

# 热处理工艺

## 全书

主编 谢绍自

RECHULIGONGYI  
QUANSHU

山西人民出版社

## 第十七章 大型锻铸件的热处理

大型锻件通常指需用 1000t 或更大吨位水压机生产的锻件。它们大多是国民经济与国防建设所必需的各种大型关键设备的主要基础零部件，如：大型汽轮机的发电机转子，大型轧机的工作辊与支承辊，大型高压容器的筒体与封头，大型舰船的主轴、尾轴与舵杆，大型火炮的身管等。这些锻件都是由钢锭直接锻成的，因而在热处理中必须考虑冶炼、铸锭、锻造等过程对锻件内部质量的影响，主要影响因素是：

- 1) 化学成分不均匀与多种冶金缺陷的存在。
- 2) 晶粒粗大且很不均匀。
- 3) 较多的气体与夹杂物。
- 4) 较大的锻造应力和热处理应力。

一般说，锻件的尺寸和重量愈大，钢中的合金成分含量愈高，这些问题就愈严重。

大型锻件在生产中往往要进行好几次热处理，其中在锻造成形后立即进行的热处理称为锻后热处理，或预备热处理；经切削加工后进行的热处理称为最终热处理。

### 第一节 大型锻件的锻后热处理

大型锻件锻后热处理的目的是，防止白点与氢脆、改善锻件内部组织、消除锻造应力、降低硬度提高锻件的切削加工性、细化晶粒提高锻件的超声波探伤性能、使锻件获得良好的力学性能或为后续热处理过程准备良好的组织条件。对于不再进行最终热处理的锻件，通过锻后热处理必须保证锻件达到技术条件规定的组织与性能。

## 一、大锻件中的白点与氢脆

白点是钢中的一种内部裂纹，在锻件的纵向断裂面上呈现为边缘清晰的圆形或椭圆形银白色斑点；在横向低倍试片上为发纹状小裂纹，长度数毫米，最大数十毫米。见图 17-1a、b。在扫描电镜下，白点的微观形貌为由撕裂岭和解理小平面构成的穿晶准解理，见图 17-2。

白点的出现将导致锻件横向性能（主要是塑性、韧性）急剧降低并成为最危险的断裂源，严重降低零件的使用性能与寿命。因而，一旦发现白点，锻件即应报废或改锻为较小尺寸的锻件。

白点是在钢中的氢与应力联合作用下产生的。白点的形成温度约为 200 ~ 50℃，基本上不随钢的化学成分而变。白点的形成需要孕育期，使钢中的氢形成足够程度的偏聚和使金属脆化。白点多形核于晶界、亚晶界、夹杂物表面及其他晶体缺陷处。

为防止白点的形成，必须将钢中残留氢限制在钢的无白点极限含氢量以下。钢的无白点极限含氢量受控于钢的白点敏感性并与钢的化学成分、组织状态等因素有关。Ni、Mn、Ni-Cr 等合金元素使钢的白点敏感性增高；Zr、Nb、Mo、W、V、Ti、单独存在的 Cr 及稀土元素 Ce 等可使钢的白点敏感性有所下降。在各种组织中，白点敏感性下降的顺序是：珠光体、贝氏体、马氏体；混合组织比单一组织更易出现白点。细化晶粒、碳化物质点的细化与片状化、位错密度增加等因素可加大结构缺陷对氢的捕获作用，可减小钢的白点敏感性。

按照白点敏感性的不同，可将生产中常用的钢号分为以下四组：

第一组 白点敏感性较低的碳素结构钢和低碳低合金钢，如 25、15CrMo、20CrMo、20MnMo 等，其无白点极限含氢量可取为  $3.5 \times 10^{-6}$ 。

第二组 白点敏感性中等的中碳低合金钢，如 40Cr、35CrMo、34CrMo1A 等，其无白点极限含氢量可取为  $3 \times 10^{-6}$ 。

第三组 白点敏感性较高的中、高碳 Ni-Cr 合金钢，如 40CrNi、34CrNi1Mo、5CrNiMo、70Cr3Mo 与 9Cr2Mo 等，其无白点极限含氢量可取为  $2.7 \times 10^{-6}$ 。

第四组 白点敏感性很高的高镍合金钢，如 12CrNi3MoV、18Cr2Ni4WA、34CrNi3Mo、26Cr2Ni4MoV 等，其无白点极限含氢量可取为  $1.8 \times 10^{-6}$ 。

还应特别注意，少量残留奥氏体的出现可急剧增大钢的白点敏感性。因为，残

留奥氏体不仅阻碍氢的扩散逸出，而且有吸引和储存氢的作用，使氢在钢中局部地区高度富集。随后，当残留奥氏体转变为马氏体时，高度富集的氢与巨大的相变应力相结合，形成白点的危险性便大大增加了。

