

形变热处理工艺方法36例

■ 赵步青, 张丹宁, 刘春菱

形变热处理也称“热机械加工”。在机械制造过程中,将压力加工(辊、锻、轧)与热处理工艺有效地结合起来,则可同时发挥形变强化和热处理强化的双重作用,获得单一的强化方法所不能达到的综合力学性能。这种复合强化的工艺称为形变热处理。

除了能获得优异的力学性能外,形变热处理还可省去热处理的重新高温加热,从而节约大量能源、加热设备和车间面积,减少材料的氧化脱碳、畸变等热处理缺陷。因此,形变热处理工艺兼有优良强化效果与巨大的经济效益。以下列举形变热处理方法36例,供参考。

1. 锻热淬火工艺16例

(1) 镗刀锻后淬火 镗床用镗刀刀身直径4mm,刀头直径6mm,总长40mm,锻后立即淬火并及时回火,结果使切削寿命较常规处理提高30%以上。

(2) 车刀锻后淬火 国内某机床电器厂生产的自用M2钢车刀,锻后立即淬油、550℃回火,使用寿命较市售车刀提高1倍多。嘉龙公司用9341钢制12方自用车刀,自由锻造后油冷,使

使用寿命比较高。

(3) 粉碎机锤头锻热淬火 65Mn钢制355mm×98mm×33mm粉碎机锤头锻后余热淬火:始锻温度1050℃,终锻温度840~860℃,终锻后在空气中停留2~3s后淬入流动的自来水,180~200℃回火,表层向内10mm处硬度可达50~55HRC,使用寿命较常规热处理提高50%以上。

(4) 套筒扳手锻热淬火 国内某五金工具厂用40Cr钢制套筒扳手,锻热淬火代替原盐浴淬火,不仅节能环保,而且质量上乘。

(5) 镊子锻热淬火 55MnSi钢制镊子在2500N空气锤和专用的模具上锻造成形,高温形变温度为920~950℃,形变量为75%左右,终锻温度约900℃,形变后30s内(视工件表面火色)迅速水淬油冷,220~270℃回火。形变热处理后的镊子硬度高、韧性好,使用寿命大幅提高。

(6) 螺纹环规的锻热淬火 将230mm×120mm质量约40kg的CrMn钢毛坯锻打成90mm×90mm×600mm方条,再根据环规尺寸下料。将坯料加热到1050~1150℃,适当保温在高

温形变区内快速锻拔成形,其形变量为35%~40%,终锻温度920~900℃,立即投入到40~70℃油冷却,在油中冷40~60s,约100℃出油空冷并及时回火,环规表面硬度均≥62HRC。

(7) 45钢制链轮锻热淬火 始锻温度1070~1150℃,终锻温度为850℃,形变量为35%~75%,回火温度200~350℃,较盐浴炉或箱式炉加热淬火,强度提高约30%,耐磨性提高26%~30%。

(8) GCr15钢制轴承锻热淬火 形变温度930~970℃,形变量30%,油冷,150~180℃回火。与常规热处理相比,提高强度近20%,接触疲劳寿命提高23%。

(9) 40Cr钢制柴油机连杆锻热淬火 1150~1180℃始锻,胎模锻造,形变时间13~17s,形变量约40%,紧接着在2150N曲柄压力机上切边、校直后立即淬火(工件此时的温度为900~950℃),最后进行650℃回火。

(10) 45Mn2钢制钢球锻热预冷淬火 使用45Mn2钢制直径70~100mm钢球,始锻温度约1200℃,终锻温度控制在1000~1050℃,根据钢球规格选择不同

的预冷时间后水淬, 150~180℃回火钢球表面硬度均 $\geq 57\text{HRC}$, $\geq 50\text{HRC}$ 的硬化层深度均大于20mm, 满足了大规格钢球的使用要求。

