

加热和锻后热处理

一 加热工艺分析

加热工艺通常包括装炉温度、升温速度、均热控制、保温时间。比较主要的是最高加热温度控制、均温及允许的温度场不均匀控制和“温度头”（即最高炉温和锻件表面的温差，也叫“过热度”）控制。

1. 温度应力

坯料在加热时，其表面和中心部位之间存在温度差引起不均匀膨胀，使表面受到压应力，中心部位受到拉应力。这种由于温度不均匀而产生的内应力叫温度应力。温度应力的大小与钢的性质和断面温度有关。一般只有钢料出现温度梯度并处在弹性状态时，才会产生较大的温度应力并引起裂纹。钢在温度低于500~550℃时处在弹性状态，因此低于这个温度范围时，须考虑温度应力的影响。当温度超过500~550℃时，钢的塑性比较好，变形抗力较低，通过局部塑性变形可以使温度应力消除或减少。

2. 装炉温度

通常装炉温度高低对小截面、低碳低合金坯料影响不大，而对中高碳或多组元合金钢（尤其是未压过的钢锭等铸态组织的零件）则影响很大，因为钢锭等铸态组织及多组元合金钢导热性差，过高的装炉温度将给加热件带来较大的附加应力，严重的可使高合金钢中心开裂。另外，因生产条件限制，大多数热送钢锭的生产、送达有一个较长的时间段，在这段时间的待料中，炉温实际上给钢锭一个由表及里的热传导过程，减少了内外层温度差，即减小了热应力差异，并给后续升温提供了一个快速升温的基本条件。

装炉温度可根据温度应力和钢料最大允许温差（ Δt ）来确定， Δt 可根据下式计算。

$$\Delta t = 1.4 [\sigma] / \alpha E$$

式中 $[\sigma]$ 为相应温度下的抗拉极限（MPa）；

α 为相应温度下的线膨胀系数（ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ）

E 为弹性模量（MPa）

由上式得出的最大允许温差，再按不同热阻条件下最大允许温差与允许装炉温度的理论计算曲线（见图1），确定出允许装炉温度。这个结果一般偏小，还要在实际工作中加以修正。钢锭加热的装炉温度及在此温度下保温的时间见图2。

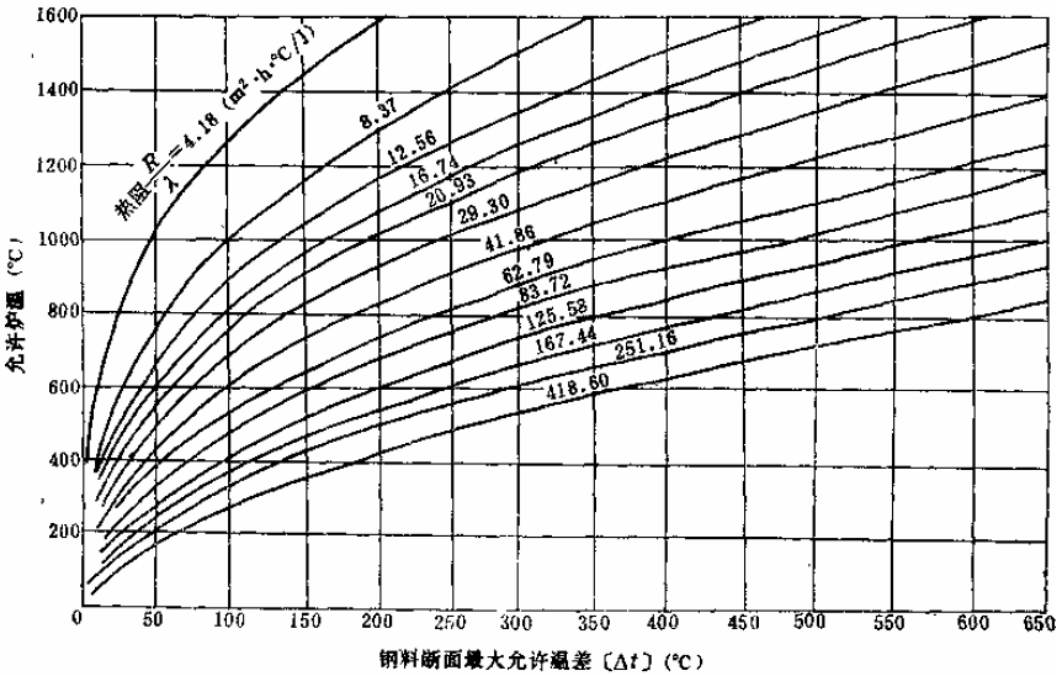


图1 圆坯允许装炉温度和最大允许温差关系

(R : 加热件半径 (m) λ : 导热系数 ($\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}/\text{J}$))

3 加热速度

加热时经常用到“尽速”、“尽功率”升温的要求,这是指按炉子所能提供的最大升温能力来升温。另外也有限制升温速度的标记,如“ $\leq 70^\circ\text{C}/\text{h}$ ”,指的是保证加热件的热应力不超过它所能承受的极限值的安全升温速度。它主要取决于加热过程中产生的热应力,而热应力的大小又与金属的热扩散率、热容量、线膨胀系数、高温力学性能和加热件形状尺寸有关。圆柱坯料允许的加热速度 $[u]$ 通常用下式计算。

$$[u]=5.6k[\sigma]/\alpha E R^2$$

式中 k 为热扩散率 (m^2/h),与导热系数 λ 、比热容 c 、密度 ρ 有关,即 $k=\lambda/c\rho$

$[\sigma]$ 为相应温度下的抗拉强度 (MPa) α 为相应温度下的线膨胀系数 ($^\circ\text{C}^{-1}$)

E 为弹性模量 (MPa)

R 为加热件半径 (m)

