

目 录

不銹鋼的焊接	1
316 及 316L 不銹鋼焊縫腐蝕及其有關問題	32
影响 18-8 鉻鎳鋼焊縫金屬腐蝕的時間-溫度參數	40
1X18H9T 鋼焊接時焊縫金屬的增碳	46
碳對 1X18H9T 鋼焊縫金屬晶間腐蝕的影响	50
X18H9T 不銹鋼焊縫的晶間腐蝕	55
1X18H9T 鋼 T 形對接焊縫的晶間腐蝕	58
氮對 18-8 型鋼焊縫耐腐蝕性能的影响	61
X28AH 鋼焊接接頭近縫區金屬晶間腐蝕試驗	63
奧氏體不銹鋼應力腐蝕的研究	67
奧氏體鋼焊縫中預防熱裂縫的某些冶金方法	72
鉻鎳奧氏體鋼焊著金屬中錳對硫的影响	75
合金元素對 350~650°C 長期加熱 1X18H9T 鋼焊接接頭耐腐蝕性的影响	82
合金元素對 350~650°C 長期工作的 18-8 鋼焊接接頭機械性能的影响	87
25-20 奧氏體鋼焊縫金屬化學成分對 $\gamma \rightarrow \sigma$ 轉變的影响	92
25-20 奧氏體鋼焊縫脆化的預防	98
1X18H9T 鋼在 Φ HK 陶質熔劑層下的自動焊	101
1X18H9T 厚鋼板的熔劑層下自動焊	105
1X18H9T 鋼制化工容器的自動焊	110
化工容器設備雙層鋼板焊接	114
關於雙層不銹鋼焊接接頭消除應力方法的研究	119
原子反應堆用不銹鋼的焊接	135
高溫蒸汽導管用奧氏體不銹鋼	142
0X21H6M2T 耐腐蝕鐵素體-奧氏體鋼的電弧焊接	151
不銹鋼及高溫合金半自動保護氣體鎢極電弧點焊	157
18-8 鉻鎳不銹鋼電阻點焊的條件	167
18-8 鋼焊接用電焊條的規格統一化	179

不 锈 钢 的 焊 接

鈴木 春 義

前 言

随着不锈鋼需要的增加，有关不锈鋼的焊接問題也就更为重要。在各种用途中，不锈鋼的耐腐蝕性能得到特別重視，同时，在高温、高压及低温中的使用面也很广，所以在生产中采用焊接的必要性就很大。

在不锈鋼的焊接方面要研究各种材料的焊接性能。同时要探討焊接法、施工法、焊缝部分的缺陷、机械性能、耐腐蝕性、耐热性以及低温性能等等。

本文仅着重指出某些不锈鋼焊接基本的重要之点。

种 类

1. 概論

最近由于不锈鋼应用的飞速增加，焊接技术就成为重要問題。不锈鋼的种类比碳素鋼多得多，所以焊接問題也非常复杂。以往不锈鋼在焊接后发生过許多损坏事故，其原因是：材料选择的錯誤以及焊条和施工法选定的不妥等等。

材料在焊接时的特性，特别是其变质等知識是很需要的；此外，焊条选定及施工法等一系列应有常識也是非常重要的。

目前，不锈鋼約有四十余种，在日本应用的不锈鋼規格有 JISG 430/(SUS)和 JISG 4302(SEH)，还

有在 1959 年修正的 JISG 4303~4309。美国鋼鉄协会(AISI)的規格范围比它更广。因此，本文将用 AISI 規格來說明。

不锈鋼按照 900~1,100°C 高温淬火(急冷)处理后的反应和微觀組織可以分为三大类：即淬火后硬化的馬氏体系和淬火后不硬化的鉄素体系及奧氏体系。它們的区別列于表 1。

2. 馬氏体系不锈鋼

馬氏体系不锈鋼具有淬硬性，在淬火后回火状态下可以得到最好的耐腐蝕性。这种鋼可以在水、大气及含有某种药品的輕度腐蝕条件下使用。且特別适用于要求有高强度、高硬度、高耐磨性以及高耐腐蝕性能等場合。

馬氏体系不锈鋼的种类列于表 2。

3. 鉄素体系不锈鋼

鉄素体系不锈鋼含有多量的鉻(16% 以上)，具有經過淬火也不会硬化的性质。鉄素体系不锈鋼的耐腐蝕性与耐热性均較奧氏体系不锈鋼为差，但由于价格較低，性能較高，因而得到广泛的应用。其种类列于表 3，但是在高鉻鋼中，特别是含鉻量在 18% 以上的鋼在常温时的冲击韧性是极低的。在焊接厚板时由于焊缝部分接近室温就特別容易脆化且有开裂的缺点。表 3 中 AISI40512Cr-Al 鋼是在添加少量鋁后能防止淬火硬化(防止脆化)的鉄素体系不锈鋼。普通 12Cr 鋼焊接前如不将基体預热会使焊缝部分易于开裂，而 12Cr-Al 鋼則有不經預热也无开裂的优点，因此可用于操作时預热有困难の場合。

表 1 不锈鋼的分类

分 类	大概成份(%)			淬 火 性	耐 腐 蝕 性	加 工 性	可 焊 性	磁 性
	Cr	Ni	C					
馬氏体系	11~15	—	1.20 以下	自 硬 性	可	可	不可	有
鉄素体系	16~27	—	0.35 以下	无	佳	尙佳	尙可	有
奧氏体系	16 以上	7 以上	0.25 以下	无	优	优	优	无

表2 馬氏体系不銹鋼及其塗料焊條的標準

鋼種名稱	AISI	JIS	化學成份①(%)			適當的焊條②	預熱及焊道③間溫度(°C)	焊後熱處理④ 在705~790°C 保溫每吋厚度 一小時
	規格	規格	C	Cr	其 他	AWS 規格		
12Cr	403	SUS 22	0.15 以下	11.5~13.0	汽輪機用 Si 0.50 以下	E 410	315~370	
12Cr	410	SUS 21	0.15 以下	11.5~13.5		E 310, E 309 (E 308) E 410	205~315 (大力推薦) 315~370	推 荐⑤ 大力推薦
改 12Cr	410	SUS 21	0.08 以下	11.5~13.5		E 310, E 309 E 410	150~260 (大力推薦) 150~260	推 荐 大力推薦
12Cr-2Ni	414		0.15 以下	11.5~13.5	Ni 1.25~2.50	E 309, E 310 E 410	205~315 315~370	大力推薦⑥ 大力推薦
12Cr-FM	416		0.15 以下	12.0~14.0	P, S, Se 0.07 以下 Zr, Mo 0.60 以下	E 430, E 410 E 309, E 308	315~370 205~315	大力推薦⑦ 推 荐⑦
13Cr	420	SUS 23	0.15 以下	12.0~14.0		E 310, E 309 E 410, E 430	205~315 315~370	推薦大力 推 荐
16Cr-2Ni	431	SUS 44	0.20 以下	15.0~17.0	Ni 1.25~2.50	E 310, E 309 E 430	205~315 315~370	推 荐 大力推薦
17Cr-C	440-A		0.06~0.75	16.0~18.0	Mo 0.75 以下	E 430, E 442	315~370	絕對必要⑧
	440-B		0.75~0.95	16.0~18.0	Mo 0.75 以下	E 430, E 442	315~370	絕對必要
	440-C		0.95~1.20	16.0~18.0	Mo 0.75 以下	E 430, E 442	315~370	絕對必要
12Cr	ACI規格⑨		0.15 以下	11.5~14.0	Mn, Ni 1.0 以下	E 310, E 309	205~315	推 荐
	CA-15				Si 1.5 以下	E 430	(大力推薦) 315~370	大力推薦
13Cr	ACI 規格		0.20~0.40	11.5~14.0	Mn, Ni 1.0 以下	E 310, E 309	205~315	推 荐
	CA-40				Si 1.5 以下	E 430, E 410	315~370	大力推薦

