

锻造余热 热处理

戚正风 隋凤桐 靖殿军 编著

机械工业出版社

锻造余热热处理

戚正风 隋凤桐 靖殿军 编著

机械工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了钢在锻造余热热处理的加热与冷却过程中所发生的各种转变, 锻造余热热处理工艺, 锻造余热热处理所用设备以及锻造余热热处理生产线的设计等, 最后还列举了锻造余热热处理生产线的一些实例。

本书可供从事锻造、热处理、车间设计以及零件设计等方面工作的技术人员及工人阅读, 也可供金属材料热处理及压力加工专业的师生在教学中参考。

锻造余热热处理

戚正风 隋凤桐 靖殿军 编著

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

中国农业机械出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092 1/32·印张 12·字数 261 千字

1987年4月北京第一版·1987年4月北京第一次印刷

印数 00,001—3,730·定价 2.75 元

统一书号: 15033·8451

前言

60408/19

形变热处理是一种综合应用各种强化手段提高钢材强韧性的先进工艺。这一工艺既能进一步挖掘钢材的潜力，又能显著节约工时与能耗，因此受到人们重视。凡在相变前先行形变且相变又受形变影响的工艺均可称为形变热处理。形变热处理种类很多。在各种各样形变热处理中，目前在机械制造行业中应用最广的首推锻造余热热处理。这是因为形变热处理的一个主要特点是在改变性能的同时也将改变形状。因此，与其他一些提高使用性能的热处理工艺不同，在形变热处理之后，必须进行机械加工。由于此时零件已被强化，这就给机械加工带来困难。但对于锻造余热淬火等工艺来说，这一困难并不存在。因为经这些工艺处理的零件在使用状态下硬度与强度并不高，不影响机械加工。而采用锻造余热处理工艺却可在提高强韧性的同时显著节约工时与能耗。

所谓锻造余热热处理指的是在锻后利用锻造余热立即进行热处理的一种工艺。其中包括锻造余热淬火、退火及正火等。

但不能把锻造余热热处理看成是一般的热处理而应将其看成是形变热处理的一种。关于这个问题目前还有些不同看法。一种意见认为如果锻造形变所造成的强化效应能保留到热处理之后，则可将其归并入高温形变热处理的范畴。否则，如果锻造形变强化效应已经通过回复与再结晶而消失，

锻后立即进行的热处理仅仅是利用了锻造所留下的余热，则不应再称之为高温形变热处理，亦即不应再将其看成是形变热处理。我们认为这一看法是有片面性的，我们的意见是如果把形变的影响不仅仅局限于热处理后是否保留形变强化效果而是将其扩大到对形变后的相变以及相变所得产物及其性能的影响，则利用锻造后的余热立即进行的热处理均可看成是形变热处理。因为即或在锻造形变之后进行了充分的回复与再结晶，但所得的组织仍与锻造形变密切相关，如再结晶所得晶粒比较粗大，奥氏体晶界比较干净等等，这些都必将影响随后所发生的相变及相变所得的组织与性能。因此从这一点看，应该将锻造余热热处理列入形变热处理而不应将不保留形变强化效应的锻造余热热处理看成与一般热处理没有甚么差别。

但由于这是介于锻造与热处理之间的一种工艺，这一工艺的采用不仅需要从事锻造与热处理的技术人员与工人之间的密切配合，而且还要对锻造车间进行适当的改造。这就使这一先进工艺的推广应用受到一定限制。我们编写本书的目的也就在于克服这一障碍以使这一先进工艺能尽快得到普遍推广应用。

本书一共分五章。考虑到原来从事锻造的技术人员与工人的需要，在本书的第一章中扼要地但较全面地介绍了钢料在锻造余热热处理的加热与冷却过程中可能发生的各种转变。可以认为，第一章是锻造余热热处理工艺的理论基础。在此基础上，我们在第二章中介绍了各种锻造余热热处理工艺。

一种工艺的实现必须得到设备上的保证。锻造余热热处理工艺不仅涉及锻造设备，而且也涉及热处理设备。因此我

们在第三章中介绍了各种各样的有关设备并尽可能给出了这些设备的主要参数，供选用这些设备时参考。

在采用这一工艺时往往需要对生产线甚至整个车间进行改造。本书的第四章就是针对这一目的编写的。为了供车间设计者在设计时作为借鉴，我们在最后一章列举了一些目前已经正式生产的锻造余热热处理生产线。

