

化工与通用机械参考资料

国外低温容器焊接

一九七五年九月

化工与通用机械参考资料
国外低温容器焊接

1975年9月

编辑
出版：合肥通用机械研究所
发行
制版：北京市制版厂
印刷：北京印刷二厂

工本费：1.20元

出 版 说 明

应英国焊接学会的邀请，中国焊接学会曾派出专业小组于1973年11月17日赴英参加英国焊接学会为纪念英国焊接学会成立50周年而召开的国际低温容器讨论会。会议共有20个国家267名代表参加，提出了26篇技术报告，分为五个部分：

1. 焊接9% 镍钢用焊条；
2. 断裂力学的研究与应用；
3. 除9% 镍钢以外的其它低温材料的研究；
4. 大型低温贮罐的设计；
5. 有关标准的讨论。

这些报告在一定程度上，反映了国外对低温容器的选材、设计、焊接和检验等方面所进行的工作和今后发展的动向。为了供国内对低温容器有关问题的参考，我们选编了部分技术报告出版。当然，这些资料中，由于资本主义制度对技术的影响，必然会存在一定的问题，例如：技术为企业追求超额利润服务以及技术上为企业吹嘘等等，希望读者根据洋为中用的方针，批判地加以吸收。

本资料系由上海材料研究所、哈尔滨焊接研究所、兰州石油机械研究所、杭州制氧机研究所和合肥通用机械研究所承担翻译，并又由合肥通用机械研究所组织校对与编辑出版的。

编 者

1975年1月20日

目 录

一、9%镍钢的焊接 (美国).....	(1)
二、焊接9%镍钢用铁素体型MIG焊丝的新发展 (日本).....	(11)
三、低温用细晶粒低温钢的经济埋弧焊 (瑞典)	(23)
四、铝的电渣焊 (西德)	(30)
五、9%镍钢模拟热影响区的组织变化和机械性能 (瑞典、波兰、澳大利亚).....	(37)
六、阿姆科 Cryonic 5钢焊接接头的断裂韧性 (美国).....	(44)
七、9%和5½%镍钢的疲劳性能和断裂韧性 (日本)	(58)
八、9%镍钢在液化天然气生产中的应用 (英国).....	(74)
九、在0°C以下工作的液化气体货船中结构钢贮罐的缺口韧性要求(意大利).....	(93)
十、船运液化天然气用的大型球罐设计中的断裂力学(挪威).....	(103)
十一、不锈钢角焊缝的低温疲劳(英国).....	(115)
十二、有关经济、安全的400巴压力液氧与液氢贮罐设计的一些问题(西德).....	(123)
十三、对液化天然气管线的材料要求(加拿大).....	(129)
十四、大型液化石油气和液化天然气贮罐设计和制作方面的考虑(美国).....	(138)
十五、冷冻液体产品用地面贮罐(英国).....	(144)

一、9% 镍 钢 的 焊 接

R.H.Tharby, D.J.Heath, J.W.Flannery (美国)

本文评述了9%镍钢的历史及其在工业中的各种应用,详细提出了在工厂和安装现场制造9%镍钢所采用的焊接方法,重点是有关大型贮运容器和液化天然气贮罐的焊接方法。同时,对这种材料的冶金和发展背景作了介绍。

此外,还介绍了一些国家标准中所规定的9%镍钢的机械性能和化学成分,对设计许用应力进行了审议,许用应力可根据抗拉强度或屈服限来确定。而且还详细讨论了焊接9%镍钢用的一些焊接材料的机械性能和化学成分。

本文对大型9%镍钢贮罐工业生产中所采用的各种焊接过程作了评述。其中包括手弧焊、埋弧焊和熔化极惰性气体保护焊(包括射流过渡、短过渡、脉冲射流过渡)等焊接方法。这种材料的优良焊接性还表现在焊前不要求预热,当厚度 $\leq 50\text{mm}$ 时,焊后不需要热处理。

前 言

本文评述了近代世界各国焊接9%镍钢的实际情况。这种镍钢在 -196°C 的低温下具有良好的韧性和强度。近10~15年来,9%镍钢已广泛用于各种液化气体贮罐。取暖和发电所需要的天然气数量日益增长,对这种清洁燃料的大量需求,要求建造大型贮罐。近几年来,还提出了建造液化天然气远洋运输贮罐的要求,大多数固定式贮罐的容量为 47000M^3 左右。建造 159000M^3 的贮罐也是可能的。图1所示为正在建造中的大型液化天然气贮罐。液化天然气一般是在最大压力为1磅/吋²($0.07\text{kg}/\text{cm}^2$),温度为 -162°C 的条件下贮存的。由于氧气在炼钢工业中的大量应用,还对液氧贮罐也产生了需求。各种液化工业气体是用60磅/吋²左右($\sim 4.2\text{kg}/\text{cm}^2$)压力,最大容量45600升左右的9%镍钢容器贮存的。

在详细讨论焊接方法之前,回顾一下9%镍钢的历史及其冶金过程是有益的。

历 史

9%镍钢创始于1944年国际镍公司的产品研究试验室。截止1960年,已建造了大量贮存液化气体的压力容器。1960年建成了第一个在现场装配的液化天然气贮罐。目前在世界各地这样的9%镍钢液化天然气贮罐已超过70个,一些贮罐的容量达到 94000M^3 ,除制造液化天然气贮罐以外,9%镍钢还用来制造 $\phi 3000 \times 36.4$,长32m,工作压力 $38.5\text{kg}/\text{cm}^2$,工作温度 -196°C 的大型精馏塔。“低温下的应用”^[1]的试验报告是有助于这种材料在世界上被采用的因素之一,这是一份说明9%镍钢适用于 -196°C 低温液化气体贮存、生产和运输容器及设备的资料。由美国机械工程师协会批准的这项试验的成果之一,就是当采用厚度到50mm的9%镍钢时,不必消除焊后应力。各种试验的结果均作有详细记录。质量评定试验由于最初就引用了断裂力学对韧性的概念,因此得到更充分的发展。所以目前各种断裂力学质量评定试验方法都要求焊缝中带有模拟缺陷的人工缺口。虽然如此,“低温下的应用”的试验成果对工业都