注：① 除特別注出外 Mn 及 Si 均為 1.0% 以下，P 均為 0.04 以下，S 均為 0.03% 以下；

② 焊條的特性參照表 10 及 12；

③ 薄板(厚度約 3 毫米以下)因熱影響區冷卻較緩，故預熱可以省去；

④ 焊接後立即進行熱處理，然後在空氣中冷卻。厚度約 3 毫米以下的薄板可以省去焊後熱處理；

⑤ 不能進行預熱的場合，採用小直徑焊條；

⑥ 薄板焊後熱處理可以省去；

⑦ 高速鋼是不能推薦焊接的；

⑧ 此鋼焊接時易於開裂，也並不適於焊接。但在不得已非焊接不可時，必須施行預熱及焊後熱處理；

⑨ 鑄件規格

表3 铁素体系不锈钢及其涂料焊条的标准

钢种名称	AISI	JIS	化学成分①(%)			适当的焊条② AWS 规格	预热及焊接 部分③温度 (°C)	焊后热处理④ 在705~790°C 保温每一吋厚 度一小时
	规格	规格	C	Cr	其他			
12Cr-A1	405	SUS 38	0.08 以下	11.5~13.5	Al 0.10~0.30	E 430 E 310, E 309 (E 308)	不 必 要 不 必 要	大力推荐 推 荐
12Cr-4A1	406		0.15 以下	12.0~14.0	Al 3.50~4.50	E 310		⑤
16Cr	430	SUS 24	0.12 以下	14.0~18.0		E 430 E 310, E 309 (E 308)	不 必 要 不 必 要	大力推荐 推 荐
16Cr-FM	430-F		0.12 以下	14.0~18.0	P, S, Se 0.07 以上 Zr, Mo 0.60 以下	E 430 E 309, E 308		推 荐⑥ 推 荐⑥
18Cr	442		0.35 以下	18.0~23.0		E 442, E 446 E 309, E 310 (E 308)	不必要, 但 普通在150~ 205°C的预 热推荐	必须焊后 热处理 大力推荐
27Cr	446		0.35 以下	23.0~27.0	N ₂ 0.25 以下	E 446 E 310, E 309 (E 308)	150~205°C 不 必 要	必须焊后 热处理 不必要⑦
20Cr	ACI⑤规格 CB-30		0.30 以下	18.0~22.0	Ni 2.0 以下	E 442 E 309, E 310 (E 308)	不必要, 但 普通在150~ 205°C的预 热推荐	必须焊后 热处理 大力推荐
27Cr	CC-50		0.50 以下	26.0~30.0	Ni 4.0 以下	E 446 E 309, E 310 (E 308)	150~205°C 不 必 要	必须焊后 热处理 不必要⑦
27Cr	HC		0.50 以下	26.0~30.0	Si 2.0 以下 Ni 4.0 以下	E 446 E 309, E 310 (E 308)	150~205°C 不 必 要	必须焊后 热处理 不必要⑦

- 注: ① 除特别注出外 Mn 及 Si 均为 1.0% 以下, P 均为 0.04 以下, S 均为 0.03 以下;
 ② 焊条的特性参照表 10 及 12;
 ③ 18Cr 以上在常温时因冲击韧性极低, 故需预热;
 ④ 改善热影响区的脆化;
 ⑤ 不推荐焊接, 在有必要作修补焊接时可使用 E 310 型小直径焊条及采用小电流;
 ⑥ 不推荐焊接;
 ⑦ 最理想的就需要焊后热处理;
 ⑧ 铸件规格

含铬量在 13% 以下的铁-铬合金系在高温时会
 出现奥氏体区域, 但如含铬量高于此数就成为铁素
 体组织。含碳量在 0.10% 以下, 含铬量在 17.0~
 18.0% 以上的钢是铁素体组织钢。铁素体系铬钢因
 在热处理时并不出现相变, 其微观组织不能变细, 所
 以过热后的粗晶脆化组织除通过机械塑性加工使其
 再结晶外, 别无他法加以改善。还有含铬量 20~
 70% 高铬钢的铁素体在冷却过程中会析出 σ 相。众

所周知, σ 相是极脆的, 它会损坏不锈钢的高温性
 能。

4. 奥氏体系不锈钢

在一般不锈钢零件制造中奥氏体系不锈钢是最
 重要的钢种, 比其他系列不锈钢具有最优良的耐腐
 蚀性、耐热性及延性, 且有更优越的可焊性。其主要
 种类(是轧材而铸造材料从略)列于表 4。钢的大部分
 是以 18Cr-8Ni 合金钢为基础并添加 Cr、Ni、

表4 奥氏体系不锈钢及其涂料焊条的标准

钢种的① 名称	AISI 规格	JIS 规格	化 学 成 分②(%)				适当的焊条③ AWS 规格	预 热④ 及后热⑤
			C	Cr	Ni	其 他		
17-7	301	SUS39	0.08~0.20	16.0~18.0	6.0~8.0	—	E 308	
18-8	302	SUS40	0.08~0.20	17.0~19.0	8.0~10.0	—	E 308	
18-8 Si	302 B		0.08~0.20	17.0~19.0	8.0~10.0	Si 2.0~3.0	E 308, E 309	
18-8 FM	303		0.15 以下	17.0~19.0	8.0~10.0	Rs, Se 0.07 以上 Zr, Mo 0.60 以下	E 312, E 308⑥	
19-9 LC	304	SUS27	0.08 以下	18.0~20.0	8.0~11.0		E 308	
19-9 ELC	304 L	SUS28	0.03 以下	18.0~20.0	8.0~11.0		E 308 L, E 347	
18-10	305		0.12 以下	17.0~19.0	10.0~13.0		E 308	
20-10	308		0.08 以下	19.0~21.0	10.0~12.0		E 308	
24-12	309		0.20 以下	22.0~24.0	12.0~15.0		E 309	
24-12 LC	309 S	SUS41	0.08 以下	22.0~24.0	12.0~15.0		E 309	
24-12 Cb	309 Cb		0.20 以下	22.0~24.0	12.0~15.0	Cb 10×C 以上	E 309 Cb	
25-20	310	SEH5	0.25 以下	24.0~26.0	19.0~22.0	—	E 310	
25-20 LC	310 S	SUS42	0.08 以下	24.0~26.0	19.0~22.0	—	E 310	
25-20 Cb	310 Cb		0.25 以下	24.0~26.0	19.0~22.0	Cb 10×C 以上	E 310 Cb	
25-20 Mo	310 Mo		0.25 以下	24.0~26.0	19.0~22.0	Mo 2.0~3.0	E 310 Mo	
25-20 Si	314		0.25 以下	23.0~26.0	19.0~22.0	Si 1.5~3.0	—	
18-12 Mo	316	SUS32	0.10 以下	16.0~18.0	10.0~14.0	Mo 2.0~3.0	E 316, E 310 Mo⑦	
18-12 Mo ELC	316 L	SUS33	0.03 以下	16.0~18.0	10.0~14.0	Mo 2.0~3.0	E 316 L, E 318, E 310 Mo⑦	
19-13 Mo	317		0.10 以下	18.0~20.0	11.0~14.0	Mo 3.0~4.0	E 317, E 310 Mo⑦	
18-12 Mo Cb	318		0.10 以下	18.0~20.0	11.0~14.0	Mo 2.0~3.0 Cb 10×C 以上	E 318, E 310 Mo⑦	
18-10 Ti	321	SUS29	0.08 以下	17.0~19.0	8.0~11.0	Ti 5×C 以上	E 347⑧	
18-10 Cb-Ta	347	SUS43	0.08 以下	17.0~19.0	9.0~12.0	Cb+Ta 10×C 以上	E 347	
18-10 Cb	348		0.08 以下	17.0~19.0	9.0~12.0	Cb 10×C 以上 Ta 0.1 以下	E 348	

注：① 17-7、18-10、19-9、19-12 等往往被统称为 18-8；

② 除特别注出外 Mn 均为 2.0% 以下，Si 均为 1.0% 以下，P 均为 0.04% 以下，S 均为 0.03% 以下；

③ 焊条的特性参照表 10 及 12，JISZ 3221 是用 D 代 E 来表示；

④ 原则上不进行预热；

⑤ 有关焊后热处理问题可参阅本文；

⑥ E 308 以用碱性涂料为宜。高速钢的焊缝金属易产生高温开裂，但 E 312 (29Cr-9Ni) 焊着金属含有多量的 δ 铁素体，故能防止高温开裂；

⑦ E 316、E 316 L、E 318、E 317 等焊接状态焊着金属的耐腐蚀性往往较差，特别在高温氧化性酸类中更易腐蚀。此时在使用 C 0.12% 以下的 E 310 Mo 时其焊着金属具有良好的耐腐蚀性。如不能使用 E 310 Mo 时，进行如下热处理以提高其耐腐蚀性：1) 基体金属为 316、317 时，可用 1,065~1,120°C 完全固溶体化的水淬火处理；2) 基体金属为 316、317 L 时可用 870~880°C 消除应力的退火处理；3) 基体金属为 318 时可用 870~900°C 的稳定化处理；

⑧ 虽然制造出加 Ti 的涂料焊条，但在电弧中 Ti 仍被烧损，故并不实用。相反加 Cb 的 E 347 却可以使用（但在采用惰性气体保护电焊法时，因 Ti 的烧损少，所以加 Ti 的焊条也是实用的）

