

水电站金属结构安装 经验选编

水利电力部科学技术委员会 水利电力部电力基建司

水利电力出版社

水电站金属结构安装 经验选编

水利电力部科学技术委员会
水利电力部电力基建司

水利电力出版社

内 容 提 要

本书是1978年水利电力部召开的全国水机电安装技术经验交流会的经验选编之三。内容包括三梁叉管、月牙形叉管、球壳叉管的制造,某些特殊条件的钢管安装,CO₂气体保护自动焊,高压弧形闸门的制造、安装等。

本书可供从事水电站金属结构制造、安装、运行工人和技术人员参考。

水电站金属结构安装经验选编

水利电力部科学技术委员会

水利电力部电力基建司

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 6 $\frac{3}{4}$ 印张 150,000 字

1979年6月第一版 1979年6月北京第一次印刷

印数 00001—6940 册 每册 0.60 元

书号 15143·3480

前 言

为了贯彻华主席和党中央提出的抓纲治国的战略决策，加快水电建设速度，提高水电机电安装质量和技术水平，进一步促进群众性的技术革新运动，水利电力部于1978年元月召开了全国水电机电安装技术经验交流会。会议交流了许多好的经验，并确定组织安装经验选编小组，在交流会提供有关资料的基础上，将部分比较成熟的经验编写成4本选编，包括：

- (1) 《水轮机安装经验选编》；
- (2) 《水轮发电机安装经验选编》；
- (3) 《水电站金属结构安装经验选编》；
- (4) 《水电站电气设备安装经验选编》。

选编内容主要是近年来我国安装各种机电设备的结构特点、安装工艺、施工工具以及在安装、运行中出现的问题和解决方法，供水电安装、检修、运行的广大工人和技术人员在工作中参考。

《水电站金属结构安装经验选编》由邱友元、陈勇等同志负责编写。在编写过程中，得到很多单位的支持和帮助，在此表示感谢。由于我们水平有限，难免有错误和不足之处，希广大读者给予批评指正。

编 者

1979年2月

目 录

前言

一、三梁叉管的制造·····	1
二、月牙形内加强肋叉管的制造·····	10
三、球壳叉管的制造·····	15
四、坝内式压力钢管的安装·····	19
五、竖井钢管的安装·····	23
六、预留槽压力钢管安装的几项措施·····	28
七、CO ₂ 气体保护自动焊·····	32
八、自动碳弧气刨机·····	44
九、高压弧形闸门的制造·····	50
十、高压弧形闸门制造工艺·····	64
十一、高压弧形闸门安装·····	72
十二、水工金属结构的涂料·····	98

一、三梁叉管的制造

某水电站的压力钢管上装有3个三梁式叉管，外侧回填混凝土，埋在岩石隧洞内。叉管的设计水头为400米（包括水锤升压）。叉管的主管和支管都是用28毫米厚的16Mn普通低合金钢钢板制成。叉管上的U型梁和上、下连接柱是用20MnSi锻件加工的。

叉管的分叉角为 60° ，主管和支管都是锥形管。在主管和支管的分叉连接处用3根U型加固梁和上、下连接柱把主管、支管连成一个整体。3根U型梁和上、下连接柱构成叉管的骨架，承受叉管管壁开孔区域内不平衡的内水压力所产生的弯曲应力。