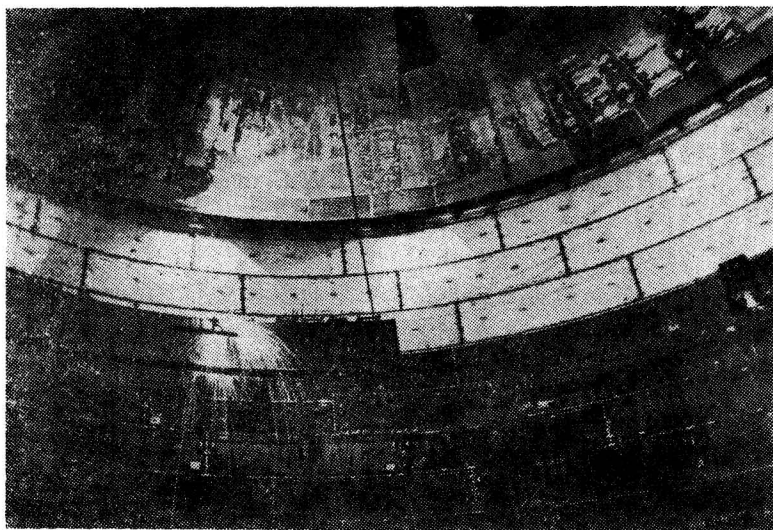
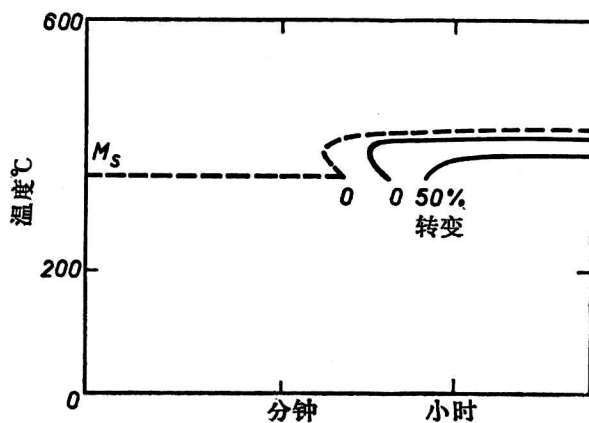


图1 制造大型液化天然气贮罐内侧景



淬火前在恒温槽中保温的时间

图2 在900°C时低碳9%镍钢奥氏体化的等温转变图

很适用，并且已成功地生产了数以千吨计的9%镍钢，且已在使用。这些容器和贮罐在使用中，没有发现一个属于板材和焊缝断裂韧性不足的缺陷。经过二次正火和回火或经淬火的材料，可以用来制造现场装配的容器。

冶金

9%镍的存在使钢材具有很高的可淬性，从图2的等温状态转变图中可明显看出，当在奥氏体化温度对此种钢板及型钢水淬或冷却时，一般为低碳马氏体显微组织^[2]，常用的焊前热处理规范可采用以下的一种：

(a) 在900°C正火，再在790°C正火后进行570°C回火

(b) 800°C水淬后再570°C回火

回火处理时有少量奥氏体生成，并在温度低于零度仍是稳定的，它对钢的韧性发挥了作用。

通常，这种钢材在完全热处理状态下焊接，熔焊的热效应可能引起热影响区显微组织的变化，图3示出用IMCO-WEIDA焊条手弧焊所得到的热影响区显微组织金相图，靠近焊缝

金属的地方是热影响区受到剧烈加热和淬火部分，其组织与最右侧的母材金属不同，为清晰的针状组织。

在热影响区所进行的硬度和冲击试验证实了其金相和性能的变化，性能测定曲线列于图4，图4左面是被焊钢材热影响区硬度变化曲线，与所预计的一样，其硬度的峰值位于焊缝的附近。图4右面是在-196℃距焊缝中心各点与V形缺口冲击值的关系，手弧焊的热效应并不引起冲击值的明显降低。

尽管在热影响区发生硬化，但没有遇到“硬化区裂纹”或“焊道下裂纹”，这种裂纹在焊接含碳量大于0.15%的合金结构钢时经常发生。当焊接容易产生这种裂纹的钢材时，应采取预防措施，包括预热、采用低氢焊条、适当的干燥、保证焊接区有低氢含量等，截面厚度到50mm的9%镍钢的焊接经验表明，这种钢不需要预热。

母 材

9%镍钢可采用二次正火和回火或淬火和回火状态，各主要工业国均能生产，各国的标准化学成分列于表1，相应的机械性能列于表2。

表1 钢板的标准及化学成分（重量百分比）

国 家	规 范 或 标 准	C 最大	Si	Mn	Ni	S 最大	P 最大
比 利 时	NBN630-70, 10Ni26	0.10	0.15—0.35	1.00最大	8.50—9.50	0.030	0.030
法 国	NFA36-208, 9Ni (1966)	0.10	0.15—0.30	0.8最大	8.5—9.5	0.030	0.030
西 德	VDEh 680, X8Ni9	0.10	0.10—0.35	0.3—0.8	8.0—10.0	0.035	0.035
意 大 利	UNI5920-66, X10Ni9	0.10	0.15—0.30	0.90最大	8.50—9.50	0.035	0.035
日 本	ASTMA353-70 ASTMA553-70A级或NV20-2	0.13 0.08	0.15—0.30 0.15—0.35	0.90最大 0.40—0.70	8.50—9.50 9.00最小	0.040 0.025	0.035 0.020
挪 威	DnV (1971): NV20-2	0.08	0.15—0.35	0.40—0.70	9.00最小	0.025	0.020
英 国	BS1501-509	0.10	0.10—0.30	0.30—0.80	8.75—9.75	0.030	0.025
美 国	ASTMA353-70 ASTMA553-70A级	0.13	0.15—0.30	0.90最大	8.50—9.50	0.040	0.035