由上式看出,金属的热扩散率(即导热系数)和强度极限越大,允许的加热速度越大,而金属的直径越大、弹性模量和线膨胀系数越大,允许的加热速度越小。通常中低碳碳钢的热扩散率比中高合金钢大,虽然高温强度极限比合金钢低,但它产生的热应力相对较小,因此中低碳碳钢允许的加热速度比中高合金钢大。

由于钢锭中组织差、有各种缺陷,钢锭的允许升温速度要比已经经过轧制或粗锻的坯料小。

通常对已达到 700°C 的大多数 A1 类钢的高温阶段升温实施尽速升温,这对节约能源、细化晶粒有利。

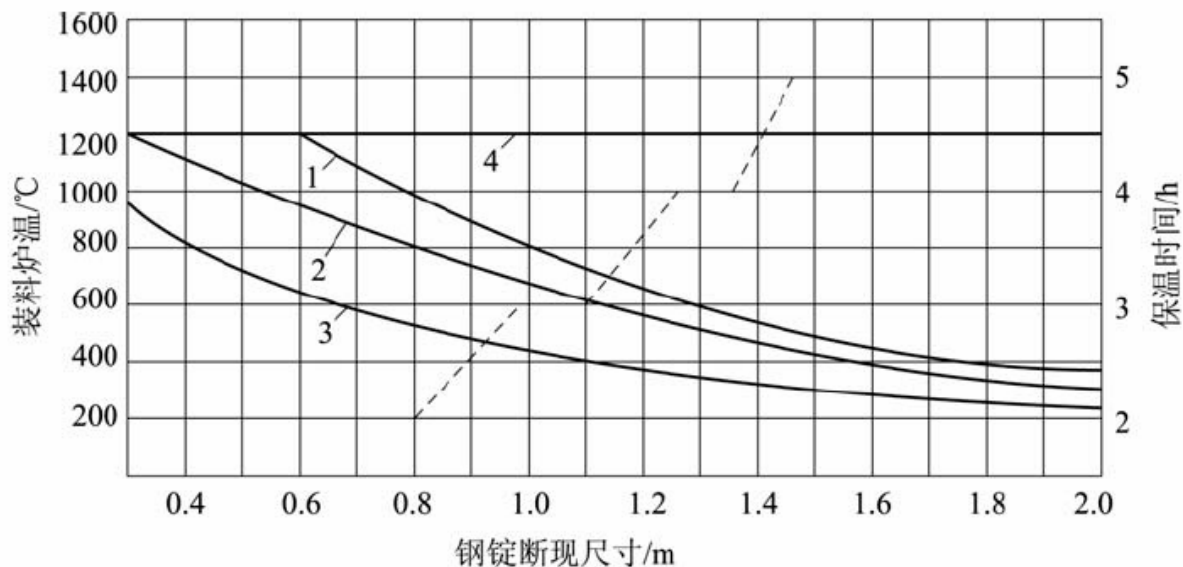


图2 钢锭加热的装炉温度及保温时间

1— 组冷锭的装炉温度 2— 组冷锭的装炉温度 3— 组冷锭的装炉温度 4—热锭的装炉温度

4. 均热保温

均热指的是当测温偶反映到仪表指示温度达到工艺规定的温度后,炉子内部加热区的温度场均匀化和钢锭表面各处均匀化(即温色一致)。保温指的是这种表面均匀化向钢锭中心导热后达到内外温度一致的过程。

均热时间和装炉量、装炉方式、控温作业方法和设备状态有关,它通常结合实测值和经验值确定。大锻件加热炉容积都很大,当钢锭或坯料装进这些炉子里后,加热件本体表面温度和炉侧或炉顶热电偶显示的炉内气温差距很大——加热件往往要很长时间才能达到通体表温和炉温一致(通常目测炉墙和加热件表面温色作判断),所以在大型锻件加热时均温控制比一般小锻件要严得多。在许多重机厂加热工艺中锻造加热的均温时间常常被计入保温时间中;而在锻后热处理升温时常常单列开来,要求司炉人员按实际情况目测加多点测温(包括接触式铠装偶)来控制。

保温时间则大都与材料本身的导热等物化特性有关。它可直接在有关规范、标准中选取。

对重要的、组元复杂的合金钢大钢锭实施 $A1$ 线相变前的中间保温是多数大钢锭锻造加热的常用工艺。它可以减小温差、提高后续升温速度(而尽快通过两相区对细化奥氏体晶粒有利)、减少锻造

温度下的保温时间等，但也会延长周期、少量加大能耗。

在不考虑合金成分或碳化物等化合物扩散、不进行镦粗、强压等大压缩量锻造的前提下，保温应取“最小保温时间”，避免出现严重的粗晶、脱碳等质量缺陷，也加快周期、节约能源。

如遇到设备故障无法及时修复而停锻检修时应立即降温到合适的温度：由值班长或有关人员商议后现场决定工艺对策，或按修复时间，先降温至 900 ~ 1050 （1050 以上将使晶粒迅速粗大），适时尽速升温、酌情确定保温时间。

5.关于高温扩散

锻前高温扩散是大型铸锻件复杂生产工艺链中的一个环节，它是在钢锭脱模之后、大变形热锻之前通过较高温度下的长时间保温，依靠扩散作用来改善钢锭中的微观偏析等缺陷，以提高钢锭热加工性能，并最终提高锻件质量的一种工艺。

国内外一些学者曾对高温扩散的作用做过相关的研究，学术上存在着诸多争论：有人主张不进行锻前高温扩散，因金属原子扩散的距离有限，根据研究单纯靠扩散可以修复裂纹尺寸非常小，恒温无外压保温条件下可修复裂纹尺寸一般小于1 μm，扩散作用不大，且易使锻件晶粒过大，无益于锻件的最终性能；有人则认为，若不进行锻前高温扩散，那么锻件无论采用多大的锻比，仍然不能完全消除微观偏析，并将最终影响锻件的质量。另外，赞同采用锻前高温扩散工艺的主张中，关于保温时间也有不同的意见，目前所采用此工艺的企业通常是在超过1200 （例如电站转子 26Cr2Ni4MoV的扩散温度在1250 ，汽轮机转子30Cr1Mo1V的扩散温度则在1260 ~ 1270 ）高温下保温40小时甚至更多时间，而有些资料认为，保温时间不宜超过15小时。