本书的第一、二章是由大连铁道学院戚正风同志编写的；第三、四、五章是由机械部第五设计院隋凤桐、水电部郑州机械所靖殿军二位同志合写的，全书经南京汽车厂王东升同志审阅。本书在编写过程中引用了一些同志的资料，特此致谢。

由于我们水平有限，错误在所难免，望读者批评指正。

戚正风

1985.8.8于北京

目 录

前言

第一章 钢在锻造余热热处理时的转变	1
一、钢在加热时的转变	1
(一) 平衡态钢的加热转变	1
(二) 非平衡态钢的加热转变	3
(三) 奥氏体晶粒的长大	8
(四) 晶界偏聚与熔化	13
二、奥氏体的形变与再结晶	14
(一) 奥氏体的形变抗力	14
(二) 奥氏体热形变后的回复与再结晶	19
三、高温形变对过冷奥氏体分解过程的影响	35
(一) 过冷奥氏体的分解	35
(二) 高温形变对先共析铁素体析出过程的影响	43
(三) 高温形变对碳化物析出过程的影响	47
(四) 高温形变对珠光体及贝氏体转变的影响	49
四、高温形变对马氏体转变及回火转变的影响	53
(一) 马氏体转变	53
(二) 形变对马氏体转变过程的影响	56
(三) 高温形变对马氏体转变产物的影响	58
(四) 高温形变对回火的影响	63
参考文献	64
第二章 锻造余热热处理工艺	68
一、概述	68
二、亚共析钢锻热淬火	69
(一) 锻热淬火	69
(二) 锻热淬火后的力学性能	74

(三) 影响锻热淬火后性能的因素	78
(四) 锻热淬火强韧化机理	103
三、过共析钢锻热处理	118
(一) 过共析钢热处理要点	118
(二) 过共析钢锻热处理工艺	120
四、锻造余热等温淬火	126
五、渗碳钢锻造余热等温退火	128
六、锻造余热正火及退火	131
七、锻造余热强化正火	133
参考文献	134
第三章 设备	139
一、成形设备	139
(一) 蒸汽(空气)模锻锤	139
(二) 摩擦压力机	141
(三) 热模锻压力机	142
(四) 平锻机	143
(五) 辊锻机	145
(六) 扩孔机	146
二、加热设备	147
(一) 毛坯高温加热炉	147
(二) 锻件热处理炉	155
(三) 感应加热设备	173
三、冷却设备	182
(一) 淬火槽	183
(二) 缓冷装置	185
(三) 辅助冷却设备	189
四、清理设备	200
(一) 清理滚筒	200
(二) 抛(喷)丸设备	201

(三) 酸洗设备	203
五、检验设备	205
(一) 磁性硬度分选器	205
(二) 磁力探伤机	207
六、温度测量和调节装置	208
(一) 温度检测装置	208
(二) 温度显示和调节仪表	215
(三) 辅助机构和执行机构	218
(四) 温度控制系统实例	221
七、机械化运输设备	225
(一) 输送机构	225
(二) 进出料机械手	228
(三) 其它装置	231
参考文献	232
第四章 锻造余热热处理生产线的设计	233
一、生产组织	233
(一) 锻件的生产批量	233
(二) 生产纲领及设计能力	234
(三) 工作制度及年时基数	235
(四) 负荷时数及负荷率	236
二、工艺过程和设备的选择	237
(一) 制坯工艺及设备选择	238
(二) 锻造过程及设备选择	242
(三) 余热热处理工艺过程及设备选择	269
(四) 清理氧化皮	283
(五) 锻件质量检验	286
三、工序流程及结构	289
(一) 工序流程图	289
(二) 生产线的类型	291
(三) 生产线的结构	293