(11) 65Mn钢犁铧辊锻余热淬火 1100~1200℃中频感应加热, 从辊锻变形开始至淬火前约20s, 犁铧不同部位的变形量为56%~83%, 形变后淬热密度为 $1.30\sim 1.35\text{g/cm}^3$ 的 CaCl_2 水溶液中, 淬火后进行 $460\sim 480^\circ\text{C} \times 3\text{h}$ 回火, 硬度40~45HRC。

与犁铧的常规热处理工艺相比, 加热次数由4~5次减少为两次, 生产效率提高约4倍, 产品质量全部达到一等品要求, 经济效益十分显著。

(12) 汽车转向节锻热淬火 直径60mm的40Cr钢制汽车转向节, 1150~1200℃加热后始锻, 终锻温度900~850℃, 油冷, $600^\circ\text{C} \times 2\text{h}$ 回火。利用锻造余热淬火, 不仅节约能源降低成本, 而且显著改善组织结构, 提高材料力学性能, 尤其是冲击韧度的提高对汽车安全性意义更为重大。

(13) Cr12MoV钢制精密塑料热压模锻热调质 模具的外形尺寸为 $70\text{mm} \times 20\text{mm} \times 10\text{mm}$, 在20mm宽度平面上分布有直径1.5mm、2.5mm、3mm小孔各20个, 要求热处理后的孔距公差为 $\pm 0.006\text{mm}$, 平面度 $< 0.01\text{mm}$, 硬度56~60HRC。

由于Cr12MoV钢的共晶碳化物偏析严重, 经开坯轧制后有一定程度的破碎, 但沿轧制方向仍呈带状分布, 心部呈网状、块状和堆集分布, 成为应力集中和裂

纹源, 并导致材料各向异性, 同时也增加热处理畸变, 而采用锻热形变较好地解决了上述问题。具体工艺如下: 始锻温度1050~1160℃, 终锻温度850~950℃, 热油冷, $780^\circ\text{C} \times 3\text{h} \times 2$ 次回火。最终热处理工艺: 600°C 、 850°C 两次预热, 1100~1160℃盐浴加热, 800°C 、 450°C 两次分级, 280°C 等温淬火, $490\sim 500^\circ\text{C} \times 2\text{h} \times 2$ 次回火。

最终热处理后的金相组织: 马氏体+下贝氏体+弥散碳化物+少量的残留奥氏体。其比体积与锻热调质的索氏体接近, 达到微变形, 热处理后不用校直, 畸变全部达到技术要求, 硬度58~60HRC, 合格率达99.99%。按上述工艺热处理的模具有高的耐热性、热硬性和耐磨性, 使用寿命长。

用锻造余热淬火+高温回火的例子还有很多, 如六角拉轮模、拉深模、冷冲模等, 不再逐一列举。

(14) 五金工具锻热淬火 五金工具中的扳手、旋具、钳子、剪刀等手工工具是最早施行锻造余热淬火的, 这也许是最早的形变热处理原形吧。将工具要淬火的部位放在焦炭炉加热, 观其火色, 即行锻造, 有的需几火才能打到既定尺寸, 最后一火锻造成形后不要空冷, 根据材料, 选择合适的淬火冷却介质, 然后放在炉边回火或采用自身余热回火, 很少采用专用的回火炉。

(15) 木工工具锻造淬火 木工工具中的刨刀、斧头、凿子自由锻造后, 一般均用余热

淬火, 节电省时, 生产效率高。

(16) 农机具锻造余热淬火 现在到农村一些集镇, 仍然可以看到用焦炭炉加热, 利用锻造余热淬火的农机具有镰刀、铁锹、铲子、耙田耙子、破碎机锤头, 以及厨房用的勺子、锅铲、菜刀等。

2. 锻造正火2例

(1) 3Cr3Mo3W2V钢制热锻模消除链状碳化物的正火处理 该钢锻后缓冷易出现链状碳化物, 导致模具脆断、龟裂或热裂失效, 采用正火, 可使 M_6C 溶解, 在空冷速度 $> 15^\circ\text{C/min}$ 时, 超过了形成链状碳化物的临界冷却速度, 可消除链状碳化物并在球化退火后获得颗粒细小均匀分布的碳化物。推荐的正火温度为 1130°C , 经改锻正火冲击韧度值由 23J/cm^2 提高到 26J/cm^2 , 寿命由原1500件提高到2000件以上。