三梁叉管的结构见图1-1，尺寸见表1-1。

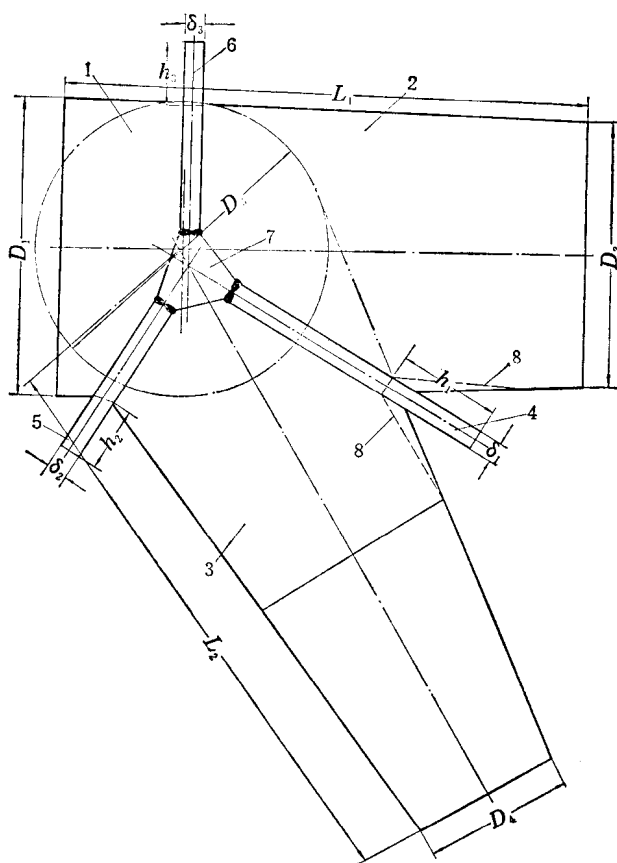


图 1-1 三梁叉管结构

1—主管前锥管；2—主管后锥管；3—支管；4— K_1 加固梁；5— K_2 加固梁；6— K_3 加固梁；
7—连接柱；8—导流板

表 1-1

三 梁 叉 管 尺 寸 表

叉 管 编 号			1	2	3
锥 管	主 锥 管	进口内径 D_1 (毫米)	3400	3000	2400
		出口内径 D_2 (毫米)	3000	2400	1600
		锥管长度 L_1 (毫米)	6000	7500	10000
	支 锥 管	内切圆直径 D_3 (毫米)	3305	2886	2238
		出口内径 D_4 (毫米)	1700	1700	1700
		锥管长度 L_2 (毫米)	7150	5300	2450
加 固 梁	K_1 梁	厚度 δ_1 (毫米)	230	200	180
		腰高 h_1 (毫米)	1200	1000	800
		重量(吨)	11.5	8	4.7
	K_2 梁	厚度 δ_2 (毫米)	230	170	150
		腰高 h_2 (毫米)	800	700	700
		重量(吨)	7.2	4.25	3
	K_3 梁	厚度 δ_3 (毫米)	230	170	150
		腰高 h_3 (毫米)	832	731	731
		重量(吨)	7.4	5	3.2
连 接 柱		高度(毫米)	533	619	564
		重量(吨)	1.4	1.15	0.73
叉管最大运输尺寸(长×高×宽)(毫米)			5800×4100×4200	4400×3960×5500	3900×4400×3223
叉管最大运输重量(吨)			38.5	32	19

在叉管选型时,考虑到这种三梁式的叉管在设计、制造等方面存在着一些缺点,如设计计算的应力值和实测结果相差较大;结构笨重;3根U型加固梁的尺寸较大;加工比较困难;结构比较复杂;加固梁和管壁厚度相差很大,焊接时容易开裂,焊后还要作整体热处理,消除焊接应力等。因此,这种叉管并不是十分理想的。由于三梁叉管在国内、外使用的很多,有一定的经验可供参考;又因这个电站的叉管是埋于岩体中,与岩石共同承受内水压力,可以做到安全可靠,而材料供应和加工问题经过努力也是可以得到解决,因此,采用了三梁叉管。

叉管上的3根U型加固梁和上、下连接柱为20MnSi的锻件,经加工后,分件运至工地。主管和支管是用厚28毫米的16Mn普通低合金钢板加工的。整个叉管是在工地组装、焊接和热处理的。

叉管的组装,考虑了两种施工方法:一是先将3根U型加固梁和上、下连接柱按规定的尺寸焊成骨架,再把主管和支管向骨架上拼接;另一种组装方法是把主管和支管各拼成整体,把3根U型加固梁往各管口处拼装,然后再组成叉管。经过比较,决定采用第一种施工方法。因为3根U型加固梁和上、下连接柱连成骨架以后,梁和柱的焊接变形可以经过处理而保持叉管的分叉角和其他尺寸正确。如采用第二种组装方法,把各根U型梁分别焊到各管口上时,很难使梁和连接柱对接,而且梁和另一管口也不易对拢,使3个锥管相互位置不对,因此不能采用这种组装方法。具体组装次序为:把 K_1 梁放置在水平位置与上、下连接柱连好,用外加的拉板把梁和柱连成一体。然后,将 K_1 梁吊起竖立在平台

上，再与 K_2 、 K_3 梁相接，检查尺寸正确后，焊接3根U型加固梁和上、下连接柱的焊缝，最后将主管、支管和骨架连接，焊接管壁和梁的接缝。

U型加固梁和连接柱焊接前后，测量尺寸的部位见图1-2。测量结果见表1-2及表1-3。

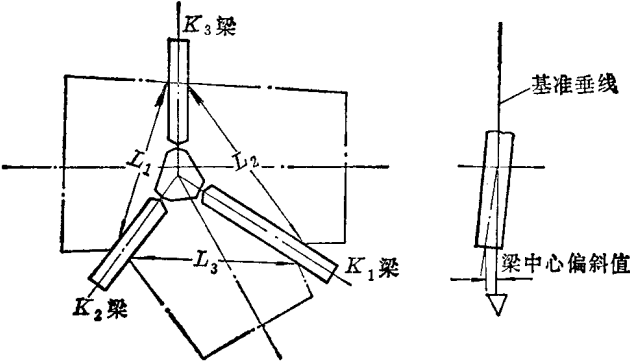


图 1-2 叉管梁、柱的组装尺寸测量

表 1-2 叉管尺寸测量表 (毫米)

叉管号	部位	计算值	焊接前	焊接后
1	L_1	3485.4	3483	3472
	L_2	4124.8	4122	4110
	L_3	3330.5	3330	3330
2	L_1	3052.7	3055	3048
	L_2	3593	3597	3590
	L_3	2910.8	2912	2907
3	L_1	2375.7	2376	2378
	L_2	2798.4	2800	2799
	L_3	2267.7	2270	2265

表 1-3 加强梁偏差值 (毫米)

叉管号	加强梁号	偏差方向	偏差数值
1	K_1	偏 左	2
	K_2	偏 左	2
	K_3	偏 右	1
2	K_1	偏 左	5
	K_2	偏 左	2
	K_3	偏 右	2
3	K_1	偏 左	4
	K_2	偏 右	1
	K_3	偏 左	2

叉管焊接工作可分为三部分：3个锥管的环缝、纵缝的焊接；U型加固梁和上、下连接柱的焊接；U型加固梁和3个锥管管壁的焊接。全部焊接采用手工电弧焊。焊条用结507低氢型碱性焊条，直径为4毫米。焊条在使用前，按规定经250~300℃烘干3小时以上，然后放在150℃的保温箱内存放，随用随取。如焊条取出箱外过久未用完，则需重新干燥。焊接电源采用直流反接。由于3个叉管都是在冬季严寒季节焊接，在叉管焊接场上搭有防风防雨棚，并在棚内用煤炉加热，提高气温。

