

第2版

RECHULI SHIYONG JISHU

热处理 实用技术

李泉华 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TG15/15

2007

热处理实用技术

第 2 版

李泉华 主编

机械工业出版社

本书集热处理工艺、设备及检验技术为一体,系统地介绍了数十种热处理工艺、设备操作及检验方法,提供了各种不同设备、材料及工艺条件下的最佳工艺参数、质量控制技术诀窍、渗剂配方,以及控制热处理畸变、裂纹、淬硬的强韧化和表面处理技术。本书案例典型,实用性和可操作性强。

本书适用于企业从事热处理生产的工人、技术人员,也适用于从事设计、制造的机械工程师和管理人员,并可作为工科高等院校、科研单位的参考书,同时亦可作为材料热处理工程师资格考试参考书。

图书在版编目(CIP)数据

热处理实用技术/李泉华主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2006.12

ISBN 7-111-07699-0

I. 热… II. 李… III. 热处理 IV. TG15

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第135911号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:杨民强 版式设计:霍永明 责任校对:吴美英

封面设计:王伟光 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2007年1月第2版·第1次印刷

184mm×260mm·30.5印张·752千字

13 001—17 000册

定价:49.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379771

封面无防伪标均为盗版

前言

《热处理实用技术》一书由于通俗易懂、实用性和可操作性强等特点，自 2000 年出版以来，已 6 次印刷，发行 13000 多册，深受读者喜爱。但随着热处理设备及检测技术的不断提高，热处理工艺也有了显著进步，因此有必要对该书重新进行修订，以满足广大读者的需求。

本书仍保留原书名，集热处理工艺、设备、检测技术为一体，便于读者查阅、保存。全书共分 3 章，第 1 章分为整体热处理、化学热处理、表面处理、铸铁热处理、有色金属热处理、模具热处理、刀具热处理、量具与工具热处理、典型零件热处理共 9 节，条目更加清晰。不仅挖掘整理了传统热处理工艺的技术诀窍，而且提供了数百种化学热处理渗剂配方，还增加了控制产品零件、模具、刀具、工具热处理畸变、裂纹、淬硬的强韧化和表面处理技术；并补充了有色金属、铸铁件的优选工艺和表面强化工艺，通过生产实践论证其应用效果。第 2 章按常用热处理设备、可控气氛炉、真空热处理炉和表面处理设备分类，增加了新设备的安全与维修技术。第 3 章除保留原有各类热处理质量检验标准外，特意增加了理化、金相检测分析方法和裂纹、断口分析技术，便于读者及时、准确地掌握产品零件质量检测和零件失效分析手段，查找材料零件失效的根本原因，不断提高产品质量。

本书是全体热处理工作者，特别是企业技术人员、工人师傅宝贵经验的历史积淀。因此，该书是热处理工作者的共同财富，每一项技术都渗透着他们的心血，在此不能一一将他们的姓名公示，甚感遗憾，希望读者不要忘记他们的辛勤劳动和为此付出的毕生精力，在此深表敬意。数据共享，造福社会，这是作者惟一心愿。同时也要指出，书中介绍的各种工艺、技术诀窍和渗剂配方只是为读者在解决实际生产问题时提供了一条快捷途径，避免盲目性和少走弯路；由于生产现场条件（设备、操作技巧等）和具体零件材料及工况条件不同，切不可生搬硬套，工艺实施时还要活学活用，经过自己亲身试验验证后，才能投入批量生产，以免造成不必要的浪费。书中不妥之处，敬请批评指正。

本书在编写过程中得到北内集团总公司和机械工业出版社的大力支持，宋宝敬、屠世润、张祖凤、黄艳霞、严范梅、朱彩绵、张增民、邢志松、赵惠兰、李刚、李茜、赵国强、解智慧、汪人先、陈传文、苏运波、徐跃明、石康才、李韵豪、刘香国、刘树仁、潘晓岭、王宝平、张书民、赵淑芬、商伟伟等提供了资料或参与了有关章节的编写整理工作，在此谨向有关作者表示衷心的感谢。

