

## 正火和淬火温度对 30CrMoA 钢除砂器大型锻件 -40 °C 冲击韧性的影响

杨新武<sup>1</sup> 宛农<sup>1</sup> 周许<sup>2</sup> 王立新<sup>2</sup>

(1 武汉工业学院机械工程学院, 武汉 430023; 2 中原特钢股份有限公司, 济源 459000)

**摘要** 30CrMoA 钢( /% : 0.30C, 0.21Si, 0.53Mn, 0.003S, 0.005P, 0.98Cr, 0.22Mo, 0.06V) 除砂器锻件为外径  $\Phi 405 \sim 493$  mm 内径  $\Phi 90 \sim 167$  mm 的管状工件, 技术条件要求调质后 -40 °C 横向冲击功  $\geq 20$  J。经常用正火 + 调质工艺 920 °C 正火(风冷) + 880 °C 正火(风冷) + 860 °C 淬火(空冷 + 水冷) + 630 ~ 680 °C 回火(空冷)后横向  $R_m$  715 ~ 815 MPa,  $R_{p0.2}$  545 ~ 665 MPa,  $A$  19% ~ 20%,  $Z$  65% ~ 68%, 室温  $A_{KV}$  36 ~ 101 J, -40 °C  $A_{KV}$  11 ~ 21 J; 通过 Thermo-calc 软件计算出该钢平衡相图及计算的  $Ac_3$  温度确定优化调质工艺 950 °C 正火(风冷) + 820 °C 淬火(空冷 + 水冷) + 660 ~ 670 °C 回火(空冷), 其横向力学性能为  $R_m$  685 ~ 700 MPa,  $R_{p0.2}$  500 ~ 525 MPa,  $A$  21% ~ 22%,  $Z$  63% ~ 66%, 室温  $A_{KV}$  65 ~ 114 J, -40 °C  $A_{KV}$  23 ~ 28 J, 均符合技术条件要求。

**关键词** 30CrMoA 钢 除砂装置 大型锻件 亚温淬火 低温冲击功

## Effect of Normalizing and Quenching Temperature on -40 °C Impact Toughness of Heavy Forging of Steel 30CrMoA for Desander

Yang Xinwu<sup>1</sup>, Wan Nong<sup>1</sup>, Zhou Xu<sup>2</sup> and Wang Lixin<sup>2</sup>

(1 School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023;  
2 Zhongyuan Special Steel Co Ltd, Jiyuan 459000)

**Abstract** The forging of steel 30CrMoA ( /% : 0.30C, 0.21Si, 0.53Mn, 0.003S, 0.005P, 0.98Cr, 0.22Mo, 0.06V) for Desander is a tubular stock with outside diameter  $\Phi 405 \sim 493$  mm and inside diameter  $\Phi 90 \sim 167$  mm and in specification the transverse impact energy of quenched-tempered steel at -40 °C is  $\geq 20$  J. With conventional normalizing + quenching-tempering process: 920 °C normalizing (fan cooling) + 880 °C normalizing (fan cooling) + 860 °C quenching (air cooling + water cooling) + 630 ~ 680 °C tempering (air cooling) the transverse  $R_m$  of steel is 715 ~ 815 MPa,  $R_{p0.2}$  545 ~ 665 MPa,  $A$  19% ~ 20%,  $Z$  65% ~ 68%, ambient  $A_{KV}$  36 ~ 101 J and -40 °C  $A_{KV}$  11 ~ 21 J; with equilibrium phase diagram calculated by Thermo-calc software and calculated  $Ac_3$  value of steel, the optimum normalizing + quenching-tempering process has been defined that is 950 °C normalizing (fan cooling) + 820 °C quenching (air cooling + water cooling) + 660 ~ 670 °C tempering (air cooling), and with the optimum process the transverse mechanical properties of steel are  $R_m$  685 ~ 700 MPa,  $R_{p0.2}$  500 ~ 525 MPa,  $A$  21% ~ 22%,  $Z$  63% ~ 66%, ambient  $A_{KV}$  65 ~ 114 J and -40 °C  $A_{KV}$  23 ~ 28 J, all meet the requirement of specification for the steel.

**Material Index** Steel 30CrMoA, Desander, Heavy Forging, Intercritical Quenching, Low Temperature Impact Energy

除砂器装置采用的主要材料为 30CrMoA<sup>[1-2]</sup>, 主要元件包括筒体、平盖、卡箍、三通、四通等。最大的受压元件筒体为长筒形, 工件壁厚为 300 ~ 320 mm, 长度大于 3 m, 单件重约 7.2 t。这种产品除要求较高的常规性能外, 还要有一定的高温性能、断裂韧性、低温韧性。在实际生产条件下, 很难将化学成分规定为某一固定值甚至控制在很微小范围内, 同时锻造过程中不可避免存在粗晶等现象, 最后只能利用热处理来改善力学性能。

### 1 30CrMoA 锻件的主要技术要求及制造过程

筒体的结构以及取样部位见图 1, 其材质为

30CrMoA ( /% : 0.30C, 0.21Si, 0.53Mn, 0.003S, 0.005P, 0.15Ni, 0.98Cr, 0.22Mo, 0.06V, 0.03Cu), 调质后的横向力学性能要求见表 1。