3个锥管本身的纵缝和环缝的焊接与普通钢管焊接相同。

U型加固梁和上、下连接柱的接缝，特点是坡口尺寸较大，填充的金属量多，焊缝很集中，要求各加强梁之间的尺寸保持不变或少变。对梁和柱的焊缝坡口作了两种方案的比较。图1-3为这两种坡口的型式，图中(a)为一些水电站大型水轮机的转轮下环对接焊缝的坡口，这种坡口的钝边比较单薄，焊接时容易过热烧穿，如将钝边加厚，又难以焊透，并

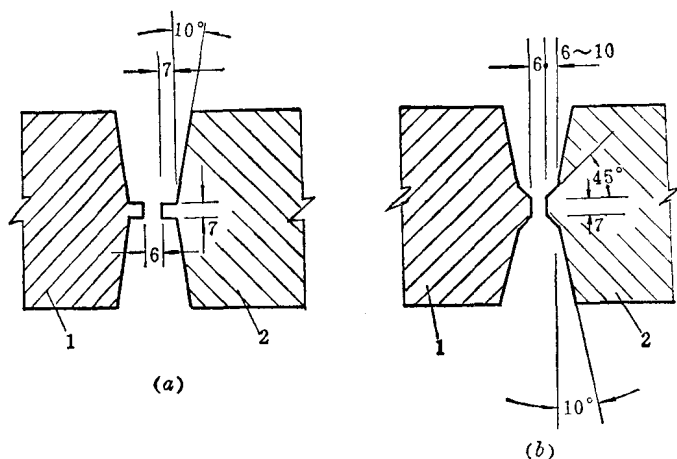


图 1-3 U型梁和连接柱的焊缝坡口
1—连接柱；2—U型梁

增加背缝的清根工作量。又因钝边和坡口侧面交接处为直线相接，转角处电弧不能到达，容易产生气孔、夹渣等缺陷。图中(b)的坡口则可避免这些缺点，并在同样的条件下可以减少填充的金属量，所以采用了图中(b)的坡口。为了使骨架在焊接时不变形和少变形，要求每一根U型梁和上、下连接柱的焊缝同时焊接，正、反面同时焊接，要求4名焊工使用的焊条、焊接电流、焊接速度尽量一致，焊时还要使整条接缝一次焊完，中途不应中断。焊接时因气温较低，除了使焊接工作完全在保温棚内进行外，还要在焊接前用氧气乙炔火焰将坡口两侧烘烤加热，一方面提高焊缝的热量，另一方面可以清除坡口附近的水分、铁锈等杂物，使焊缝保持干净。焊接时是采用上、下两层同时施焊，都用立焊。焊接次序是先焊 K_1 梁和上、下连接柱的焊缝，然后焊 K_2 梁，最后焊 K_3 梁。每一根U型梁和连接柱焊接时，先由一名焊工焊接，焊完第二层后停下，用碳弧气刨作背缝清根，把背缝也焊到同样的高度后，才开始两面同时焊。U型梁和连接柱的接缝长度为400~500毫米，每一层焊缝焊接时，都用分段后退焊，当焊第一、二层时，因坡口较窄，可用全宽运条，第三层以后，则采用多道焊接，即在同一层内，由两侧向中间排列施焊，每一层的堆焊厚度不宜超过4毫米。由于采用立焊位置，故第一、二层焊接电流用120~130安，其他各层可用140~160安，要求4名焊工使用的电流一致，相差不大于10安，在每台焊机上都装有电流表监视，4人的焊接速度要尽量接近。为了监视每根梁在焊接时变形情况，在梁与梁之间焊有观测杆，随时检查梁在焊接时的变形情况，并可根据变形的方向和数值，调整焊接的次序，使变形减小。

U型加固梁与管壁焊接特点是厚薄相差悬殊(为230:28毫米)，角焊缝的角度变化不相等，而且不对称，这给焊接工作造成了困难。除了按以上梁和连接柱的有关方法进行焊接外，对焊接次序作了变动，变为先焊支管与 K_1 、 K_2 梁相接的接缝，其次焊主管的下游锥管段与 K_1 、 K_3 的接缝，最后焊主管的上游锥管段与 K_2 、 K_3 梁的接缝。在每一个管口和相接的两根梁的整条焊缝上，按焊接位置分为四个区，左、右侧为立焊区，上部为平焊

区，下部为仰焊区。焊时先焊上、下两区段，因为这两区段的焊缝长度较大，特别是仰焊部位，焊接速度要慢一些，待这两区段焊完一定长度后便可在这四个区段内同时施焊。各区段内都采用分段后退焊，见图1-4所示。

在第一、第三号叉管的 K_1 梁水平中心线附近出现了加强梁本身的焊接裂缝，长度约2米，裂缝深度为20毫米，如图1-5所示。裂缝的出现是在外侧焊缝全部焊完，内侧焊缝经碳弧气刨清根处理后，即将全部焊完情况下发生的。根据裂缝产生部位和焊接施工情况，分析裂缝产生的原因：