李泉华

目 录

前言

第1章 热处理常规工艺及改进

技术 1

1.1 钢的整体热处理常规工艺及控制

热处理畸变、裂纹、淬硬的强韧化

技术 1

1.1.1 钢的常规退火工艺 1

1.1.2 钢的多种实用型退火新工艺 7

1.1.3 钢的常规正火工艺 11

1.1.4 钢的实用型正火新工艺 12

1.1.5 钢的常规淬火工艺 13

1.1.6 控制钢件畸变、淬硬、裂纹的强

韧化热处理工艺技术 18

1.1.7 钢件盐浴炉常规淬火工艺及盐浴

炉加热的改进措施 40

1.1.8 钢的常规回火、真空回火、高温

快速回火工艺 45

1.1.9 校直工艺 49

1.1.10 清洗、喷砂和喷丸、防锈

工艺 51

1.2 钢的化学热处理实用技术和多种

渗剂配方 52

1.2.1 钢的常规渗碳工艺及改进

技术 52

1.2.2 钢的薄层(0.15~0.40mm)渗碳

工艺 61

1.2.3 钢的深层渗碳工艺 63

1.2.4 钢的真空渗碳工艺的质量

控制 66

1.2.5 钢的离子渗碳 67

1.2.6 气体渗氮工艺的质量控制及

改进技术 68

1.2.7 钢的离子渗氮工艺的质量控制及

改进工艺 74

1.2.8 钢的盐浴 QPQ 处理工艺 78

1.2.9 渗氮缺陷及其防止方法 80

1.2.10 钢的碳氮共渗工艺的质量控制及

改进工艺 81

1.2.11 钢的薄层及深层的碳氮共渗

工艺 88

1.2.12 稀土催渗剂配制技术 89

1.2.13 钢的气体氮碳共渗及复合

处理工艺 91

1.2.14 钢的固体氮碳共渗工艺 97

1.2.15 钢的离子氮碳共渗工艺 98

1.2.16 钢的液体氮碳共渗工艺 100

1.2.17 钢的渗硼工艺及多种渗剂

配方 100

1.2.18 钢的渗硫工艺 106

1.2.19 钢的多种实用型渗铝工艺 108

1.2.20 钢的渗锌 116

1.2.21 钢的多元共渗优选工艺 118

1.3 表面处理工艺的质量控制与改进

技术 122

1.3.1 感应加热淬火的质量控制 122

1.3.2 感应器设计的诀窍 133

1.3.3 火焰淬火的质量控制 138

1.3.4 激光淬火工艺的质量控制 140

1.3.5 发蓝工艺的质量控制与改进

工艺 143

1.3.6 钢铁磷化工艺的质量控制和

多种磷化液配方 147

1.3.7 化学沉积镍磷合金表面处理

工艺和多种工艺配方 152

1.3.8 碳化钛(或氮化钛)涂覆工艺 154

1.4 铸铁件常规热处理工艺及改进

技术 157

1.4.1 灰铸铁的常规热处理及表面

强化工艺 158

1.4.2 球墨铸铁的常规热处理及强韧化

处理工艺 160

1.4.3 可锻铸铁的退火工艺 170

1.4.4 合金铸铁的热处理常规工艺及强

韧化处理技术 172

1.5 有色金属热处理的常规工艺及强 韧化工艺	176
1.5.1 铝及铝合金的热处理常规工艺及 改进工艺	176
1.5.2 铜及铜合金的热处理常规工艺及 改进工艺	184
1.5.3 钛及钛合金的常规热处理工艺及 改进工艺	191
1.5.4 镁及镁合金的热处理常规工艺及 改进工艺	193
1.6 模具热处理的强韧化和表面处理 技术	197
1.6.1 模具预备热处理工艺操作 技术	198
1.6.2 热作模具的真空热处理常规工艺 操作技术	200
1.6.3 锤锻模的热处理强韧化及表面 处理技术	201
1.6.4 热挤压模的热处理强韧化及表面 处理工艺	213
1.6.5 压铸模的热处理强韧化和表面 处理工艺	219
1.6.6 冷作模具常规热处理工艺的 操作技术	221
1.6.7 冷冲裁模具的热处理强韧化和 表面处理技术	226
1.6.8 切边模、剪切模的选材与热 处理工艺	240
1.6.9 冷镦模具的热处理强韧化和 表面处理技术	245
1.6.10 冷挤压模具的选材与热处理强 韧化和表面处理技术	248
1.6.11 拉深模的选材与热处理强韧化 和表面处理技术	250
1.6.12 滚丝模的选材与热处理强韧化 和表面处理技术	252
1.6.13 塑料模具的选材与热处理 强韧化工艺	255
1.7 刀具热处理常规工艺及热处理 强韧化与表面处理技术	260
1.7.1 高速钢的预处理工艺及改进 技术	260
1.7.2 高速钢刀具常规热处理工艺	

操作技术	262
1.7.3 高速钢刀具控制热处理畸变和 强韧化与表面处理技术	267
1.7.4 低合金高速钢、V3N 超硬高速 钢、M2Al 高碳含铝高速钢和 粉末冶金高速钢刀具热处理 工艺	274
1.8 量具、工具类常规热处理工艺及控制 淬火畸变和强韧化技术	277
1.8.1 量具常规热处理工艺的质量 控制	278
1.8.2 量具热处理控制畸变与强韧化 技术	279
1.8.3 不锈钢刀剪类热处理强韧化 工艺	282
1.8.4 木工工具的热处理 强韧化技术	282
1.8.5 农机具热处理工艺强韧化 技术	285
1.8.6 钳工工具热处理工艺强韧化 技术	288
1.9 典型零件热处理工艺的质量控制 和强韧化技术	294
1.9.1 轴类零件热处理的强韧化 技术	294
1.9.2 齿轮热处理控制畸变、淬硬、 裂纹的强韧化工艺	302
1.9.3 弹簧的热处理强韧化工艺	308
1.9.4 大型锻件的热处理强韧化 技术	313
1.9.5 轧辊的热处理强韧化工艺	317
1.9.6 滚动轴承零件的热处理强韧化 技术	322

第2章 热处理设备操作、安全与

维修技术

2.1 热处理常用设备的操作、安全与 维修技术和设备改造	326
2.1.1 箱式电阻炉的操作技术和 设备改造	326
2.1.2 井式电阻炉操作技术	332
2.1.3 常用电热元件及热电偶材料	338
2.1.4 浴炉操作、安全与维修技术和 设备改造	340

2.1.5	振底式煤气加热炉操作技术	349	2.3.9	中、高频电源设备主要技术指标 比较	407
2.1.6	电加热振底炉操作技术	350	2.3.10	晶闸管中频加热电源的主要 故障及排除方法	408
2.1.7	推杆式煤气炉操作技术	351	2.4	真空热处理设备的操作、安全与 维修技术	409
2.1.8	热处理工件及刀具校直技术	353	2.4.1	VSE 立式真空淬火炉的操作 技术	409
2.1.9	火焰淬火装置操作技术	355	2.4.2	WZC—45 型真空油气淬火炉 操作技术	411
2.1.10	LD51 型推杆炉操作技术	356	2.4.3	WZH—45 型真空回火炉的结构 和操作技术	413
2.1.11	电阻炉温度管理技术	359	2.4.4	真空热处理炉的使用维护和 性能试验	415
2.2	可控气氛炉及控制气氛设备的操作、 安全与维修技术	361	第 3 章 热处理质量检验与分析 技术	417	
2.2.1	54m ³ /h 制氮系统 (PSN—2 型) 操作技术	361	3.1	热处理质量检验	417
2.2.2	PSN—1 型制氮装置操作 技术	363	3.1.1	热处理检验通则	417
2.2.3	326B 型氧分析仪操作技术	367	3.1.2	退火、正火及调质件质量 检验	418
2.2.4	54m ³ 氮气发生器氧分析仪操作 技术	368	3.1.3	淬火件质量检验	419
2.2.5	60m ³ /h 电加热吸热式气体发生炉 操作技术	369	3.1.4	渗碳件质量检验	421
2.2.6	电加热连续式气体渗碳炉生产线 操作技术	372	3.1.5	碳氮共渗件质量检验	423
2.2.7	15—HERT—24128—17AS 链板式 连续热处理生产线操作技术	374	3.1.6	气体渗氮件质量检验	425
2.2.8	Abar Zpsen 周期炉生产线操作 技术	379	3.1.7	氮碳共渗件质量检验	426
2.2.9	可控气氛炉的安全操作技术和 维修保养技术	385	3.1.8	冷作模具热处理质量检验	427
2.2.10	BCRX—Z 系列全自动薄板件 成形淬火生产线操作技术	388	3.1.9	热作模具热处理质量检验	429
2.3	表面处理 (离子渗氮、磷化、激光淬火、 感应加热淬火) 设备的操作、安全与 维修技术	389	3.1.10	高速工具钢质量检验	430
2.3.1	离子渗氮装置操作技术	389	3.1.11	感应加热热处理件质量检验	439
2.3.2	缸体激光淬火生产线操作 技术	391	3.1.12	火焰淬火件质量检验	443
2.3.3	磷化生产线操作技术	392	3.1.13	铸造铝合金铝锭及铸件针孔 度检验	444
2.3.4	BPS 型中频机组操作、安全与 维修技术	394	3.1.14	铸造 Al-Si 系合金变质处理显微 组织检验	446
2.3.5	曲轴旋转淬火机床操作技术	398	3.1.15	ZL10 系铸造铝合金过烧 检验	447
2.3.6	GP 型高频感应加热装置操作、 安全与维修技术	400	3.1.16	铍青铜零件热处理质量 检验	449
2.3.7	螺杆钻具中定子和转子的中频 感应热处理生产线	404	3.1.17	渗硼件的热处理质量 检验	450
2.3.8	族类工件感应淬火机床	406	3.1.18	钢的热浸镀锌质量 检验	452
			3.1.19	高速钢刀具氧氮共渗的质量	