白点所造成的脆性，随钢在加载时应变速率的升高而急剧增加，这种现象称为钢的第一类氢脆。

当钢中的氢不足以形成白点时，钢的塑性、韧性亦随钢中含氢量的增加而降低，但下降程度随加载时应变速率的升高而减小，这一现象称为钢的第二类氢脆。随着第二类氢脆的出现，钢的塑性指标可减少一半以上，并在持久加载时导致钢的延迟断裂。因而对于多种重要大锻件必须考虑第二类氢脆所造成的危害。为避免第二类氢脆，重要大锻件中的剩余氢应降至  $1 \sim 1.5 \times 10^{-6}$  以下。

## 二、大锻件的扩氢计算

大型锻件用钢中的原始含氢量因钢的冶炼方法不同而异。据多年统计资料，在正常情况下的含氢量是：

碱性平炉钢	$5.5 \sim 6.5 \times 10^{-6}$
碱性电炉钢	$4 \sim 5 \times 10^{-6}$
酸性平炉钢	$3.5 \sim 4.5 \times 10^{-6}$
经一次真空处理后	$2 \sim 3 \times 10^{-6}$
经两次真空处理后	$1 \sim 1.5 \times 10^{-6}$ 或更低。

不难看出，只有经过两次真空处理之后，大型锻件用钢方能完全免除白点与氢脆的危害。无以上条件时，为防止白点与氢脆，大型锻坯应在锻后热处理中，通过等温退火将钢中含氢量降低至允许的数字之内。

计算时，应先确定毕氏准数与位置准数。若已知退火时间与退火温度，即可算出时间准数，然后由表 17-2 求得相应的浓度准数  $U$ ，进而算出经退火后锻件中指定部位的剩余含氢量。若已知所必须达到的浓度准数  $U$ ，即可算出为此所必需的退火时间  $\tau$ 。

## 三、大锻件的晶粒细化问题

大型锻件由于：原始钢锭尺寸较大，结晶缓慢；锻造时间长，加热次数多，而且锻造比小，变形不均匀；加热速度慢，保温时间长；某些大锻件用钢的奥氏体晶

粒遗传严重等原因，往往晶粒十分粗大而且不均匀。

表 17-1 氢在  $\alpha$ -Fe 及  $\gamma$ -Fe 中的扩散系数

温 度 /°C	扩散系数( $\text{cm}^2/\text{h}$ )	
	$\alpha$ -Fe	$\gamma$ -Fe
1500	1.43	1.90
1400	1.38	1.49
1300	1.31	1.19
1200	1.25	0.90
1100	1.19	0.684
1000	1.11	0.468
900	1.02	0.313
800	0.97	0.205
700	0.84	0.112
690	0.8295	—
660	0.798	—
650	0.7875	—
645	0.777	—
630	0.7665	—
620	0.756	—
610	0.7455	—
600	0.735	0.056
500	0.612	0.023
400	0.497	0.007
300	0.360	0.002
200	0.240	—
100	0.008	—
50	0.004	—
20	0.001	—

晶粒粗大不仅使大锻件的性能低劣、寿命下降，而且使其在作超声波探伤时出现草状波，声波信号迅速衰减，底波消失，以至无法探伤。为了提高大锻件的性能水平和改善其探伤性能，必须细化其晶粒组织。

第十七章 大型锻铸件的热处理

表 17-2 圆柱形锻件的  $B_i$ 、 $F_i$ 、 $\frac{r}{R}$  与  $U$  之间的关系

$B_i$	4		6		10		15		30	
	$r/R$	$U$	$r/R$	$U$	$r/R$	$U$	$r/R$	$U$	$r/R$	$U$
0.02	0.99931	0.99266	—	0.99563	—	0.99176	—	0.99043	—	—
0.04	0.99786	0.96237	0.99886	0.95236	0.99758	0.93678	0.99810	0.92769	0.99839	0.91186
0.06	0.98970	0.90998	0.98805	0.88792	0.98335	0.85918	0.98104	0.84133	0.97798	0.82559
0.10	0.93439	0.79640	0.91635	0.75542	0.89935	0.70956	0.88723	0.68210	0.87109	0.64907
0.20	0.69869	0.55632	0.65034	0.49689	0.59981	0.43926	0.57119	0.40740	0.54186	0.37398
0.30	0.49164	0.38697	0.43206	0.32655	0.37361	0.27301	0.34668	0.24545	0.31547	0.21751
0.40	0.34242	0.26898	0.28441	0.21460	0.23430	0.16977	0.20906	0.14788	0.18369	0.12663
0.50	0.23806	0.18095	0.18696	0.14103	0.14574	0.10559	0.12654	0.08910	0.10695	0.07373
0.60	0.16547	0.12993	0.12286	0.09268	0.09064	0.06567	0.07589	0.05368	0.06227	0.04292
0.80	0.07992	0.06275	0.05306	0.04003	0.03506	0.02540	0.02754	—	0.02111	0.01455
1.00	0.03860	0.03031	0.02291	0.01729	0.01356	0.00982	0.01000	—	0.00716	—
1.20	0.01865	0.01464	0.00900	0.00747	0.00524	0.00380	0.00363	—	0.00243	—
1.40	0.00900	0.00707	0.00427	0.00322	0.00203	0.00147	0.00132	—	—	—
1.50	0.00626	0.00491	0.00281	0.00212	0.00126	0.00092	—	—	—	—

