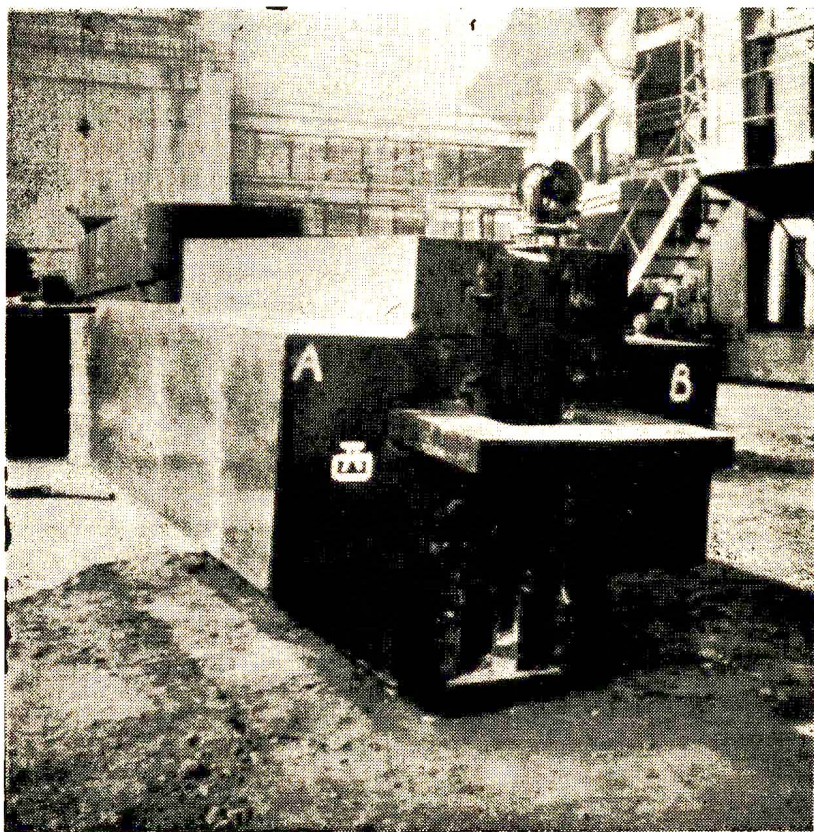


核电站大锻件电渣熔焊工艺 鉴定会文集



一九八二年十一月

目 录

一、核电站大锻件电渣熔焊工艺研究总结。

上海重型机器厂，郑州机械研究所，728工程研究设计院

二、中等间隙三相多板极电渣焊工艺研究。

郑州机械研究所，上海重型机器厂

三、核电站大锻件(压力壳接管段)模拟件熔焊接头性能研究。

上海重型机器厂，郑州机械研究所，728工程研究设计院

四、核电站大锻件(压力壳接管段)模拟件熔焊接头断裂韧性和疲劳裂纹扩展速率试验报告。

冶金部钢铁研究总院物理室

五、核电站大锻件（压力壳接管段）模拟件熔焊接头落锤、动态撕裂(DT)及低周疲劳裂纹扩展速率试验报告。

中国造船总公司七院七二五所

核电站大锻件电渣熔焊工艺研究总结

上海重型机器厂
郑州机械研究所
728工程研究设计院

一、前 言

世界上有限的石油贮存量(约800亿吨)满足不了发电、供热、石油化工等方面的消耗。有人估计继续开采20年后石油与煤将不再作为电、热的主要燃料。这正导致核电站兴建国家日益增多(已达23个国家和地区),运转数量不断增长(277座,15920万千瓦)与单机容量急剧加大(130万千瓦)。兴建一个大型核电站的周期需五年左右,而研究一种新型的核动力堆到大规模工业应用则需十五年至二十年。因此,结合国家资源,研究、建设核电站,无论就近期或远期着眼,都属一个国家的技术政策。考虑到我国石油资源并不丰富,建设核电站势在必行,刻不容缓。

我国第一个核电站(728工程)电功率为30万千瓦,堆型属压水堆。反应堆所需锻件总重量约3000吨,其中以压力壳接管段重量最大:内径约3米,壁厚约410毫米,高约3米,锻件重量152吨,约需重320吨的钢锭进行锻造。目前我国所能提供的最重钢锭约为220~260吨,这是发展中的矛盾。

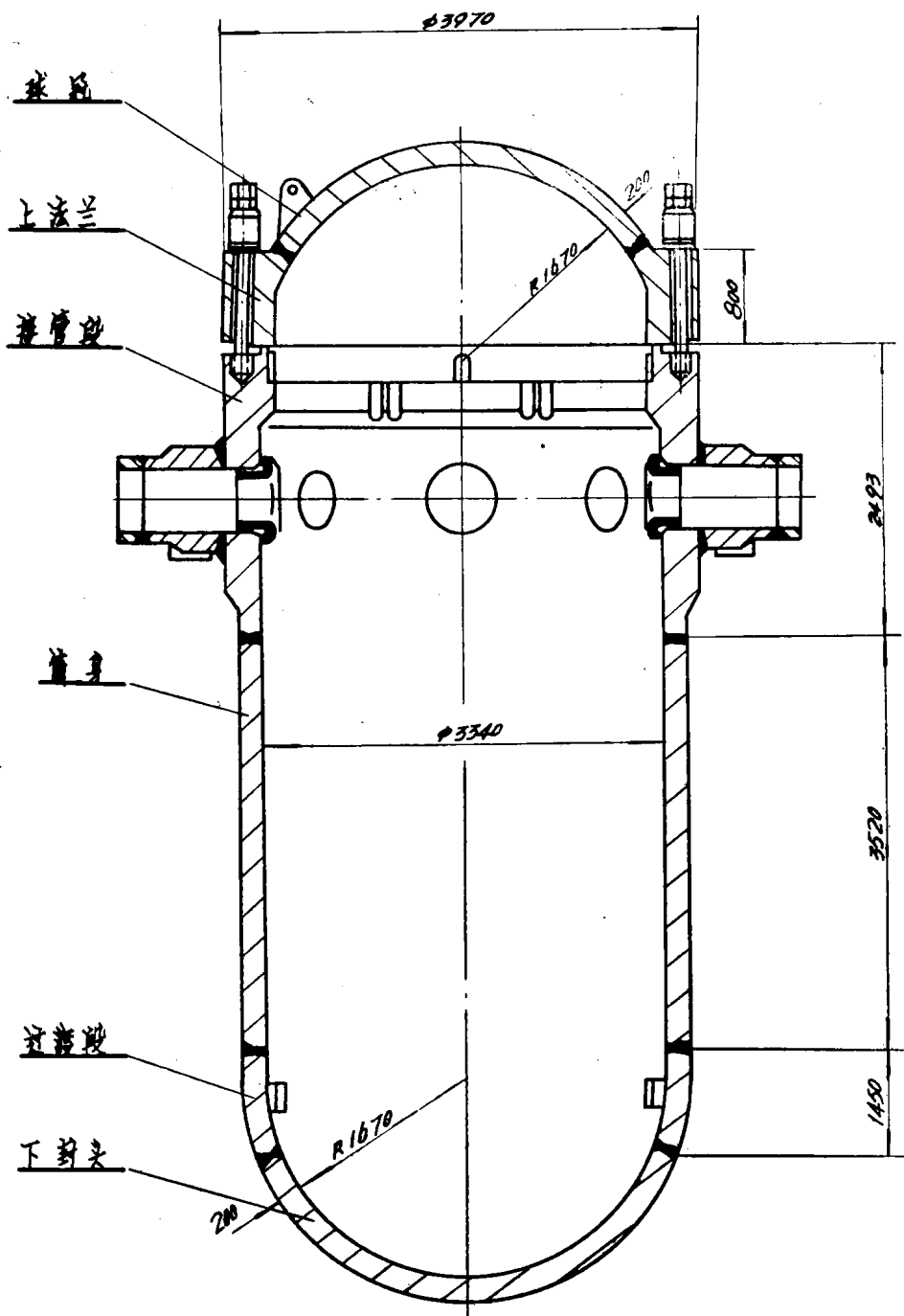
按国外已建成、投入运转的压水堆型压力壳来分析(表1),随着核电站向大容量方向的演变,这一矛盾还正在发展之中。