表5 其他种类的不锈钢或铬钢及其焊接标准

钢种名称	AISI规格	其他名称	化学成分① (%)							适当的焊条AWS	预热及焊接部分温度(°C)	焊后热处理(°C)	备注
			C	Mn	Si	Cr	Ni	其他					
5Cr	501		0.10 以下	1.0 以下	1.0 以下	4.0~6.0	—	—	同种金属或 E 310 E 309	250~300	即于 700~760°C ×2 小时/每一时	马氏体系	
	502		0.10 以下	1.0 以下	4.0~6.0	—	—						
	A 213-T5		0.15 以下	0.6 以下	0.5~1.0	4.0~6.0	Mn 0.45~0.65						
7Cr	A 213-T7		0.15 以下	0.6 以下	0.5~1.0	6.0~8.0	Mo 0.45~0.65		E 310 E 309	约 150			
	A 213-T9		0.15 以下	0.6 以下	1.0 以下	8.0~10.0	Mo 0.9~1.1						
Cr-Ni-Mn		201	0.15 以下	5.5~7.5	1.0 以下	16.0~18.0	3.5~5.5	N 0.25 以下	E 308 E 309 E 347 E 316	不要	不要	奥氏体系 (薄板)	
		202	0.15 以下	7.5~10.0	1.0 以下	17.0~19.0	4.0~6.0	N 0.25 以下					
17-4PH		代表成份	0.04	0.60	0.40	17.0	4.0	Cu 4.0 Cb 0.3	同种金属②	不要	推荐③与基体金属同样的热处理	马氏体系	
		AMS规格	0.07 以下	1.0 以下	1.0 以下	15.5~17.5	3.0~5.0	Cu 3.0~5.0 Cb+Ta 0.15-0.45					
17-7PH		代表成份	0.07	0.60	0.40	17.0	7.0	Al 1.2	17-4 PH 涂焊接焊条	不要	推荐④与基体金属同样的热处理	马氏体系	
		AMS规格	0.09 以下	1.0 以下	1.0 以下	16.0~18.0	6.5~7.75	Al 0.75~1.5					

注: ① P 在 0.04 以下, S 在 0.03 以下;
 ② 17-4 PH 在马氏体中含有少量的铁素体, 作为棒材、型材、铸件与 304 型具有同样的可焊性;
 ③ 17-4 PH, 1,098°C 水淬火, 482~593°C 回火析出硬化物;
 ④ 17-7 PH, 1,066°C 水淬火, 760°C 相变, 566~593°C 回火析出硬化

表6 不銹鋼的物理性能

AISI 型	磁性 (常溫)	彈性模數 (公斤/毫米 ²)	密度 (克/厘米 ³)	比電阻 (20°C) ($\mu\Omega\text{-cm}$)	比熱 (0~100°C) (卡/克 °C)	導熱系數 (100°C) (卡/厘米 秒 °C)	線膨脹系數 (1/°C) × 10 ⁻⁶		溶解溫度 範圍 (°C)	在大氣中能耐氧化的溫度 (°C)
							0~100°C	0~1,000°C		
302	非	19,700	7.93	72	0.12	0.250	17.3	20.1	1,400~1,421	850
304	非	19,700	7.93	72	0.12	0.050	17.3	20.1	1,400~1,454	850
308	非	19,700	7.93	72	0.12	0.047	17.3	20.1	1,400~1,421	850
310	非	21,100	7.98	78	0.12	0.039	14.4	19.1	1,400~1,454	1,100
316	非	19,700	7.98	74	0.12	0.050	16.0	20.0	1,370~1,400	900
321	非	19,700	8.02	72	0.12	0.052	16.7	20.1	1,400~1,427	900
347	非	19,700	8.02	73	0.12	0.052	16.7	20.0	1,400~1,427	900
410	有	20,400	7.75	57	0.11	0.059	11.0	13.7	1,482~1,532	680
430	有	20,400	7.70	60	0.11	0.062	10.4	13.1	1,482~1,510	840
軟鋼	有	21,000	7.86	17	0.12	0.144	11.7	(0~600°C) 14.8	1,492~1,520	550

Mo、Nb(Cb)、Ti 等元素而成。特別是 347 型 (18-10 Cb 或 18-8 Cb)，通常用來製造焊條芯，因添加 Cb 后高溫強度比較優越。但用於原子能容器時，因 Ta 能帶激發放射能，使用 347 型很是危險，因此最近已將 Ta 量加以限制，故在表 4 中有新型 AISI 348 型的規定。

5. 其他不銹鋼

其他不銹鋼和類似不銹鋼的鋼種列於表 5。含 4~6% Cr 的鉻鋼具有很優越的高溫強度。含 5~9% Cr-0.45~1.10% Mo 的鉻鉬鋼具有更優越的高溫強度且沒有回火脆性。為了節約不銹鋼中的鎳有加入百分之幾錳的鉻鎳錳鋼。還有製造導彈、超音速飛機用的析出硬化型的超高強度 17-4 PH、17-7 PH 等不銹鋼。

不銹鋼的性質

1. 物理性能

不銹鋼與結構碳素鋼有着不同的物理性能，即使是可焊性也直接間接都會對它發生很大影響。如表 6 所示，不銹鋼與軟鋼有同等程度的彈性模數、密度及比熱，其熔點則稍低，其導熱系數則非常小，約為軟鋼的三分之一。加以奧氏體系鋼的熱膨脹系數約比軟鋼高 50%，而馬氏體系及鐵素體系鋼則與軟鋼接近。所以焊接時的冷卻速度，要比軟鋼緩慢得多。奧氏體系鋼焊接時，其變形撓度比軟鋼易于增大。如不同質不銹鋼相互焊接時，或者以奧氏體焊條堆焊碳素鋼時，由於基體金屬與焊縫金屬熱膨脹系數不同引起熱應力，易使焊縫破壞。關於此點將

在以後詳述。

2. 機械性能

不銹鋼的機械性能示於表 7，由於熱處理軟化狀態，其抗拉強度為 50~70 公斤/毫米²，比碳鋼 (41~49 公斤/毫米²) 要強得多。但象碳素鋼的屈服點，一般在不銹鋼上是不明顯的，所以用產生 0.2% 永久變形作為屈服強度 (持久強度)。圖 1 表示不銹鋼在高溫時的抗拉強度。還有合金鋼約在 450°C 以上高溫長期使用的蠕變強度有着重要的意義。圖 2 為主要不銹鋼在淬火 (固溶體化處理) 狀態下蠕變強

表7 不銹鋼的公稱機械性能(常溫)
(軋材熱處理后)

AISI 型	抗拉強度 (公斤/毫米 ²)	0.2% 屈服強度 (公斤/毫米 ²)	延伸率 (2吋) (%)
302	63	25	60
304	(54)* 60	(26) 21	(55) 60
304 L	53	20	50
308	60	21	55
310	67	32	50
316	(56)* 60	(30) 25	(50) 55
316 L	53	22	50
321	60	21	55
347	(54)* 63	(27) 25	(39) 50
410	49	25	30
430	53	28	30
17-4PH**	140	120	12

注：* 括號內為鑄件淬火后；

** 熱處理：1,038°C 水淬，482°C 析出硬化

度对試驗温度的影响(在10,000小时后产生1%蠕变的应力)。表8所示是10,000小时×1%及100,000小时(11.43年)×1%的蠕变强度。(ASME規定)。

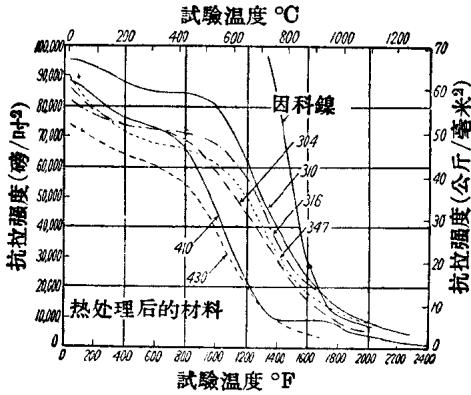


图1 不銹鋼軋材热处理后的高温强度

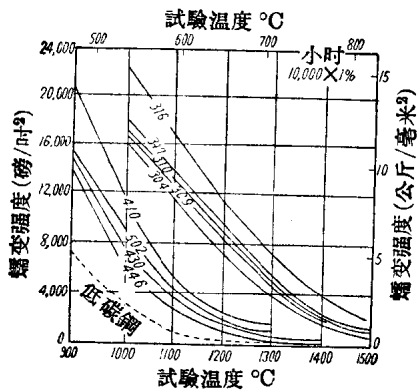


图2 不銹鋼軋材热处理后的蠕变强度 (10,000小时×1%)

3. 脆化

不銹鋼是延性較好的材料,但具有因冷加工、加热及腐蚀容易产生脆化的缺点,特别是因加热而引起的脆化。475°C脆化,碳化物的晶間析出,σ相或Chi相的析出等均为因加热而引起脆化的主要原因。

冷加工 不銹鋼冷加工后有显著加工硬化,反而使延性降低。同时奥氏体鋼在冷加工时奥氏体的一部分相变为铁素体,所以冷加工后的奥氏体鋼在高温使用中会促使σ相的形成而很快脆化。