对于大多数锻件来说，通过退火、正火、调质等处理可使大锻件中粗大的晶粒得到细化。对于奥氏体晶粒遗传比较严重的钢种（如 26Cr2Ni4MoV、34CrNi3Mo 等），往往要通过多次正火（或退火）和提高重结晶时的加热速度等方法才能使锻件的晶粒获得细化，或一定程度的细化。

#### 四、锻后热处理工艺制订原则与工艺参数

大型锻件在完成锻造工序后应立即进行锻后热处理。在制订工艺时，应遵守以下原则：

(1) 使锻件尽快地、充分地由奥氏体转变为铁素体—碳化物组织，这样作不仅有利于氢的脱溶与扩散，而且有利于晶粒的调整与细化。应根据钢的过冷奥氏体稳定性并充分考虑锻件中成分与组织不均匀性的影响，合理确定锻件的冷却速度、过冷温度及过冷保温时间等工艺参数。

(2) 通过去氢退火将锻件中的氢降至极限含氢量以下并使其分布均匀, 以免除白点、氢脆的危害。对多数大锻件来说, 这是锻后热处理的首要任务, 必须完成。去氢退火的关键工艺参数是:

(3) 退火温度通常取  $(650 \pm 10)^\circ\text{C}$ , 具体数值见表 17-3, 因退火温度与高温回火温度相近, 故有时将它们列在一起。

多数碳钢锻件和部分低合金钢锻件的锻后热处理就是最终热处理。对于这类锻件, 在锻后热处理中均需安排一次正火和回火, 以使其获得必要的组织与性能。对于含合金元素较多、性能要求较高的锻件, 尽管还要进行最终热处理, 锻后也要进行一次甚至多次重结晶, 以便改善锻件的组织与性能, 为最终热处理准备良好的组织条件和提高锻件的超声波探伤性能。

在重结晶中, 关键工艺参数是:

1) 加热速度, 在  $\approx 600^\circ\text{C}$  以下, 钢处于冷硬状态, 要限制加热速度; 在  $\approx 600^\circ\text{C}$  以上可以快些。对于尺寸较大或合金元素较多的锻件, 可在  $\approx 650^\circ\text{C}$  加一个保温台阶, 以减小锻件中的内外温差和内应力。

2) 加热温度 (见表 17-3)。

3) 在可能的情况下, 过冷温度应尽量低一些, 以使组织转变更彻底和获得更细的组织。具体数值见典型工艺曲线。

表 17-3 常用大锻件用钢的正火 (退火)、高温回火温度 ( $^\circ\text{C}$ )

钢号	正火或退火温度		高温回火温度	
	单独生产	配炉	单独去氢	考虑性能
15	900 ~ 920	880 ~ 920	620 ~ 660	580 ~ 660
25	870 ~ 890	870 ~ 900	620 ~ 660	580 ~ 660
35	860 ~ 880	850 ~ 870	620 ~ 660	580 ~ 660
45	830 ~ 860	820 ~ 850	620 ~ 660	580 ~ 660
55	810 ~ 830	810 ~ 840	820 ~ 660	580 ~ 660
40Mn	840 ~ 860		580 ~ 620	560 ~ 640
50Mn	820 ~ 840		580 ~ 620	560 ~ 640
20SiMn	910 ~ 930	900 ~ 930	630 ~ 660	560 ~ 660
35SiMn	880 ~ 900	880 ~ 920	630 ~ 660	560 ~ 660
35SiMnMo	880 ~ 900	880 ~ 920	630 ~ 660	560 ~ 660
60SiMnMo	820 ~ 840	810 ~ 840	630 ~ 660	
37SiMn2MoV	880 ~ 900	880 ~ 920	630 ~ 660	560 ~ 660
20MnMo	880 ~ 900	870 ~ 900	630 ~ 660	660 ~ 660
18MnMoNb	920 ~ 640	900 ~ 950	640 ~ 660	