这一矛盾,在国内外都很普遍。矛盾的焦点是压力壳的生产方式,是年产少量的特大型锻件与巨大基建投资建设大型车间之间的矛盾。国外早期核容器多用锅炉钢板制造,以后随着压力壳壁厚加大,改用低合金高强度钢锻件,当生产条件限制提供大吨位锻件时,趋向采用锻焊结构,我国由于钢锭吨位又有限,因之在能取得大吨位钢锭之前,必须根据我国国情,选择新的途径。一九七七年728工程“六二〇”会议决定采用二条腿走路的方针:即一方面进行大型电渣锭的研制,另一方面列题进行核电站大锻件的电渣熔焊工艺研究。一九七九年一机部将该课题列为重点科研项目(课题名称“大截面铸锻件焊接成型工艺研究”),并确定由上海重型机器厂和郑州机械研究所共同负责,728工程研究设计院参加,进行该项研究工作。

从六十年代开始,苏、美、法、德等国都进行了熔锻结构大锻件的试验研究,我国的一些科研机构、工厂也先后开展了这项研究工作,上重厂于1975年采用电渣熔焊工艺方法,焊接了截面为1米×1米,材料为34 CrMo1A的1.2万瓩熔锻结构发电机转子,经一机部,水电

表1.国外压水堆压力壳规格

国别	名 称	电功率 (万千瓦)	内径 (米)	高 (米)	壁厚 (毫米)	重量 (吨)	运转年月
美	Haddan Neok	60	3.91	12.7	274	380	1968.1
	Indian Point 2	90	4.4	13.4	218	535	1973.8
	Indian Point 3	100	4.4	13.4			1975
	WPN 1	130	5	13.11	235		
日		50	3.353	11.5	168	230	
		85	3.988	12.5	200	330	
		115	4.394	13	220	390	1977.4, 1977.10
西德		30	3.27	9.83	160	190	1969.3
		45	3.73	9.035	181	220	
		60	4.08	10.405	192	280	
		80	4.536	11.4	230	400	
	Biblis	120	5	13.25	235	540	1976.8
		200	6	11.6	300	820	设计中
法	Chooz SENA	27.2	3.2	11.2	230	275	1967.4
	Fessenheim 1、2	93	3.99	12.3	200	327	1976
瑞典	Rnghals 2	86.2	4	13.3	200		1974.7
	Rnghals 3、4	90		13			1977.11, 1979.7
捷克	BohuhiceV1 —1、2	41.3	4.3	11.8	160		1977
西班牙	Almayaz 1、2	93	3.99	13	200		1976.11, 1977.12
瑞士	Beznan 1、2	36.4	3.3	10.7	166	155	1969.12, 1972.3



压力壳示意图
重号: ~250⁷ x 1

图 1

部鉴定通过，已安装在南京炼油厂。

本课题的任务是进行核电站熔锻结构大锻件电渣熔焊工艺研究。由于核电站大锻件种类较多，经“六二〇”会议决定，选择其中较有代表性的压力壳接管段为研究对象。

试验研究工作由1977年开始，共分三个阶段：电渣熔焊设备的改装、调试及试焊阶段；焊接方法、焊接材料及工艺规范试验阶段；2米截面 S271 钢模拟件的焊接试验及性能研究阶段，前后共历时四年。

对电渣熔焊工艺的研究，我们做了一定的工作。由于水平有限，在试验及资料编写工作中还存在不足之处，希望与会代表指正。

二、压力壳接管段的技术要求及焊接方案选择

1.压力壳接管段的技术要求:

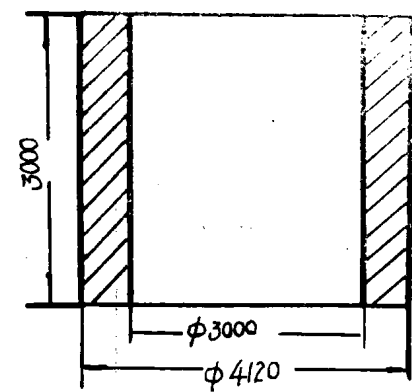


图2.压力壳接管段示意图

728工程压力壳如图1，接管段为其中最重的一件(图2)，锻件重152吨。

压力壳接管段的主要技术要求如下:

a.超声波探伤:

锻件不允许存在白点、裂纹等危险缺陷。 $\phi 2\text{ mm}$ 平底孔当量以下的缺陷不计。允许 $\leq \phi 4\text{ mm}$ 平底孔当量的分散缺陷存在。不允许存在 $> \phi 4\text{ mm}$ 平底孔当量的单个缺陷。不允许存在密集缺陷。

b.化学成份:

S271 钢的化学成份应符合表 2 规定

表 2

元 素	C	Mn	Si	S	P	Ni	Mo	Nb	Cr	Cu	Co
含 量 (%)	0.17 ~0.23	1.20 ~1.50	0.15 ~0.30	≤ 0.015	≤ 0.012	0.60 ~0.90	0.45 ~0.65	0.02 ~0.06	≤ 0.25	≤ 0.05	≤ 0.02

c.机械性能

锻件经调质热处理后，距表层 45×45mm 部位切向取样，试样经受产品生产过程中所有各项热处理后，进行机械性能试验，其数值应满足表 3 要求。

表 3

项目	350℃ 高温抗拉		常温抗拉		却贝V型缺口冲击性能				NDT (℃)
	σ_b (kg/mm ²)	σ_s (kg/mm ²)	δ_5 (%)	ψ (%)	-10℃ Cv (kg-m/cm ²)	上平台能量 (kg-m/cm ²)	+20℃ Cv (kg-m/cm ²)	横向 膨胀 (mm)	
技术要求	≥ 56	≥ 35	≥ 18	≥ 50	≥ 5.2	≥ 13	≥ 8.7	≥ 0.90	≤ -10