表2 钢板的标准及机械性能

状态及性能	英 国 BS1500:1970		比利时 NBN630-70	法 国 AFNOR NFA36-208680 -70 (1966) 9Ni	西 德 VDEH X8Ni9	意大利 UNI 5920-66 X10Ni9	日本、美国 ASTM		挪威 DnV NV20-2 (1971)
	509	510	10Ni36				A353-70	A553-70A级	
状 态	NNT或QT	QT			NNT或QT	NNT或QT	NNT	QT	
板 厚 mm			16—40	30—50					
抗拉强度kgf/mm ²	71	71	65—85	70	55—85	70—85	70—84	70—84	65
屈服限kgf/mm ² ≥	54	60	54	60	50	50	53	60	45
延伸率% ≥	18 ^a	18 ^a	17 ^a	19 ^a	17 ^b	19 ^a	20 ^a	20 ^b	20 ^b
断面收缩率%	—	—	—	—	50	—	—	—	50
冲击值 -196℃纵向 CV-kg·m/cm ²	4.3	4.3	5	6	DVM 3.5(横向) 6(纵向)	4.3			4.3
侧向膨胀mm	—	—	—	—	—	—	0.38	0.38	—

a—5.65 S₀, b—51mm

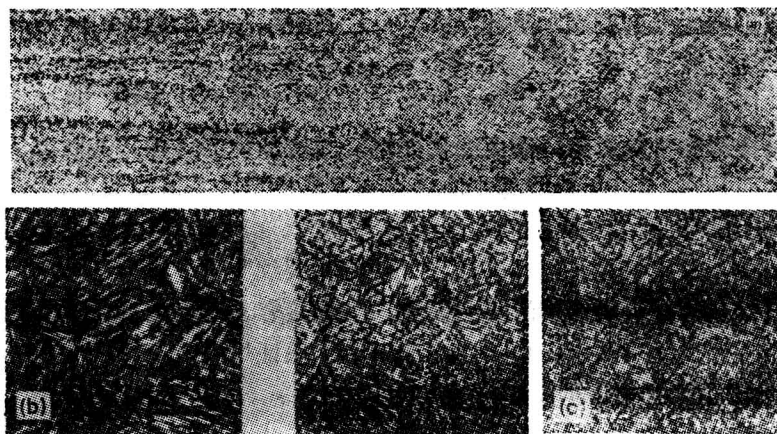


图3 用 INCO-WELD A 焊条手弧焊所焊得的9%镍钢热影响区金相组织
(a) $\times 25$ (b) 热影响区 $\times 250$ (c) 未受热影响区 $\times 250$

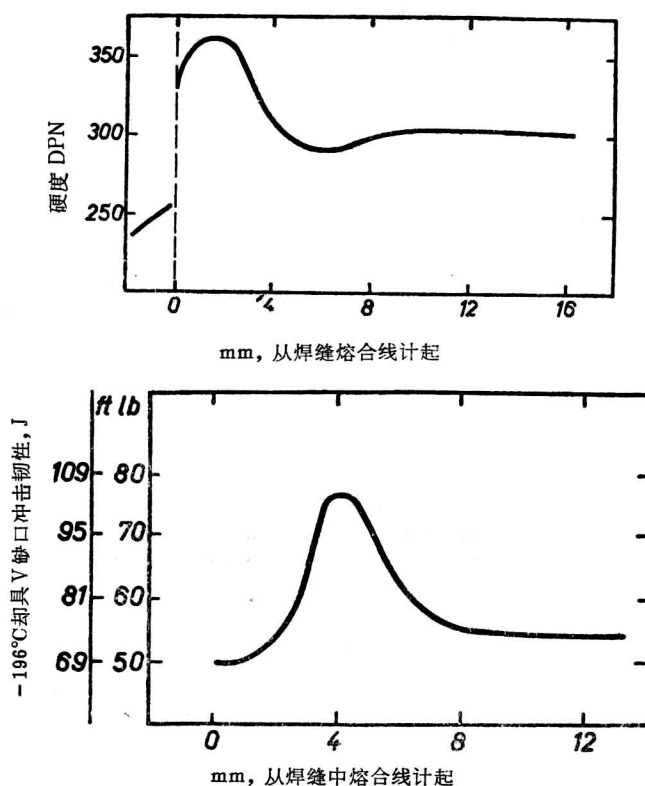


图4 9%镍钢焊缝热影响区的硬度和韧性 (Inco-Weld A 焊条)

设计应力

美国所使用的压力容器和贮罐是按美国机械工程师协会 (ASME) 规范或美国石油学会 (API) 规范设计的, 虽然这些规范在世界范围被承认, 但各国还有本国自己的规范, 表3为美国采用的许用应力, 表中 17.6kg/mm^2 是按焊缝系数为 100% 计算的, 其它值是几年前按焊缝系数 95% 计算的, 目前在技术上已能充分提高焊件的抗张力, 当讨论填充金属时再作详细介绍。

表3 许 用 设 计 应 力

美国石油学会 (API) 附录Q	22.2kg/mm ²
美国机械工程师协会 (ASME) Section VIII, Div.1.	17.6kg/mm ² ·
	16.8kg/mm ²
ASME, Code1499	17.6kg/mm ²

注: 1. *指不经焊接的母材

2. 其余是焊接接头的值

在欧洲, 设计应力不仅可以由相应的规范, 还可以根据安装和检查部门提出的特殊要求来选定, 一般来讲, 设计应力选用于焊接区屈服限的一部分, 推荐使用的应力达 29.0kg/mm²。

焊 接

制造任何压力容器或贮罐过程中, 焊接是最重要的一个环节, 无论是深冷或其它情况使用的设备, 在实际焊接之前就应当研究出一个完整的焊接方案, 认真考虑母材的准备工作、焊接部位、最佳焊接工艺、填充金属的选用、预热和焊后热处理等是非常重要的, 前面已讲过, 当9%镍钢的厚度不超过50mm时, 不要求预热和焊后热处理。

母材的焊前准备:

可以采用与碳钢、低合金钢相同的切割方法和焊前坡口准备方法, 火焰切割已经成功地用于一般的切割和加工对接接头的坡口。通常采用钝边大于3mm的70°坡口。

标准的氧-乙炔设备完全适用于9%镍钢, 使用氧-乙炔的压力和气流与切割一般碳钢时相似, 但切割镍钢的速度略为低些, 表4举例列出9%镍钢的切割条件。在欧洲氧-丙烷切割已满意地用于9%镍钢, 其热影响区的硬度不超过250VPN。如果使用的切割设备适用于氧-丙烷, 可以考虑用丙烷作为燃料气体。