第十七章 大型锻铸件的热处理

钢号	正火或退火温度		高温回火温度	
	单独生产	配炉	单独去氢	考虑性能
42MnMoV	870 ~ 890	870 ~ 900	640 ~ 670	
30CrMnSi	880 ~ 900	870 ~ 920	630 ~ 660	660 ~ 600
18CrMnTi	880 ~ 900		620 ~ 660	
15CrMo	900 ~ 920	890 ~ 920	630 ~ 660	560 ~ 660
20CrMo	890 ~ 910	880 ~ 910	630 ~ 660	560 ~ 660
30CrMo	870 ~ 890	850 ~ 900	630 ~ 660	560 ~ 600
34CrMo1A	860 ~ 380	850 ~ 900	630 ~ 660	560 ~ 660
35CrMo	880 ~ 900		630 ~ 660	560 ~ 660
42CrMo	850 ~ 870		640 ~ 660	
18CrMnMoB	880 ~ 900		680 ~ 710	
20Cr2Mn2MoA	870 ~ 890			
60CrMnMo	830 ~ 850	820 ~ 860	680 ~ 660	
24CrMoV	880 ~ 900	870 ~ 920	630 ~ 660	
30Cr2MoV	940 ~ 960		690 ~ 720	
35CrMoVA	710 ~ 920		630 ~ 660	
20Cr	880 ~ 900	870 ~ 920	630 ~ 660	560 ~ 660
40Cr	850 ~ 870	840 ~ 880	630 ~ 660	560 ~ 660
55Cr	820 ~ 840	820 ~ 850	630 ~ 660	
34CrNiMo	860 ~ 880	850 ~ 920	630 ~ 660	560 ~ 660
34CrNi2Mo	860 ~ 880	850 ~ 920	630 ~ 660	560 ~ 660
34CrNi3Mo	860 ~ 880	850 ~ 920	630 ~ 660	560 ~ 660
18Cr2Ni4WA	700 ~ 920	890 ~ 920	630 ~ 660	
20Cr2Ni4A	870 ~ 890		610 ~ 650	
35CrNiW	860 ~ 880	850 ~ 900	630 ~ 660	560 ~ 660
6CrW2Si	780 ~ 800 (退火)			
5CrMnMo	840 ~ 860	830 ~ 860	620 ~ 660	
5CrNiMo	840 ~ 860	830 ~ 860	620 ~ 660	
5CrNiW	840 ~ 860	830 ~ 860	620 ~ 660	
5CrSiMnMoV	870 ~ 890		640 ~ 660	
2Cr13	1000 ~ 1050			
3Cr13	1000 ~ 1050			
GCr15	790 ~ 810 (退火)			
GCr15SiMn	790 ~ 810 (退火)			
Cr5Mo	1000 ~ 1050	1000 ~ 1050		730 ~ 750



## 五、大锻件锻后热处理的基本工艺类型与典型工艺曲线

根据大锻件所用钢种、截面尺寸、组织性能要求及装炉情况的不同，可在生产中经常采用的大锻件锻后处理工艺分为以下十种类型。

### 第二节 大型锻件的最终热处理

大型锻件经粗加工后进行的热处理称为最终热处理，多采用淬火、正火及随后的高温回火等工艺，以达到技术条件所要求的性能，或为后续热处理过程准备良好的组织条件。

#### 一、大锻件淬火、正火时的加热

##### (一) 加热温度

为使负偏析区在加热时达到淬火或正火温度，大锻件的淬火或正火温度应取规定温度的上限。对于碳偏析比较严重的锻件，可根据不同锭节的实际化学成分，采用不同的加热温度。大锻件用钢的正火、淬火加热温度如表 17-3、表 17-4 所示。

表 17-4 常用大锻件用钢的淬火加热温度 (°C)

钢号	温度	钢号	温度
25	850 ~ 880	50Mn	800 ~ 820
35	850 ~ 870	60Mn	800 ~ 820
45	830 ~ 850	65Mn	800 ~ 820
55	800 ~ 830	35Mn2	800 ~ 850
45Mn2	810 ~ 840	35CrMnSi	850 ~ 870
50Mn2	810 ~ 840	18CrMnTi	800 ~ 870
20SiMn	880 ~ 900	15CrMo	890 ~ 910
35SiMn	860 ~ 880	20CrMo	880 ~ 900
42SiMn	840 ~ 860	30CrMo	860 ~ 880
50SiMn	820 ~ 840	34CrM01A	850 ~ 870
55Si2Mn	860 ~ 880	15CrMo	850 ~ 870
60Si2MnA	850 ~ 870	42CrMo	840 ~ 860
70Si3MnA	850 ~ 870	18CrMnMoB	870 ~ 890
35SiMnMo	870 ~ 890	20Cr2Mn2MoA	870 ~ 890

第十七章 大型锻铸件的热处理

钢号	温度	钢号	温度
42SiMnMo	850 ~ 870		800 ~ 820
60SiMnMo	830 ~ 850	34Cr3WMoV	850 ~ 860
37SiMn2MoV	850 ~ 870	30CrMn2MoB	870 ~ 890
42SiMnMoV	860 ~ 880	32Cr2MnMo	870 ~ 890
55Si2MnV	850 ~ 870	35CrMnMo	850 ~ 870
20MnMo	890 ~ 910	38CrMnNi	850 ~ 870
18MnMoNb	910 ~ 930	40CrMnMo	850 ~ 870
32MnMoVB	850 ~ 870	60CrMnMo	830 ~ 850
42MnMoV	860 ~ 880	24CrMoV	870 ~ 890
24CrMnN	870 ~ 890	30CrMoV9	850 ~ 870
30CrMnSi	850 ~ 870	30Cr2MoV	840 ~ 850
35CrMoVA	890 ~ 910	4CrW2Si	910 ~ 930
60CrMoV	840 ~ 860	6CrW2Si	850 ~ 900
20Cr	280 ~ 820	Cr12MoV	1020 ~ 1040
40Cr	840 ~ 860		1130 ~ 1150
55Cr	820 ~ 840	5CrMnMo	830 ~ 860
40CrNi	840 ~ 860	5CrNiMo	830 ~ 860
45CrNi	830 ~ 850	5CrNiW	830 ~ 860
34CrNiMo	850 ~ 870	5CrSiMnMoV	850 ~ 870
34CrNi2Mo	850 ~ 870	5SiMn2W	860 ~ 890
34CrNi3Mo	850 ~ 870	3Cr2W8	1040 ~ 1060
18Cr2Ni4WA	890 ~ 910	3Cr2W8V	1040 ~ 1060
20Cr2Ni4A	870 ~ 890	4CrWMo	850 ~ 870
	800 ~ 820	4SiMnMoV	900 ~ 920
30Cr2Ni2Mo	860 ~ 880	2Cr13	980 ~ 1000
35CrNiW	850 ~ 870	3Cr13	1000 ~ 1050
45CrNiMoV	850 ~ 870	GCr15	820 ~ 860
9Cr2	840 ~ 870	GCr15SiMn	820 ~ 840
9Cr2W	860 ~ 880	1Cr18Ni9Ti	1100 ~ 1150
9SiCr	840 ~ 860	Cr5Mo	1000 ~ 1050