从节约能源、提高生产效率等方面考虑，长时间的高温加热，将消耗大量能源，使生产成本提高，钢锭利用率和生产效率降低E73。因此，对锻前高温扩散工艺慎重分析认真对待有着重要的意义。

枝晶偏析是任何一种熔铸合金材料都不可避免的成分不均匀现象，是两种或两种以上成分的金属材料，在凝固的选分结晶过程中所形成的溶质浓度分布的不均匀现象。钢锭冷却过程中，枝晶组织凝固的先后顺序为一次主轴（一般间距8 ~ 20mm）、二次枝晶臂（一般间距100μm以上）、枝晶间。一次主轴与二次枝晶臂中的成分组成含量差别不大，溶剂原子Fe的浓度较高，而枝晶间却含有大量的溶质原子——合金元素Cr，Mo，浓度远高于一次主轴与二次枝晶臂。在对大量Cr-Mo钢锻件进行电子扫描来测定微区成分时发现枝晶间聚集了大量的合金元素，经扫描分析Cr，Mo元素含量非常高，远大于（约3 ~ 10倍于）枝晶臂上的元素含量，而其它元素偏析不明显。

锻前高温加热时，在浓度差驱动下，Cr，Mo元素由浓度高的枝晶间向浓度较低的枝晶臂、主轴中迁移，浓度差减小，成分分布趋于均匀化。

根据扩散的无规则行走理论，晶体中原子迁移的距离r和运动时间t及扩散系数D的关系为

$$\bar{r}^2 = 6Dt \text{ 或 } \bar{r} = (6Dt)^{1/2}$$

式中 $D = D_0 \exp(-Q / RT)$

Q—— 扩散激活能

D_0 ——扩散常数

由方程可知，若T越大，则原子迁移距离越远，即随保温时间的增加，扩散距离更大，高浓度区域的合金元素更充分地向低浓度区域扩散。以浓度差作为驱动力的扩散结果是，浓度差随着保温时间逐渐减小，成分分布均匀程度提高，偏析度逐渐减小。因此，随着保温时间的增加，Cr，Mo的偏析度都在减小。

高温加热进行扩散时，合金元素的迁移降低了其偏聚的程度，使其分布更为均匀，同时影响了粒状贝氏体组织的分布、组成以及合金元素固溶强化效应，并最终提高了钢的力学性能。

首先，成分分布不均匀导致贝氏体组织的不均匀性，因贝氏体铁素体内部Cr，Mo等元素的偏析，降低了位错运动的点阵阻力。而高温扩散后，合金元素分布的均匀程度提高，对基体起到了强化作用，随保温时间增长强化作用将增大。

其次，凝固过程中，晶界、枝晶臂间或多或少存在合金元素含量较高的过剩相，而合金元素的偏聚会减弱其在基体中的固溶强化作用。高温扩散使得Cr，Mo的偏聚程度降低，晶界附近的合金元素溶入奥氏体中，奥氏体中的Cr，Mo等元素含量增加，冷却后其固溶强化的作用有所增强。

在锻造比作用下，热扩散效果的显现有所不同。有些试验数据说明了这个不同。

小锻比试样的纵向冲击韧性与纵向屈服强度随保温时间的变化规律相同，强度、韧性同时提高。合金元素Cr，Mo的偏析比在热扩散作用下逐渐减小，因此基体中的元素含量增加。虽然Cr，Mo作为置换型固溶元素，其基体浓度增加对韧性影响不明显，但Cr，Mo的增加使淬透性提高，同样可提高材料的冲击韧性。另外，粒状贝氏体中的M-A小岛分布也随保温时间逐渐均匀，也将提高纵向冲击韧性。

大锻比下保温时间对纵向力学性能的影响一般。说明大锻比锻造后，锻造产生的影响已经湮没了热扩散作用对微观偏析的影响，高温扩散起不到主导性的作用，反过来说，锻造起的作用（例如打碎枝晶、改善微区偏析、各向同性等方面作用）远大于高温扩散。同时，高温扩散的“性价比”在大锻比面前相形见绌。因此，可以对从日本制钢所引进的高温扩散技术做一定的修正与改进，比较倾向性的意见是取消中小型（30万千瓦以下）转子的两次锻粗强压时的高温扩散工步或减少长时间保温的次数及时间，按常规要求保温后的多火大压缩量强压完全能够满足转子要求。