475°C脆化 高銹鋼(Cr>16%)在400~600°C范围内长时间加热或缓慢冷却就会显著脆化。在475°C左右时脆化会快速进行,因此这种脆化称为475°C脆化。其原因尚未明确,但已經脆化(475°C脆化)的銹鋼在温度600°C以上短时间加热后再空冷即能恢复其延性。同时高銹鋼加热到温度900°C以上会使晶粒粗大在室温时就变得更脆。所以在焊接时,貼近焊着金质的基体金属,因焊接热影响使晶粒粗大易于形成开裂现象。

σ相 除奥氏体系析出碳化物和铁素体系475°C碳化外,还有σ相脆化。这种脆化现象是类似不銹鋼在高温中长时间加热时产生的,因此使不銹鋼型耐热鋼的延性和韧性受到显著损害。σ相Fe-Cr化合物是极硬而极脆的。已經形成的σ相在930~980°C加热后急冷就可以消失。

4. 耐腐蝕性

不銹鋼的特点是具有优良的耐腐蝕性。表面如与水分或液体介质接触就会被腐蚀形成很薄的致密而坚固的氧化膜。此膜能保护鋼以防止腐蚀。所以对强氧化性的硝酸能够很好的耐腐蝕。但是对弱氧化性的硫酸及盐酸等却不能耐腐蝕,原因在于不能

表8 不銹鋼的蠕变强度(軋材热处理后)

AISI 型	1,000°F (538°C)		1,100°F (593°C)		1,200°F (649°C)		1,300°F (704°C)		1,500°F (816°C)	
	100,000小时×1% (公斤/毫米²)	10,000小时×1% (公斤/毫米²)	100,000小时×1% (公斤/毫米²)	10,000小时×1% (公斤/毫米²)	100,000小时×1% (公斤/毫米²)	10,000小时×1% (公斤/毫米²)	100,000小时×1% (公斤/毫米²)	10,000小时×1% (公斤/毫米²)	100,000小时×1% (公斤/毫米²)	10,000小时×1% (公斤/毫米²)
304	—	12.0	5.3	—	3.2	4.9	1.7	2.8	0.5	0.7
309	—	11.2	4.6	—	2.7	5.6	1.6	3.2	0.5	0.7
310	—	12.0	6.0	9.1	4.2	6.3	2.5	3.5	0.5	0.7
316	—	17.6	7.3	12.8	4.8	8.9	2.8	5.6	1.1	2.0
321	—	12.7	—	9.1	3.5	5.6	1.9	3.2	0.7	0.6
347	—	13.4	—	9.8	3.5	5.8	1.9	3.2	0.7	1.1
410	—	6.5	2.0	2.8	0.7	1.4	—	0.7	—	—
430	—	6.0	2.2	3.0	1.2	1.5	—	0.9	—	—

发挥上述氧化膜的保护作用。

由于不锈钢的腐蚀介质种类及腐蚀条件等不同,在各种应用中必须对钢种作适当的选择。

不锈钢腐蚀中,应特别注意奥氏体体系的晶间腐蚀及应力腐蚀。

晶间腐蚀 为取得奥氏体体系不锈钢(300型)最好的延性和耐腐蚀性,可将其在 $1,040^{\circ}\text{C}$ 以上高温中加热使碳化物全部固溶在奥氏体中后加以急冷(水淬火)。但此种淬火后的不锈钢如在 $480\sim 820^{\circ}\text{C}$ 温度范围中长时间保温或缓冷,就会形成显著的腐蚀如图3所示。原因在于固溶在奥氏体中的碳再一次形成了碳化铬,晶粒边界呈网状连续析出的结果示于图4b,晶界两侧如图3所示形成贫铬层降低了这一部分的耐腐蚀性,就引起所谓晶间腐蚀。

同时碳化物晶间析出后,由于析出物与奥氏体间的电解腐蚀作用促进了晶间腐蚀。图5是产生晶间腐蚀后18-8不锈钢的微观组织,此状态在受到荷

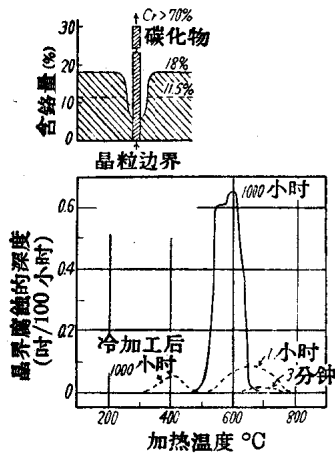


图3 经 $1,050^{\circ}\text{C}$ 固溶体化处理后含 0.08% C的18-8不锈钢加热到 $480\sim 820^{\circ}\text{C}$ 时产生的晶间腐蚀

18-8(0.08% C)不锈钢在 $1,050^{\circ}\text{C}$ 固溶体化处理后的试样; Strauss 试剂(修改) 47毫升 H_2SO_4 , 13克 CuSO_4 , $5\text{H}_2\text{O}$ 加水到1,000毫升(沸腾液)

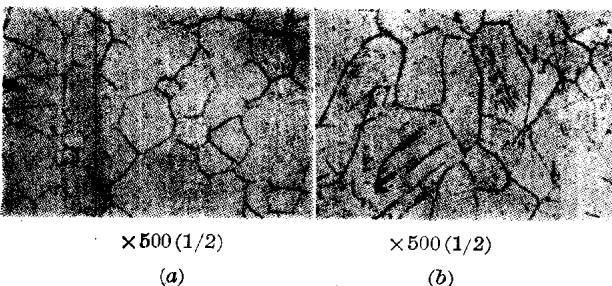


图4 18-8不锈钢的微观组织

a— $1,050^{\circ}\text{C}$ 水淬后(晶界没有碳化物析出); b— $1,050^{\circ}\text{C}$ 水淬后再加热到 $650^{\circ}\text{C}\times 2$ 小时空冷(晶间有碳化物析出)

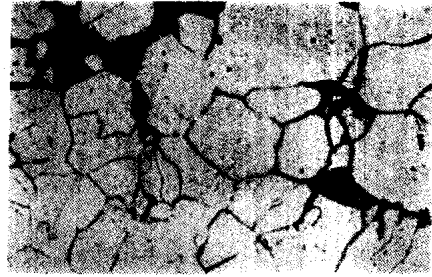


图5 产生晶间腐蚀后18-8不锈钢的微观组织

重后就会沿晶界断裂。受焊接热影响的部分也会引起碳化物的晶间析出,即所谓腐蚀介质中引起的焊缝腐蚀(Weld decay)。

可是,在腐蚀性不太强的气氛中,即使引起了碳化物的晶间析出,不锈钢的延性及韧性降低得较微。在引起碳化物晶间析出的温度范围中进行加热,称之为敏化处理(Sensitization)。

碳化物的晶间析出以18Cr-SNi钢为最显著,但在增加含铬量及添加钼后可以略为减轻(例如25-20及18-12Mo)。防止、缓和或消除碳化物晶间析出的方法如下:

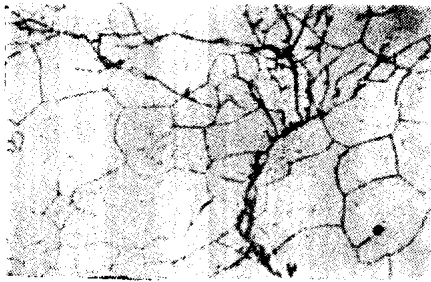
- (1) 降低含碳量(C在 0.03% 以下;如使用条件缓和时则含碳量可在 0.06% 以下)。
- (2) 添加特殊元素使不锈钢中的碳化物稳定(添加Cb、Ta、Ti等元素以防止碳化铬的形成)。
- (3) 添加铁素体形成的元素(Mo、Si、V等)。
- (4) 在固溶体化处理温度($1,040\sim 1,120^{\circ}\text{C}$)进行水淬火(消除析出的碳化物)。
- (5) 非敏化热处理(在 $820\sim 850^{\circ}\text{C}$ 加热后使析出的碳化物凝集使铬扩散并使网状析出物碎断)。

其中(5)的效果是不完全的,但对减轻晶间腐蚀有较好的作用。奥氏体体系不锈钢要在腐蚀性气氛中在碳化物析出温度范围内($480\sim 820^{\circ}\text{C}$)使用时必须选定如下钢种以防止碳化物的晶间析出:

- (1) 碳素极低的($\text{C}<0.03\%$) 304L型、316L型、310L型等。
- (2) 加入Cb+Ta的347型、加入Cb的348型、加入Ti的321型。

应力腐蚀 在某种介质中奥氏体体系不锈钢在应力状态下特别容易腐蚀,称为应力腐蚀。不锈钢在冷加工及焊接后有残余拉应力或因外界荷重受到拉应力时会产生应力腐蚀。图6表示由应力腐蚀所引起的裂缝现象。在应力腐蚀破坏时有三种情况,即有的沿着晶粒边界断裂,有的通过晶粒内部断裂,还有是二者俱有,但多