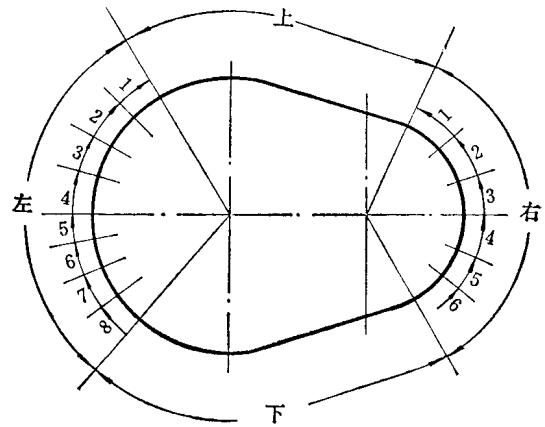


图 1-4 U型梁与管壁的焊缝分段

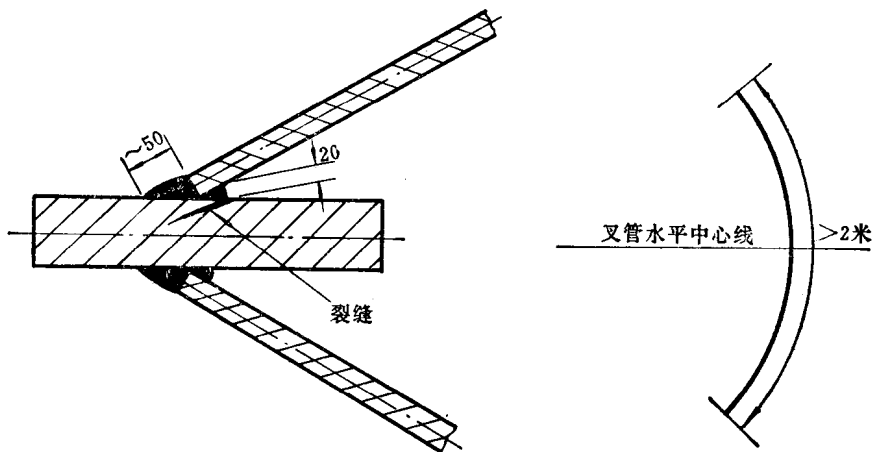


图 1-5 U型梁的焊接裂缝

(1) 由于U型梁与管壁厚度相差很大，U型梁两侧焊缝较集中， K_1 梁与管壁在水平中心线附近夹角又最小，使内侧焊缝和外侧焊缝熔化金属量相差较多，焊后熔化金属收缩使 K_1 梁在厚度方向受拉，产生层状撕裂；

(2) 组装应力比较大；

(3) K_1 梁锻件质量不良；

(4) 焊接时气温偏低，只有10℃左右。

裂缝的处理是用碳弧气刨将裂缝刨去，然后补焊。

参加叉管焊接的人数、焊接时间和焊条用量见表1-4。

叉管是一个结构复杂的焊接构件，其焊缝集中，焊接后经用钻孔释放应力的方法测得焊缝附近的纵向应力达4170公斤/厘米²，横向应力为2320公斤/厘米²，应力是比较高的；对这样大直径的三梁叉管还是第一次用在这样的高水头电站上。因此，要求将叉管焊接后

表 1-4

叉管号	U型梁与连接柱的焊接			U型梁与管壁的焊接		
	参加焊接的人数 (人)	焊接持续时间 (小时)	焊条用量 (公斤)	参加焊接的人数 (人)	焊接持续时间 (小时)	焊条用量 (公斤)
1	8	57	450	8	152	650
2	8	49	350	7~9	116	500
3	8	36	250	9~10	146	400