(2) 20CrMnTi钢锻热正火 高温形变正火是指工件在终锻后约 850°C , 直接放到空气中散冷, 不仅能使强度提高, 而且钢的冲击韧度、耐磨性及抗疲劳性都有大幅度提升, 而且降低了钢的脆性转变温度。用20CrMnTi钢制锻坯外形尺寸为 $80\text{mm} \times 80\text{mm} \times 40\text{mm}$, 锻后空冷, 控制好冷却速度, 使力学性能大大提高, 而且便于切削加工。国内某些机械公司, 对于20CrMnTi钢汽车齿轮, 采用锻造余热正火, 生产1t齿轮即可节电300kW·h以上。

3. 锻热退火2例

(1) 高速工具钢锻件的快速球化退火 国内有些单位在高

速工具钢停锻后立即放入早已升温到 $A_{c1}-(20\sim 30)^{\circ}\text{C}$ 炉保温 $2\sim 3\text{h}$ ，炉冷至 550°C ，出炉空冷，简化了工序，缩短了生产周期，节电 $70\%\sim 90\%$ ，降低生产成本，改善了劳动条件，提高了锻件质量，并有利于机械化操作。经过轧制、模锻等温加工的高速工具钢工件，不必沿用常规的高温工具钢工件，可以参考本例。

(2) 8Cr2WMnMoVS (简称8Cr2S) 制精密冷冲模锻造余热退火 模具外形尺寸为 $250\text{mm}\times 200\text{mm}\times 42\text{mm}$ ，始锻温度 $1150\sim 1100^{\circ}\text{C}$ ，终锻温度 $900\sim 850^{\circ}\text{C}$ ，退火工艺： $800\sim 820^{\circ}\text{C}\times 4\sim 6\text{h}$ 炉冷至 500°C 出炉空冷。

4. 辊、轧、挤余热淬火5例

(1) 机械刀片镶轧淬火 木材加工行业使用的部分旋刀和刨切刀是用镶接法成形的。刀刃用5Cr8W2MoVSi之类的合金工具钢，刀体(或叫刀背)为45钢或Q235A钢，加热到刃钢的锻造温度，用轧机把刃钢和刀体焊接在一起，属于一种固相焊接法，压轧成规定尺寸，控制终轧温度，适时淬火冷却。这种方法制造出来的刀片省时省电，而且质量好，硬度高，寿命长。

(2) M2钢车刀轧热淬火 轧热淬火是利用各种型材轧制后的余热进行淬火的热处理工艺，其强化效果与锻热淬火相同。M2钢 1220°C 轧制(250型轧机， 50r/min)成规定尺寸直接淬火，硬度均能达65HRC以上，车刀切削寿命均比盐浴淬火的高。

(3) 45钢制机用木工麻花

钻轧热淬火 国内某工具公司生产机用木工麻花钻，笔者实施形变热处理取得成功。通过高频感应加热装置，四辊热轧，奥氏体化温度 $950\sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，形变温度 $880\sim 950^{\circ}\text{C}$ ，形变量 30% 左右，淬火冷却介质为循环的两硝水溶液，水温 $< 70^{\circ}\text{C}$ ，淬火后硬度 $\geq 54\text{HRC}$ ， $240\sim 260^{\circ}\text{C}\times 1\text{h}$ 回火后硬度 $\geq 50\text{HRC}$ ，符合技术要求， 95% 以上达到形变要求。