二 锻件的加热规范

中华人民共和国机械行业标准
JB/T6052-92

钢质自由锻件加热通用技术条件

1.主题内容与适用范围

本标准规定了钢质自由锻件的通用加热技术要求。
本标准适用于碳素钢、合金结构钢的冷、热钢锭（坯）的锻造前加热。
本标准不适用于本标准规定以外的新钢种锻造前加热。

2.常用钢号的加热温度范围

常用钢号按其碳含量及合金元素含量分为三组，其加热温度范围见表1。

表 1 常用钢号的始锻、终锻、精锻加热温度 ℃

组 别	代 表 钢 号	允许温度		
		始 锻	终 锻	精 锻
I	15 ~ 45, 15Mn ~ 35Mn, 15Cr ~ 35Cr	1250	750	700
II	50, 55, 40Mn ~ 50Mn, 35Mn2 ~ 50Mn2, 40Cr ~ 55Cr, 20SiMn ~ 35SiMn, 12CrMo ~ 50CrMo 34CrMoAl, 30CrMnSi, 35CrMnSi, 20CrMnTi, 20MnMo 12CrMoV ~ 35CrMoV, 20MnMoNb, 14MnMoV ~ 42MnMoV, 38CrMnAl, 38CrMnMo	1220	800	750
III	34CrNiMo ~ 34CrNi3Mo, PCrNiMo ~ PCrNi3Mo, 40CrNiMo, 37SiMn2MoV, 18CrNiW 20Cr2Ni4A, 30Cr2MoV, 50Si2 ~ 60Si2, 5CrNiMo, 5CrMnMo, 5CrNiW, 50CrMnMo 60CrMnMo, 50CrNiMo, 9Cr, 9Cr2, 9Cr2Mo, 9Cr2V, 60CrMnV, 70Cr3Mo, GCr15 GCr15SiMn, T7, T8, W18Cr4V, 3Cr2W8V, 9CrSi, CrWMn, 4CrW2Si ~ 6CrW2Si 86Cr2MoV, 12Cr2Mo, Cr5Mo, Cr17Ni2, 50Mn18Cr4, 50Mn18Cr4N, 50Mn18Cr4WN 30Cr1MoV, 25Cr2Ni4MoV, 22Cr2Ni4MoV, 25CrNiMoV ~ 25CrNi3MoV, 28CrNi3MoV 1Cr13 ~ 4Cr13, 1Cr18Ni9Ti, 22Cr12MoV	1200	800	750

3. 装炉的技术要求

3.1 钢锭（坯）装炉前，应校对其冶炼炉号、钢号、钢锭（坯）重量、尺寸，并检查其表面质量，清除表面缺陷。

3.2 记录装炉位置，做好实际操作记录。钢锭（坯）装入炉内的位置应根据炉型、炉底尺寸、装炉方式及被加热钢锭（坯）的尺寸重量等确定其距炉子的火墙、前后墙、烧嘴等的距离。严禁火焰直射被加热金属表面。

3.3 钢锭（坯）加热时应使用垫铁。垫铁高度应不低于炉子下排烧嘴的高度。

3.2 钢锭（坯）加热的装料方式，分为三种：

第1装料方式，称“单列顺装法”，如图1 的 所示。

第2装料方式，称“单层并列法”，如图1 的 所示。料间间距应不小于钢锭内切圆直径 d 的 $1/4$ 或 $1/2$ 或钢坯边长（直径） d_1 的 $1/4 \sim 1/3$ 。

第3装料方式，称“叠装法”，如图1 的 所示。钢锭（坯）呈两层或两层以上叠装在炉床上，料间距离不限。

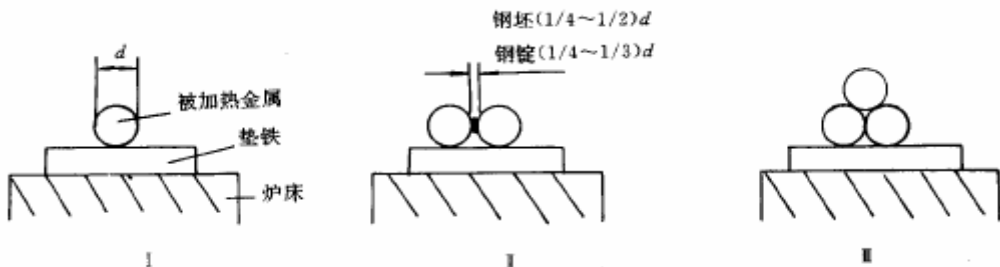


图 1

3.5 钢锭入炉前的表面温度低于 400 的称为冷钢锭， $400 \sim 500$ 的称为半热钢锭，高于 500 的称为热钢锭。冷热钢锭（两者温差大于 400 ）（坯）同装一炉时，其料间间距必须大于一个钢锭（坯）的半径。应尽量避免冷热钢锭（坯）混装一炉。

3.6 严禁在已加热到锻造温度的热钢锭（坯）旁装放冷钢锭（坯）。

3.7 严禁将锭身实际温度低于 0 的钢锭（坯）直接装炉快速升温加热。

3.8 检验合格的热锭运至锻件生产车间时，应做好钢锭过冷或及时装炉，不得拖延装炉时间。

4 炉温控制与金属加热的技术要求

4.1 炉子热电偶升到锻造温度后，锻件的保温时间从其所有表面达到始锻温度时算起（此前均为均温）。保温终结时，金属温度应在炉温公差范围内。

4.2 钢锭（坯）加热过程中必须精心操作，严格控制装炉温度、升温或冷却速度。炉气应保持微正压。炉床上的氧化铁皮应定期清理。

4.3 半热钢锭宜装于 650 的炉内按表2规定的时间保温之后，按热钢锭加热规范进行加热。

表2

钢锭重量,t	≤ 10	$> 10 \sim 20$	$> 20 \sim 40$	$> 40 \sim 70$	$> 70 \sim 120$	> 120
保温时间,h	2	3	3.5	4	5	6

4.4 热钢锭的加热，可按附录A（参考件）中表A1的加热规范进行。热钢锭装入低于表A1规定的装炉温度的炉内时，可立即升温至装炉温度，然后按表A1的规范进行加热。加热时间从炉温升至规定的装炉温度时开始计算。

4.5 冷钢锭的加热，可按附录A中表A2的规范进行。冷钢锭装入实际炉温低于表A2规定的装炉温度的炉内时，以不超过预热升温限定的速度直接升温至规定的装炉温度。

4.6 钢坯的加热，可按附录A中表A3的规范进行。

4.7 钢锭或钢坯按表3及表4的规定完成加热保温之后因故不能出炉锻造时，应将炉温降至 $1000 \sim 1050$ 进行保温（适用于短时待压状态），或将炉温降至 ~ 850 进行保温（适用于需待压8

小时以上状态)，或干脆降温至~650 待压（适用于长时间待压状态）。经降温处理到850 以上待压的钢锭，再加热至锻造温度下的保温时间可以减少1/3~1/2。经650~750 炉内长时间保温之后因故不需再加热时，必须随炉以小于100 /h的降温速度将钢锭或坯料炉冷至100~250 以下方可出炉（视钢种、大小、产品重要度确定）。