表4 火 焰 切 割 9 % 镍 钢

板 厚 mm	切割嘴直径mm	乙炔压力 g/cm ²	氧 压 力 g/cm ²	切割速度M/hr
3.2	1.6	211	1406	>19.8
3.8	1.6	211	1757	19.8

众所周知, 在火焰切割后钢材存在很薄的过热层, 一般可用磨加工消除。这种磨加工的方法还可把表面氧化皮除掉, 而氧化皮在焊缝金属中促使气孔的形成。在火焰切割表面所作的弯曲试验表明, 虽然热影响区的硬度略有提高, 但这一区域 (或靠近切削面的金属层) 的延性并没有降低。气割的薄板和厚板在焊接前后硬度测定值列于图5, 作用于气割表面上的焊接热效应未带来明显害处, 试验室检查气割后受焊接热影响的区域未发现任何金相组织不良的削弱现象。

填充金属:

填充金属的选择与焊接过程的确定几乎是同样复杂, 最好是把制造9%镍钢制深冷容器和贮罐所用的填充金属全部列出, 表5、表6为手弧焊、熔化极惰性气体保护焊、埋弧焊所用填充金属, 仅限于实际结构中所采用的一些材料, 在以往的深冷容器制造中认为 INCO-

WELD A 焊条最合适, 焊缝金属的韧性最佳, 但抗拉强度略低于母材, 最近国际镍公司研制出 Inconel112焊条^[3], 用这种焊条所焊出的焊缝, 根据母材的抗拉强度, 其焊缝系数已达到 100%, Inconel182焊条具有较好的焊接操作性能, 故常用于仰焊。

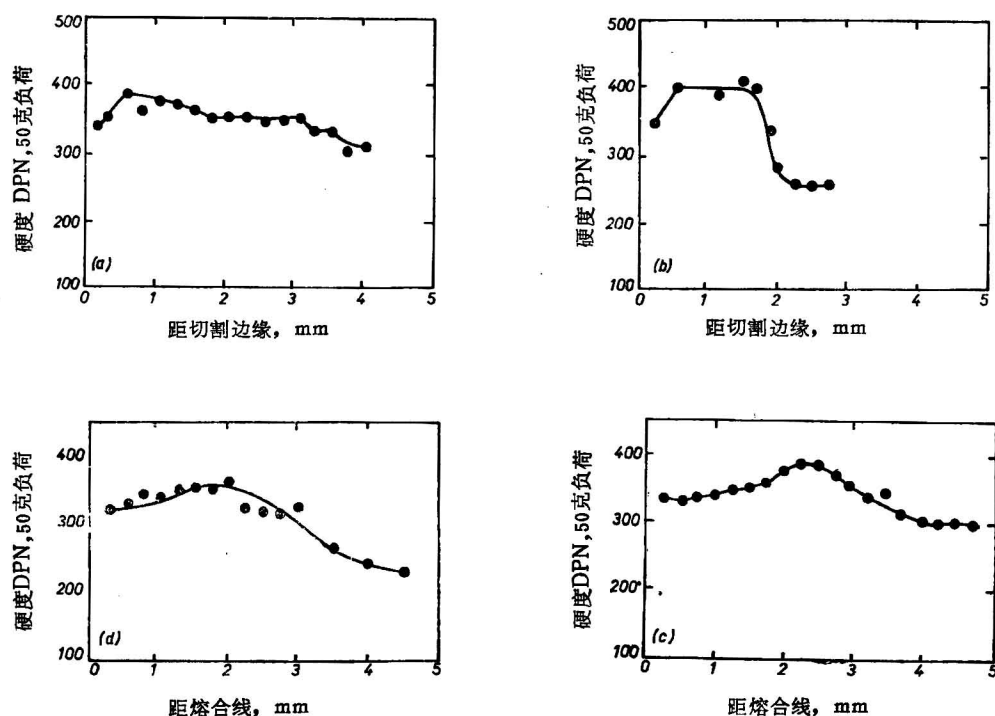


图 5 9%镍钢板热影响区的硬度: (a) 火焰切割 3mm 厚近切割边缘处硬度值; (b) 火焰切割和手弧焊 3mm 厚, 热影响区硬度变化; (c) 火焰切割 15.8mm 厚近切割边缘处硬度值; (d) 火焰切割和手弧焊, 15.8mm 厚, 热影响区硬度变化

表 5 焊条的化学成分 (重量百分比)

焊 条	Ni	Cr	Mo	Mn	Fe	C	Nb	Ti	W
Inco-weld A*	70.0	15.0	1.5	2.0	9.0	0.03	2.0	—	—
Inco-weld A*	70.0	15.0	2.5	2.5	9.0	0.13	2.5	—	—
Inconel 182*	67.0	14.0	—	7.75	7.50	0.05	1.75	0.40	—
Inconel 112*	61.0	21.5	9.0	0.3	4.0	0.05	3.6	—	—
Nyloid 2*	65.0	13.0	6.0	3.0	其余	0.08	1.2	—	1.2
Nicrex 9*	52.0	13.0	5.5	1.5	其余	0.09	0.8	—	0.8
OK 59.45*	12.5	16.0	—	7.5	其余	0.20	—	—	3.5
Grinox T-Skola*	13.0	17.0	—	9.0	60	0.25	—	—	3.5
Yawata WeldB+	70.0	15.0	2.0	9.0	0.03	0.03	—	—	3.0
Yawata Weld B (M)+	68.5	15.4	2.13	2.0	9.55	0.08	2.26	—	4.0
Cryo-Therm 60*	51.0	10.0	2.5	2.70	其余	0.17	1.30	—	—

* 国际镍公司牌号 ϕ Murex Welding processes Ltd牌号 $\neq$ Messer Griesheim牌号
 • 英国氧气公司牌号 $\times$ ESAB牌号 + 日本钢铁公司牌号
 + Champion Industries, Inc牌号