检验	452	3.2.3 无损探伤	460
3.2 材料化学成分、力学性能、无损		3.2.4 金相组织试验与分析技术	460
探伤和金相组织检验与分析		3.2.5 裂纹分析技术	462
技术	453	3.2.6 断口分析技术	465
3.2.1 材料化学成分的检验	453	参考文献	476
3.2.2 力学性能试验	455		

第 1 章 热处理常规工艺及改进技术

1.1 钢的整体热处理常规工艺及控制热处理畸变、裂纹、淬硬的强韧化技术

对工件整体进行穿透加热的热处理工艺称为整体热处理。钢的整体热处理主要是退火、正火、淬火、回火。

1.1.1 钢的常规退火工艺

钢的退火是指将钢或钢件加热到适当温度，保持一定时间，然后缓慢冷却的热处理工艺。

退火分为完全退火、不完全退火、等温退火、球化退火、均匀化退火、去应力退火、再结晶退火、稳定化退火、预防白点退火等。应根据工件的技术要求与工艺流程合理选用。

1.1.1.1 完全退火

完全退火是将钢件加热到临界点 A_{c3} 以上的适当温度、在炉内保温缓慢冷却的工艺方法。其目的是细化组织，降低硬度，改善切削加工性及去除内应力。

完全退火用于中碳钢和中碳合金钢的铸、焊、轧制件等。过共析钢一般不采用完全退火。

- 1. 完全退火工艺曲线 见图 1.1-1。
- 2. 常用结构钢退火温度与退火后硬度 见表 1.1-1。

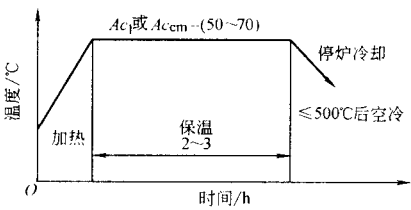


图 1.1-1 完全退火工艺曲线

表 1.1-1 常用结构钢的完全退火温度与硬度值

钢号	退火温度/℃	退火后的硬度值 HBW
40Cr	860 ~ 890	≤207
40MnVB	850 ~ 880	≤207
42SiMn	850 ~ 870	≤207
35CrMo	830 ~ 850	197 ~ 229
50CrVA	810 ~ 870	179 ~ 255
65Mn	790 ~ 840	196 ~ 229
60Si2MnA	840 ~ 860	185 ~ 225
38CrMoAlA	900 ~ 930	≤229

- 3. 工件装炉 一般中、小件均可直接装入退火温度的炉内，亦可低温装炉，随炉升温。
- 4. 保温时间 保温时间是指从炉子仪表到达规定退火加热温度开始计算至工件在炉内停止加热开始降温时的全部时间。工件堆装时，主要根据装炉情况估定，一般取 2 ~ 3h。

5. 工件冷却 保温完成后, 一般停电 (火) 关闭炉门缓冷至 500°C 即可出炉空冷。对某些合金元素含量较高、按上述方式冷却后硬度偏高的工件, 可采用等温冷却, 即在 650°C 附近保温 $2 \sim 4\text{h}$ 后再炉冷至 500°C 出炉。

1.1.1.2 不完全退火

不完全退火是将铁碳合金加热到 $A_{c1} \sim A_{c3}$ (A_{cm}) 之间的温度, 达不到完全奥氏体化, 随之缓慢冷却的退火工艺。

不完全退火主要目的是为了降低硬度, 改善切削加工性能, 消除内应力。

不完全退火主要适用于过共析钢, 消除锻轧内应力, 降低硬度和提高韧性。这种退火不能完全消除原始组织中的网状渗碳体, 所以过共析钢锻造后, 没有网状渗碳体析出或消除了网状渗碳体之后, 才可以采用不完全退火。对于亚共析钢如果原始组织晶粒很细小, 只是为消除锻件产生的内应力或降低硬度, 采用不完全退火为好, 不必采用完全退火, 以降低成本。

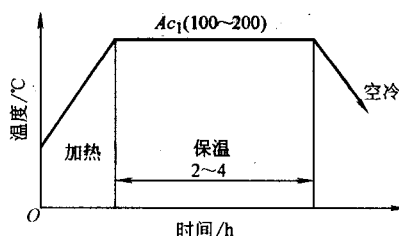


图 1.1-2 去应力退火工艺曲线

不完全退火工艺规程 (装炉温度、加热速度、保温时间) 与完全退火工艺相同。

1.1.1.3 去应力退火

去应力退火是将工件加热到 A_{c1} 以下的适当温度, 保持一定时间后缓慢冷却的工艺方法。其目的是为了去除由于形变加工、机械加工、铸造、锻造、热处理及焊接等产生的残余应力。

1. 去应力退火工艺曲线 见图 1.1-2。

2. 不同工件去应力退火工艺 见表 1.1-2。

3. 去应力退火的温度 一般应比最后一次回火低 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$, 以免降低硬度及力学性能。