4.8 钢锭加热后，只进行压钳把、倒棱、啃底或抛圆时，其锻造温度下的保温时间可比规范规定值减少一半，需进行墩粗或强压（或均匀化）时，其保温时间应增加 20%。

4.9 锻件半成品（钢坯）重复加热温度的上限，应根据其自身的剩余锻造比值来确定，见表5。

4.10 锻件半成品坯料的加热时间，按其形状尺寸并参照附录A 中表A3 确定。

4.10.1 实心圆类坯料高度大于直径时按直径尺寸确定加热时间；反之按高度尺寸确定加热时间；

4.10.2 筒类锻坯的长度大于直径时，按坯料壁厚尺寸的1.3~2倍来确定加热时间；

4.10.3 空心盘（环）类锻坯壁厚尺寸大于或等于盘（环）高度尺寸时，按壁厚尺寸确定加热时间。

表3

钢锭重量 t	锭身平均直径 mm	不同装料方式的保温时间, h		
		I	II	III
≤1.4	410	5	8	14
> 1.4 ~ 3	> 410 ~ 630	6	8	16
> 3 ~ 5	> 630 ~ 700	7	10	18
> 5 ~ 8	> 700 ~ 800	8	12	22
> 8 ~ 13	> 800 ~ 950	11	14	24
> 13 ~ 20	> 950 ~ 1150	13	16	26
> 20 ~ 30	> 1150 ~ 1230	14	18	26
> 30 ~ 40	> 1230 ~ 1310	15	18	28
> 40 ~ 50	> 1310 ~ 1400	17	20	28
> 50 ~ 65	> 1400 ~ 1500	18	20	30
> 65 ~ 80	> 1500 ~ 1700	18	21	30
> 80 ~ 95	> 1700 ~ 1780	19	22	35
> 95 ~ 120	> 1780 ~ 1875	19	24	35
> 120 ~ 140	> 1875 ~ 1950	20	24	40
> 140 ~ 170	> 1950 ~ 2100	20	25	40
> 170 ~ 200	> 2100 ~ 2400	21	26	42
> 200 ~ 230	> 2400	21	26	42

表 4

钢坯直径或边长 mm	不同装料方式下的保温时间, h		
	I	II	III
≤ 60	2	2	4
> 60 ~ 100	3	4	6
> 100 ~ 150	4	6	8
> 150 ~ 250	5	8	10
> 250 ~ 350	6	9	12
> 350 ~ 450	7	10	14
> 450 ~ 600	9	12	16
> 600 ~ 800	10	14	20
> 800 ~ 1000	14	18	24
> 1000 ~ 1200	18	20	28

表 5

剩余锻造比值	最高加热温度 ℃	备 注
≤1.1 或无锻比	950	
> 1.1 ~ 1.5	1050	
> 1.5 ~ 2	1100	
> 2	始锻温度	需在芯棒上拔长或扩环的筒(环)类锻件的坯料,加热温度应将始锻温度提高 20 ~ 30℃

4.11 终锻温度高于950 的锻坯返炉加热或达到规定的保温时间后经过短暂降温（1小时以内）的钢坯（锭）又直接升温者，其坯料表面达到始锻温度时即可出炉锻造。

4.12 混装炉时的加热工艺规范按钢种或坯料截面尺寸确定。

4.12.1不同钢种混装时，加热工艺规范按合金元素含量高的钢种确定。

4.12.2 不同截面尺寸的坯料混装炉时，加热工艺规范按尺寸大的坯料确定，要求在锻造温度下保温时间短的应先出炉。

5 锻件修整加热的技术要求

5.1 冷至室温后的锻件修整时，可参照附录A中表A4的规定进行加热

5.2 热锻件修整的终止温度应不低于600 ，并及时进炉消除应力（温度一般为600~650 ）。

5.3 冷锻件的修整，不宜进行局部加热。

5.4 重要锻件的修整，应有专用的加热规范。

附录A 冷、热钢锭（坯）加热规范（参考件）

表A1 热钢锭（坯）加热规范

钢锭重量,t		锭身平均直径 mm	I、II 组 钢				
普通型	短粗型		最高允许 装炉炉温 ℃	升温时间,h	锻造温度下最小保温时间,h		
					装料方式		
					I	II	III
> 3 ~ 5	—	630 ~ 700	1200	升温速度 不 限	1.5	2	2.5
> 5 ~ 8	—	> 700 ~ 800	1200		2.5	3	3.5
> 8 ~ 13	—	> 800 ~ 950	1200		3.5	4	5
> 13 ~ 20	—	> 950 ~ 1150	1200		4	5	6
> 20 ~ 30	—	> 1150 ~ 1230	1200		5	6	7
> 30 ~ 40	—	> 1230 ~ 1310	1200		6	7	8
> 40 ~ 50	—	> 1310 ~ 1400	1200		7	8	9.5
> 50 ~ 65	—	> 1400 ~ 1500	1200		8	9.5	11
> 65 ~ 78	—	> 1500 ~ 1600	1200	—	9.5	11	13
> 78 ~ 88	≤50	> 1600 ~ 1700	1200	—	12	13	15
> 88 ~ 105	> 50 ~ 60	> 1700 ~ 1800	1100	6	13	15	17
> 105 ~ 135	> 60 ~ 70	> 1800 ~ 1900	1100	8	15	17	19.5
> 135 ~ 170	> 70 ~ 80	> 1900 ~ 2000	1100	10	17	19	—
> 170 ~ 230	> 80 ~ 115	> 2000 ~ 2300	1000	12	20	—	—
—	> 115 ~ 160	> 2300 ~ 2600	1000	14	22	—	—
—	> 160 ~ 230	> 2600 ~ 2850	1000	16	24	—	—
—	> 230 ~ 300	> 2850 ~ 3100	1000	18	26	—	—