表6 焊丝的化学成分 (重量百分比)

焊 丝	Ni	Cr	Mo	Fe	C	Mn	Nb	Ti
Inconel 92*	71.0	16.4	—	6.60	0.03	2.30	—	3.2
Inconel 82*	72.0	20.0	—	1.00	0.02	3.00	2.5	0.55
Inconel 625*	61.0	21.5	9.0	2.5	0.05	0.25	3.65	0.2
Chromet 6*	68.0	20.0	9.0	10.0	0.06	—	3.0	—
Chromenar*	67.0最大	20.0	—	1.00	0.04最大	3.0	2.5	0.50

注: 1. 上述大部焊丝可用于MIG及埋弧焊

2. 埋弧焊时焊剂用Incoflux4*, Linconweld 880*, Arcosite N82H*

* 国际镍公司牌号 φ 林肯电气公司牌号

+ Rockweld公司牌号 * Arcos公司牌号

在某些规范中, 许用设计应力选取是依据屈服限, 而不是抗拉强度, 在这种情况下, 制造厂应该选取一种能提高屈服限的焊条。焊接9% 镍钢用的焊条机械性能列于表7, 要着重指出的是这些数据的来源不同, 因此直接进行比较不能说明问题。试验用的板材厚度、焊条、焊丝的直径、接头制备和试样等都会影响试验的结果。

表7 典型的机械性能

焊 条 或 焊 丝	全 部 焊 缝 金 属				横 向 9 % 镍 钢 焊 接 接 头		
	0.2屈服限 kg/mm ²	抗拉强度 kg/mm ²	延伸率 %	却贝冲击值 -196°C, 呎-磅	抗拉强度 kg/mm ²	延伸率 %	却贝冲击值 -196°C, 呎-磅
Inco-Weld A	38	65	30	50—60	82.5	28	50—60
Inco-Weld B	47	77	32	44	—	—	—
Inconel 182	35	61	30	50—60	72	28	50—60
Inconel 112	52	82	36	47	82	—	47
Nyloid 2	45	68.5	35	25	72	15	33
Nicrex 9	44	68	35	40—55	77	15	54
OK 69.45	46	61	40	41	71.5	7.5	41
Grinox-T-Skola	51	61—77	30	20	77	26	41
Yawata B (M)	43	71	44	52	—	—	—
Cryo-Therm 60	48	70	29	34—47	77	27	—
Inconel 625 MIG—脉冲射流	57	85	29	54	78.5	—	—
埋弧 Incoflux 4	47.5	79	32	—	77	—	—
Inconel 92 MIG—脉冲射流	46.7	75	39	—	89.5	—	—
Inconel 82 埋弧-Incoflux4	39	69	39	80.5	72	—	—
Chromenar 382 MIG—射流	41	64	55	—	70	—	—
埋弧 Arcosite N82H	38	60.5	50	—	67	—	—

当讨论焊丝的焊缝机械性能时, 必须考虑是采用气体保护焊或埋弧焊, Inconel 92 焊丝或表6中的其它任意一种焊丝当采用熔化极惰性气体保护焊时, 利用射流、短路或脉冲射流过渡, 其焊接效率全部可达到母材抗拉强度的95%。当要求将焊接效率提高到板材强度时, 应当采用 Inconel625或 Chromet6.0焊丝, 上述多数焊丝都能用一般常用焊剂进行埋弧焊。

焊接方法

工业中常用的多数焊接方法都能够焊接9% 镍钢, 但是在本文中只是讨论在工业生产中得到广泛应用的那些方法。其中有: 手弧焊、熔化极惰性气体保护焊(包括脉冲射流过渡、短

路过渡、埋弧焊接。

手弧焊

大量的手弧焊工作是用高镍焊条完成的。高镍焊条不能保证熔深；金属流动性也差，熔合边界处容易形成铁素体焊缝金属，但这并不意味着应用高镍焊条对焊接有困难，只是这种焊条与其它焊条不同，一旦把这种困难向焊工讲清楚，使他们熟悉这种焊条性能，焊接9%镍钢就不会有问题。

对接焊或角焊的根部焊道是最苛刻的一个工序，如不采取可靠预防措施，就会导致发生裂纹。采用 $\phi 3\text{mm}$ 焊条和适当的焊接电流能够得到十分满意的结果。只是要轻轻摆动焊条，同时适当加快焊条的移动速度，以控制焊缝的尺寸。在根部焊道末端焊接弧不应突然熄灭，这样的熄灭会引起一个深的火口和裂纹，而引起的裂纹可能从火口伸向热的焊缝金属。用焊条将火口引向焊缝侧更好些，同时应加速移动速度，以减小熔池的尺寸。引弧的方法对焊缝成形有着明显的影响，推荐用一种倒回法或“T”形法，就是电弧应该在火口前端的边缘引燃，然后迅速返回到火口后面，再倒回后摆动焊条，继续进行焊接，这样的引弧方法有三个优点：

1. 在未焊接处就能形成正确的弧长；
2. 冷的火口可以得到一些预热；
3. 能使最初突然冷却的熔滴或急速冷却了的焊缝金属重新熔化，以减少气孔。

熔化极惰性气体保护焊 (MIG)

熔化极惰性气体保护焊（射流过渡）主要用于为“用户服务系统”的车间内9%镍钢焊接，与其它焊条相比，其优点是能够采用半自动或自动焊，通常焊丝的直径为 $\phi 1.6\text{mm}$ ，用纯氩作保护介质，由于输入热相当高，典型的焊接条件是27—32V、250—300A、焊丝直径为 $\phi 1.6$ ，焊接熔池大，流体成形最适于平焊，在这种情况下可采用具有良好经济效果的全自动焊。

近十多年来，已提出两种形式的熔化极惰性气体保护焊：短路和脉冲射流过渡，二种方法都能应用于立焊、仰焊和横焊，脉冲射流过渡已得到较广泛的采用，并广泛应用于大型液化天然气贮罐的立焊缝。