2. 焊接方案选择:

压力壳接管段如采用熔锻结构方案, 按上重厂电炉冶炼的能力需用四个钢锭以三条焊缝拼成坯料。焊后经锻粗、冲孔、扩孔等工序锻造成形。凭藉冲孔可以排除钢锭心部富集的缺陷, 取得优质的接管段。经计算锻坯的焊接截面为 2×2 米参见图 3。

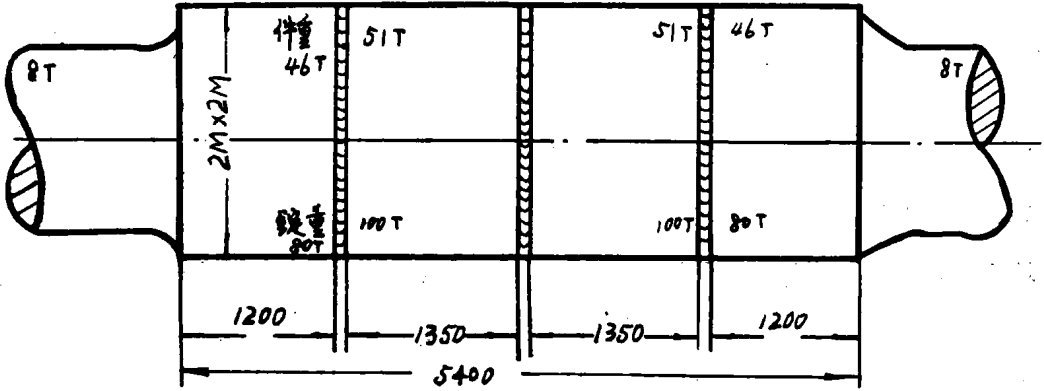


图3. 压力壳接管段拼焊结构示意图

焊接大截面构件的方法, 特别如厚达 2 米截面的构件, 国内外全部使用电渣焊, 无一例外。但具体方案, 因国而异, 因厂而异。纵观国外多年来的发展可归纳为:

a) 多焊丝熔咀电渣焊:

多焊丝熔咀电渣焊是焊接大截面的传统方法, 焊丝数量随截面尺寸增大而增多, (例如由截面尺寸 750 毫米 10~12 支焊丝而增大至 18~24 支焊丝焊接 2000×2650 毫米的大截面)。从理论上分析焊接截面可无限增大, 只需加多焊丝数量。但实际上焊丝数量愈多, 进给装置愈繁杂, 焊接过程中难以保证大量焊丝无一不出故障。焊丝增多, 出故障的机率增大。

熔咀电渣焊焊缝间隙仅 30—50 毫米, 焊缝金属收缩应力小的优点使熔咀电渣焊目前在焊接 2 米以上截面的构件中仍占一席之地。但熔咀电渣焊因间隙小易引起夹渣的缺点, 连同较难保证不出故障的顾虑, 使这一方法在某些国家里重遭舍弃。例如美、捷等国已经不再使用。

b) 板极电渣焊

板极电渣焊是以少量截面较大的板极代替大量的焊丝, 因此设备、操作及电极制备等问题均可简化。单板极焊接时, 板极宽度一般等于坯料厚度。坯料截面增大时可相应增大板极宽度或增多板极数量, 但板极过宽会引起熔宽的均匀。日本钢厂曾用单相单极、单相双极串联及三相三极电渣焊拼接 300 毫米宽的 SM50 钢板坯, 试图解决熔宽不均匀等问题, 但仅在小截面范围内作过少量工作, 而且局限于对板极作线性的研究, 在固定板极厚度 32 毫米下, 研究 120、220、233 毫米不同板极宽度对焊接过程及质量的影响。偏重宽度而忽视厚度。板极电渣焊可望为焊接大截面构件的有效方法。

c) 双极串联宽间隙电渣焊

双极串联宽间隙电渣焊是苏联巴东电焊研究所所竭力鼓吹的大截面焊接方法, 法国克鲁索·卢瓦尔的 A、B、R (Assemblage de Blooms Par Refusion) 法也源出于此, 属同一类型。苏联声称此法具有设备简单、不需预热、以及电极制备简单等优点, 还特别强调宽间隙焊接

因输入热量大，焊缝金属和母材冷却速度缓慢而焊前不需预热、焊时不必伴同加热而无开裂之扰，并于70年代初期宣称焊成 $\phi 1500$ 毫米的50万千瓦级转子实体模型。

宽间隙电渣焊与传统使用的窄间隙电渣焊相比，确实具有明显的优点(表4)，特别是电极制备简便，又可有效保证转子类焊件焊缝金属具有与母材同样的导磁率。

表4.宽间隙电渣焊与窄间隙电渣焊的比较

	宽间隙电渣焊	窄间隙电渣焊
装配间隙，(毫米)	可达 130 以上	30~50
填充金属材料形式	板极	焊丝
填充金属数量	4 支	18—24支
填充金属价格	与母材同炉材料，低廉	焊丝制备困难，昂贵
焊缝成分控制	简单而均匀	困难
送给设备	简单	复杂
预热	不需要	需要

但是宽间隙电渣焊的致命弱点恰恰在于间隙增大，而势必增大输入热，必然导致焊缝金属和近缝区金属晶粒粗大，必然增大焊缝金属的收缩应力。苏联声称宽间隙输入热大、冷却速度慢而不需预热，恰恰孕育着开裂的危险。为克服这一系列缺点，苏联曾采取下列措施来强化坯料的“先天”：采用电渣锭；电渣冶炼过程中添加稀土金属；锻坯经反复拔长镦粗。目的是以先天较细的晶粒，补偿后天焊缝金属结晶的粗大。

据上分析，三种电渣焊法各有所长和所短。上重厂及郑州机械研究所根据多年实践经验，取窄间隙(熔化咀)电渣焊收缩应力小、过热程度低与宽间隙(双极串联)电渣焊排夹杂容易、电极制备简便之长，克窄间隙电渣焊进给复杂与宽间隙收缩应力大、金属晶粒粗之短，提出中等间隙多板极电渣焊法，以中等间隙扬长避短，以三相三、六、九板极保证电网平衡，藉此焊接大截面构件。