表 1.1-2 去应力退火工艺及低温时效工艺

类 别	加热速度	加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	保温时间/h	冷却速度
焊接件	$\leq 300^{\circ}\text{C}$ $\leq 100 \sim 150^{\circ}\text{C/h}$	500 ~ 550	2 ~ 4	炉冷至 300°C 出炉空冷
消除加工应力	到温装炉	400 ~ 550	2 ~ 4	炉冷或空冷
镗杆、精密轴套 (38CrMoAlA)	$\leq 200^{\circ}\text{C}$ 装炉 $\leq 80^{\circ}\text{C/h}$	600 ~ 650	10 ~ 12	炉冷至 200°C 出炉 (在 350°C 以上冷速 $\leq 50^{\circ}\text{C/h}$)
精密丝杠 (1、2 级)	$\leq 200^{\circ}\text{C}$ 装炉 $\leq 80^{\circ}\text{C/h}$	550 ~ 600	10 ~ 12	炉冷至 200°C 出炉 (在 350°C 以上冷速 $\leq 50^{\circ}\text{C/h}$)
一般丝杠、主轴 (45、40Cr)	随炉升温	550 ~ 600	6 ~ 8	炉冷至 200°C 出炉
精密丝杠、量检具 (T8、T10、CrMn、GCr15)	随炉升温	130 ~ 180	12 ~ 16	空冷 (时效多在油浴中进行)

1.1.1.4 等温退火

等温退火是将钢件或毛坯加热到高于 A_{c3} (或 A_{c1}) 温度, 保持适当时间后, 较快冷却到珠光体温度区间的某一温度并等温保持, 使奥氏体转变为珠光体组织, 然后在空气中冷却的退火工艺。

等温退火的目的与完全退火相同, 但等温退火能够得到更为均匀的组织 and 硬度, 特别对于过冷奥氏体比较稳定 (曲线位置靠右) 的合金钢, 可以有效地缩短退火周期。

等温退火主要用于中碳合金钢、经渗碳处理的低碳合金钢和某些高合金钢的大型铸锻件及冲压件。

1. 加热温度 亚共析钢 $A_{c3} + 30 \sim 50^{\circ}\text{C}$; 共析或过共析钢为 $A_{c1} + 20 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 。
2. 加热速度和保温时间 按照完全退火工艺规范。
3. 等温温度和等温时间 一般等温温度为 $A_{r1} - 30 \sim 40^{\circ}\text{C}$; 等温时间 3 ~ 4h, 高合金钢 5 ~ 10h 或更长。
4. 等温方式 奥氏体化保温后的工件应迅速转移到炉内进行等温。
5. 冷却 工件在等温炉中完成等温转变后, 小型、简单的工件可自炉中取出空冷; 大型或形状复杂的工件, 为减少应力, 可随炉冷至 $500 \sim 550^{\circ}\text{C}$ (要求内应力较小时为 $300 \sim 350^{\circ}\text{C}$) 后, 出炉空冷。

常用钢材的等温退火工艺如表 1.1-3 所示。

表 1.1-3 几种常用钢材的等温退火工艺规范

钢号	加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	等温温度/ $^{\circ}\text{C}$	钢号	加热温度/ $^{\circ}\text{C}$	等温温度/ $^{\circ}\text{C}$
40Mn2	830	620	40CrNiMo	830	650
20CrNi	885	650	20Cr	885	690
40CrNi	830	660	30Cr	845	675
50CrNi	830	660	40Cr	830	675
12Cr2Ni4	870	595	50Cr	830	675
30CrMo	855	675	50CrV	830	675
40CrMo	845	675	30CrNiMo	845	660
50CrMo	830	675	50CrNiMo	830	650
20CrNiMo	885	660	60Si2Mn	860	660

1.1.1.5 球化退火

钢的球化退火是使钢中碳化物球状化而进行的退火工艺。

球化退火的目的是降低硬度, 改善切削加工性能, 并为以后的淬火作准备, 减小工件淬火畸变和开裂。一次球化难以达到目的, 可采用循环退火法进行球化。球化退火主要用于共析钢、过共析钢的锻轧件及结构钢的冷挤压件等。球化退火可分为普通球化退火、等温球化退火、循环球化退火等。

1. 普通球化退火 主要用于共析、过共析碳钢, 球化较充分, 但周期较长。加热温度为 $A_{c1} + 10 \sim 20^{\circ}\text{C}$; 保温时间取决于工件透烧时间, 但不宜长; 冷却速度一般在炉内以 $10 \sim 20^{\circ}\text{C/h}$ 冷速, 冷到 550°C 以下出炉空冷。

2. 等温球化退火 主要用于高碳工具钢。合金工具钢、该工艺球化充分, 易控制, 周期较短, 适宜大件。加热温度为 $A_{c1} + 20 \sim 30^{\circ}\text{C}$, 保温时间取决于工件的透烧时间; 等温温度为 $A_{c1} + 20 \sim 30^{\circ}\text{C}$, 等温时间取决于 TTT 曲线及工件截面尺寸; 等温后空冷或炉冷至 550°C 以下出炉空冷、工艺曲线如图 1.1-3 所示。工具钢、轴承钢的球化退火温度及硬度值如表 1.1-4 所示。

3. 循环球化退火工艺 主要适用碳素工具钢、合金工具钢。该工艺周期较短, 球化较充分, 但控制困难, 不适合用于大件。加热温度为 $A_{c1} + 20 \sim 30^{\circ}\text{C}$, 等温温度为 $A_{c1} - 20 \sim 30^{\circ}\text{C}$, 保温时间取决于工件的透热时间, 循环周期视球化要求等级而定; 冷却速度炉内以 $10 \sim 20^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 冷到 550°C 出炉空冷。