作整体热处理, 消除焊接应力, 增加焊缝热影响区内的韧性, 提高叉管的安全度。

退火炉的结构见图1-6。炉膛尺寸是按尺寸最大的第一号叉管外形尺寸来选定的, 高

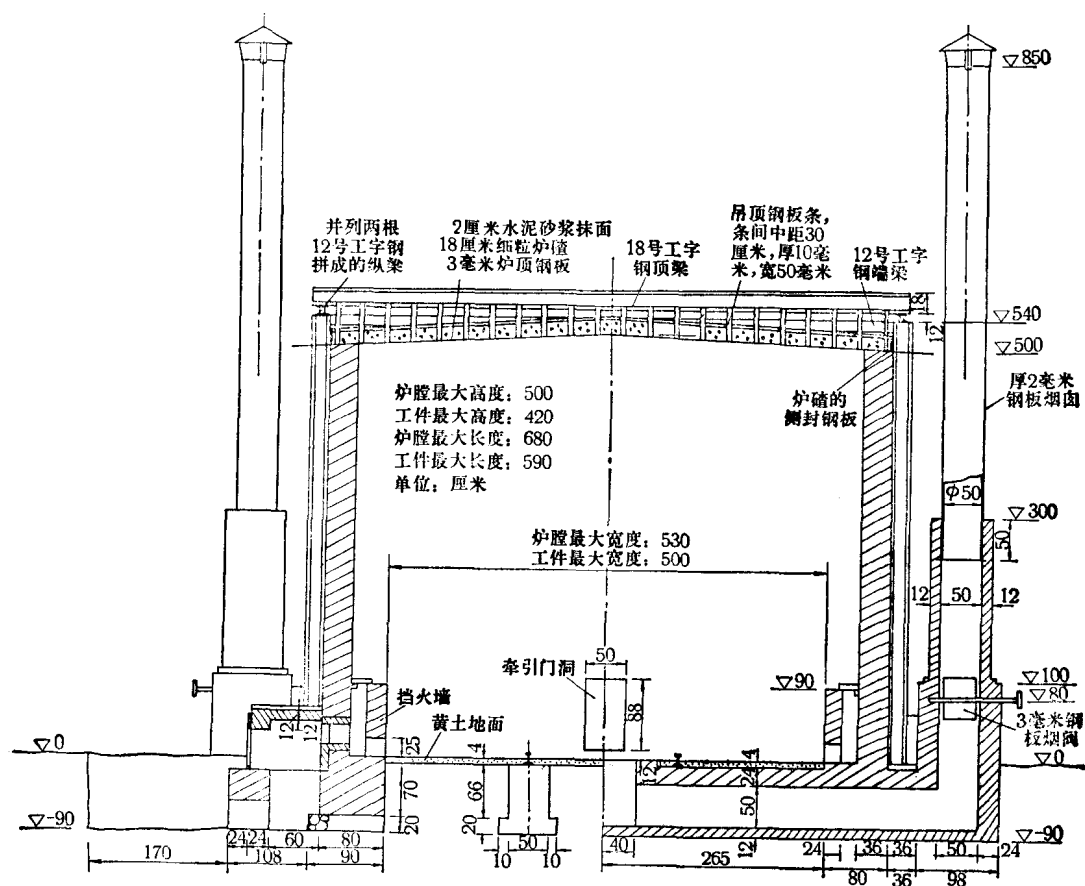


图 1-6 退火炉结构

为5米, 宽为5.3米, 长为6.8米。四周边墙用浆砌块石为基础, 用普通红砖砌筑, 内壁敷抹厚2厘米的细矿渣粘土保护层, 墙厚36厘米, 先砌筑两边侧墙和后山墙, 等叉管运入炉膛后再砌前山墙。侧墙和山墙外均各有4根工字钢为立柱, 以支持炉顶和保持墙体的稳定。在侧墙的4根立柱上铺上由2根工字钢拼成的纵梁, 纵梁上再架上8根横梁为炉顶骨架。横梁上都焊有吊顶用的钢板条, 在钢板条下焊上3毫米厚的炉顶钢板。在炉顶钢板上

铺有18厘米厚的经筛选过的细炉碴为保温层，在保温层外再加矿碴棉，用石棉瓦覆盖。在两侧墙外各有8个加热炉，相邻两个炉子的火焰经同一个进火口和挡火墙进入炉膛内。燃料用块煤。烟道口设在退火炉膛中间的地下，经两个地下烟道把烟引到侧墙外的两个烟囱排出。烟囱上装有阀门，控制排烟量。加热炉装有鼓风机送风。除加热炉的炉膛、炉顶、进火口和挡火墙用耐火砖砌成外，其他均用普通红砖砌成。退火炉的结构见图1-6。炉子修筑好后，按图1-7所示的烘炉加热过程曲线，烘炉时间共用74小时，耗煤12吨。

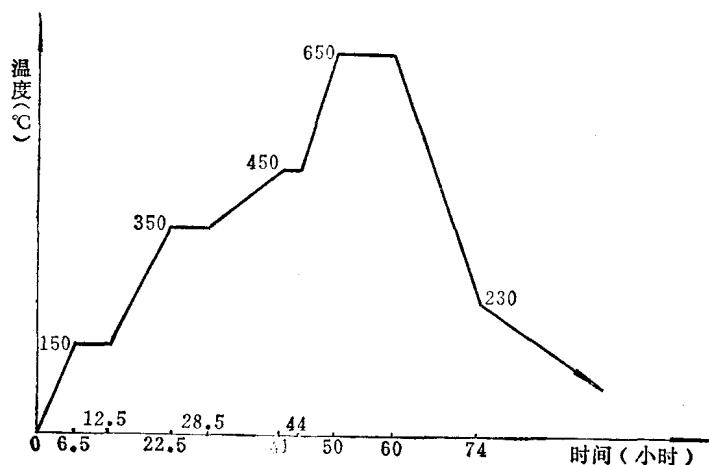


图 1-7 烘炉加热过程曲线

叉管退火工艺过程包括升温、降温的速度、保温时间、最高退火温度、炉温的测量和控制以及出炉温度等参数的计算和确定。

因叉管U型梁和管壁厚度相差很大，采用的升温 and 降温速度不宜过高。一般工件热处理升温 and 降温速度 (V) 可用下式计算：

$$V = \frac{200 \times 25}{\delta} \text{ (} ^\circ\text{C/小时)} \text{}$$

式中 δ ——结构的最大厚度 (毫米)。

以U型梁的厚度 230~150 毫米代入上式，计算得升温、降温速度为 21.8~33.3 $^\circ\text{C/小时}$ ，实际操作时是按30 $^\circ\text{C/小时}$ 来控制的。

保温时间 (T) 一般按下式计算：

$$T = \frac{\delta}{25} \text{ (小时)} \text{}$$

式中 δ ——结构的最大厚度 (毫米)。

以U型梁的厚度230~150毫米代入上式得出其保温时间为6~9.2小时，决定按9小时来控制。

焊接件热处理消除焊接应力的最高温度，一般规定为650 $^\circ\text{C}$ 左右。因叉管是个薄壁构件，温度过高时，由自重产生的变形就越大。为了减少变形，决定退火的最高温度为560~580 $^\circ\text{C}$ 。