三、焊接工艺和焊接材料的试验研究

核电站压力壳接管段，在高温高压下工作，对锻件的质量要求高，2米厚截面大锻件的焊接在国内又属首次，因此在进行2米截面模拟件焊接前，我们对可能影响焊接质量的各种工艺因素进行了试验，主要试验工作如下：

1.大截面电渣焊焊接方法的研究：

大截面电渣焊由于焊接截面大，焊接时间长(焊接一条焊缝往往长达10小时以上)，因而所采用的焊接方法不但要保证焊接接头的质量优良，抗裂性能良好，而且要保证长时间的焊接过程稳定可靠，不能有丝毫的中断和停顿。否则就会在焊缝中形成缺陷，影响质量。

在分析了目前国际上常用的熔咀电渣焊和双极串联电渣焊优缺点的基础上，对八种不同

尺寸的板极进行了各种试验。研究了他们对焊接过程的稳定性；对熔宽和熔宽不均匀性；对焊缝的抗裂性能；对焊缝中的夹杂(渣)物以及对焊接接头各区铸态组织的断裂韧性等方面的影响后，结合上重厂现有的设备条件，提出了用“中等间隙三相多板极电渣焊”来焊接S271钢2米截面大锻件。并通过试验得出：采用板极厚度为45mm，板极宽度为290mm的六板极三相电渣焊能够保证焊缝质量。(详见“中等间隙三相多板极电渣焊工艺研究”)。

2. 焊接材料的选择：

a) 板极化学成份的确定：在焊接过程中焊缝中的各种合金元素不可避免地会有不同程度的烧损。表5为用70%CaF₂ + 30%Al₂O₃的焊剂焊接S271钢时焊缝中化学成份沿焊缝高度的变化情况。由表5可以看出Mn的烧损较为严重，因此为保证焊缝金属的化学成份、组织、性能与母材相同，并确保材料具有较好的可焊性，必须对板极的化学成份进行必要的调整，调整后的板极化学成份见表6。

表 5

钢 样 编 号	取样时 焊缝高 度 (mm)	C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Mo %	N %	Cu %	Co %	Al %
1	45	0.21	1.22	0.18	—	—	—	0.51	—	—	—	0.007
2	238	0.21	1.16	0.22	0.010	0.023	0.89	0.53	0.04	0.06	0.011	0.008
3	438	0.21	1.14	0.23	—	—	—	0.52	—	—	—	0.009
4	650	0.21	1.08	0.21	0.011	0.023	0.87	0.52	0.042	0.06	0.011	0.009
5	760	0.21	1.04	0.16	—	—	—	0.49	—	—	—	0.009
试块	—	0.23	1.23	0.27	0.0135	0.020	0.90	0.51	0.04	0.07	0.012	0.003
板极	—	0.23	1.23	0.28	0.013	0.020	0.90	0.51	0.04	0.07	0.012	—

表 6

元素	C %	Mn %	Si %	S %	P %	Cu %	Ni %	Mo %	N %	Co %	Cr %	B %
调整后的板极 化学成份	0.17 } 0.21	1.4 } 1.6	0.15 } 0.30	≤0.012	≤0.012	≤0.05	0.6 } 0.9	0.45 } 0.65	0.02 } 0.06	≤0.02	≤0.25	≤0.0005
按设计 标准规 定的化 学成分	0.17 } 0.23	1.2 } 1.5	0.15 } 0.30	≤0.015	≤0.012	≤0.05	0.6 } 0.9	0.45 } 0.65	0.02 } 0.06	≤0.02	≤0.25	≤0.0005

b)焊剂成份的确定：为了尽量减少S271钢在电渣焊过程中合金元素的烧损，采用无氧碱性焊剂是比较合适的。但不同成份的焊剂其焊接工艺性能和去硫能力都有差别。为了选择合理的焊剂成份，我们对 $\text{CaF}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 的二元渣系和 $\text{CaF}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ 的三元渣系进行了对比试验。试验表明，采用电渣重熔中广泛应用的 $70\% \text{CaF}_2 + 30\% \text{Al}_2\text{O}_3$ 焊剂是合适的。这种焊

剂具有一定的去硫能力，其脱硫率为 $\frac{0.0105 - 0.007}{0.0105} \approx 34\%$ 。用这种焊剂焊接S271钢，

熔渣的化学成份变化见表 7。

表 7

渣样编号	取渣样时金属熔池的高度 (mm)	熔 渣 化 学 成 份							
		FeO %	SiO ₂ %	MnO %	CaF ₂ %	CaO %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	S %
1	刚造完渣	0.75	1.7	1.2	60	1.8	5.2	26.4	0.0085
2	~300	0.94	4.5	2.01	57	3.7	4.6	26.2	0.0077
3	~460	1.22	7.1	2.72	52.5	4.8	4.4	27.8	0.013

c)加铝脱氧：为了控制渣池成份，尽量减小焊缝金属中合金元素的烧损，在焊接过程中加入适量的铝屑脱氧是十分必要的。但铝屑加入量必须适中，如铝屑加入量不足，则脱氧能力低，合金元素烧损较多，如铝屑加入量过多，就会在焊缝中形成夹杂(渣)。为此我们进行了不同加铝量对焊缝金属脱氧效果的试验，进行了用10×10×5mm的铝块来代替铝屑进行脱氧效果的比较。试验证明：熔池中的铝屑加入量以0.5公斤/吨钢水为宜。如铝屑加入量超过正常量的5~10倍，就会在焊缝中形成夹渣，影响焊缝质量。试验还表明，用10×10×5mm 的小铝块来代替铝屑，脱氧效果不变，小铝块能在熔池中完全熔化，不会产生夹渣。

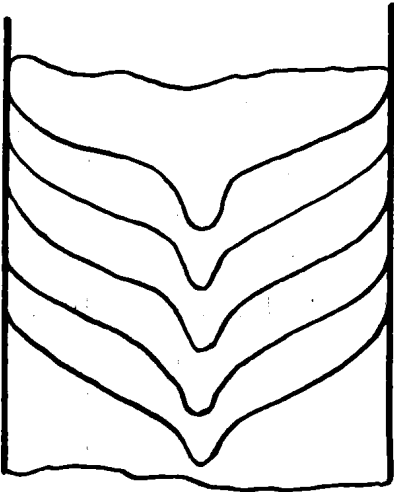


图4.焊接电流过大时的结晶层线形状 (b) 焊接电压：焊接电压对焊缝的熔宽影响较大，在渣池深度和焊接电流一定时，焊接电压过低，因熔宽过狭会造成未焊透，焊接电压过高，不但熔宽大，收缩应力大，有时还会造成焊接过程不稳定，破坏焊接过程的正常进行。图5