数为通过晶粒的内部断裂。其原因尚不明确，但一般说来，在含有钠、氯等腐蚀性气氛中受到某种数值以上的应力时就容易产生应力腐蚀。应力腐蚀试验是以 154°C、42% MgCl₂ 沸騰溶液中的浸漬试验为较好。板状试件在一定应力的弯曲或延伸状态浸漬在溶液中直到产生开裂为止的时间(数小时至数百小时)作为试验的比较数据。试验结果证实，奥氏体系中 304 型及 302 型易于产生应力腐蚀破坏，316 型(18-8 Mo)及 347 型(18-8 Cb)略有抵抗力，而 310 型(25-20)的抵抗力极强。含 Ni 量多的 15Cr-35Ni 或高镍合金等的抵抗力也较强。马氏体系或铁素体系的铬不锈钢，则不易产生应力腐蚀。为防止材料的应力腐蚀，将其应力值——特别是残余应力值——减小是最有效的方法。因此，在冷加工或焊接后进行退火以去除应力是很重要的。



×200(2/3)

图6 18-8 不锈钢应力腐蚀后的裂纹

可 焊 性

对不锈钢可焊性有关的焊接热影响、焊缝金属、焊接缺陷及焊接部分的脆化等，均需具备必要的知识。

1. 焊接热影响

邻近焊接金属的不锈钢基体部分，由于受到焊接热的影响，在焊接后容易引起各种脆化。其脆化程度随马氏体系、铁素体系及奥氏体系的区别而不同。

马氏体系 马氏体系受到焊接热影响的部分会象淬火硬化变为很硬的马氏体组织。特别是含碳量较多的硬化更甚，其残余应力也较大，因而在冷却后容易断裂。为减轻硬化可用表 2 所示 200~400°C 预热并保持焊道间温度，或在焊后尚未冷却前将工件加热至 700~800°C 保温后空冷就能使焊接部分获得延性。图 7 是焊后热处理温度对焊着金属软化的影响，完全软化要用 700°C 以上的焊后热处理才

能达到。此外，添加少量铝的非自硬性 13Cr 钢，例如 405 型(0.08% 以下 C、0.10~0.30% Al、11.5~13.5% Cr)具有防止硬化的有效作用。在构件焊接前后不可能加热时，使用此种非自硬化性不锈钢，就比较方便。

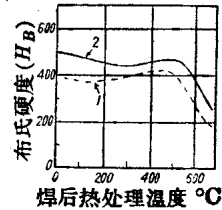


图7 焊后热处理温度对马氏体系焊着金属软化的影响

No.	C(%)	Cr(%)	马氏体(%)
1	0.10	11.5	80
2	0.25	13.0	100

铁素体系 铁素体系受到热影响的部分是不会硬化的，但是在邻近焊着金属被加热到熔点附近区域，会造成显著的粗晶，因而在常温时的延性及韧性就同时减少。同时在进行缓冷时，前述 475°C 脆化即会伴随发生。而且含铬量 16% 以上的铬钢，如图 8 所示，在常温时冲击值极小，几乎没有冲击韧性。

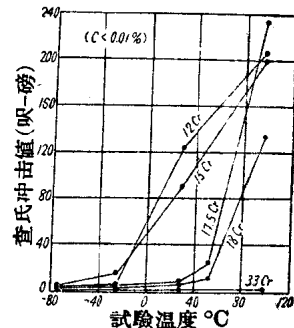
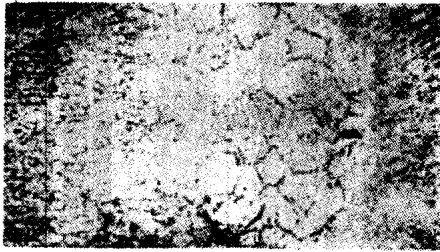


图8 铬钢的迁移曲线

如果焊接部分快冷到常温，则在常温中产生裂纹的可能性较多，因此需将基体金属稍稍预热(70~100°C)使在富有冲击韧性的温度范围中焊接，焊后缓冷到常温较好。但是，为避免 475°C 脆化，最好预热温度不超过 150°C。

奥氏体系 奥氏体系 Cr-Ni 不锈钢受焊接温度影响的变化如图 9 及图 10 所示。在邻近焊着金属已成为粗晶化，但有加热到固液体化处理温度以上的区域，在粗晶化区外侧有加热到 480~820°C 的区域，引起部分碳化物的晶间析出，在腐蚀性气氛中使用，就会产生晶间腐蚀作用。例如图 10 斜线(c)部分受到特别显著的腐蚀，即所谓焊接腐蚀。



×50(2/3)

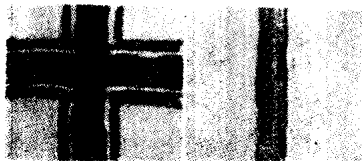
图9 20Cr-12Ni 不銹鋼的焊接断面組織
(右側为焊着金属, 中央为粗晶化部分, 左侧为未影响部分)



图10 18Cr-8Ni 鋼的焊接热影响
(粗晶化及晶間析出)

奥氏体系不銹鋼中, 热影响区碳化物的晶間析出是由 815~480°C 冷却时間超过約 1 分钟所引起, 特別在气焊时有此危險性。当然, 在有强腐蚀性气氛中使用的制件, 必需在焊接后使其急冷。为此, 奥氏体系不銹鋼在焊接时不采用預热减少焊接吸热量并使其迅速冷却是很必要的。

图11 是 304 型和含碳量极少的 304L 型不銹鋼焊接部分腐蝕比較的試驗結果。304 型焊珠的兩側, 由于热影响区被腐蝕呈黑色的带状, 而含碳量极低(C<0.03%)的 304L 型热影响区根本没有腐蝕。



(a) 焊接状态 焊接后以 1,050°C 水淬火
304 型鋼板 + D308 焊条



(b) 焊接状态 焊接后以 1,050°C 水淬火
304L 型鋼板 + D308L 型焊条

图11 304 型及 304L 型不銹鋼焊接热影响区晶間腐蝕的比較 (腐蝕液 10% HNO₃+3% HF)

但 304 型焊接后作固溶体化处理温度的淬火就沒有腐蝕。

2. 焊接裂縫

Schaeffler 組織图 不銹鋼焊着金属的机械性能及耐腐蝕性是与其化学成分和微觀組織有着密切关系的。图12 表示在焊接状态的不銹鋼焊着金属組織及化学成分(等价 Ni 及等价 Cr 量)間关系的 Schaeffler 組織图。如图中所示, 馬氏体系、鉄素体及純奥氏体系等都有引起各种脆化和裂縫的缺点。在图的中部附近表示 ER 308 型惰性气体电焊用 19-9 焊絲的焊着金属組織, 該区是比較安全的。但是用 347 型(18-10 Cb) 焊条焊接时, 焊着金属会形成純奥氏体組織, 在高温时就有容易产生裂縫的缺点。相反从图13 中可知, 在奥氏体中, 如含有 4% 以上的 δ 鉄素体时, 就会减少裂縫現象。在制订焊条規格时, 曾考虑到这些問題来規定焊条的化学成份。

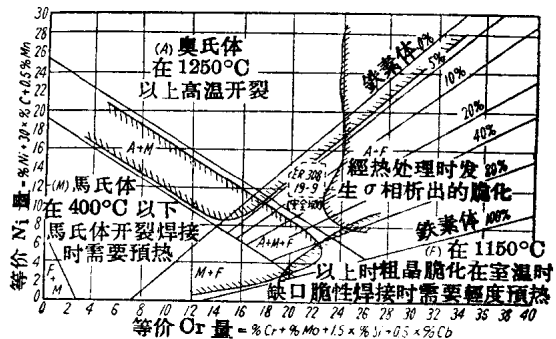


图12 不銹鋼焊着金属的 Schaeffler 組織图

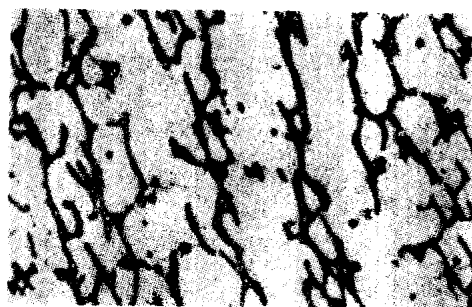


图13 347 型不銹鋼焊縫金属的 δ 鉄素体

焊着金属 Schaeffler 組織图是极重要的, 如遇到不同金属焊接时, 可以由此推測焊着金属的組織。

奥氏体系不銹鋼的热裂縫 奥氏体系不銹鋼在厚板焊接时和剛性条件下焊接时或在焊接后的热处理过程中很容易产生裂縫。为防止焊接裂縫, 做过很多研究工作。

奥氏体系不锈钢的热裂纹有许多种类如图 14 所示。沿焊珠中央的纵向大裂纹、火山口状(Crater)裂纹、星形裂纹、微观裂纹(Microfissure, Microcrack)、过渡区裂纹、焊缝根部裂纹(Root crack)等焊着金属内部的裂纹外，还有基体热影响区产生的基体裂纹和受热处理及长时间高温使用后产生的裂纹现象等。图 15 为厚 40 毫米的不锈钢焊道断面在用 25-20 焊条堆焊时焊珠中产生的高温开裂(在图的左中部)及在热处理时因热应力产生的热应力开裂(在图的左上部)。