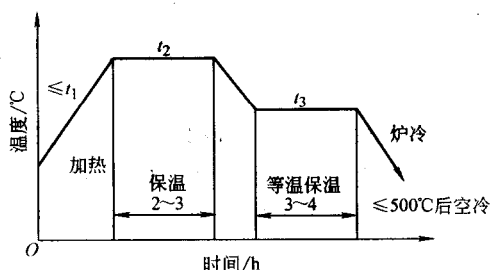


图 1.1-3 等温球化工艺曲线

1.1.1.6 再结晶退火

再结晶退火是将钢件经冷变形后的金属加热到再结晶温度以上, 保持适当时间, 使形变晶粒重新结晶为均匀的等轴晶粒, 以消除形变强化和残余应力的退火工艺。

表 1.1-4 工具钢、轴承钢的球化退火温度及硬度值

钢 号	保温温度 $t_2/^{\circ}\text{C}$	等温温度 $t_3/^{\circ}\text{C}$	等温时间/h	退火后硬度 HBW
T7	750 ~ 770	640 ~ 670	2 ~ 3	187
T8A	740 ~ 760	650 ~ 680	2 ~ 3	187
T10A	750 ~ 770	680 ~ 700	2 ~ 3	163 ~ 197
T12A	750 ~ 770	680 ~ 700	2 ~ 3	163 ~ 197
9M2V	740 ~ 760	630 ~ 650	3 ~ 4	229
9SiCr	790 ~ 810	700 ~ 720	3 ~ 4	197 ~ 241
CrMn	770 ~ 810	680 ~ 700	3 ~ 4	197 ~ 241
CrWMn	780 ~ 800	690 ~ 700	3 ~ 4	207 ~ 255
GCr15	790 ~ 810	680 ~ 710	3 ~ 4	207 ~ 229
5CrNiMo	760 ~ 780	≈ 610	3 ~ 4	197 ~ 241
5CrMnMo	850 ~ 870	≈ 680	3 ~ 4	197 ~ 241
Cr12	850 ~ 870	720 ~ 750	3 ~ 4	207 ~ 255
Cr12MoV	850 ~ 870	720 ~ 750	3 ~ 4	207 ~ 255
3Cr2W8	850 ~ 880	730 ~ 750	3 ~ 4	207 ~ 255
W18Cr4V	850 ~ 880	730 ~ 750	4 ~ 5	207 ~ 255
W6Mo5Cr4V2	870 ~ 890	740 ~ 750	4 ~ 5	255
W12CrV4Mo	840 ~ 860	720 ~ 750	4 ~ 5	223 ~ 269
1Cr13、4Cr13	860 ~ 880	730 ~ 750	3 ~ 4	149 ~ 207

再结晶退火主要用于冷变形钢材或钢件。加热温度采用 $Ac_1 - 50 \sim 150^\circ\text{C}$ ，对于碳素钢，其加热温度可控制在 $650 \sim 700^\circ\text{C}$ ；保温时间一般 $1 \sim 3\text{h}$ ；冷却可采用保温后炉冷或出炉空冷。

1.1.1.7 均匀化退火（扩散退火）

均匀化退火（扩散退火）是为了减少铸锭、铸件或锻坯的化学成分的偏析和组织的不均匀性，将其加热到高温，长时间保持，然后进行缓慢冷却，以达到化学成分和组织均匀化为目的的退火工艺。

加热温度为 Ac_3 或 $Ac_{cm} + 150 \sim 200^\circ\text{C}$ ，碳钢一般为 $1100 \sim 1200^\circ\text{C}$ ，合金钢为 $1050 \sim 1200^\circ\text{C}$ 。碳钢及低合金钢铸锭及铸件或形状复杂、截面大的工件，可采用预热—加热的方式或低温入炉，随炉开温的加热方式。中、小件亦可采用在工件温度装炉加热的方式。保温时间可按工件有效截面厚度每毫米保温 $2 \sim 3\text{min}$ 计算，一般保温 $10 \sim 20\text{h}$ 或更长。保温后炉内冷却速度碳素钢 $\leq 100 \sim 200^\circ\text{C/h}$ ，合金钢 $\leq 50 \sim 100^\circ\text{C/h}$ ，高合金钢 $\leq 20 \sim 60^\circ\text{C/h}$ ；炉冷到 350°C 左右出炉空冷。

1.1.1.8 真空退火

真空退火是在低于 0.1MPa 的环境中进行退火的工艺。

真空退火是最早在工业上得到应用的真空热处理工艺。对金属材料及工件进行真空退火除了要达到改变晶体结构、细化组织、消除应力和软化材料等工艺目的以外，还为了发挥真空加热可防止氧化脱碳、除气脱脂、使氧化物蒸发，以提高表面光亮度和力学性能的作用。例如，在超高真空 $1.33 \times 10^{-8} \sim 1.33 \times 10^{-6}\text{Pa}$ 中加热难熔金属使其表面氧化物产生蒸发、除气及提高塑性的有效方法。真空退火在工业中的应用，可归纳为：活性与难熔金属的退火与除气；电工钢及电磁合金、不锈钢及耐热合金、钢及其合金以及钢铁材料的退火等。

1. 钢铁材料的真空退火 真空退火的主要工艺参数是加热温度与真空度，真空度是根据对表面状态的要求选定的。一般质量的结构钢产品只要求 60% 以上的光亮度，在 $1.3 \sim 1.3 \times 10^{-1}\text{Pa}$ 下退火即可达到要求。碳质量分数为 0.35% ~ 0.60% 的卷钢丝于 $750 \sim 800^\circ\text{C}$ 退火可获得良好的外观。进行中温退火的重要工件和工具（特别是含铬的合金工具钢），表面的含铬氧化膜需在 $1.33 \times 10^{-2} \sim 1.3 \times 10^{-1}\text{Pa}$ 以上的真空中才可蒸发，工件才可得到光洁的表面。处理温度应比常规退火温度略高，一般材料的光亮度将随退火温度的上升而提高，于 950°C 以上温度退火，光亮度可达 80%。对锈蚀表面可于 1000°C 进行退火，借助于蒸发使表面净化。例如，带氧化皮的轧制轴承钢于 780°C 、高速钢于 840°C 退火，表面即可净化，与此同时将脱碳；在 $300 \sim 500^\circ\text{C}$ 以上温度出炉将使退火净化的表面重新氧化，因而为获得 70% 以上的光亮度，必须在 200°C 以下出炉。为缩短处理周期和提高炉子利用率，可充入气体循环冷却降温。一般钢材的退火工艺参数，如表 1.1-5 所示。