钢锭重量,t		锭身平均直径 mm	Ⅲ 组 钢				
普通型	短粗型		最高允许 装炉炉温 ℃	升温时间,h <div> </div>	锻造温度下最小保温时间,h		
					装料方式		
					I	II	III
> 3 ~ 5	—	630 ~ 700	1200	升温速度 不 限	3	4	5
> 5 ~ 8	—	> 700 ~ 800	1200		4	5	6
> 8 ~ 13	—	> 800 ~ 950	1200		5	6	7
> 13 ~ 20	—	> 950 ~ 1150	1200		6	7	8
> 20 ~ 30	—	> 1150 ~ 1230	1200		7	8	9.5
> 30 ~ 40	—	> 1230 ~ 1310	1200		8	9.5	11
> 40 ~ 50	—	> 1310 ~ 1400	1100		9.5	11	13
> 50 ~ 65	—	> 1400 ~ 1500	1100	6	11	13	15
> 65 ~ 78	—	> 1500 ~ 1600	1100	8	13	15	17
> 78 ~ 88	≤50	> 1600 ~ 1700	1100	10	15	17	19
> 88 ~ 105	> 50 ~ 60	> 1700 ~ 1800	1000	12	17	19	—
> 105 ~ 135	> 60 ~ 70	> 1800 ~ 1900	1000	14	19	22	—
> 135 ~ 170	> 70 ~ 80	> 1900 ~ 2000	1000	16	22	—	—
> 170 ~ 230	> 80 ~ 115	> 2000 ~ 2300	1000	18	24	—	—
—	> 115 ~ 160	> 2300 ~ 2600	900	20	26	—	—
—	> 160 ~ 230	> 2600 ~ 2850	900	22	28	—	—
—	> 230 ~ 300	> 2850 ~ 3100	900	24	30	—	—

表A2 冷钢锭加热规范

钢锭重量,t	锭身平均直径 mm	I 组 钢							
		最高允许 装炉炉温 ℃	850℃				锻造温度下最小保温时间,h		
			保温,h	升温,h	保温,h	升温,h	装 料 方 式		
							I	II	III
>0.5	270	1150	—	按炉子 功 率	—	—	0.5	0.5	1
>1.4	410	1100	0.5		—	—	1	1	1.5
>2.3	630	1100	1		—	升温速度 不 限	1.5	2	3
>3~5	>630~700	1000	1.5		—		3	3.5	4
>5~8	>700~800	900	3		—		3.5	4	5
>8~13	>800~950	800	3		—		4	5	6
>13~20	>950~1150	750	3		—		5	6	7
>20~30	>1150~1230	700	4	3	4	6	7	8	
>30~40	>1230~1310	650	4	4	5	7	8	9.5	
>40~50	>1310~1400	600	4	5	6	8	9.5	11	

钢锭重量, t	锭身平均直径 mm	Ⅱ 组 钢							
		最高允许 装炉炉温 ℃	850℃				锻造温度下最小保温时间, h		
			保温, h	升温, h	保温, h	升温, h	装 料 方 式		
							Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
> 0.5	270	1050	—	—		—	0.5	0.5	1
> 1.4	410	1000	—	按炉子 功 率	1	—	1	1	1.5
> 2.3	630	950	—		2	升温速度 不 限	1.5	2	3
> 3 ~ 5	> 630 ~ 700	900	4		2.5		3	3.5	4
> 5 ~ 8	> 700 ~ 800	800	4		3.5		3.5	4	5
> 8 ~ 13	> 800 ~ 950	750	4		4		4	5	6
> 13 ~ 20	> 950 ~ 1150	700	4	4	5		5	6	7
> 20 ~ 30	> 1150 ~ 1230	650	4	4	6		6	7	8
> 30 ~ 40	> 1230 ~ 1310	600	5	6	7	—	7	8	9.5
> 40 ~ 50	> 1310 ~ 1400	550	5	8	8	8	8	9.5	11
钢锭重量, t	锭身平均直径 mm	Ⅲ 组 钢							
		最高允许 装炉炉温 ℃	850℃				锻造温度下最小保温时间, h		
			保温, h	升温, h	保温, h	升温, h	装 料 方 式		
							Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
> 0.5	270	750	—	0.5	1	1.5	0.5	1	1.5
> 1.4	410	650	—	0.5	1	2	1	1.5	2
> 2.3	630	600	0.5	1.5	1.5	2	2	2.5	3.5
> 3 ~ 5	> 630 ~ 700	600	2	3	4	3	3.5	4	5
> 5 ~ 8	> 700 ~ 800	550	3	4	5	4	4	5	6
> 8 ~ 13	> 800 ~ 950	550	3	5	6	5	5	6	7
> 13 ~ 20	> 950 ~ 1150	450	4	6	7	6	6	7	8
> 20 ~ 30	> 1150 ~ 1230	400	4	7	8	7	7	8	9.5
> 30 ~ 40	> 1230 ~ 1310	350	5	8	9	8	8	9.5	11
> 40 ~ 50	> 1310 ~ 1400	300	5	9	10	10	9.5	11	13

表A3 冷钢坯加热规范

钢坯的直径 或边长 mm	I 组 钢								
	最高允许 装炉炉温 ℃			锻造温度下最小保温时间, h			不同装料方式的总加热时间 h		
				装料方式					
				保温, h	加热, h	I	II	III	I
≤ 100	1200	—	—	—	—	—	0.5	0.8	1.0
> 100 ~ 150	1200	—	—	—	—	—	0.7	1.2	1.3
> 150 ~ 200	1200	—	—	—	—	—	1.0	1.5	2.0