(二) 加热方式

大锻件加热时, 为了避免过大的热应力, 应该控制装炉温度和加热速度。截面大、合金元素含量高的重要锻件, 多采用阶梯式加热。即在低温装炉后按规定速度加热, 在升温中间进行一次或两次中间保温。有些锻件采用较低的加热速度而不进行中间保温。只有截面尺寸较小、形状简单、原始残留应力较小的碳钢和低合金结

构钢锻件，才允许高温装炉、不限制加热速度或在低温装炉后采用最大功率升温。

高温装炉直接加热时，锻件中不同部位的升温曲线如图 17-1 所示。可以看出，在这种情况下锻件表面与中心的最大温差很大，出现最大温差时工件心部温度低于 200℃，钢仍处于冷硬状态，易因巨大的温差应力而产生内部裂纹。

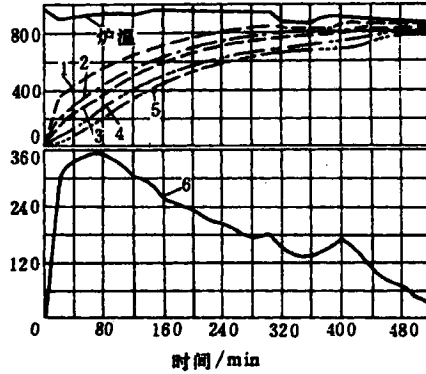


图 17-1  $\phi 800\text{mm}$  40CrNi 钢坯加热曲线  
(炉温 950℃ 装炉)

1—距表面 10mm 2—距表面 70mm 3—距表面 130mm 4—距表面 260mm 5—距表面 400mm 6—表面与中心温差

阶梯式加热时锻件中不同部位的升温曲线如图 17-2 所示。可以看出，由于采取了中间保温，在加热中出现了两次最大温差。第一个出现在心部温度为  $\approx 350^\circ\text{C}$  时，数值仅为图 17-13 曲线的 1/3。出现第二个最大温差时，锻件心部温度已升高至  $\approx 700^\circ\text{C}$ ，钢已处于塑性状态，无开裂危险了。当锻件尺寸很大时，加热中第一个最大温差的数值仍会较大，这时要在  $\approx 400^\circ\text{C}$  等温一段时间，待工件表面和心部都升至较高温度时再继续加热。这样可以减小第一个最大温差的数值和使其在更高些的温度范围出现。

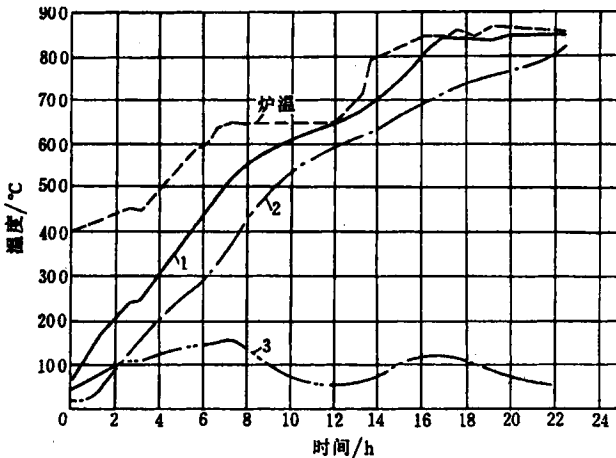


图 17-2  $\phi 900\text{mm}$  40Cr2MoV 锻件加热曲线

1—距表面 15mm 2—中心处 3—表面与中心温差

(三) 升温速度

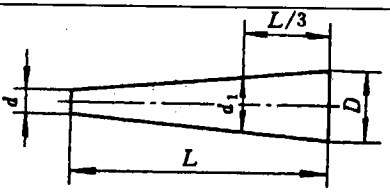
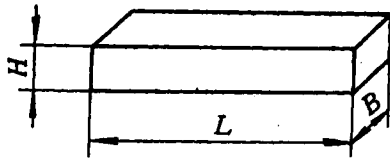
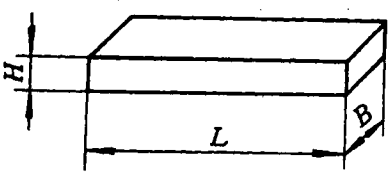
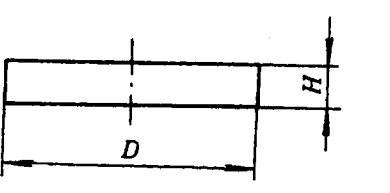
锻件在加热过程的低温阶段，升温速度要控制在  $30 \sim 70^\circ\text{C}/\text{h}$ 。经中间保温后，整个截面上塑性较好，升温速度可以快些，一般取  $50 \sim 100^\circ\text{C}/\text{h}$ 。