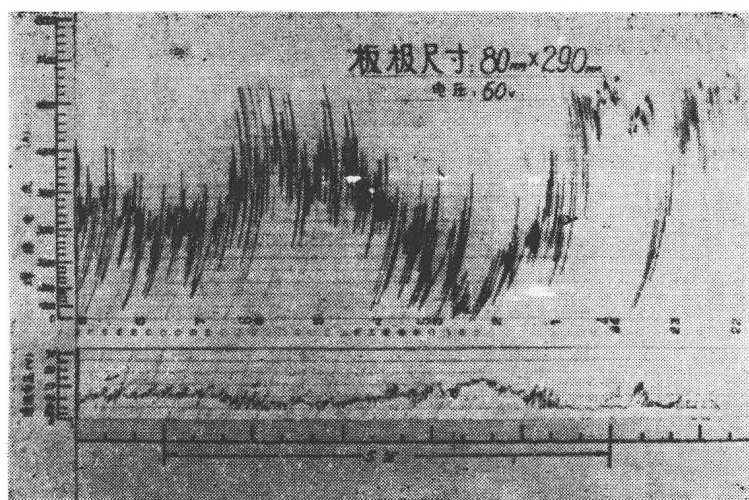


图5.电压过高出现不正常的焊接电流波动图
近形成夹渣(图6)。

为焊接电压过高而出现的不正常焊接电流波动图。试验表明,在一定的装配间隙下,在保证焊缝全部焊透的前提下,应采用低电压焊接为好。低电压焊接,由于熔滴颗粒细小,焊接过程十分稳定,熔渣对熔滴表面的非金属夹杂物的吸附作用更为充分,焊缝质量较高。(详见“中等间隙三相多板极电渣焊工艺研究”)。

在整个焊接过程中,焊接电压应保持稳定,不能突变,焊接电压的突变严重时,会在熔合线附近

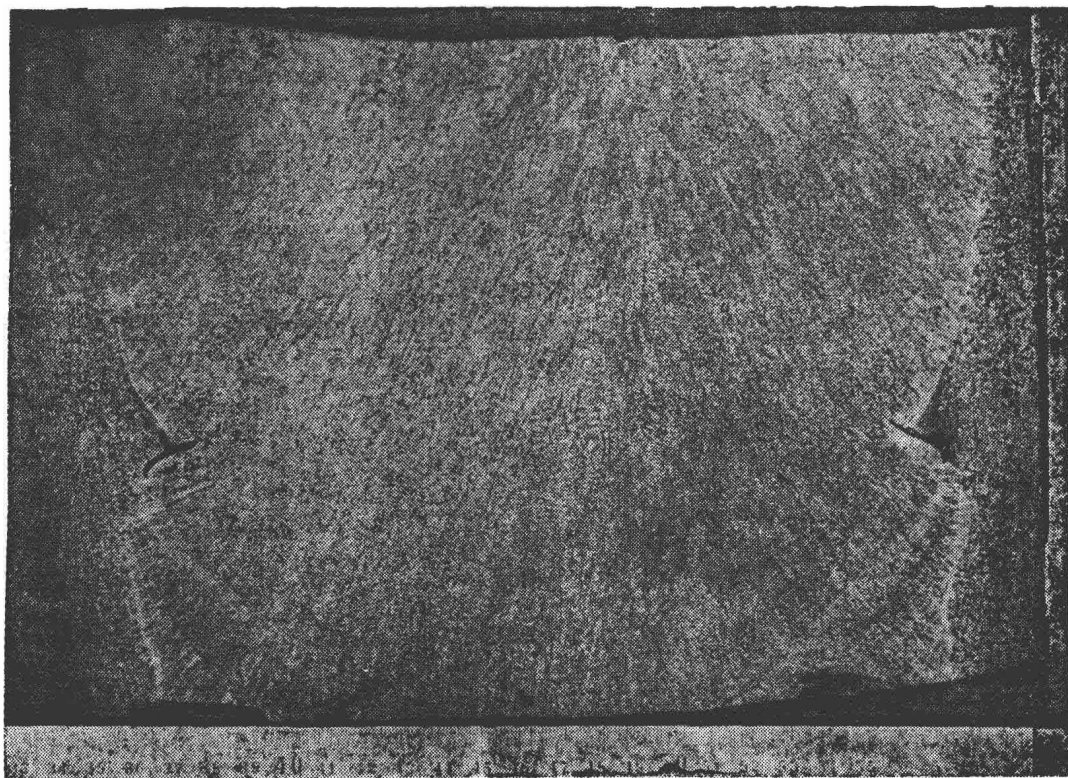


图6.焊接电压突变时在焊缝附近形成的夹渣

(c) 渣池深度:渣池深度对焊接过程的稳定性和焊透率影响较大。当焊接电压和焊接电流一定时,渣池深度过大,热量分散,容易出现未熔合。渣池过浅,则焊接过程不稳,有时会出现飞渣现象,破坏了焊接过程的正常进行。试验表明:2米截面板极电渣焊,渣池深度以50~60mm为宜。

4. 支点位置的选择:

大截面电渣焊时由于焊件重量大,在焊接过程中若支点位置选择不当,由锻件自重而作用于焊缝中的附加应力也是不可忽视的。光弹模拟试验结果表明:由锻件自重引起的附加应力,当支点位于锻件重心内侧时为拉应力,它对在开始焊接后 300~400mm 处的焊缝影响最大,它可能是造成焊缝下端中心裂缝不可忽视的因素。光弹模拟试验还表明:正确的支点位置应在锻件重心外侧,这样锻件自重引起的附加应力为压应力,有利于提高焊缝的抗裂性能。

5. 装配马的选择:

采用不同型式的装配马,在焊接过程中由于焊缝收缩而引起的变形量是不一样的。为此测量了用二种不同装配马(厚板马和“Π”形马)进行焊接时,焊缝的收缩变形量。试验表明:厚板马刚度大,焊件的拘束应力大,焊缝容易开裂。“Π”形马刚度小,拘束应力小,在焊接过程中,焊缝能较为自由地收缩变形,抗裂性能较好。因此在进行抗裂性能试验时,为提高试验方法的灵敏度,应采用拘束度较大的厚板马;而在焊接产品时,为避免焊缝中产生裂缝,应采用拘束度较小的“Π”形马。(详见“中等间隙三相多板极电渣焊工艺研究”附录)。

6. 大截面焊件的造渣试验:

引弧造渣是焊接 2 米截面大锻件的关键技术之一。由于被焊工件截面大,板极多,因而如何保证整个焊接截面同时造渣是十分重要的。如果六块板极造渣不同步,则就有发生短路跳闸的危险,从而使造渣过程中断。为此我们进行了各种造渣工艺试验。试验表明:为了便于造渣,板极端部应割成如图7所示的特殊形状。引弧造渣采用成份为 50%CaF₂ + 50%TiO₂ 的导电焊剂和铁屑,导电焊剂和铁屑的重量比为1:1,导电焊剂的用量为焊剂用量的 5%左右。图7为大截面焊件造渣示意图。采用上述方法造渣,配以合适的造渣规范就能保证造渣