2. 不锈钢、耐热合金的真空退火 不锈钢、耐热合金含有在高温与氧亲合力强且化学稳定性高的铬、锰、钛等元素。在空气中加热时，由于表面的铬氧化，内部的铬向外扩散，因而在一定范围内产生了贫铬现象。在含碳的保护气氛中退火，则由于增碳使不锈钢易产生晶间腐蚀。将这类合金在真空中退火，比在常用的低露点氢中退火更易于获得洁净和高质量的表面，并保持耐蚀性。还由于冷速较高，因而生产率较高，对尺寸小、精度高的细丝，如高纯镍丝、镍合金丝、 $\phi 0.03\text{mm}$ 镍铬—镍铝热偶丝等进行真空退火时，能保证这类制品的电学性能，还不易于粘连。

适用于奥氏体不锈钢的退火温度与真空度如表 1.1-6 所示。

表 1.1-5 钢的退火工艺参数

材 料	真空度/Pa	退火温度/°C	冷 却 方 式
45	$1.3 \times 10^{-1} \sim 1.3$	850 ~ 870	炉冷或气冷, $\approx 300^{\circ}\text{C}$ 出炉
$w(\text{C})$ 为 0.35% ~ 0.6% 卷钢丝	1.3×10^{-1}	750 ~ 800	炉冷、气冷, $\approx 200^{\circ}\text{C}$ 出炉
40Cr	1.3×10^{-1}	890 ~ 910	缓冷, $\approx 300^{\circ}\text{C}$ 出炉
Cr12Mo	1.3×10^{-1} 以上	850 ~ 870	720 ~ 750°C 等温 4 ~ 5h, 炉冷
W18Cr4V	1.3×10^{-1}	870 ~ 890	720 ~ 750°C 等温 4 ~ 5h, 炉冷
空冷低合金模具钢	1.3	730 ~ 870	缓冷
高碳铬冷作模具钢	1.3	870 ~ 900	缓冷
热作模具钢	1.3	815 ~ 900	缓冷

表 1.1-6 奥氏体不锈钢的真空退火参数

热处理	温度/°C	真空度/Pa
热变形后去氧化皮代替酸洗退火	900 ~ 1050	1.3 ~ 13.3
退火	1100	$6.7 \times 10^{-2} \sim 1.3 \times 10^{-1}$
	1050 ~ 1150	$1.3 \times 10^{-1} \sim 1.3$
电真空零件退火	950 ~ 1000	$4 \times 10^{-3} \sim 1.3$
带料在电子束设备中退火	1050 ~ 1150	$1.3 \times 10^{-3} \sim 1.3 \times 10^{-2}$

3. 电工钢及磁合金的退火 现代工业对电工钢及磁合金除了磁导率、磁损外, 还提出了稳定性 (如在 $60 \sim 400^{\circ}\text{C}$, $1.3 \times 10^{-4} \sim 8 \times 10^3 \text{Pa}$ 冲击负荷和放射性照射下可稳定工作) 的特殊要求。为此, 对于硅钢必须进一步去除可增高矫顽力、降低磁导率、加大磁损失的各类杂质 (碳、氧、氢、硫化物、氮化物等); 消除冲剪等工序所造成的应力畸变。目前广泛采用氢气退火或真空退火。实践证明, 真空退火的温度、保温时间、真空度、冷却条件与磁合金的磁感应强度、矫顽力、磁导率等有密切联系, 这是由于不同的真空退火工艺改变了杂质成分、含量大小及分布; 改变了晶粒粗细、均匀性、冷变形的不均匀状态, 如取向、纤维组织、晶格缺陷、畸变程度等。例如, 经真空退火的 D320 钢带比空气退火者, 在 15000GS 下的空载电流降低 8.8%, 铁损减少 6.4%。

软磁材料用量最大的是硅钢。成卷、成叠热轧的变压器电机硅钢在一般情况下, 可在罐式真空炉中进行 $850 \sim 1150^{\circ}\text{C}$ 的中温退火。在 $2.7 \times 10^3 \sim 4 \times 10^3 \text{Pa}$, 漏气率 $< 1.33 \times 10^3 \text{Pa/h}$ 条件下即可脱除部分碳和硫, 提高塑性并得到均匀磁性。微弱的氧化对于绝缘性是无害的, 把真空度提高至 13.3Pa, 可进一步提高磁感应强度, 降低单位铁损。真空度提高到 $1.3 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 以上的高真空退火, 夹杂物可减少至原来的 $2/3 \sim 1/2$ 。损耗系数减少 25% ~ 40%, 从而得到更高质量的硅钢。例如, 冷轧钢的中间退火可在 $850 \sim 1100^{\circ}\text{C}$, $1.3 \times 10^{-1} \text{Pa}$ 下保温 1 ~ 5h 后, 以 $50 \sim 200^{\circ}\text{C/h}$ 速度冷却至 $600 \sim 200^{\circ}\text{C}$, 再以任意速度冷至 $50 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 。 $w(\text{Si})$ 低于 2.5% 的硅钢必须在低于 900°C (α 相区) 退火。

低温退火多用于硅钢片的制成品,如冷轧钢冲压件和铁心等。为消除冷加工应力,保持表面光洁,可在 $1.3 \times 10^{-2} \sim 1.3 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ 、 $700 \sim 850^\circ\text{C}$ 加热 $2 \sim 4\text{h}$,然后以 $40 \sim 60^\circ\text{C/h}$ 速度冷至 $200 \sim 250^\circ\text{C}$,或按钢材出厂规定的规范进行真空退火。

1.1.2 钢的多种实用型退火新工艺

1.1.2.1 适用于单件小批量生产的水退火法

水退火就是在水中急冷而软化,关键是加热温度,其温度比相变点大约低 100°C 左右(切不可比相变温度高),加热 10min 以上,然后放入水中急冷,水中冷却时间 $1 \sim 2\text{min}$ 。工艺曲线如图 1.1-4 所示。

水退火对机械工厂常用的钢种几乎都适用。如 T7A ~ T13A 系列碳素工具钢、Cr12、Cr12MoV、3Cr2W8V、W18Cr4V 和 W6Mo5Cr4V2,加热温度分别为 650°C 、 750°C 、 790°C 和 800°C ,到温后进行水冷或空冷(不如水冷优越)。经此处理后,硬度都在 30HRC 以下(即使原来硬度 $> 60\text{HRC}$),可进行切削加工。