钢坯的直径 或边长 mm	Ⅰ 组 钢								
	最高允许 装炉炉温 ℃	保温, h	加热, h	锻造温度下最小保温时间, h			不同装料方式的总加热时间 h		
				装料方式					
				Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
> 200 ~ 250	1200	—	—	—	0.5	0.5	1.5	2.0	2.5
> 250 ~ 300	1200	—	—	0.5	0.5	0.75	1.8	2.5	3.0
> 300 ~ 350	1200	—	—	0.5	0.75	1.0	2.0	3.0	3.5
> 350 ~ 400	1200	—	—	1.0	1.0	1.5	3.0	4.0	5.0
钢坯的直径 或边长 mm	Ⅱ 组 钢								
	最高允许 装炉炉温 ℃	保温, h	加热, h	锻造温度下最小保温时间, h			不同装料方式的总加热时间 h		
				装料方式					
				Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
≤ 100	1200	—	—	—	—	—	0.6	1.0	1.3
> 100 ~ 150	1200	—	—	—	—	0.5	1.0	1.5	2.0
> 150 ~ 200	1200	—	—	0.5	0.5	0.6	1.5	2.0	3.0
> 200 ~ 250	1150	—	—	0.5	0.75	1.0	2.0	2.5	3.5
> 250 ~ 300	1150	—	—	0.5	0.75	1.0	2.5	3.0	3.8
> 300 ~ 350	1100	—	—	0.5	1.0	1.5	3.0	3.5	4.0
> 350 ~ 400	1100	—	—	1.0	1.0	2.0	3.5	4.0	5.0
钢坯的直径 或边长 mm	Ⅲ 组 钢								
	最高允许 装炉炉温 ℃	保温, h	加热, h	锻造温度下最小保温时间, h			不同装料方式的总加热时间 h		
				装料方式					
				Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
≤ 100	850	—	—	0.5	0.75	1.0	1.5	2.5	3.5
> 100 ~ 150	850	—	—	0.75	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0
> 150 ~ 200	850	—	—	1.0	1.2	1.5	3.0	3.5	5.0
> 200 ~ 250	800	—	—	1.0	1.5	2.0	3.5	5.0	5.5
> 250 ~ 300	800	—	—	1.25	2.0	2.5	4.5	5.5	6.5
> 300 ~ 350	800	—	—	1.5	2.5	3.0	5.5	6.0	8.0
> 350 ~ 400	800	—	—	2.5	2.5	3.0	6.5	7.0	9.0

注：总加热时间中含锻造温度下的保温时间。

表A4 冷锻件修整加热规范

锻件截面 尺寸或挡量 直径 mm	I 组 钢						
	最高允许 装炉炉温 ℃	保温, h	加热, h	装料方式		不同装料方式 的总加热时间, h	
				I	II		
				最小保温时间, h		I	II
≤ 300	950	—	—	1.5	3	1.5	3

锻件截面 尺寸或挡量 直径 mm	I 组 钢						
	最高允许 装炉炉温 ℃			装料方式		不同装料方式 的总加热时间, h	
				I	II		
				最小保温时间, h		I	II
> 300 ~ 500	950	—	—	2.0	4	2	4
> 500 ~ 750	850	1 ~ 2	1.5 ~ 2	3	4	5.5	8
> 750 ~ 1000	700	2 ~ 3	2 ~ 3	4	6	8	12
锻件截面 尺寸或挡量 直径 mm	II 组 钢						
	最高允许 装炉炉温 ℃			装料方式		不同装料方式 的总加热时间, h	
				I	II		
				最小保温时间, h		I	II
≤ 300	900	0.5	0.5	2	2.5	2.5	3.5
> 300 ~ 500	850	1 ~ 1.5	1 ~ 2	3	4	5	7.5
> 500 ~ 750	700	1.5 ~ 2.5	2 ~ 3.5	5	5	8.5	11
> 750 ~ 1000	600	2 ~ 3	3 ~ 5	6	6	11	14
锻件截面 尺寸或挡量 直径 mm	III 组 钢						
	最高允许 装炉炉温 ℃			装料方式		不同装料方式 的总加热时间, h	
				I	II		
				最小保温时间, h		I	II
≤ 300	750	1	2	2	3	5	6
> 300 ~ 500	650	1.5 ~ 2	3 ~ 3.5	2.5	3.5	7	9
> 500 ~ 750	650	2 ~ 2.5	4 ~ 5	5	6	11	13.5
> 750 ~ 1000	550	2.5 ~ 3	5 ~ 7	6	8	13.5	18

注:第 II 装料方式取表中保温与加热的上限值。

另 附表 A1 日本制钢所的钢锭**第一火**(初加热)加热规范

吨位	锭身 (T)	锭身长度 (mm)	底部端直径× 冒口端直径 (mm)	均径 (mm)	平均断面 积 (mm ²)	热送锭 550 ~ 1250 初加 热		保温 (h)	
						升温时间 (h)	速度 (/h)	普通	最少
6 BKT	4.91	1685	550×770	660	3712	10	70	5.5	1.5
8 BKT	6.3	1840	605×840	722.5	4631	10.5	67	6.5	1.5
8 CKT	6.5	1500	715×915	815	5520	10.5	67	6.5	2.5
9 BKT	7.73	1965	645×900	772.5	5011	10.5	67	6.5	2
9 CKT	8	1575	775×990	882.5	6470	11	64	7	3.5
11 BKT	9.5	2110	690×955	822.5	5735	11	64	7	3.5
16 BKT	13.36	2355	775×1075	925	7226	11.5	61	9	3.5
20 BKT	17.5	2575	845×1180	1012.5	8657	12	58	10	5
25CKT	21	2270	1055×1345	1200	11784	12.5	56	11	5
30CKT	27	2410	1160×1480	1320	14272	13	54	12	5.5