因炉膛尺寸较大，炉内温度要求不差20 $^\circ\text{C}$ ，每15分钟用热电偶温度计巡回检测一次。

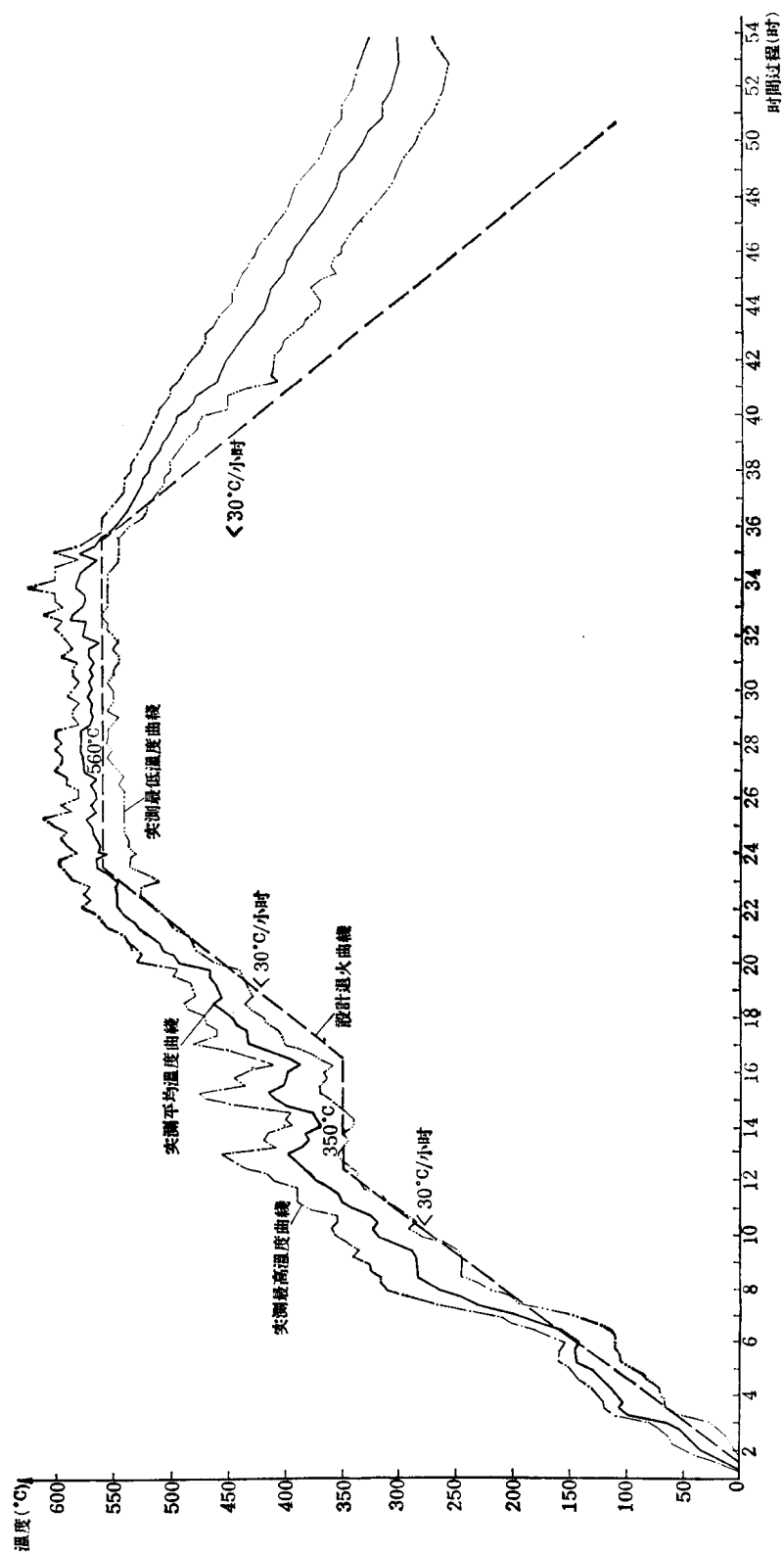


图 1-8 叉管退火曲线

实际操作时，发现各处温差相差过大，特别是炉顶温度较高，温差往往达到50℃。

工件出炉时的温度，一般规定应低于350℃。因叉管退火后需拆除前炉门的山墙才能运出，因此，实际叉管的出炉温度是很低的。

叉管的退火热处理升温、降温的过程曲线见图1-8。每个叉管退火耗用块煤约6吨。

为了再一次检验叉管的设计、制造的质量，在三个叉管热处理完毕后，抽出第2号叉管作水压试验，即在叉管的主、支管的3个管口焊上封头，叉管内加水压，测量U型加固梁和管壁的应力值，以检查叉管在工作时是否安全可靠。叉管的 最大设计水头 （包括水锤升值）为400米，考虑其中的15%由周围的混凝土、岩石承受，叉管本体承受85%（即340米水头）。最高的试验压力值取叉管本体最大设计压力的1.25倍（即 $340 \times 1.25 = 425$ 米水头）。试压时，经过4次升压减压达到试验压力值， $0 \rightarrow 100 \rightarrow 0$ ， $0 \rightarrow 200 \rightarrow 0$ ， $0 \rightarrow 300 \rightarrow 0$ ， $0 \rightarrow 340 \rightarrow 0$ ， $0 \rightarrow 425 \rightarrow 0$ 。在设计水头下，测得U型加固梁的最大应力为1745公斤/厘米²，U型梁与管壁连接焊缝附近测得应力值为2899公斤/厘米²。焊缝附近应力较高，已接近16Mn钢的屈服点。但因叉管深埋于山体之中，与周围的混凝土、岩石联合作用，共同承受其内水压力。叉管在正常工作时，应力的分布将会有所改善，不会影响其安全。

这电站的3个三梁式叉管投入运行以来，经过6年多的使用，证明叉管的设计、制造和安装质量是好的。

（本篇由四川省电力局水电机电安装工程处提供资料编写而成）

二、月牙形内加强肋叉管的制造

某水电站装机3台。每台3.4万千瓦，共10.2万千瓦，为隧洞引水式。隧洞的全长为5890多米，隧洞末端设调压井，调压井下为压力钢管。钢管主管内径为5米，长度为331.77米，钢管为埋藏式，埋于岩石之中。主管末端装有两个月牙形内加强肋叉管，把水引入厂房3台机组。钢管末端的最大工作水头为185米（包括水锤升值）。