水退火法非常适用于单件小批量生产,加热宜用盐浴炉,水冷可用自来水。

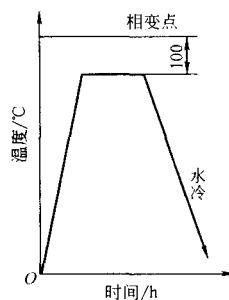


图 1.1-4 水退火工艺曲线

1.1.2.2 冷拉钢丝低温快速球化退火工艺

冷拉钢丝 60 钢、T8A、T9A 钢采用 $600 \sim 700^\circ\text{C}$ 、保温 $30 \sim 60\text{min}$,炉冷至 500°C 取出空冷,或 $725^\circ\text{C} \times 3\text{h}$ 炉冷和水冷均可达到球化效果。一般采用 $700^\circ\text{C} \times 60\text{min}$ 可以得到渗碳体呈小球状均匀分布在铁素体基体上的球状组织,并满足下道工序要求。60 钢丝 $725^\circ\text{C} \times 3\text{h}$ 水冷仍可获得细片状珠光体组织。

这是钢丝大变形量的预先冷变形对其球化起着显著促进作用,才有可能进行低温快速球化退火处理。这比常规球化退火工艺简单。

1.1.2.3 T8 钢淬火 + 高温回火球化处理工艺

原采用 $(730 \sim 740)^\circ\text{C} \times 3\text{h}$ 再以 $40 \sim 60^\circ\text{C/h}$ 冷到 550°C 空冷。

改进工艺 $(800 \pm 10)^\circ\text{C} \times 0.5\text{h}$ 水淬, $(700 \pm 10)^\circ\text{C} \times 2\text{h}$ 再以 $40 \sim 60^\circ\text{C/h}$ 冷到 550°C 空冷。新球化工艺比普通球化工艺节省 20% 时间,退火质量较好,效率高,耗能低,但操作略显麻烦。适用于单件或小批量生产简单模具、冲头、剪刀等工具的球化退火零件。

1.1.2.4 45 钢、65Mn 钢最佳球化工艺

45 钢经 $760^\circ\text{C} \times 30\text{min}$ 以 20°C/h 冷至 $700^\circ\text{C} \times 3\text{h}$ 再炉冷,得到完全的球化组织;45 钢经 $755^\circ\text{C} \times 30\text{min}$ 以 20°C/h 冷至 680°C 再炉冷,亦可得到完全的球化组织。

65Mn 钢经 $760^\circ\text{C} \times 30\text{min}$ 以 20°C/h 冷至 $700^\circ\text{C} \times 6\text{h}$ 再炉冷,全球化(4 级),尺寸均匀。

1.1.2.5 T10 钢细化组织的球化退火工艺

T10 钢经热轧或锻造后,适当加快冷却速度,如采用喷水冷却,获得尽可能细小的片状珠光体,然后进行球化退火。工件随炉升温至 $730^\circ\text{C} \times (1 \sim 3)\text{h}$,炉冷至 $690^\circ\text{C} \times 4\text{h}$,空冷。这样降低球化退火温度和缩短保温时间,可显著细化退火后的碳化物粒度,且大小及分布均匀性亦明显改善。

1.1.2.6 冷挤压用低碳钢的等温球化工艺

10 钢中间退火工艺: $(760 \pm 10)^{\circ}\text{C} \times 5\text{h}$, 炉冷至 $(660 \pm 10)^{\circ}\text{C} \times 7\text{h}$, 再炉冷至 $< 450^{\circ}\text{C}$ 空冷。晶粒度为 6~7 级, 硬度 50~54HRB, 碳化物成小球, 点状分布在铁素体基体上。得到了良好的冷挤压组织。采用奥氏体化等温退火等工艺均不行。对冷变形要求高的低碳钢中间退火仅仅控制晶粒度和硬度是不够的, 关键在于控制渗碳体的形态。球化的关键又在于控制温度, 一般控制在 $A_{c1} + (20 \sim 30)^{\circ}\text{C}$ 。

1.1.2.7 薄板球化退火工艺

10 钢、30 钢、45 钢、35CrMnSiA 钢板 (1.5~2.2mm), 当 $w(\text{C})$ 在 0.34% 以上时韧性显著下降; 当 $w(\text{Si})$ 在 1% 以上时韧性、塑性都下降; 冲压裂纹严重。板材组织中铁素体形态呈网状或呈条状分布易冲裂。板材中带状组织严重也影响冲压性能。

冲压性能差的低中碳钢, 经过球化退火, 冲压性能可明显改善。球化退火工艺: 加热至 A_{c1} 以上 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 保温 2h, 再降温到 A_{c1} 以下 $20 \sim 30^{\circ}\text{C}$ 保温 2h, 炉冷至 500°C 出炉空冷, 或反复球化一次, 这样退火后得到的碳化物是粒状或部分粒状, 晶粒大小比较均匀, 铁素体大小比较均匀, 可基本消除冲裂现象, 裂纹量降到千分之一左右。

1.1.2.8 20Cr 钢球化退火工艺

为适应冷拔、冷镦和冷挤压等冷变形的需要, 亚共析钢球化工艺亦开始在生产中应用。

1. A_{c1} 稍上奥氏体化等温球化退火工艺 $790^{\circ}\text{C} \times 8\text{h}$, 炉冷至 $690^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$, 炉冷至 620°C , 出炉入缓冷筒。

2. A_{c1} 以下的球化退火工艺 $740^{\circ}\text{C} \times 13\text{h}$, 其球化效果良好, 碳化物颗粒均匀。

3. A_{c1} 以上奥氏体化缓冷球化退火工艺 $790^{\circ}\text{C} \times 40\text{min}$, 再以 $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的冷却速度炉冷至 550°C 出炉后缓冷。硬度为 125~128HBW。

在球化效果相同的情况下, 以等温退火时间最短, 在 A_{c1} 以下退火次之, 缓冷球化退火时间较长。

1.1.2.9 常用冷镦钢的中间热处理工艺

1. ML35、ML45 钢缓冷法球化退火工艺 $(750 \sim 770)^{\circ}\text{C} \times 0.5\text{h}$, 炉冷至 $(680 \sim 710)^{\circ}\text{C} \times (3 \sim 34)\text{h}$, 炉冷至 $\leq 500^{\circ}\text{C}$ 出炉空冷。