吨位	锭身 (T)	锭身长 度 (mm)	底部端直径× 冒口端直径 (mm)	均径 (mm)	平 均 断 面积 (mm ²)	热送锭 550 ~ 1250 初加 热		保温 (h)	
						升温时间 (h)	速度 (/h)	普通	最少
40CKT	32	2500	1235×1580	1407.5	16305	14	50	14	7
50CKT	38.1	2690	1260×1635	1447.5	18043	14.5	48	15.5	7
60CKT	46.1	2840	1360×1750	1555	20547	15	47	16.5	9
75CKT	57	3010	1310×1970	1640	24083	15	47	18	10
75CK	58	2945	1635×1880	1757.5	24200	15	47	18	10
90CK	70	3035	1755×2025	1887.5	28040	15.5	45	19.5	11
90CKT	70	3200	1415×2130	1772.5	27866	15.5	45	19.5	11
105CK	80	3285	1790×2090	1940	31000	15.5	45	20.5	12
105CKT	81	3320	1665×2150	1907.5	31079	15.5	45	20.5	12
120CK	94	3480	1885×2200	2042.5	34400	16	44	22	12.5
120CKT	94	3450	1760×2270	2015	34708	16	44	22	12.5
140CK	110	3405	2100×2410	2255	39900	16	44	23.5	15
180CK	140	3910	2180×2535	2357.5	45610	16.5	42	26	16
250CK	200	4320	2510×2855	2682.5	58600	17.5	40	36	18.5
350DK	263	3770	3015×3640	3325	88867	20	35	73	—
450DK	385	3960	3560×4215	3887.5	123850	25	28	110	—
600DK	461	4440	3790×4285	4037.5	132270	30	23	110	—

注：1.至 140T 的第一次锻压温度保温时间基本是 1h/100mm（平均直径）

2.最少保温时间适用于（一般材料一般用途产品）钢锭的压把、倒棱、啃底

3.待料温度：550

附表 A2 日本制钢所（热锭或坯后几火的）再加热表（750 ~ 1250）

坯料直径 (mm)	升温时 间 (h)	升速 (/h)	保温		坯 料 直 径 (mm)	升温时间 (h)	升速 (/h)	保温	
			普通	最少				普通	最少
400	3	167	1	1	2400	8.5	59	21.5	13
500	3.5	143	2	1	2500	8.5	59	23	14
600	4	125	3	1	2600	8.5	59	24	15
700	4.5	111	4	1.5	2700	8.5	59	25	15.5
800	5	100	5	2	2800	8.5	59	26	16.5
900	5.5	91	6	2.5	2900	9	56	27	17
1000	6	83	7	3	3000	9	56	28.5	18
1100	6	83	8	3	3100	9	56	30	18.5
1200	6.5	77	9	3.5	3200	9	56	31.5	19.5

坯料直径 (mm)	升温时 间 (h)	升速 (/h)	保温		坯料直径 (mm)	升温时 间 (h)	升速 (/h)	保温	
			普通	最少				普通	最少
1300	6.5	77	10	4.5	3300	9.5	53	33	20
1400	7	71	11	5	3400	9.5	53	35	21
1500	7	71	12	6	3500	9.5	53	37	22
1600	7.5	67	13	7.5	3600	9.5	53	39.5	23
1700	7.5	67	14	7.5	3700	9.5	53	41.5	23.5
1800	7.5	67	15	8.5	3800	10	50	44	24.5
1900	7.5	67	16	9	3900	10	50	47	25
2000	8	63	17	10	4000	10	50	50	26
2100	8	63	18.5	11	4100	10	50	53	27
2200	8	63	19.5	11.5	4200	10	50	56	28
2300	8	63	20.5	12.5					

▲ 关于保温时间的一些重要规定：

JTS ————— 普通保温时间×1.1

WHF 转子 ————— 普通保温时间×1.7

WHF 其它和 AI 终脱氧锭 ——— 普通保温时间×1.2

AI 终脱氧锭+WHF ————— 普通保温时间×1.5

(MnMoNi55,SA508- 等核电锻件锻造温度保温时间至少按“普通”，最多为“普通”+12 小时)

▲ 加热件当量直径计算规定

饼类件 厚度×1.5≥直径时，取直径；厚度×1.5 < 直径时取厚度×1.5；

筒体、圈类 外径 < 950mm 时取外径；

外径≥950mm、且长度（或高度）≥外径/3 时，取其厚度（即外径-内径）×2；

外径≥950mm、且长度（或高度）< 外径/3 时，取其厚度（即外径-内径）×1.5。

轴类件 按最大外径。

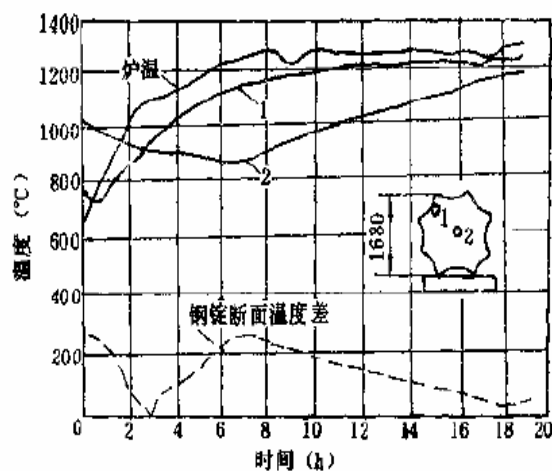


图3 88t 9CrV 热送锭升温实测 (1- 表面, 2- 心部)

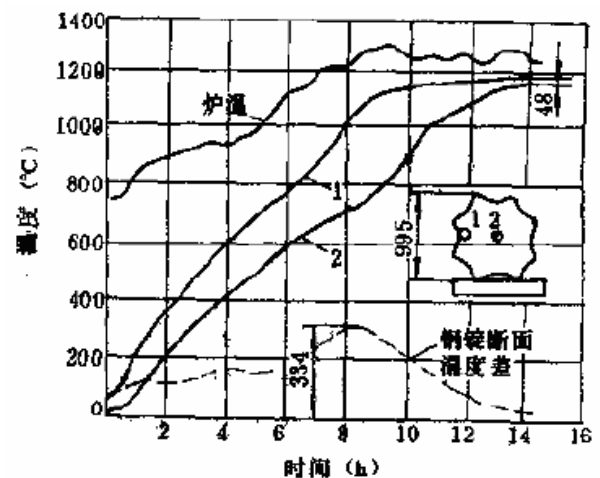


图4 19.5t 20MnMo 冷锭升温实测