(四) 均温与保温

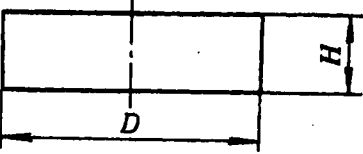
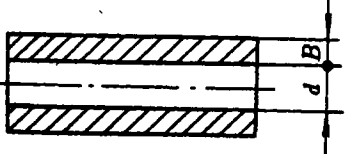
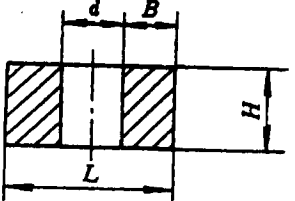
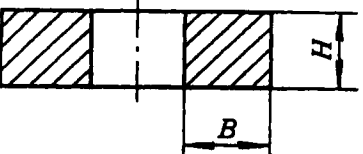
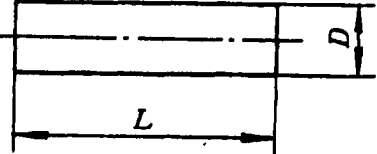
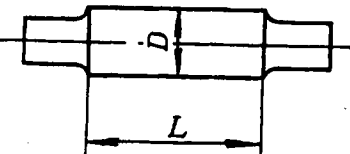
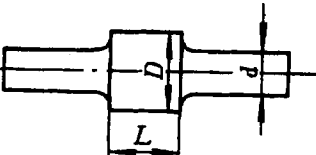
当加热炉主要测温仪表（一般台车式炉指炉顶测温仪表，井式炉指各段炉壁仪表）指示炉温到达规定温度时，即为均温开始，至目测工件火色均匀并与炉墙颜色一致时为均温终了。

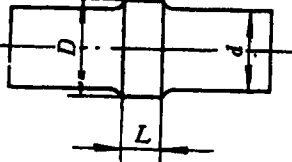
为使工件心部达到规定温度、完成奥氏体转变并使其均匀化，锻件在均温后尚需进行保温。保温时间根据工件有效截面确定。对碳素结构钢与低合金结构钢锻件，保温时间按  $0.6 \sim 0.8\text{h}/100\text{mm}$  计算。对中、高合金钢锻件，按  $0.8 \sim 1\text{h}/100\text{mm}$  计算。各种形状锻件有效截面计算方法见表 17-5。

表 17-5 有效截面计算方法

锻件形状	尺寸关系	有效截面
	$d < D$	$d_1$
	$H < B \leq 1.5H$	$H$
	(1) $1.5H < B \leq 3H$ (2) $B > 3H$	(1) $(1 \sim 1.5) H$ (2) $1.5H$
	$3H < D$	$1.5H$

热处理工艺全书

锻件形状	尺寸关系	有效截面
	(1) $1.5 < H \leq 3H$ (2) $H < D \leq 1.5H$	(1) $(1 \sim 1.5) H$ (2) $H$
 	(1) $d > B$ (2) $d < B$  (1) $d < B \begin{cases} B < H < 1.5B \\ 1.5B < H \end{cases}$ (2) $d > B \begin{cases} B < H < 1.5B \\ 1.5B < H \end{cases}$	(1) $1.5B$ (2) $(1.5 \sim 2) B$  (1) $\begin{cases} (1) (1 \sim 1.5) B \\ (1.5 \sim 2) B \end{cases}$ (2) $\begin{cases} B \\ (1 \sim 1.5B) \end{cases}$
	(1) $H < B \leq 1.5H$ (2) $B \geq 1.5H$	(1) $(1 \sim 1.5) H$ (2) $1.5H$
	$D < L$	$D$
	$D < L$	$D$
	$d < L < D$	$L$

锻件形状	尺寸关系	有效截面
	$L < d < D$	$d$

## 二、大锻件淬火、正火时的冷却

在大锻件淬火、正火冷却过程的工艺参数中，最关键的是选择恰当的冷却速度和终冷温度。

对于性能要求很高的高合金钢大锻件，必须选择能够保证工件心部奥氏体完全躲过珠光体和上贝氏体转变的冷却速度，以使锻件沿整个截面获得下贝氏体或下贝氏体加马氏体组织。终冷温度的选择主要取决于锻件的冶金质量。对于夹杂物、气体含量都很少，化学成分十分均匀的优质电站大锻件，终冷温度可选择为 40 ~ 60℃ 或 60 ~ 80℃。对于冶金质量较差的锻件，终冷温度可提高至 200 ~ 250℃。在终冷温度下的保持时间，应以使锻件心部完成所规定的组织转变为准。