短路过渡工艺

典型的短路过渡工艺焊接条件是19—23V、100—180A 采用 $\phi 0.8$ 的高镍焊丝和氩-氦混合气体作保护介质。由于输入热较低使焊接熔池迅速固化，因此非常适合于立焊和仰焊。这个工艺的另外重要用处是在任何位置时可控制根部焊道的熔深，这样焊工可便于改变根部间隙。

纵然对于有些材料应用短路过渡工艺存在熔深不够的问题，但对9%镍钢就无需顾虑，它有利于控制其根部焊道，但必须采用正确的焊接条件和工艺。

脉冲射流过渡工艺

脉冲射流过渡工艺应用于9%镍钢已有几年，它具有极好的适应性，兼有短路过渡工艺的某些优点（各种位置的可焊性）和射流过渡工艺的某些优点（高的热输入和较低的焊接缺陷敏感性）。

试验室工作在现场使用证明正确选择电源特性是个关键，通常，用平电压特性电源较具有陡降电压特性更难以建立适宜的规范，因此，曾经设想利用一定的临界峰值脉冲电压来衰减电压陡降特性有足够的复原电压来保持低电流弧，脉冲射流过渡时与其它熔化极惰性气体保护焊一样，常采用镍铬合金焊丝 Inconel 82 或 92，这些焊丝具有比用于碳钢和低合金钢较高的电阻，为此焊丝的伸出长和接触点更应注意。但是焊丝的熔点比钢低，故不需深的熔深即可获得良好的熔合。从冶金学观点来说，这是有利于限制热裂的倾向。最佳焊接规范可

以先形成短小滴弧以后引加脉冲，直至形成正确的弧长。正确的焊接规范是由光亮的焊肉带有最小表面氧化来显示，在实验室得出的典型条件示于表 8。

这个工艺已经应用于大型现场装配固定式液化天然气贮罐的制造和大部分33M 直径船用球形液化天然气贮罐的制造。

埋弧焊

埋弧焊应用于容器的制造已有多年，最近已成功地用于固定式液化天然气贮罐的垂直焊缝，46000M³ 贮罐上的垂直焊缝是采用 Inconel 625 焊丝和 Lincoln Weld880 中性焊剂 焊接的。这些焊缝全部经过射线检验，质量完全合格。二个贮罐已在意大利建成，其成功的经验已被 Rosa 及 Bove 写成资料〔4〕。埋弧焊已广泛用于25.4mm 厚的9% 镍钢运洋球形液化天然气容器的焊接。

最近曾在平焊位置进行了9% 镍钢的双道埋弧焊，初步试验的结果见图6，其应用的参数列于表 9，因为这是一项可行的试验研究，未测定其机械性能，其它焊丝和焊剂的应用仍需探讨。

表 8 典型的脉冲弧焊规范

板厚 mm	位 置	坡 口 型 式	电 压 (伏)	脉冲电压峰值 50 PPS	平 均 电 流 (安)	送丝速度 米/分
12	平	单面坡口60°	22—24	70—75	120	3.81
12	立	单面坡口70°	电流不变	70—75	95	3.17
30	平	双面坡口60°	22—24	75—80	115	3.81
30	立	双面坡口70°	电流不变	75—80	105	3.81

注：纯氩作保护介质，焊丝直径1.2mm。

表 9 埋 弧 焊 规 范

焊接 序号	板 厚 mm	坡 口 型 式	焊丝直径 mm	焊丝型号	电 流 (安)	电压 (伏)	焊 接 速 度 mm/分	注
1	12	3.32钝边单面坡口60°	2.4	镍基合金	300	30	305	—
2	12	单面坡口60°对接	1.6	镍基合金	根200 第2层280 背280	30	508 254 508	背面铲除
3	6	1.5mm间隙不开坡口	1.6	镍基合金	280	30	762	未铲背面
4	12到6	T 角焊缝	2.4	镍基合金	300	30	762	—

注：焊接接头宏观组织见图 6。

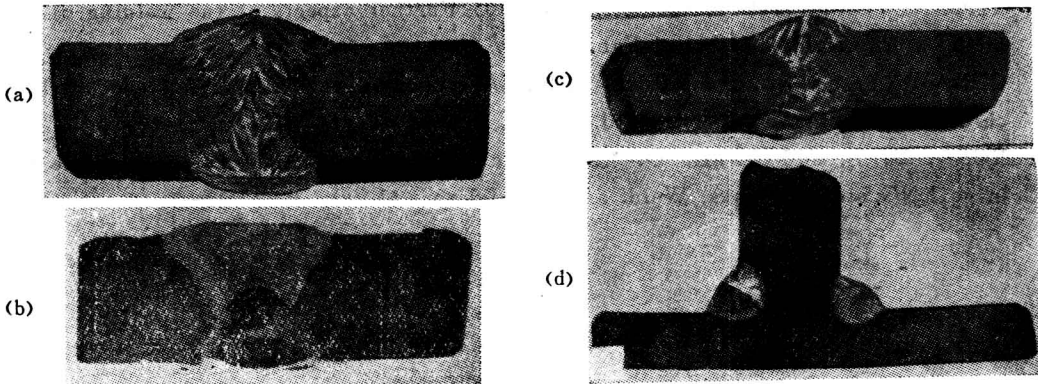


图 6 9% 镍钢埋弧焊接头宏观组织

(a) 焊缝序号 1；(b) 焊缝序号 2；(c) 焊缝序号 3；(d) 焊缝序号 4

预 热

9%镍钢在焊接、电弧切割、氧-乙炔切割和其它类似的加工过程中,不需要预热。

磁性影响

虽然在用9%镍钢建造最初的容器和贮罐时,磁性弧偏吹是引起困难的,但现在已不成问题了。在轧钢厂和现场管理中,避免感应磁场是目前普遍采用的方法,这些预防措施包括避免接触磁场,退磁和进行质量检验,使残留磁场低于50奥斯特。假如在制造过程中有磁性弧偏吹发生,则可用最近发明的镍合金焊条克服,这种焊条用交流电比直流电更好。

二个有效的方法是:第一对钢板焊接区域退磁。第二利用交流焊条使发生中和作用,适宜的交流焊条如:Nyloid2, Inco Weld B, Yawata B等,均能有效地克服磁偏吹,并成功地在生产使用。