四、设备布置	294
(一) 设备布置原则	294
(二) 设备布置方法	295
(三) 设备的并联	298
五、公用部分	300
(一) 淬火介质循环冷却系统的设计	300
(二) 动力公用资料的计算	311
六、技术经济分析	321
(一) 基建投资的计算	322
(二) 工艺方案成本的计算	325
(三) 技术经济分析的效果及指标	329
(四) 技术经济分析论证的原则	330
参考文献	330
第五章 锻造余热热处理生产线实例	332
一、简易生产线	332
(一) 135系列柴油机连杆锻热淬火简易生产线	332
(二) 红旗100履带拖拉机链轨节锻热淬火简易生产线	334
(三) 130火箭弹喷射管锻热淬火简易生产线	335
(四) 梭尖锻热淬火简易生产线	337
(五) 推杆套筒挤压成形余热退火简易生产线	339
(六) 矿用联接环锻热淬火简易生产线	339
二、半连续式生产线	341
(一) 机械化半连续式生产线	341
(二) 自动化半连续式生产线	344
三、综合生产线	347
(一) 95连杆锻热淬火综合生产线	347
(二) 曲轴余热正火加高温回火自动化综合生产线	348
(三) 支重轮余热调质自动化综合生产线	349
(四) 连杆余热调质自动化综合生产线	349
(五) 凸轮轴余热调质自动化综合生产线	350

(六) 汽门锻热淬火自动化综合生产车间	351
四、联合生产线	352
(一) 农业机械提升机链环锻热淬火联合生产线	352
(二) 犁头余热调质联合生产线	353
参考文献	354
附录	358
1 蒸汽(空气)模锻锤技术参数及工作性能	356
2 摩擦压力机技术参数及工作性能	359
3 热模锻压力机技术参数及工作性能	362
4 垂直分模平锻机技术参数及工作性能	364
5 水平分模平锻机技术参数及工作性能	367
6 辊锻机技术规格	370
7 全国各城市选用冷却塔设计的湿球温度	372

第一章 钢在锻造余热热处理

理时的转变

一、钢在加热时的转变

钢加热到临界点以上将转变为奥氏体。奥氏体是碳与合金元素溶于 γ 铁所形成的固溶体。

钢加热时从低温组织转变为奥氏体的过程称为加热转变。对钢的加热转变已进行了广泛的研究^[1~4]。结果表明,钢的加热转变与转变开始时的组织密切相关,亦即与加热前的原始组织、加热速度、转变温度、钢料成分等有关。下面分别讨论具有不同原始组织的钢的加热转变。

(一) 平衡态钢的加热转变

平衡态指的是退火、正火以及淬火并充分回火 α 基底已再结晶的状态,此时碳以碳化物状态存在。碳化物可能呈片状,如退火、正火后,也可能呈颗粒状,如淬火并高温回火后。 α 相可能呈片状,如珠光体中的 α 相;或成等轴状,如先共析铁素体或淬火并高温回火后得到的在其上分布有颗粒状碳化物的等轴铁素体。一般锻造加热前都为平衡态。

将平衡态的共析钢加热到 A_{c1} 以上将转变成奥氏体。转变是通过形核与长大进行的。

一般认为奥氏体的核在铁素体与渗碳体交界面上形成。但近年的工作^[3,4]表明奥氏体的核更易在大角晶界上形成,其中包括珠光体团界、珠光体与铁素体交界面、铁素体与铁素体晶粒交界面。如加热速度较快,转变被推迟到较高温

度，则奥氏体的核也可能在铁素体晶粒内嵌镶块边界，即亚晶界上形成^[6]。

奥氏体的核在铁素体与渗碳体交界面上形成是因为这里易于满足形核时对成分与能量的需要。因铁素体含碳仅0.02%，渗碳体含碳为6.69%，而在略高于 Ac_1 时所形成的奥氏体的含碳量为0.77%，介于二者之间，远高于铁素体含碳量，故在铁素体内难以形成奥氏体核，而在铁素体与渗碳体交界面上就容易满足对成分的要求，形成含碳0.77%的奥氏体核。此外，铁素体与渗碳体交界面的界面能可以提供形核所需的能量。易于在大角晶界形核与上述讨论并不矛盾，因为在大角晶界上也有渗碳体，奥氏体的核也总是在这些渗碳体旁边形成。

一般认为奥氏体的核是通过扩散机构形成的，即核形成时碳原子和铁原子都发生了扩散。

奥氏体核形成后，由图1-1a可见，如转变在 t_1 进行，则与 α 接壤的奥氏体量的含碳量为 $C_{\gamma-\alpha}$ ，而与渗碳体接壤的奥氏体的含碳为 $C_{\gamma-Fe_3C}$ 。因 $C_{\gamma-Fe_3C} > C_{\gamma-\alpha}$ ，故奥氏体中的碳将从与渗碳体接壤处向与铁素体接壤处扩散。这就破坏了界面的平衡。为恢复平衡铁素体与渗碳体将溶于奥氏体中，亦即奥氏体界面随碳在奥氏体