对于大型碳钢和低合金钢锻件，冷却后获得下贝氏体的要求有时难于达到。这时应将心部奥氏体过冷到防止出现粗大珠光体和铁素体的温度，对低合金钢锻件终冷温度可选为 400 ~ 450℃；碳钢件可选为 450 ~ 500℃。

对照相应锻件的冷却曲线和所用钢种的过冷奥氏体连续转变曲线，可获得锻件尺寸、冷却速度、冷却时间、终冷温度以及转变产物与性能水平等方面的完整资料。从图 17-3 所示实例可以看出，为使锻件心部无珠光体，应保证锻件心部冷却速度不小于  $v_1$ ，终冷温度不高于 450℃。如要使锻件心部获得马氏体组织，必须保证锻件心部冷却速度不低于  $v_2$ ，且应过冷到 300℃ 以下。在确定终冷保持时间时，必须充分考虑组织转变热效应的影响。

### (一) 冷却方式及冷却曲线

大锻件常用的冷却方式有：静止空气冷却、鼓风冷却、喷雾冷却、油冷、水冷、喷水冷却及水淬油冷、空—油冷却（延迟淬冷）、水—油双介质淬火、油—空双介质淬火等。这些冷却方式并不能完全满足大锻件冷却的要求，还有待于寻求新

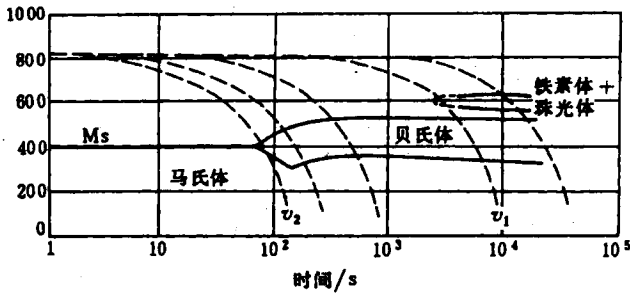


图 17-3 3.5%Ni-Mo-V 钢奥氏体连续冷却转变曲线示意图

的淬火介质和冷却方法。对形状复杂、截面变化较大的工件，为使冷却均匀和减小淬火应力，有时采用工件在炉内稍降低温度后再出炉淬火的方法。

1. 水冷 水冷工件经高温回火后的强度、塑性、韧性和脆性转变温度等力学性能都比油冷好（特别是心部性能）。因此，在不引起缺陷扩大的前提下，应采用水冷。但是这时工件截面上的最大温差可达 750~800℃，如锻件冶金质量不好，巨大的内应力会使工件产生裂纹甚至断裂。图 17-4 是锻件的不同截面水冷曲线。

在判断锻件在淬火冷却中能否采用水冷时，首先应考虑锻件化学成分和基础性能的影响，按式 (17-5) 计算出锻件的碳当量 CE。

$$CE = C\% + \frac{Mn\%}{20} + \frac{Ni\%}{15} + \frac{Cr\% + Mo\% + V\%}{10} \quad (7-5)$$

当计算结果（成分为质量分数）为：

1) 锻件中正偏析区的碳当量  $CE \leq 0.75\%$ ，正偏析区的含碳量  $\leq 0.31\%$  时，锻件可以毫无危险地采用水淬。

2) 锻件中正偏析区的碳当量  $CE = 0.75\% \sim 0.88\%$ ，正偏析区的含碳量 =  $0.32\% \sim 0.36\%$  时，锻件可以采用水淬，但需特别小心。

3) 锻件中正偏析区的碳当量  $CE \geq 0.88\%$ ，正偏析区的含碳量  $\geq 0.36\%$  时，若无特殊的指示与指导，禁止水淬。

随着大锻件用钢含碳量的逐步降低和电渣重熔、钢包精炼、真空除气、真空碳脱氧等先进冶炼工艺的采用，大锻件的冶金质量有了明显提高，承受较大淬火应力而不引起开裂的可能性有所增加，应当扩大急冷和深冷的应用。

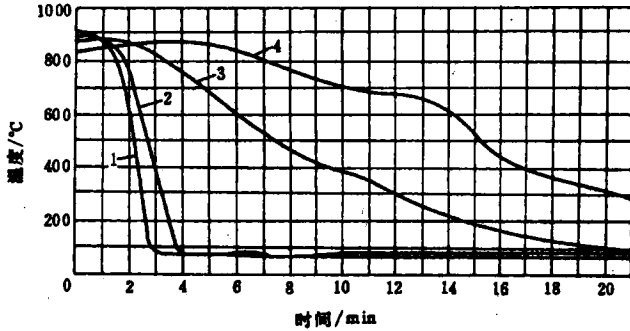


图 17-4  $\phi 300\text{mm} \times 2000\text{mm}$  9Cr 钢锻件水冷曲线 (水温 20°C)