象这样的管径、水头的叉管，以往多用三梁叉管，用3根U形加固梁来承受叉管开口处的不平衡内水压力。但三梁叉管本身存在着一些缺点：结构不合理、3根U形梁主要承受弯曲应力，没有充分发挥出材料的抗拉性能；应力的分析计算繁琐，计算值较实测结果相差较大；加工制造工艺复杂，3根U形梁需用大型钢锭用大型锻造水压机加工，再经机械加工焊接成梁；叉管在工地组装后，外形尺寸很大，又很重，起吊运输工具难于解决，特别是装在隧洞内的三梁叉管，必须把运输叉管的道路桥梁和交通运输洞的尺寸加大，才能通过。经过反复对比，未采用三梁叉管，而用月牙形内加强肋叉管。月牙形内加强肋叉管是由三梁叉管不断改进和逐步演变而成的，其特点是将加强肋板安放在叉管管壁内。当内水压力作用时，肋板两侧锥形管壳开口处的不平衡内力的合力正好作用在肋板上，使肋板承受均匀的拉应力。设计时，只要求出每一截面的合力中心作为肋板的形心位置，就可以得出一个月牙形的内加强肋，肋板的厚度则可按等强度要求，用第四强度理论计算。这种叉管显然是比三梁叉管合理，减小外形尺寸和节约用料。经模型水力试验证明，在整个钢管道上，使每一叉管的主管上设有一定的倒锥，主、支管的连接过渡是平缓的，肋板与管内水流的流向交角小一些，这样，整个叉管的流态是好的，水头损失也是比较小的。模型试验还证实，月牙形内加强肋叉管比三梁叉管安全度高，爆破压力为完整圆筒的90%以上。

这个电站的2个叉管中，2号叉管尺寸较大，是我国已制成的最大管径的月牙形内加强肋叉管，结构见图2-1。3号叉管尺寸较小，与2号叉管相似。叉管是由月牙形内加强肋板、主锥管和两个支管锥管这四大件和两块导流板组成的。主锥管进口内径为5米，主、支锥管相交处的公切圆球的半径为2791毫米，叉管处的最大静水头为146米，计入水锤升值后的最大工作水头为185米，外形尺寸为 $5.66 \times 8.50 \times 8.20$ 米，重达40吨。月牙形内加强肋板是用厚为80毫米的16Mn普通低合金钢板分块焊成。主、支锥管用厚为25毫米的16Mn普通低合金钢钢板制成。主锥管见图2-2；支锥管(1)见图2-3；支锥管(2)见图2-4；月牙形内加强肋板见图2-5。焊接材料根据16Mn普通低合金钢来选用。焊条用结507型低氢型碱性焊条，埋弧自动焊的焊丝用H08A、H08Mn，焊剂采用431高锰高硅低氟型的焊剂。这些焊接材料在使用前都先进行检验，质量合格后才能使用。