2. ML35、ML45 钢软化退火工艺 $(700 \sim 720)^{\circ}\text{C} \times (3 \sim 4.5)\text{h}$, 炉冷至 550°C 后空冷。

3. ML30Cr、ML40Cr 钢缓冷法球化退火工艺 $(770 \sim 780)^{\circ}\text{C} \times (0.5 \sim 1)\text{h}$, 炉冷至 $(680 \sim 710)^{\circ}\text{C} \times (3.5 \sim 4.5)\text{h}$, 炉冷至 $\leq 500^{\circ}\text{C}$ 空冷。

4. ML30Cr、ML40Cr 钢软化退火工艺 $(720 \sim 740)^{\circ}\text{C} \times (3 \sim 4.5)\text{h}$, 炉冷至 550°C 空冷。

5. ML15MnVB、ML40MnB 钢缓冷球化退火工艺 $750 \sim 770^{\circ}\text{C} \times 0.5\text{h}$, 炉冷 $680 \sim 700^{\circ}\text{C} \times 3.5 \sim 4.5\text{h}$, 炉冷至 $\leq 500^{\circ}\text{C}$ 空冷。

6. 用于冷镦的 0Cr18Ni9 钢固溶处理工艺 $(1180 \sim 1130)^{\circ}\text{C} \times (15 \sim 45)\text{min}$ 水淬。

1.1.2.10 65Mn 冷轧钢带退火新工艺

原采用 $(730 \pm 10)^{\circ}\text{C} \times 13\text{h}$ 炉冷至 650°C 以下空冷。现采用 $(860 \pm 10)^{\circ}\text{C} \times (45 \sim 60)\text{min}$ 炉冷至 $(750 \pm 5)^{\circ}\text{C} \times (3 \sim 3.5)\text{h}$, 再炉冷至 $650 \sim 660^{\circ}\text{C}$ 出炉堆放冷却或入保温坑缓冷。组织符合退火技术要求 (珠光体 2.5~6 级, 以 4 级左右为佳), 经冷轧后轧制情况良好。该工艺提高效率 80%~100%。

1.1.2.11 锻造余热等温退火

对低碳合金钢如 18CrMnTi、20CrNi 等，终锻切边后，以 40 ~ 50°C/min 的冷速冷却到珠光体转变温度 600 ~ 700°C，并保温至完全转变成珠光体，处理后的金相组织形成均匀层状的珠光体并出现贝氏体，工艺曲线如图 1.1-5 所示。各种钢的热处理规范如表 1.1-7 所示。

这种处理方式与自常温下加热到 A_{c3} 以上的等温退火相比，大约可节省 70% 的燃料费。20CrMnMo 钢以 8min 从终锻温度 1100°C 冷到 660°C，保温 90min 后出炉空冷。硬度 163 ~ 173HBW，金相组织为片状珠光体，铁素体呈块状及粗针状，内外均匀一致，晶粒局部达 4 级。

1.1.2.12 35 钢线材在三乙醇胺裂解气中的保护退火

35 钢线材退火用 120kW 中温井式电炉，每炉装入量 2t。

线材在 500°C 装炉升温，通氮气排气，流量为 1 ~ 2m³/h。当炉温升到 650°C 时，停止通 N₂ 气，改滴三乙醇胺，120 ~ 130d/min。700°C × 4h 保温三乙醇胺 30 ~ 60d/min，炉压 350Pa 左右，排气管火焰高度控制在 150mm 左右，炉冷到 580°C 出炉空冷。退火后硬度 ≤ 80HRB，半脱碳层 < 1.5% D（D 为处理线材直径，mm）。

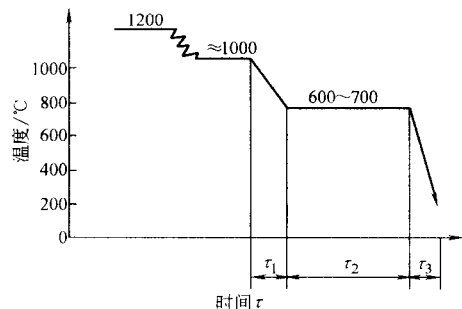


图 1.1-5 锻件余热等温退火工艺曲线

注：τ₁：为 6 ~ 10min，急冷时间为本工艺关键项目。为获得均一的急冷效果，以钢种和零件形状而定。

τ₂：根据 C 曲线求得，并适当的增加。

τ₃：空冷或冷却室内冷却。

表 1.1-7 钢的等温退火规范

钢号	热处理规范	硬度 HBW	钢号	热处理规范	硬度 HBW
20CrMnMo	等温温度 650°C	174 ~ 209	30CrMnTi	等温退火 660 ~ 680°C	170 ~ 228
20CrNi	等温温度 650 ~ 680°C	157 ~ 207	15Cr2MnTiBA	等温退火 650 ~ 680°C	207 ~ 250
20CrMo	等温温度 650 ~ 670°C	160 ~ 207	50Mn2	等温退火 650 ~ 700°C	< 229
18CrMnTi	等温退火 660 ~ 680°C	156 ~ 228			

1.1.2.13 08CuP 钢冷轧板退火工艺

常规工艺采用 700°C 加热保温后空冷是不可取的。因为 700°C 时铜在 α 铁中的溶解度为 0.3%（质量分数），室温时降为 0.2%（质量分数），而在冷却过程中富铜 ε 相析出较慢，所要求临界冷却速度不大，空冷即可达到固溶效果，使 ε 相无法析出，形成固溶强化。实际生产中，可以 15 张板为一摞，每摞之间用耐火砖隔开，工艺：700°C × 4h（总加热时间 ≥ 5h）随炉冷却，特殊情况下可允许 300°C 出炉，效果很好。

1.1.2.14 中碳钢及中碳合金结构钢的中间热处理退火工艺

1. 球化退火 加热至 750 ~ 760°C 后按 20°C/h 炉冷至 690°C × 4h，缓冷至 500°C 后出炉空冷。在奥氏体冷却期间需要控制冷却速度在 10 ~ 20°C/h，以防条片状渗碳体析出。该方法用于冷镦变形度大及形状复杂的中碳钢、中碳合金钢及低碳马氏体含硼钢。

2. 软化退火 加热至 (760 ~ 770)°C × 3h 炉冷至 550°C 出炉空冷。该方法操作简单，周期短，退火后钢材能完全恢复到冷拔前的塑性，适用于冷镦变形度不大，形状简单的中碳钢