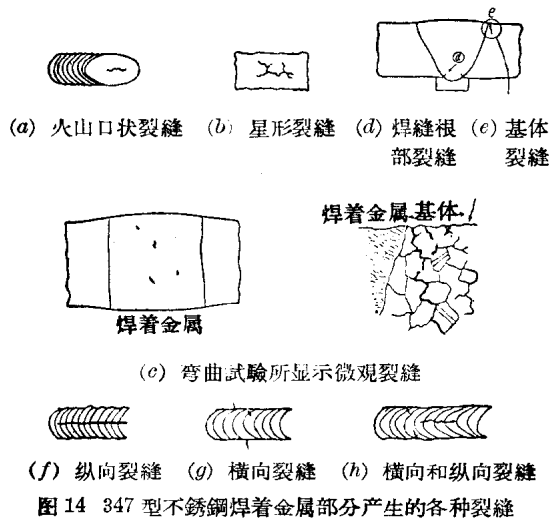


图 15 25-20 焊条堆焊时焊珠中产生的熔合线横向热裂纹及在热处理后产生的基体热应力裂纹(左上方)

影响奥氏体系不锈钢焊着金属产生裂纹的因素是：1) 组织；2) 焊丝及基体化学成分；3) 焊接工艺；4) 涂材；5) 接缝的形状；6) 刚性条件等。合金元素 Mo、Mn、C 有减少裂纹的倾向；相反，元素 Cb、Si 及 P、S 是有害的。同时，过量的 Ni 也会形成裂纹。另如，在 $C=0.07\sim 0.11\%$ 、 $Mn=1\sim 5\%$ 的范围内，美国的实验结果是：随着 C 或 Mn 的增加，裂纹会显著地减少；而在 $P=0.02\sim 0.05\%$ 、 $S=0.01\sim$

0.05% 的范围内，增加 P 和 S，会增加裂纹的现象。同时 C 在 0.1% 以上，或 C/Si 在 $0.5\sim 0.6$ 以上时，也有完全防止裂纹的现象。

虽然对开裂的原因在很注意地研究着，但其中最主要的原因是在奥氏体晶粒边界中存在着低熔点杂质的影响。因为不锈钢有宽阔的凝固温度范围，使低熔点杂质仍然保持液状而集中在晶粒边界中，这就是冷却时在收缩应力下被开口形成高温开裂的原因。实际上，西德考豪辛(Kauhausen)等已制成具有纯奥氏体组织和不开裂的焊条(19Cr-13V-5Mn)。同时美国巴科克(Babcock)公司曾以 Croloy 16Cr-8Ni-2Mo 焊条与 347 型焊条作比较后发现，前者较难开裂，已经肯定这种焊条成份是优良的而且是实用的。

对奥氏体系不锈钢的焊接裂纹问题，最近在美国也作了研究，认为在高温时的焊接裂纹与不锈钢延性的降低有密切的关系。特别是使用在火力发电蒸汽中的 347 型厚板焊接部分，除了普通的焊着金属裂纹外，如图 14(e) 所示的基体热影响区常常产生裂纹。因此美国 RPI (Ransra 工业大学) 的尼珀斯(Nippes)教授等在圆棒形试件中用特殊方法通过大电流以重演焊接热循环，并在高温过程中快速拉断以测定该材料高温延性的断面收缩率。其结果示于图 16。

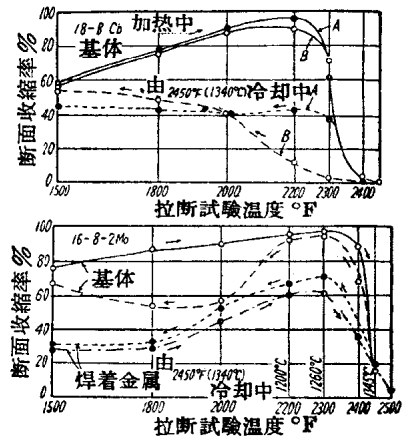


图 16 18-8Cb 基体及 16Cr-8Ni-2Mo 基体和焊着金属 RPI 高温延性的比较

即使两个同样的 347 型(18-8Cb)基体(A、B)在加热过程中其高温延性没有丝毫差别，但由 $2,450^{\circ}\text{F}(1,340^{\circ}\text{C})$ 冷却到 $2,200\sim 2,300^{\circ}\text{F}(1,200\sim 1,260^{\circ}\text{C})$ 时其延性却发生显著的差别。但同图的 16Cr-8Ni-2Mo 基体及焊着金属，则看不出由 $1,340^{\circ}\text{C}$ 冷却过程中高温延性的降低。即使 16-8-2

比 347 型有优越的高温延性, 实际上使用这种基体及焊条, 在厚件刚性焊接中几乎没有发生过裂缝。图 17 为各种奥氏体系不锈钢轧材对上述 RPI 高温延性(Hot ductility)的试验结果, 可见, 根据钢种类的不同其间有显著的差别。

RPI 焊接高温延性

试验材料	断面收缩率 (%)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
AISI 304										☒
309										☒
316										
316 CB 铸件										
*AISI 321										
347										
*16-8-2 焊条金属										
*16-8-2										
16-15N1										

注: 除 2 件试验材料外其余总称为轧材 (1,320°C 加热, 1,260°C 拉伸)

* 1,340°C 开始冷却, 若从 1,320°C 开始冷却则断面收缩率较大

图 17 各种不锈钢轧材的 RPI 高温延性比较 [2,400°F 急剧加热后在冷却过程中 2,300°F (1,260°C) 时的延性(断面收缩率)]

3. 焊条金属的 σ 相脆化

347 型焊条金属中的铁素体含量是高温使用时析出 σ 相的最大原因。如图 18 所示, 含 5~10% 铁素体的 347 型焊条金属在各种温度长时间加热后由

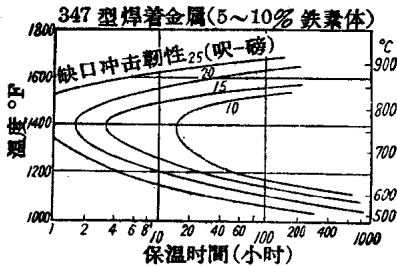


图 18 347 型焊条金属在高温加热后受 σ 相脆化的影响

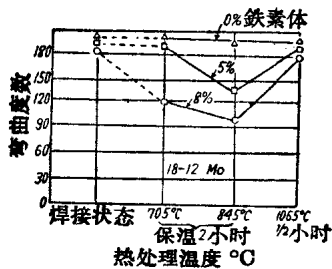


图 19 316 型焊条金属受热处理温度影响的室温延性

于 σ 相的析出降低了室温冲击值。如图 19 所示, 当铁素体含量增加时, 316 型 (18-12Mo) 焊条金属在 700~840°C 之间由于析出 σ 相会显著地脆化。

如上所述, 奥氏体钢中的铁素体含量在高温加热时很易变成 σ 相, 所以在焊后用固溶体化处理以减少铁素体含量是减轻 σ 相脆化的有效办法。美国丘伦 (Curran) 等进行各种研究后对铁素体含量约 2.5% 的 347 型不锈钢经 1,925°F (1,050°C) 固溶体化处理后可以 1,200°F (650°C) 长时间加热而不产生脆化的焊条金属成份发表如下: 0.07~0.10% C、1.50~2.50% Mn、0.5% 以下 Si、0.025% 以下 P、0.025% 以下 S、18.5~20.5% Cr、9.0~10.5% Ni、0.6~0.9% Nb、≤5% 以下 Si/C。

图 20 所示为 347 型焊条金属的铁素体含量及固溶体化温度对 σ 相脆化的影响。从 Schaeffler 组织图可知, 这些焊条金属含有 1~4% 的铁素体。而且 Si/C 的比例越小, 热裂纹现象就越难产生, 故必须将比例限制在 5 以下。同时, 采用这种焊条焊接后的厚板焊接部分需按下述方法进行焊后热处理:

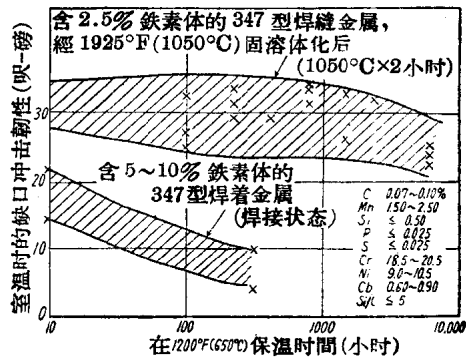


图 20 347 型焊条金属的铁素体含量及固溶体化温度对 σ 相脆化的影响 (在 1,200°F 长时间加热)