(4) 螺纹钢筋轧热淬火 20MnSi钢螺纹钢筋需热轧供货，力学性能要求抗拉强度 $\geq 510\text{MPa}$ 、抗弯强度 $\geq 335\text{MPa}$ 、伸长率 $\geq 16\%$ 。 $60\text{mm}\times 60\text{mm}$ 的方坯，轧制成直径16mm的螺纹钢筋。始轧温度 $1100\sim 1200^{\circ}\text{C}$ ，轧制形变量约 93% ，终轧温度 $950\sim 900^{\circ}\text{C}$ ，正好是该钢低碳马氏体淬火的温度，轧后水冷 $1\sim 1.26\text{s}$ 出水， $550\sim 600^{\circ}\text{C}$ ，利用本身的热量自回火。经上述轧热淬火+回火工艺处理的钢筋，力学性能远超过GB1499规定的数值，也超过英国BS4449标准规定的力学性能。

(5) 35CrMo钢制石油钻杆接头热挤压余热淬火 挤压形变温度 $1100\sim 1200^{\circ}\text{C}$ ，回火温度 $570\sim 580^{\circ}\text{C}$ 。硬度 $300\sim 335\text{HBW}$ ，力学性能抗拉强度 $\geq 1068\text{MPa}$ 、抗弯强度 $\geq 960\text{MPa}$ 、伸长率 $\geq 14.5\%$ ，符合部颁标准要求。

实践告诉我们，对于像接头这样较大的工件进行热挤压余热淬火，必须慎重选择形变温度、变形后淬火前的停留时间、淬火冷却介质、淬火时间及回火温度等工艺参数。

5. 相变超塑性热处理4例

(1) 9SiCr钢的超塑形变热处理 $840^{\circ}\text{C}\times 2\text{h}$ 油冷+ $200^{\circ}\text{C}\times 2\text{h}$ 回火是为了获得双细化组织。然后 800°C 超塑形变，形变速率 $2.5\times 10\text{s}$ 、拉伸形变量 250% ，形变后油中冷却。超塑形变后测试钢的抗弯强度与多冲寿命及硬度等指标，结果表明，抗弯强度较常规处理提高 28% ，多冲寿命提高 38.6% ，硬度均 $\geq 60\text{HRC}$ ，与常规淬火相当。

(2) 低温形变热处理 H11钢经常规淬火 482°C 两次回火后，钢的抗弯强度为 1852MPa ，伸长率为 12.5% 。如果于低温形变淬火+ 482°C 回火，再于 316°C 左右进行 2% 形变时效，最后再补充进行 482°C 回火，此工艺虽复杂一些，但使钢的抗弯强度值上升到 2548MPa ，提高 37.5% ，伸长率仍保持原来水平。

(3) 高低相结合的形变热处理 这种复合形变热处理是在高温形变淬火后，再在一定温度下进行少量的变形并回火的工艺。高温形变淬火后再进行马氏体形变时效，可使钢获得比其他任何热处理都高得多的强度性能。例如，50CrVA经常规淬火+ 200°C 回火后，力学性能分别为：抗拉强度 2119MPa 、抗弯强度 1497MPa 、断面收缩率 41.7% 。经高温形变淬火+ 200°C 回火+ 3% 形变+ 200°C 回火后的力学性能分别为：抗拉强度 2597MPa 、抗弯强度 2254MPa ，即高温形变淬火与马氏体形变时效相结合的复合形变热处理，使50CrVA钢的抗拉强度、抗弯强度分别提高了 22.6% 和 50.7% 。

(4) 机械刀片辊压校直 嘉龙公司生产长度2m以上的刨切刀、旋切刀等机械刀片,在保护气氛炉中加热淬火出炉温度约500℃,待工件冷到200℃左右,利用相变超塑性的原理,在辊压机上往复滚压几次,弯曲10~15mm立刻就能校到直线度≤0.30mm,这种形变强化,不仅能校直好弯曲的刀片,还能使被滚压的表面产生约5mm深的残余压应力层,有利于提高刀具的使用寿命。

6. 形变化学热处理7例

(1) 冷形变渗碳 该工艺是在工件冷变形后进行渗碳,由于冷变形产生了不少结构缺陷,可使渗碳过程加速。例如20CrNiMo经冷锻变形量25%,930~950℃×2h气体渗碳,渗层深度达0.84mm;若形变量50%,渗层可达0.88mm,形变量越大,渗层越深。

