加工工艺的影响,则常温下主要是奥氏体相,另一小部分则是铁素体相,即在奥氏体不锈钢组织中仍会存在一定数量的铁素体相。铁素体相的含量主要取决于奥氏体不锈钢的化学成分,特别是Cr, Ni当量的影响,同时氮(N)也是奥氏体不锈钢组织铁素体含量的重要影响元素。图1是沿奥氏体晶界分布的铁素体相金相照片。

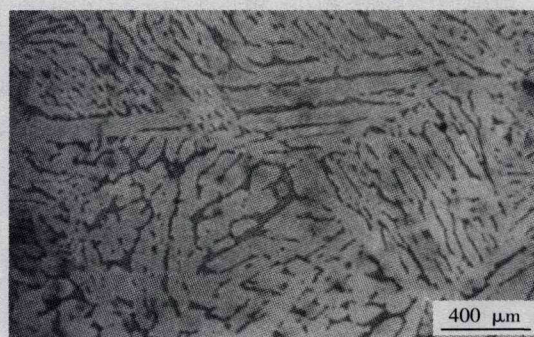


图1 沿奥氏体晶界分布的铁素体相形态