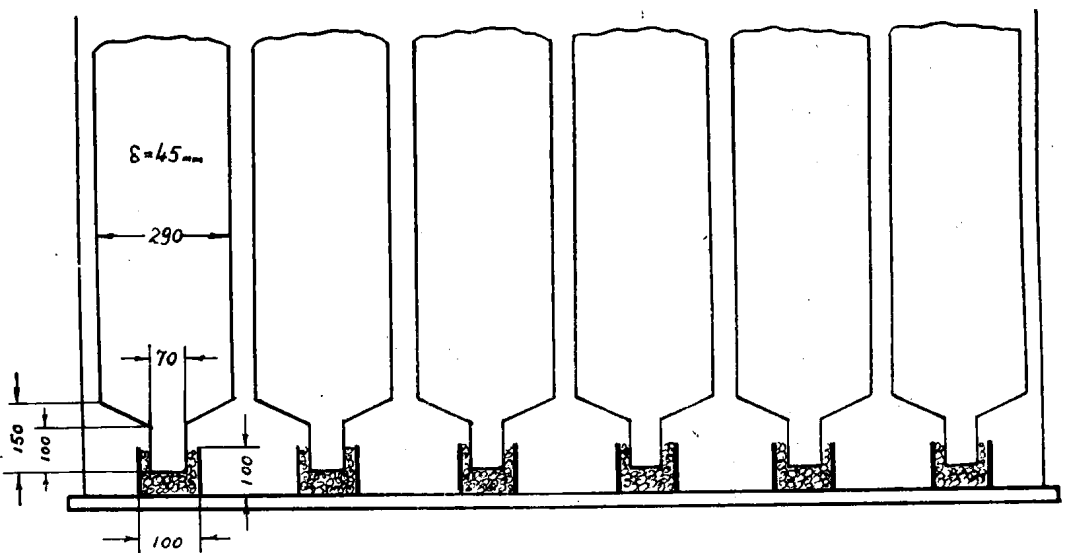


图7.大截面造渣示意图

过程顺利进行。2米截面焊件的造渣时间一般为 20~30 分钟左右。

此外，我们还进行了钢锭偏析对焊缝质量影响的试验，测定了用不同厚度板极进行焊接时的焊接热循环曲线等。通过上述一系列焊接工艺试验，我们可以看到，只要焊接方法（采用中等间隙三相多板极电渣焊）；焊接材料（采用含锰量比母材略高，碳和硫的含量比母材稍低的S271钢作板极；采用70%CaF₂+30%Al₂O₃的无氧碱性焊剂和在焊接过程中加入适量铝屑—0.5公斤/吨钢水——来进行脱氧）；焊接规范（焊接速度为 220~240mm/h，渣池电压为 25~30伏，渣池深度为50~60mm）和其它焊接工艺措施（如支点位置安置在锻件重心外侧，采用“Π”形装配马等）选择得适当、合理、那末焊接2米截面S271钢核电站大锻件的质量是可以保证的。

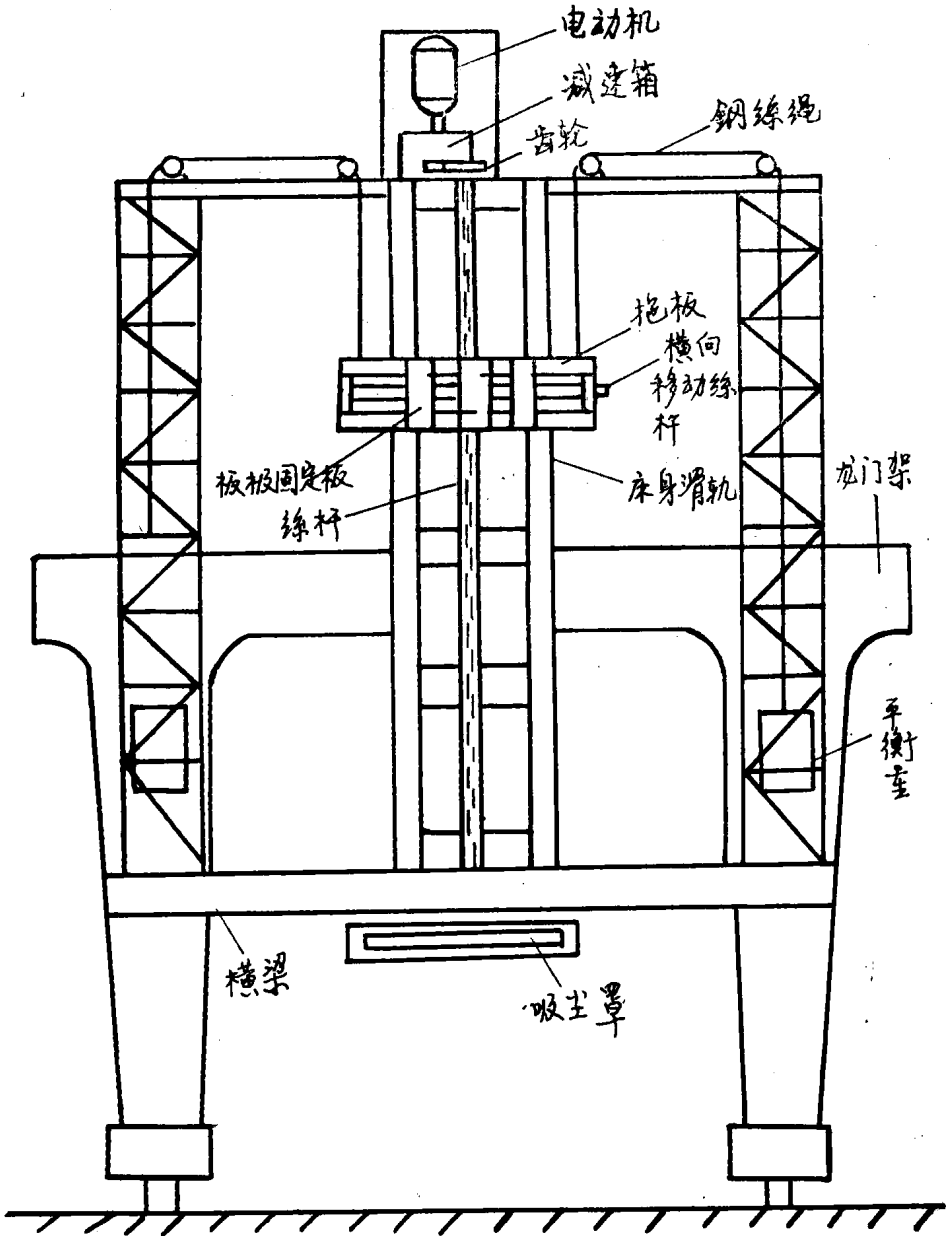


图8.板极给送机构示意图

四、焊接设备

焊接设备主要包括：板极给送机构、熔焊电源以及电源控制部份等。

1. 板极给送机构：

板极给送机构主要由传动机构、板极固定及调节机构、可沿轨道移动的龙门架及平衡重等组成见图 8。给送机构可保证板极有效进给高度为 6 米，进给速度可调范围为 0.2~1.0 米/小时。