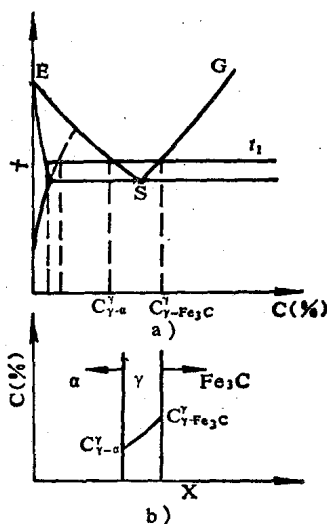


图1-1 奥氏体在 t_1 温度形成时碳浓度的变化

中的扩散而向铁素体与渗碳体推移(图1-1b)。奥氏体晶粒不断长大成颗粒状奥氏体。这一长大过程受碳在奥氏体中的扩散所控制。

对于共析钢来说,当铁素体完全消失时奥氏体的平均含碳量仍低于共析成分。这是因为仅当Fe-C状态图中的GS与ES对称于S点,且奥氏体中的含碳量呈直线变化时奥氏体的平均含碳量才能等于共析成分。但实际上GS与ES不对称于S点,ES的斜率较大且奥氏体中的含碳量不呈直线变化而是呈向上凹的曲线。故铁素体消失时,奥氏体的平均含碳量仍低于共析成分,因此必然有未溶渗碳体存在。故进一步的转变将是残留渗碳体的溶解。该溶解过程也受碳在奥氏体中的扩散所控制。

渗碳体全部溶入后,奥氏体中碳的分布仍不均匀,随温度升高与时间延长,碳将通过扩散趋于均匀分布。

综上所述,可将奥氏体的形成概括为形核、长大、渗碳体的溶解及碳的均匀化四个阶段。

由平衡组织加热转变所得的是颗粒状奥氏体。奥氏体晶粒大小取决于形核率 n 及长大速度 c 。 n 越大、 c 越小则晶粒越细。随转变温度升高, n 增加得快, c 增加得慢,故使晶粒细化。众所周知,提高加热速度可以将转变推向高温,故可用快速加热来细化奥氏体晶粒。

对于亚共析及过共析钢来说,在珠光体全部转变为奥氏体后,随温度的升高与时间的延长,先共析铁素体及先共析渗碳体将继续溶入奥氏体中。

(二) 非平衡态钢的加热转变

非平衡态组织指的是马氏体、贝氏体及回火不充分的淬火组织。中碳结构钢非平衡组织的共同特点是 α 相具有板条

特征。高碳钢非平衡组织的特点是 α 相具有透镜片状特征。

文献〔3,6〕总结了非平衡态结构钢加热转变的一般情况。文献〔4〕对此作了进一步探讨。文献〔7〕探讨了非平衡态过共析钢的加热转变。

非平衡态钢的加热转变比较复杂，不仅与加热前的组织状态有关，而且还与钢料成分、加热速度、转变温度等有关。

淬火态合金结构钢以 $1\sim 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的极慢的速度加热时，只要在发生转变前马氏体虽已回火，但 α 基底还未发生再结晶，仍然保留板条特征，则在加热到略高于 A_{c1} 时，在板条条界将形成奥氏体的核并沿条界长成针状奥氏体。在同一板条束内所形成的针状奥氏体具有相同的位向且与 α 保持K-S关系。在转变结束前，新形成的针状奥氏体与还未转变的针状 α 相相间组成类似珠光体的组织(图1-2)。随加热温度升高，保温时间延长， α 将继续转变为 γ 。最后同一板条束内位向

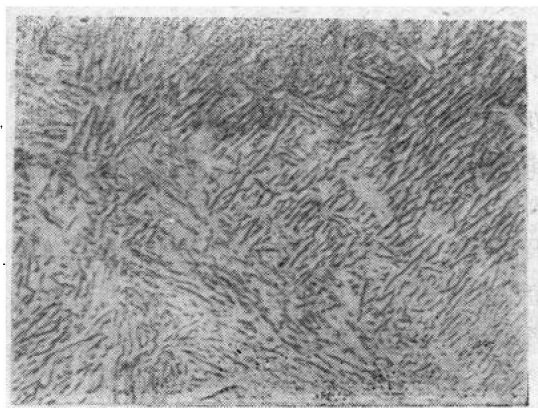


图1-2 30CrMnSi经 1280°C 淬火后以 $1\sim 2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 慢速加热到 800°C 所得 $(\gamma + \alpha)$ 组织 400 $\times$