(2) 冷形变渗氮 该工艺是工件在室温下冷变形后进行渗氮的复合热处理工艺。冷形变渗氮与冷形变渗碳不同;冷形变使渗氮速度减慢,渗层深度减薄,且随着形变量的增大,渗层减薄趋势越明显。产生这种现象的原因可能是氮原子对位错的钉扎作用(或位错对氮原子的陷阱作用),阻碍了氮原子的扩散作用。但冷形变渗氮却可使纯铁的强韧性升高。渗氮温度及保温时间视钢种而定,如38CrMoAl钢和20钢分别为650℃和550℃。

(3) 冷形变渗硼 该工艺是工件在室温变形后进行渗硼的复合热处理工艺。例如20钢制工件于室温轧制形变,随后进行900℃保温和不同的加热速度固

体渗硼。试验表明,冷形变可明显增大渗硼层深度。最大渗层深度所对应的最佳形变量随加热速度和渗硼保温时间而异。产生这种现象的原因是由于钢的冷形变组织加速了钢件表面对硼原子的吸附过程所致。

(4) 冷形变碳氮共渗 冷形变碳氮共渗是在室温变形后进行中温碳氮共渗的复合热处理工艺。表面处理前的冷处理,对钢的碳氮共渗过程有明显的影响,其作用是提高表面的C、N含量,以及在最佳形变量时增大渗层的厚度,例如:20CrMnTi钢冷轧形变量为15%时,860℃×2h、860℃×4h碳氮共渗的厚度分别为0.65mm和0.80mm。

(5) 形变渗钛 室温形变除对间隙原子在钢中的扩散过程有影响外,还对置换型原子在钢的渗入过程产生影响。例如:对冷形变后的16Mn钢进行渗钛,考查了冷形变对固体渗钛过程的影响,试验表明,渗钛温度为900~950℃,30%的形变量最佳,随着渗钛温度的提高,保温时间的延长,渗层越厚。

(6) 锻热渗碳淬火 该形变热处理工艺是将工件坯料加热到始锻温度改锻,随即放入渗碳炉中渗碳,然后直接淬火。锻热渗碳淬火可以节约渗碳时工件加热所需的电能,并能提高渗碳速度、表层硬度和耐磨性,适合于中等模数的齿轮,以及其他类型的渗碳工件。

渗碳与形变热处理相复合的另一种形式是渗碳+锻热淬火,即先进行渗碳,随之进行热模

锻和淬火;这种工艺可使工件的有效硬化层增厚、表面压应力增大、破断功提高,产品寿命延长。

(7) 9SiCr钢制圆板牙渗氮淬火复合热处理 9SiCr钢制圆板牙热处理硬度要求62~65HRC,常规热处理860~880℃盐浴加热淬火,150~180℃回火,发黑出厂。一般情况下,为提高刀具硬度、耐磨性可采用表面化学热处理,但化学热处理的工艺温度至少得400℃,对9SiCr钢制工具,显然是不合适的,而渗氮淬火解决了这个难题。

先在LD 60kW离子渗氮炉中渗氮,后在100kW中温盐浴炉中加热,油冷,冷处理,最后150~180℃回火。经检测,距表面0.10~0.80mm,硬度>927HV5,峰值硬度974~986HV5。0.20~0.60mm处硬度≥857HV5,并提高硬化区的回火稳定性,延长了板牙的使用寿命。

7. 结语

形变热处理工艺的应用极为广泛。从加工对象的角度看,它适用于各种碳钢、合金钢、镍基合金等几乎所有的金属材料。从加工方法上看,它能使两者结合起来,达到对零件及韧性等方面的特殊要求,从而使形变工件质量、寿命得到很大提升。形变热处理前途光明。

作者简介:赵步青,安徽嘉龙锋钢刀具有限公司,高级工程师;张丹宁,南京工业大学2011学院;刘春菱,常州市新城光大热处理有限公司。

MW 20170712