当横焊用埋弧焊时,由于磁场强度为150—200奥斯特,曾经遇到困难,应用交流焊接焊条可获得良好的根部焊道,随后的测量表明,磁场强度几乎完全消除。因此,应用埋弧焊熔敷留下的焊缝并不困难。

焊后热处理

试验证明,9%镍钢不要求焊后热处理,厚度 $\leq 50\text{mm}$ 不要求焊后热处理消除应力,已被许多国家的规范采纳。

结束语

9%镍钢焊接的有关情况已评述于前,它强调于大量实践生产所应用的焊接方法和工艺,同时表明9%镍钢可以应用短路或脉冲射流过渡的熔化极气体保护焊和埋弧焊,各种填充金属已可供使用,其中大多数是镍基合金,这些填充金属能保证低于液化天然气温度时具有良好的韧性,近来发展的填充金属已达到母材的同等抗拉强度,但这些焊丝要求不同于铁素体填充金属的工艺,这对使用并不困难。

母材不需要预热,而这对其它合金钢为防止热影响区的开裂是必须的。坡口加工和切割可应用氧-乙炔焰或类似工艺而无有害影响,厚度不大于50mm时不要求焊后消除应力的热处理。

参 考 文 献

- [1] 'Operation Cryogenics'. The International Nickel Company.
- [2] THORNEYCROFT, D. R. and HEATH, D. J. 'Further aspects of the welding of 9% nickel steel' Weld. and Metal Fab. 31 (2), 1963, 59—70.
- [3] CONAWAY, H. R. and Mesick, J. H. 'A report on new matrix-stiffened nickel-chromium welding products' Weld. J. Res. Suppl., 49 (1), 1970, 27s—32s
- [4] ROSA, G. F. and BOVE, O. 'Automatic welding of 9% Nickel steel plate for large LNG storage tanks, Weld. and Metal Fab., 41 (2), 1973, 62—5.

二、焊接 9% 镍钢用铁素体型 MIG 焊丝的新发展

M. Watanabe and I. Watanabe (日本)

引 言

近十年来, 9 % 镍钢被用作为液化天然气设备的标准材料。但是近来, 有显著的倾向采用其它材料制造液化天然气贮存设备。占液化天然气贮存总量的30~40%的贮存设备是用铝合金、18-8 不锈钢和 Invar 合金制成的。

造成这种情形的原因, 通常是由于 9 % 镍钢, 要采用奥氏体的高镍合金焊条焊接, 如因科镍 (Inconel) 和哈斯特洛依 (Hastelloy)。这些材料的价钱也是很高的, 同时焊接时对热裂纹很敏感。另外, 焊缝金属的屈服强度比母材低很多, 这些问题虽然采用高镍合金也从未解决。

因而决定发展铁素体焊接材料来焊 9 % 镍钢。如果这能够取得成功, 那么 9 % 镍钢就再次显示出比其它低温材料优越, 因为它将能够提高设计应力, 并采用较薄的钢板。

作者的早期工作^[1]弄清了配用的铁素体型手弧焊焊条焊出的焊缝金属中含氧量相当高是焊缝缺口韧性降低的重要原因。这时焊缝金属的含氧量平均是 600ppm 左右, 最大含量是 1095ppm。不同的焊后热处理对缺口韧性的改善不明显, 因而还不能满足许多设计规范对低温却贝冲击试验的要求。

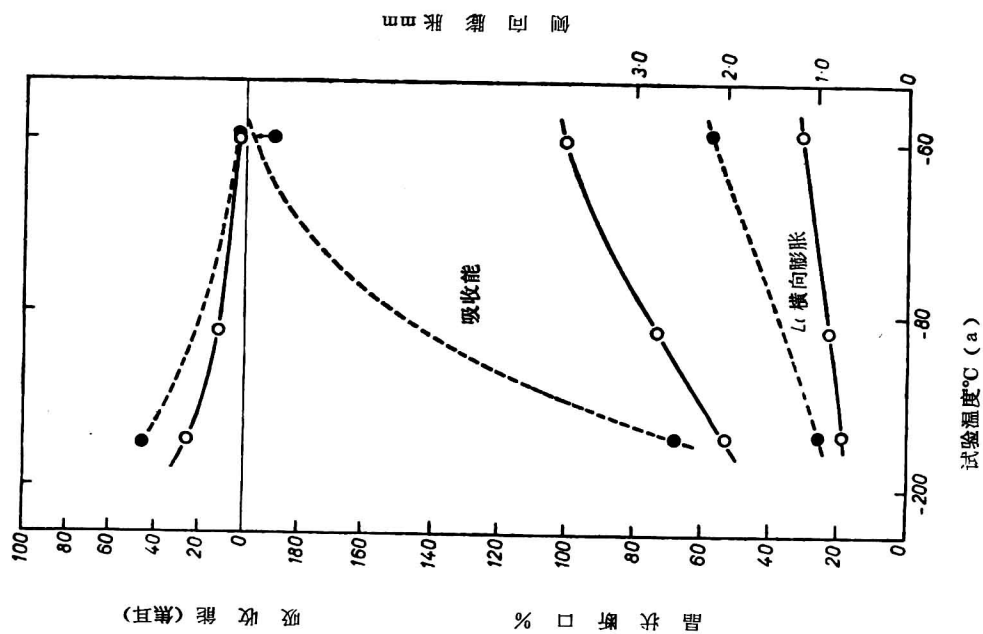
为了得到相匹配的铁素体焊缝金属具有优良的缺口韧性, 需要降低焊缝金属含氧量。我们为此进行了研究, 成功地发展了焊接 9 % 镍钢的铁素体型 MIG 焊丝。