2、焊接电源：

采用四台 BP1—3×3000 电渣焊变压器并联供电。

3、电气控制部份：

由控制电源的启动、停止、调节焊接电压及板极给送速度等部份组成。

五、模拟件的焊接及熔焊接头的质量检验：

为了确定工艺规范试验中所选定的焊接方法、焊接材料、焊接工艺能否用于压力壳接管段的焊接，进行了模拟件的焊接试验。模拟件的材料、焊接厚度与产品相同。焊后试件模拟产品的条件锻造、热处理后进行探伤及机械性能等试验，以了解焊接接头的内部质量及机械性能能否满足设计要求。

1. 模拟件的焊接：

a) 模拟件的装配：

模拟件和板极均为真空浇注的 S271 钢，其化学成份见表 8。

表 8

元 素	C %	Mn %	Si %	S %	P %	Ni %	Mo %	Nb %	Co %	B %
试 块	0.23	1.36	0.18	0.009	0.017	0.87	0.53	0.05	0.02	痕迹
板 极	0.21	1.40	0.26	0.007	0.012	0.82	0.50	0.047	0.009	

模拟件的装配见图 9。

1) 焊接：

板极排列及接线见图 10。焊剂焊前在加热炉中烘干，烘干温度为 650℃，保温 8 小时。

焊接过程中加铝脱氧，加铝量为 7.5 克/分。

采用的焊接规范见表 9。

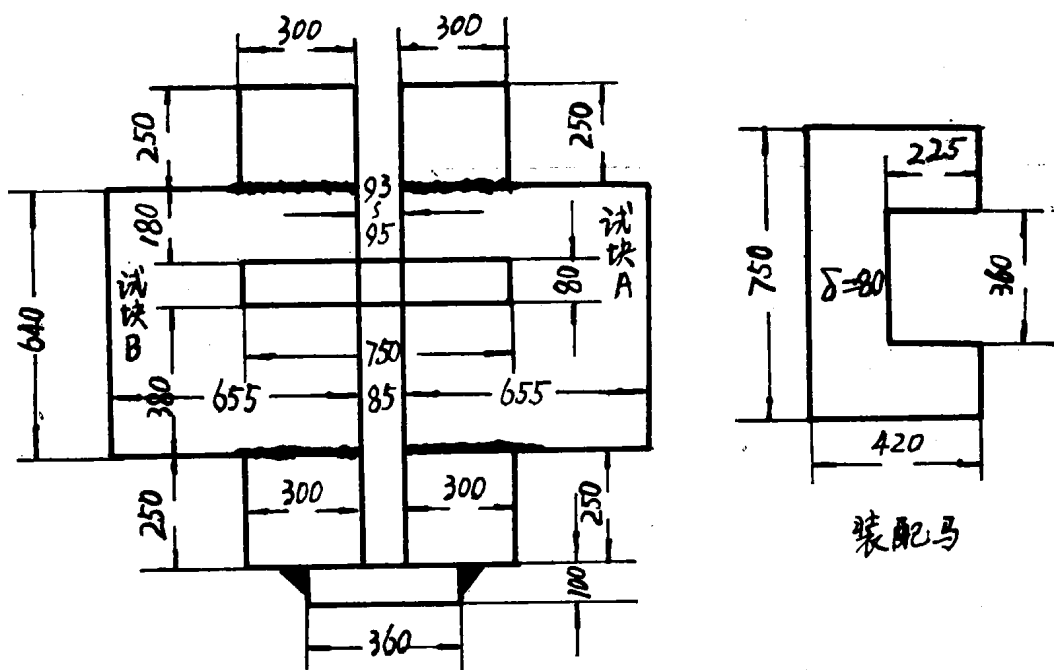


图9. 模拟件装配图(右为装配马)。

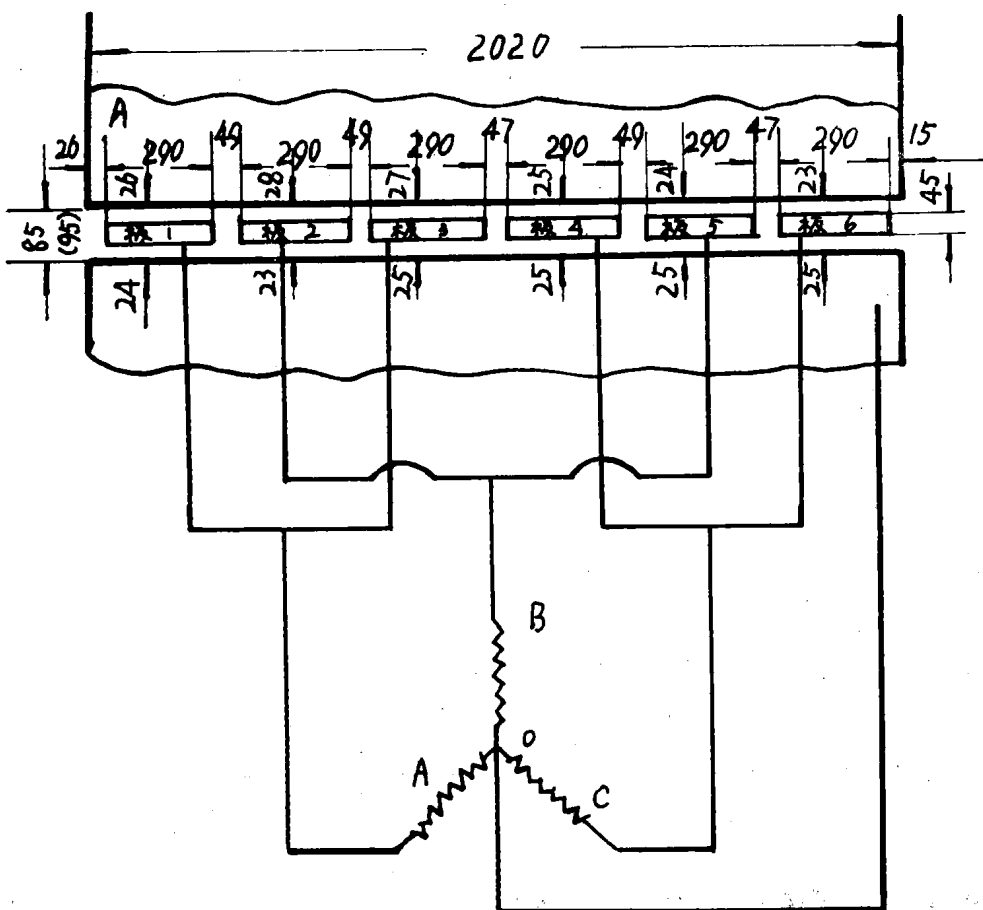


图10. 板极排列及接线示意图

表 9

规 范	焊接电压 (伏)	焊接电流 (安)	板极进给 速度 (米/小时)	渣池深度 (mm)	电流密度 (安/mm ²)	焊接速度 (米/小时)	线能量 (焦耳/cm)
数值	25~30	4000~7000	0.26	50~55	0.264	0.228	116.3