- (1) 以 300°F/小时 (167°C/小时) 的速度徐徐升温加热至 1,100°F (590°C);
- (2) 在 1,100°F 保温 2 小时 (使温度均匀化并减少残余应力);
- (3) 以 600°F/小时 (334°C/小时) 以下的速度徐徐升温, 从 1,100°F 加热到 1,925°F (1,050°C);
- (4) 在 1,925°F 保温 2 小时除去全部应力使铁素体固溶到奥氏体中时或到球状化时为止;
- (5) 接着空冷。

σ 相的析出根据不同的合金金属是有些不同的。例如图 21 是将 310、321 及 347 型基体的热影响区及焊条金属以 1,200~1,550°F (650~840°C) 的温度加热 1,500 小时以上, 使 σ 相析出后在室温

中以圓棒形試件进行缺口冲击拉伸試驗的結果。310 型比 347 型或 321 型更易脆化。但無論脆化到何種程度，用 1,065°C × 1/2 小时的固溶体化處理即能恢復其原来的冲击韌性。

焊接方法

1. 概論

目前不銹鋼的电焊方法主要是塗料焊条电焊、鎢極惰性气体电焊和金属極惰性气体电焊，按实际情况使用的是原子氬电焊、埋弧自动电焊等。还有氧炔焰气焊或气压焊等以及点焊縫焊，閃光对焊等的电阻焊接。此外鉗焊等也得到广泛采用。这些焊接方法对不銹鋼焊接的难易比較如表 9 所示。

不銹鋼焊接中的注意事項：首先要防止熔化金属的氧化，特別要防止銹氧化物〔(FeO·Cr₂O₃)熔点 1,900~2,180°C〕的形成，否則有必要加以去除。因而，在使用惰性气体、非氧化性气体或熔剂等焊接时，熔化金属必須予以保护。但电阻焊接时，由于加热時間極短就不需保护。此外，銻和碳化合后会使耐腐蝕性降低，要尽可能阻止碳的吸收。为此，在焊接前必須清除碳的来源，如熔剂中的有机物，焊接件表面的油或脂肪等，同时在气焊时還須避免乙炔焰的过剩等。

2. 塗料焊条电焊

概論 塗料焊条电焊是应用最广的不銹鋼焊接方法。电弧热量是很好集中的，所以焊接速度比气焊高而焊后变形比較少。但对厚度 1 毫米以下的薄板在塗料焊条电焊时会发生焊珠金属的脫落，故一般并不采用。

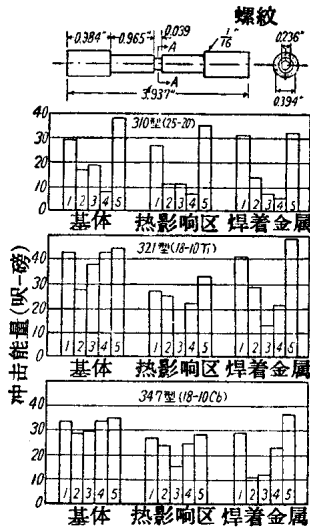


图 21 310、321、347 型基体的热影响区 (HAZ) 及焊着金属 σ 相脆化的比較

- 1—淬火: 1,850°F (1,010°C) × 1/2 小时, 炉內急冷;
 2—1,200°F (650°C) × 1,512 小时时效处理;
 3—1,350°F (730°C) × 2,120 小时时效处理;
 4—1,550°F (840°C) × 1,500 小时时效处理;
 5—1,550°F × 1,500 小时时效后作 1,950°F (1,065°C) × 1/2 小时固溶体化處理

表 9 不銹鋼焊接难易比較表

类别	焊接方法	馬氏体系	鉄素体系	奥氏体系	析出硬化系	适用鋼板厚度
		Cr 鋼	高 Cr 鋼	Cr-Ni 鋼	Cr-Ni 鋼	(毫米)
熔化焊接	塗料焊条电焊	B~C	B	A~B	A~C	t > 0.8
	鎢極惰性气体电焊	B	B	A	A~C	0.5~3.0
	金属極惰性气体电焊	B	B	A	A~C	t > 3
	埋弧自动电焊	B	B	B	B~C	t > 6
	原子氬电焊	B	B	A~B	A~C	0.3~3.0
电阻焊接	气 焊	C	C	B	B~C	t < 1.0
	点 焊	B	A	A	A~B	0.15~3.0
	縫 焊	C	B	A	A~B	0.15~3.0
鉗 焊	閃光对焊	A	A	A	A~B	0.25~1.5
	气 压 焊	C	C	B	B	t < 6
	气 压 焊	B~C	B~C	B	B~C	—

注: A: 最适宜——較易获得优良的焊縫, 已被广泛采用;
 B: 較适宜——有些困难, 但施工时稍加注意即可应用;
 C: 有困难——須特別注意, 很少应用

表 10 奥氏体系不锈钢涂料焊条规格 (JIS Z 3221-1957)

种类	焊着金属的化学成份 (%)										抗拉試驗	
	C	Or	Ni	Mo	Cu	Cb+Ta	Mn	Si	P	S	抗拉强度 (公斤/毫米 ²)	延伸率 (%)
D 308	0.08 以下	18.0~21.0	9.0~11.0	—	—	—	2.5 以下	0.9 以下	0.04 以下	0.03 以下	56	35
D 308 L	0.04 以下	18.0~21.0	9.0~12.0	—	—	—	2.5 以下	0.9 以下	0.04 以下	0.03 以下	52	35
D 309	0.15 以下	22.0~25.0	12.0~14.0	—	—	—	2.5 以下	0.9 以下	0.04 以下	0.03 以下	56	35
D 310	0.20 以下	25.0~28.0	20.0~22.0	—	—	—	2.5 以下	0.75 以下	0.03 以下	0.03 以下	56	30
D 316	0.08 以下	17.0~20.0	11.0~14.0	2.0~2.75	—	—	2.5 以下	0.9 以下	0.04 以下	0.03 以下	56	30
D 316 L	0.04 以下	17.0~20.0	11.0~16.0	2.0~2.75	—	—	2.5 以下	0.9 以下	0.04 以下	0.03 以下	52	35
D 316 Cu	0.08 以下	17.0~20.0	11.0~14.0	1.2~2.75	1.0~2.5	—	2.5 以下	0.9 以下	0.04 以下	0.03 以下	56	30
D 316 Cu L	0.04 以下	17.0~20.0	11.0~16.0	1.2~2.75	1.0~2.5	—	2.5 以下	0.9 以下	0.04 以下	0.03 以下	52	35
D 817	0.08 以下	18.0~21.0	12.0~14.0	3.0~4.0	—	—	2.5 以下	0.9 以下	0.04 以下	0.03 以下	56	30
D 347	0.08 以下	18.0~21.0	9.0~11.0	—	—	8×C%~1.0	2.5 以下	0.9 以下	0.04 以下	0.03 以下	56	30

电焊机型式无论是交流或直流都可使用。对电弧稳定性以使用直流反极性(焊条为正极)为较好;特别在薄板焊接时是不可缺少的。在使用交流电焊机时如用高频振荡器可增加电弧稳定性。

焊条 填充涂料的不锈钢焊丝可用作焊条。焊着金属的化学成份在原则上尽可能接近于基体,但焊接裂缝、耐腐蚀性以及需否热处理均随着高温使用等要求的不同往往选择不同的材料如表 2 所示。选择焊条的标准可见表 2、3、4。还有含 Ti 涂料焊条由于 Ti 会在电弧中烧损故并不实用。因此,在焊接 321 型(18-8 Ti)基体时要使用加 Cb 的 347 型涂料焊条。由于纯 Cr 系焊条的焊着金属在焊接状态时都是硬脆的,因此在焊接前要加以预热,在焊接后要进行热处理。如果不能进行焊后热处理需用延性优越的 Cr-Ni 系奥氏体焊条来代替。

在 1959 年,日本的奥氏体系不锈钢涂料焊条只有 JIS Z 3221 的规定,亦即 D 308、D 347、...等规格,这相当于美国 AWS E 308、E 347、...等规格。焊条直径为 1.6~6.0 毫米,焊着金属的化学成份及机械性能见表 10。这些规格还规定了焊着金属的化学成份分析试验,抗拉试验及对硝酸、硫酸的腐蚀试验,还有焊接接头的弯曲试验及角焊试验等等。

对焊条的称呼是:焊条的种类、种别(涂料的类别)、焊条芯直径及长度。其表示方法如下:

D316—15—3.2φ×350
 种类 种别 焊条芯直径 长度

焊条的种别有以下几种:

15—直流反极性作全位置焊接用的焊条,其直径在 4 毫米以下,涂料含钙或其他多量碱土金属化合物,所谓氧化钙型(Dime type)。

16—交流用,也适用于直流;作全位置焊接用的焊条,其直径在 4 毫米以下,涂料为氧化钙型或氧化钛型(Titania type)。为了交流焊接电弧的稳定性,可含有容易离子化的钾元素。

25—直流平焊或平角焊用的焊条;也可用于水平堆焊。涂料是含矿物质和多量 TiO₂ 的氧化钛型。

26—交流平焊或平角焊用的焊条,也可用于直流;涂料多数为氧化钛型。

焊条使用前,奥氏体系要以温度 150~200°C 干燥一小时后使用,铁素体系必须以温度 300~350°C 同样干燥一小时后使用。

接缝的准备 涂料焊条接缝的标准对接剖口形

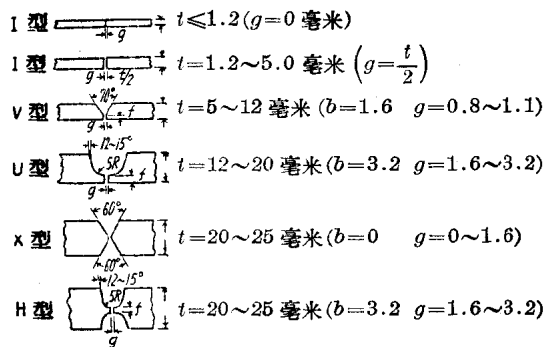


图 22 涂料焊条接縫的对接剖口形状

状示于图 22。板厚在 5 毫米以下时,采用极端垂直切断的 I 型剖口。板厚超过 5 毫米时,則用 V、U、X、H 型等剖口。剖口加工普通采用剪断或切削法。

剖口間应有适当的間隙,过狹就不易焊透,过寬使焊层薄容易开裂而且焊珠易于熔掉。为使焊着金属耐腐蚀性不受損失,应避免对碳的吸收或混入杂质,剖口附近就需清洁和彻底脫脂。要用三氯代乙烯、汽油、苯、中性肥皂或其他化学药品来脫脂,再用不銹鋼絲制的无油质細毛刷将其表面刷洗清洁,甚为重要。

焊具及夹具 在不銹鋼鋼板的焊接部分需使其和厚度約 12 毫米的銅衬垫(中部有淺沟槽)密合如图 23 所示。在使用焊具或夹具时,将焊件牢牢固定

进行刚性焊接,变形就較少。若不能使用夹具时,焊縫采用搭焊法;当板厚为 5 毫米时,搭焊間隔距离为 150~200 毫米,而薄板搭焊时,其間隔距离为 19~25 毫米。在焊接时搭焊金属必須与焊着金属熔化焊透,但这很困难,所以在焊接重要接縫时,最好在焊接前逐次除去搭焊金属后进行焊接。但是在剖口上尽量不进行搭焊,而用坚实的衬垫或其他夹具在剖口左右材料上固定其位置是个比較好的方法。

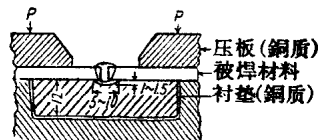


图 23 剖口采用衬垫金属(特别适用于薄板的焊接)

焊接条件 奥氏体不銹鋼接縫的焊接条件示于表 11。一般不采用直径 5 毫米以上的焊条,否則在焊着金属中会产生显微裂縫和显著的气孔。一般在用过大的电流或采用交叉焊接法时奥氏体系焊条容易产生焊接开裂現象。所以普通在較小电流下施行快速焊接,但是,过小的电流或过高的速度会使焊珠截面形状細小,反而容易开裂。在焊接时,一般須将前层熔渣完全除去,同时在进行 V、U、X、H 型剖口背面焊接第一层时,必須先将表面第一层焊珠的背面凿好后,再进行焊接。还有电弧长度应尽可能保持得短一些。

表 11(a) 奥氏体系不銹鋼接縫使用涂料焊条焊接时的条件

板厚 (毫米)	焊接层数	焊条直径(毫米)		焊条直径 (毫米)	焊条消耗量 (公斤/米)	焊接电流(安)		电弧电压 (伏)
		第一层	第二层以上			平焊和橫焊	垂直焊和仰焊	
0.40	1	1.2	—					
0.56	1	1.2	—	0.8	0.07	8~15	8~15	17~19
0.80	1	1.2	—	1.2	0.09	15~35	15~25	18~21
1.60	1	1.6	—	1.6	0.15	30~60	25~40	20~23
2.10	1	2.4	—	2.4	0.27	50~100	45~65	22~25
3.20	1	3.2	—	3.2	0.45	70~130	70~95	23~26
	2	2.4	2.4					
4.80	1	4.0	—	4.0	0.74	100~170	100~125	24~27
	2	3.2	3.2					
6.40	2	4.0	4.0	4.8	1.12	150~200	130~145	24~28
	2	4.0	4.8					
9.50	3 以上	4.0	4.0	6.4	1.78	200~290	不可	26~30
	3 以上	4.0	4.0					
12.7	3	4.0	6.4	7.9	2.23	250~400	不可	28~32
	4 以上	4.0	4.0					
15.9	4	4.0	7.9					
	5 以上	4.0	4.0					

表 11(b) 奥氏体系不锈钢接縫使用涂料焊条焊接时的条件

板厚 (毫米)	剖口形状	位置*	焊接 层数	剖口尺寸		焊 接		焊 条		备 注
				間隙 c (毫米)	鈍边 b (毫米)	电 流 (安)	速 度 (毫米/分钟)	直徑 (毫米)	消耗量 (克/米)	
6		F	3	0~2	0~2	110~140	120~180	4	300~400	第一层焊縫 金属背面需 要凿好后进 行背面焊接
		V				80~100	60~80	3.2	400~500	
12		F	5 (4:1)	0~2	0~2	110~140	100~200	4	1,500 ~ 1,600	第一层焊縫 金属背面需 要凿好后进 行背面焊接
		V	4 (3:1)			80~100	40~80	3.2~4	1,600 ~ 1,700	
22		F	13 (9:4)	0~2	—	110~140	100~200	4	3,600 ~ 3,800	第一层焊縫 金属背面需 要凿好后进 行背面焊接
		V	10 (6:4)			80~110	40~80	3.2~4	3,800 ~ 4,000	
6		F	1	0~1	1~1.5	110~140	100~150	4	300~400	第一层TIG 氬弧焊需要 衬垫
		V	1	0~1	1~1.5	80~100	40~80	3.2~4	400~500	
6		F	3	4~6	—	110~140	100~150	4	400~500	需要衬垫
		V	3			80~110	40~80	3.2~4	500~600	
12		F	10	4~6	—	110~140	60~150	4	1,600 ~ 1,700	需要衬垫
		V	6			80~110	40~80	3.2~4	1,800 ~ 1,900	

* 焊接位置: F 为平焊; V 为垂直焊

奥氏体系不锈钢多层焊接时,由于焊着金属结晶連續生长和最后凝結成很大的柱状晶体,便降低了焊着金属的延性,易于产生高温显微裂縫。所以在各层焊着金属焊珠表面进行噴砂处理使塑性变形和晶粒微細化不使焊着金属結晶粗大,就足以防止显微裂縫的产生。

焊接后,須将殘留熔渣及飞溅物清除干淨,普通用移动式砂輪机去除表面凹痕或表面粗焊珠,要使表面具有光淨面可用拋光輪拋,要除去凸出的焊珠时,可用回轉式砂輪机磨光。

3. 惰性气体电焊

概論 鎢极和金属极惰性气体电焊法能最广泛地使用于不锈钢的焊接。用惰性气体保护的焊接比用涂料焊条电焊要显著优良,加鈦的 321 型焊条就可以使用。棒状无涂料焊条使用于鎢极惰性气体电

焊。而綫状无涂料鋼絲則使用于金属极惰性气体电焊。惰性气体电焊用焊条对基体金属种类的配合和涂料焊条时(表 2~4)大致相同。表 12 是惰性气体电焊用不锈钢鋼絲的美国 AWS 規格,例如以 R 作標記的 ER 308、ER 347 焊絲相当于 E308、E347 涂料焊条。

鎢极惰性气体电焊 不锈钢鎢极的惰性气体电焊以直流正极性(电极为負)为佳;在使用反极时,因电子冲击使鎢极棒过热而使鎢微粒混入焊縫金属,所以对耐腐蝕性不利,为此,在采用正极性时,电极过热較小,基体被很快加热,焊珠幅度也小,因此,焊着金属即使在紅热脆性区域中驟冷,也难于产生高温开裂。作为鎢极惰性气体电焊的电极,除純鎢棒外,还使用一种加有氧化鈦的鎢棒(俗称鈦鎢合金,即加入 1~2% ThO₂ 的 W)。鈦鎢合金电极的特点