相同的针状奥氏体将彼此相遇而合并成一与板条束尺寸相当的粗大的颗粒状奥氏体。这一现象称为组织遗传，即新形成的奥氏体晶粒继承了原奥氏体晶粒的尺寸。此时虽已得到单一的奥氏体，但在奥氏体晶粒内还保留一些弥散分布的小斑点(图1-3)，必须加热到更高温度或保温更长时间才能使斑点消失而得到常见的奥氏体组织。

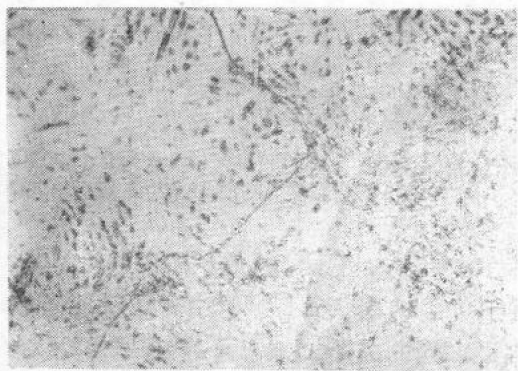


图1-3 30CrMnSi经1280℃淬火后以1℃/min的速度加热到950℃所得存在有斑点的粗大奥氏体晶粒400×

如以大于1~2℃/min的中速加热，使转变在接近 A_{c3} 的较高的温度进行，则奥氏体核最易在原奥氏体晶界形成，称为晶粒边界效应。其次也可在板条马氏体束界等大角晶界上形成。核形成后通过扩散机构长成颗粒状奥氏体。不平衡态加热时，颗粒状奥氏体的形核率较平衡态加热时高，故加热后可得到细晶粒奥氏体组织(图1-4)。

淬火后的回火将使颗粒状奥氏体的形核率显著降低，故必须以更快的加热速度使转变在更高的温度下进行才有可能形成细颗粒状奥氏体，否则就有可能形成针状奥氏体而引起

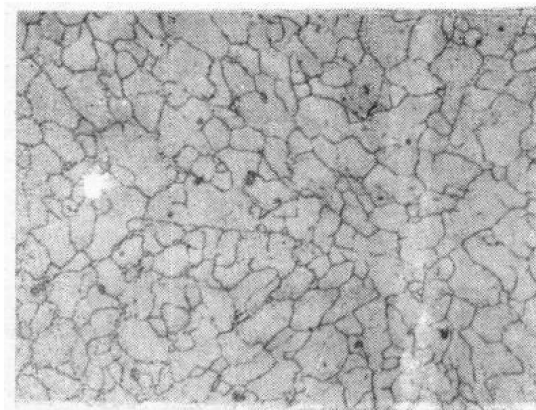


图1-4 30CrMnSi钢经1280°C淬火后以1800°C/min的速度加热到950°C所得细晶粒奥氏体组织400×

组织遗传^[4]。图1-5是不同原始状态的30CrMnSi在同样条件下加热时所得的单位面积视野中颗粒状奥氏体的个数与加热到的温度之间的关系。单位面积中晶粒数愈多，晶粒愈细。由图可见，淬火态加热时所得的奥氏体晶粒最细小。

如以1000°C/s以上的极快的速度加热，则将使原奥氏体晶粒得到完全恢复而引起另一种组织遗传。图1-6是40CrNiMo预经1280°C淬火后再经激光快速加热淬火所得的组织。由图可见月牙形激光淬硬带内的奥氏体晶粒与1280°C预淬火时所形成的粗大奥氏体晶粒完全一样。这表明快速加热已使原奥氏体晶粒得到完全恢复。关于快速加热时奥氏体的形成机构到目前为止还未完全弄清。

综上所述可见非平衡态结构钢加热时由于加热条件的不同有可能形成不同大小的奥氏体起始晶粒。

非平衡态过共析钢的加热转变与亚共析钢具有很多相似之处，但有两点不同于亚共析钢^[7]，一是过共析钢的非平