1—距表面 15mm    2—距表面 30mm  
3—距表面 75mm    4—距表面 150mm

2. 油冷 油冷时锻件中最大温差比水冷小，一般不超过 500°C。采用空—油冷却（延迟淬冷）可显著降低工件内外温差（见图 17-24）。

3. 空冷 空冷或鼓风冷的冷却能力比水冷、油冷小得多，故在一定程度内可避免锻件内部缺陷的扩大，但空冷时锻件的性能潜力不能充分发挥。

4. 双介质淬火 水—空—水、油—空—油双介质淬火方式，可使心部热量向外层传播，以减少锻件截面上的温差，使冷却比较均匀，降低淬火应力。

工件在空气中预冷 12min 后，随即水冷 2min、空冷 3min 再交替冷却至 35min，然后空冷。

5. 喷雾、喷水冷却 喷雾冷却是利用压缩空气与压力水的共同作用，使之成为细雾状向工件表面喷射的冷却方法。喷水冷却是将高压水直接向工件表面均匀喷射的冷却方法。在喷射冷却时，工件要旋转，以使冷却均匀。这种冷却方式的优点是在冷却过程中可以改变风量、水量及水压，以达到调节冷却速度的效果，使在不同冷却阶段得到不同的冷却速度。对有阶梯的工件，在不同截面处可以调节得到不同的冷却能力，使之获得相同的冷却速度。喷水冷却的冷却能力很强烈，高压水还

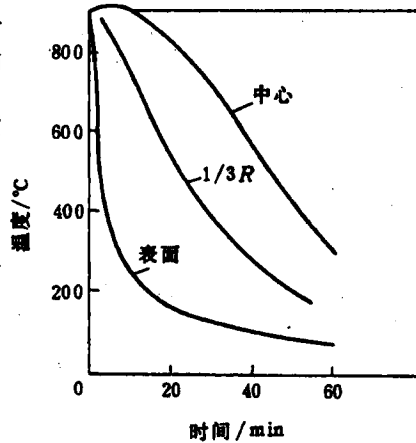


图 17-5  $\phi 450\text{mm}$  42SiMn 钢锻件水冷曲线



可以猛烈冲刷工件加热时表面形成的氧化皮。

图 17-6 所示为喷雾冷却曲线, 图 17-7 所示为喷水冷却曲线。

### (二) 冷却时间的确定

冷却时间是指工件在冷却介质中停留的时间。冷却时间过短, 会达不到要求的性能, 而冷却时间过长、终冷温度过低, 会增大淬裂的危险性。所以, 确定适当的冷却时间及终冷温度, 是大锻件热处理工艺中的一个重要问题。

在生产中的淬火冷却主要是控制冷却时间, 而工件表面的终冷温度仅作为参考。冷却时间一般根据实测的各种冷却曲线, 理论计算以及长期生产经验来确定。必须注意, 即使相同截面的工件, 在相同的淬火介质及冷却时间内冷却, 也会由于冷却设备容量、淬火介质的温度、介质循环条件及工件在介质中的移动方式等情况不同, 造成工件心部温度的显著差别。所以, 在规定冷却时间的同时, 还要严格控制冷却条件。

图 17-8 及图 17-9 所示为不同直径钢件在水冷、油冷、空冷时, 心部冷却到 450℃ 和 300℃ 时所需的冷却时间 (淬火温度取为 860℃, 淬火介质温度取为 40℃), 曲线是由实测数据整理而得到的。表 17-6 列出一些具体冷却工艺可供参考, 生产中根据工件形状、材质及生产条件, 在制订具体冷却工艺时, 作适当调整。

另外, 也可采用简化公式来估计冷却时间

$$\tau = a \times D(s) \quad (7-6)$$

式中  $\tau$ ——冷却时间(s);

$a$ ——系数(s/mm); 油冷时,  $a = 9 \sim 13$ ; 水冷时,  $a = 1.5 \sim 2$ ; 水淬油冷时, 水淬:  $a = 0.8 \sim 1$ , 油冷:  $d = 7 \sim 9$ 。

$D$ ——工件有效截面 (mm)。

工件正火时, 一般规定表面终冷温度为: 碳素结构钢、低合金结构钢不高于

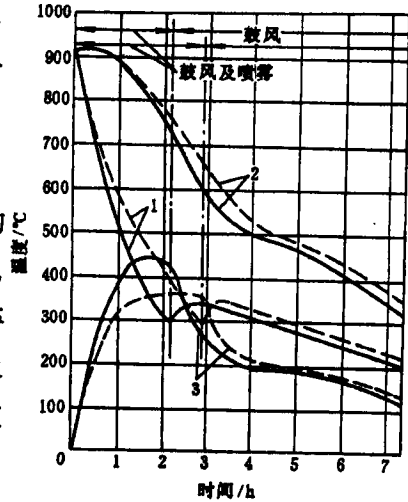


图 17-6  $\phi 950\text{mm} 28\text{CrNiMoV}7.4$  钢锻件在鼓风和喷雾冷却时的冷却曲线

1—表面温度 2—中心温度

3—表面与中心的温差

实线水压为 4.6MPa 的喷雾冷却

虚线水压为 2.5MPa 的喷雾冷却