叉管是在工厂加工制造的，工厂离工地尚有一段汽车运输距离。叉管制造好后，外形尺寸很大，必须分件运输，到工地再组装。在车间下料之前，要事先把分节分块搞好，否

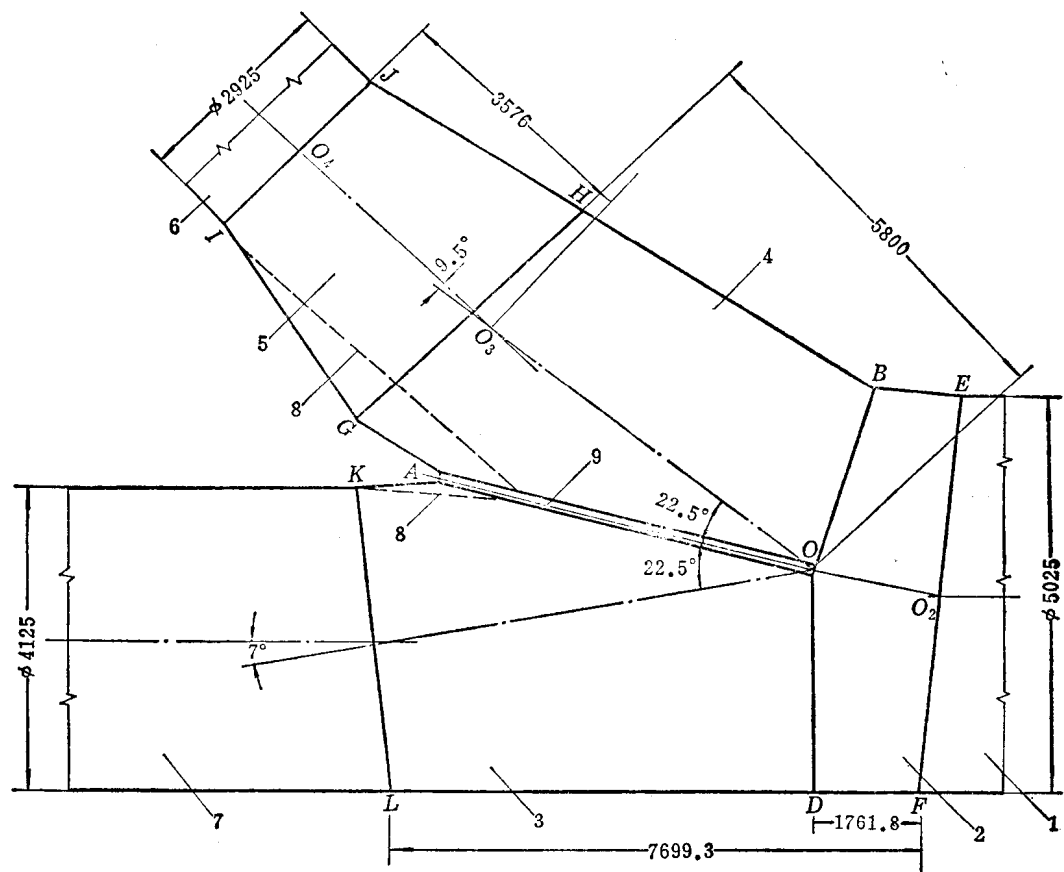


图 2-1 月牙形内加强肋叉管

1—主管；2—主锥管；3—支管锥管(1)；4—支管锥管(2)；5—支管锥管(3)；6、7—支管；8—导流板；9—月牙形内加强肋

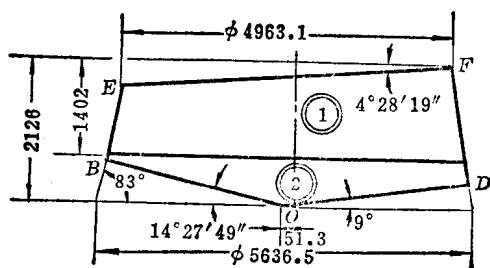


图 2-2 主锥管

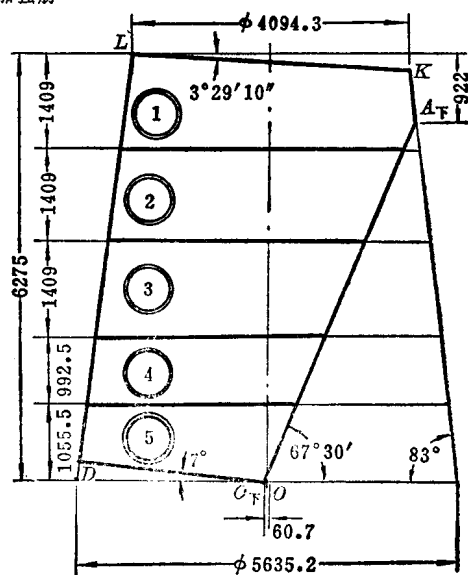


图 2-3 支锥管(1)

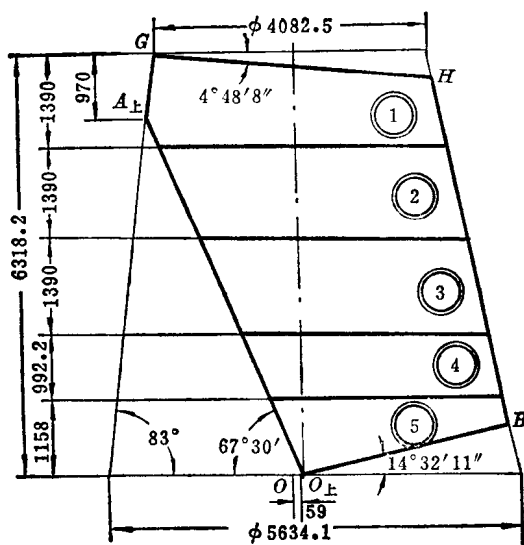


图 2-4 支锥管 (2)

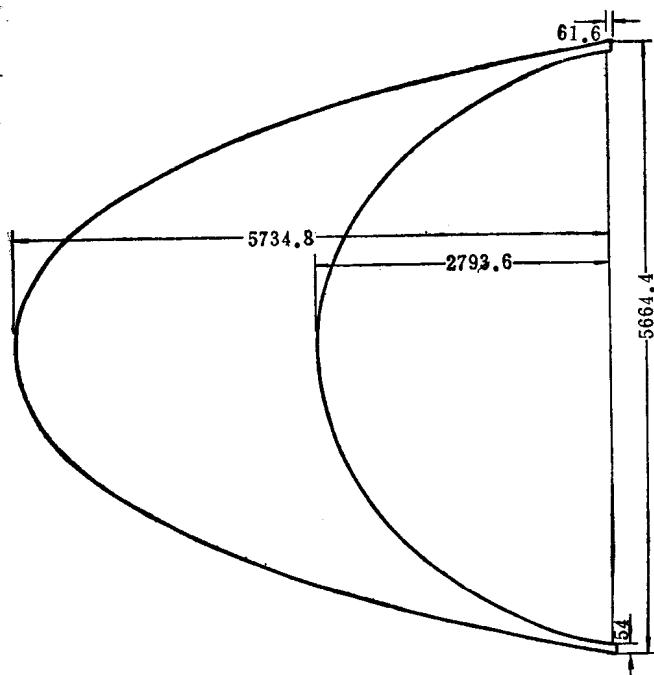


图 2-5 月牙形内加强肋板

管壁先与肋板焊好, 其他各块支锥管也同时组装、热处理, 然后拆开分件运输。这样便把运输尺寸缩小为 $3.80 \times 6.70 \times 5.66$ 米, 重量也减为15吨。分缝情况见图2-6, 图中 $A-A$, $B-B$ 为分缝线。

肋板下料时采取纵向拼接, 把焊缝布置为垂直方向, 可以减少材料用量和焊接量。焊

则叉管的热处理、吊装和运输都受到影响, 特别是工地的交通运输洞尺寸只有6.2米直径, 尺寸过大将会运不过去。此外, 分块时还要使每一件都要有足够的刚度, 以减少起吊、运输的变形。肋板上的主要焊缝, 都要在车间焊好, 尽量减少工地的焊接工作量; 还要使每一条焊缝都能互相错开一定的距离。根据以上各项要求, 我们发现一些叉管分块方法都不适当, 例如有的叉管是分为主锥管、支锥管和月牙形内加强肋板四大件运到隧洞内去组装、焊接和热处理; 有的把叉管全部组装焊接和热处理后再沿着叉管中心水平面分为两半, 运入隧洞后再对接起来, 虽然这些对接缝都是等厚度, 焊接比较方便, 但在叉管上保留一圈焊接接缝, 特别是在肋板上有一条焊缝横腰穿过, 这是非常不利的, 而且这样分块只是把高度减小一半, 长度和宽度都没有减小; 也有的叉管把月牙形内加强肋板与主锥管和另一个支锥管焊成整体热处理, 然后运到隧洞内把另一个支锥管再焊接起来, 这些分块方法我们认为都不适当, 经研究考虑采用了“管壁错缝”的分缝法。这种分缝法就是把月牙形内加强肋板两侧的管壁按钢管错缝的要求, 把大小不同的两支锥管