材 料

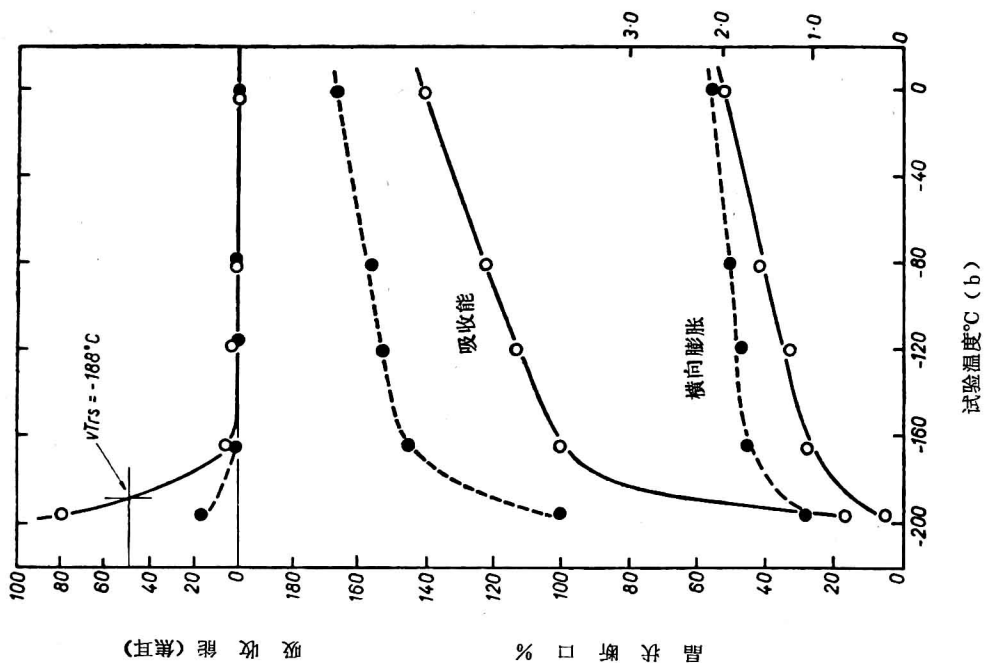
表1 a 是六种厚度的 9 % 镍钢的化学成分, 包括市售的和实验室里150公斤真空炉炼出的钢。表1 b 是试验用的铁素体型焊丝的化学成分。改变碳、硅、镍和其它元素含量。

表1a 9 % 镍 钢 的 化 学 成 分

序 号	C	Si	Mn	P	S	Ni	板 厚 (mm)
N-1	0.09	0.26	0.53	0.007	0.006	9.00	13
N-2	0.08	0.25	0.50	0.011	0.006	9.14	33
N-3	0.03	0.01	0.005	0.004	0.008	9.13	16
N-4	0.01	0.01	0.005	0.005	0.007	8.98	16
N-5	0.09	0.26	0.47	0.011	0.007	9.02	12
N-6	0.07	0.23	0.43	0.006	0.009	8.97	23



母材—N-1, 焊丝 F-1
●—母材, ○—焊缝金属



母材—N-2, 焊丝 F-2
●—母材, ○—焊缝金属

图1 却贝缺口冲击值与温度的关系

表1b 采用焊丝的化学成分

序 号	C	Si	Mn	P	S	Ni	备 注
F-1	0.024	0.07	0.59	0.004	0.009	8.76	0.011Ti, Al
F-2	0.034	0.10	0.58	0.004	0.006	10.30	
F-3	0.08	0.30	0.50	0.003	0.006	10.80	
F-4	0.04	0.37	0.62	0.004	0.005	10.73	
F-5	0.05	0.38	0.61	0.005	0.006	10.97	
F-6	0.07	0.37	0.61	0.005	0.007	10.91	
F-7	0.03	0.04	0.71	0.003	0.006	10.68	0.02Ti
F-8	0.009	0.24	0.64	—	0.004	11.20	0.56CO

试验结果与讨论

却贝冲击试验

首先进行却贝冲击试验, 以确定所配的铁素体焊缝金属的最低韧性, 然后再了解控制焊缝金属韧性的因素。

低温特性

焊接在平焊位置进行, 用全自动 MIG 电弧焊接方法, 焊接坡口有单 V 型、带直边的单 V 型和双 V 型。焊丝和母材用低硅的 F-1 和 2 以及市售的 N-1 和 2 母材钢板。全部试片从焊接接头上机械加工出, 并使断裂发生在近似地垂直于钢板主轧制方向。缺口的尖端位于焊缝金属和熔合线。以上试样的却贝冲击试验结果见图 1。母材和焊缝金属在整个零下的温度范围的却贝冲击值有相类似的倾向: 随温度的降低, 吸收能和侧向膨胀值逐渐降低, 直到 -162°C 。低于这个温度则吸收能和侧向膨胀值就急剧下降。在 -196°C 吸收能是 17.6 焦耳, 大大地低于母材, 但焊缝的剪切断裂面的转变温度 vT_{rs} 是 -188°C , 这对用到液化天然气设备使用温度 -162°C 来说还是足够低的。

缺口开在焊接接头熔合线的冲击试验结果表明, 在整个零下温度范围中焊缝熔合线的却贝冲击吸收能与焊缝金属是同样的。在 -162°C 以下, 焊缝熔合线的吸收能, 比焊缝金属的韧性要高 20 焦耳左右。

当镍含量增加约 1.5% 时, 其结果就如图 1 b 所示, 焊缝金属的 vT_{rs} 温度就降到 -196°C 以下, 并且吸收能量值在 -196°C 得到很大地提高。

以上结果证明, 高的焊缝金属韧性是与采用 MIG 焊接方法密切有关的。这种在纯氩气保护气氛中的焊接过程促使焊缝金属中含氧量大大减少。分析结果, 焊缝金属中最大含氧为 38ppm, 平均值为 25ppm 这个数字与母材相当。但是降低焊缝金属韧性的临界含氧量还没测出。

焊接规范的影响

由于焊接电弧能量显著地影响焊缝金属的缺口韧性, 所以加工了六组焊缝金属的却贝冲击试样。试样是用纯氩气保护焊, 改变焊接的电弧能量, 所用的焊丝为 F-2, 母材为 N-6 23mm 厚板。在这些试验中值得注意的是焊丝尖端熔滴的过渡型式是变化的, 标号 1~3 的焊接规范是典型的射流过渡, 4 和 5 是滴状过渡, 6 是强烈燃烧的电弧。焊接规范对缺口韧性的影响可见图 2。