焊接过程见图11。

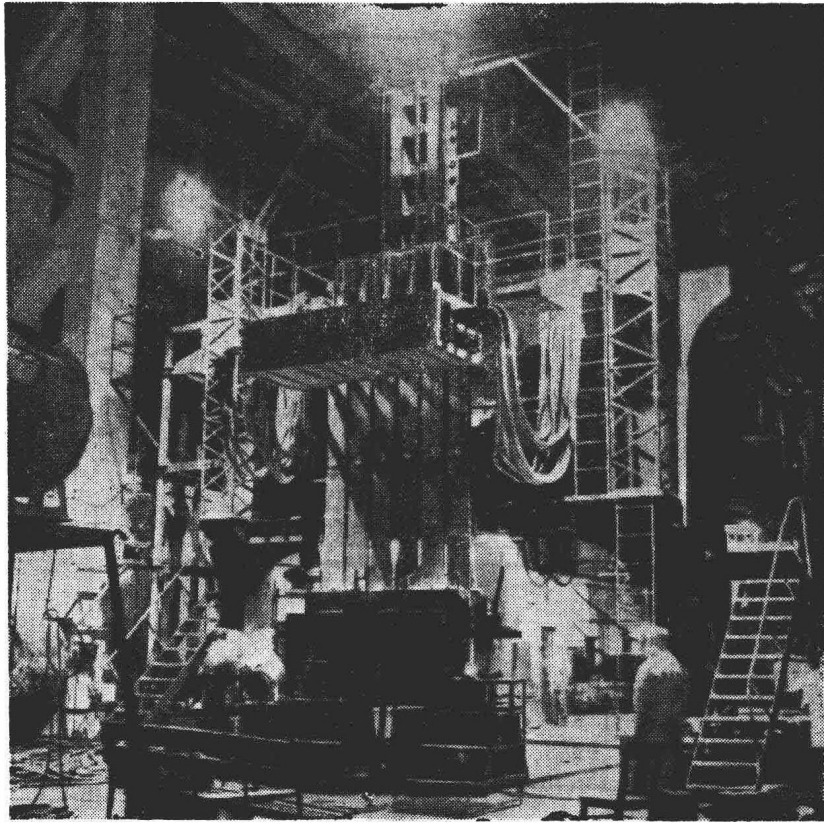


图11.模拟件的焊接

c) 焊后质量检查:

焊后表面成型良好见图12。

试块焊后立即进炉回火以消除焊接应力，回火工艺曲线见图13。

出炉后进行超声波探伤，探伤仪器及规范见表10。

表10

仪器型号	探 头	频 率	灵 敏 度	耦 合 剂	探测方向
西德USM2	24平探头(B2SM)	2MC	AVG、 $\phi 2$ (mm)	机油	垂直于焊缝

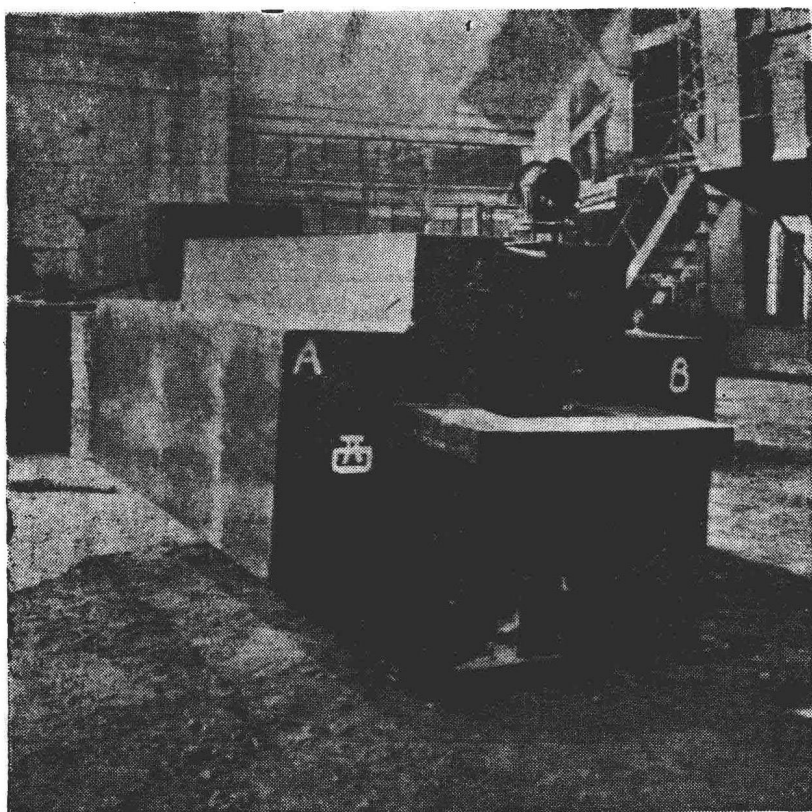


图12.焊成的模拟件

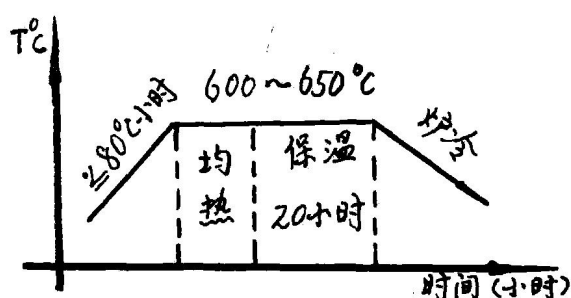


图13.回火工艺曲线

在焊接接头中未发现缺陷。

2. 熔焊接头的质量:

试块焊后, 模拟产品条件锻造及热处理, 取样进行化学分析, 金相及机械性能等理化检验(详见“核电站大锻件(压力壳接管段)模拟件熔焊接头性能研究”)。

a) 熔焊接头的内部质量:

超声波探伤后, 将2米模拟件的熔焊接头, 全部切成 $20 \times 200 \times 400\text{mm}$ 试片, 试片进行磁粉探伤, 酸蚀检查, 加工成近2000个机械性能试样后, 再进行酸蚀检查, 机械性能试验后再检查断口, 在熔焊接头中没有发现任何缺陷。