晶粒度根据 GB/T6394-2002 检测标准要求  $\geq 5$  级, 非金属夹杂物按 GB/T10561-2005 标准检查, 要求粗系、细系 A、B、C、D  $\leq 1.5$  级。30CrMoA 钢锻件的主要工艺流程为: 30 t EF-30 t LF-30 t VD-钢锭红送-棒材锻造-锻后退火-粗加工(含钻孔)-最终热处理(调质)-精加工-检验-入库。

### 2 常规热处理工艺

有用 826 ~ 926 °C 正火, 858 ~ 885 °C 淬火, 水冷

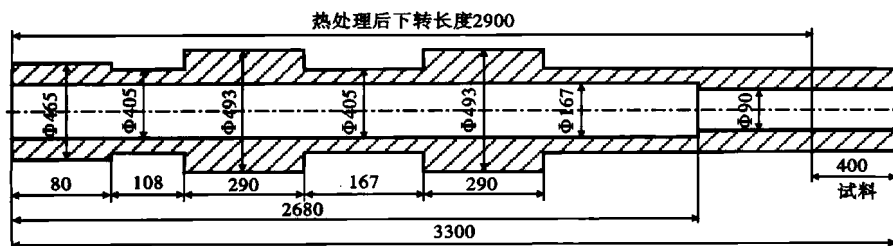


图 1 除砂器管状锻件结构和取样简图

Fig. 1 Schematics of structure of tubular forging for desander and sampling location

表 1 30CrMoA 钢的横向力学性能要求

Table 1 Requirement for transverse mechanical properties of steel 30CrMoA

取样部位	$R_m$ / MPa	$R_{p0.2}$ / MPa	A/ %	Z/ %	室温 $A_{KV}$ /J	-40°C $A_{KV}$ /J	硬度值 (HB)
壁厚 1/2 处	≥586	≥414	≥18	≥41	≥41	≥20	174 ~ 243

表 2 30CrMoA 钢常规热处理后横向力学性能

Table 2 Transverse mechanical properties of steel 30CrMoA with conventional heat treatment process

回火温 度/°C	$R_m$ / MPa	$R_{p0.2}$ / MPa	A/ %	Z/ %	室温 $A_{KV}$ /J	-40 °C $A_{KV}$ /J	硬度值 (HB)
630	815	665	19	65	53/36	12/11	275/271/293
680	715	545	20	68	89/101	16/21	226/222/228

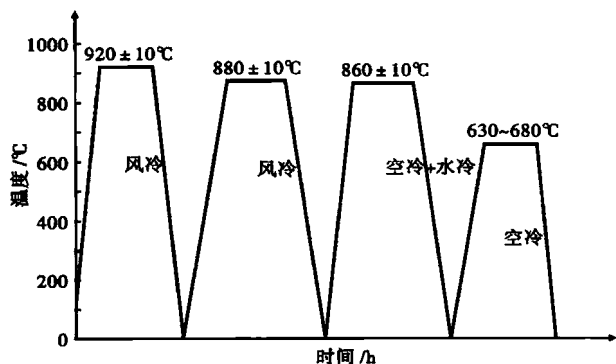


图 2 30CrMoA 钢常规热处理工艺

Fig. 2 Conventional heat treatment process for steel 30CrMoA

(水温 ≤ 38 °C), 649 ~ 704 °C 回火<sup>[3]</sup>。工艺对 30CrMoA 进行热处理,也有用双重正火预处理来提高钢件冲击韧性<sup>[4-5]</sup>,由于在常规热处理时可采用双重正火作为预处理工艺。双重正火预处理要求第一次正火选择较高奥氏体化温度,目的是使大部分碳氮化合物溶解,消除或减轻合金元素分布偏析以及带状组织,同时正火重结晶时可以细化粗大的原始晶粒,冷却时析出的化合物可以作为再次奥氏体化的形核核心。第二次正火预热的作用主要是进一步改善组织,使晶粒进一步细化,选择的奥氏体化温度

比第一次低。30CrMoA 钢管壁厚不均匀,并且长度较长,循环水冷却时的进出水温度的不同,对筒体不同部位硬度和冲击功的稳定性产生影响<sup>[3]</sup>。筒体的部位厚度不均匀,如果直接采用水淬,可能在转角处由于应力集中出现裂纹以及在淬火过程中的变形,宜采用水冷和空冷交替的冷却方式。按照上面的分析,结合资料中推荐的工艺参数,制定了如下的热处理工艺进行实验:采用 920 °C 正火 + 880 °C 正火 + 860 °C 淬火 + 630 ~ 680 °C 回火。开始水温 20 ± 5 °C,水、空交替冷却时间由温度场计算得出,具体工艺曲线见图 2,不同回火温度的检测结果见表 2。

处理后钢的晶粒度 6 ~ 7 级,属于合格范畴,只是局部有混晶存在。显微组织中发现有粗大的羽毛状魏氏组织存在,根据 GB/T13299-1991《钢的显微组织评定方法》中魏氏组织 A 系列评级标准评定其魏氏组织为 2 级,这是粗晶粒在淬火冷却过程中形成。

从表 2 中可以看出,在 630 °C 回火时强度和硬度偏高;在 680 °C 回火时,室温横向冲击值有很大提高,强度和硬度值基本都满足要求,随着回火温度增加,抗拉强度( $R_m$ )、屈服强度( $R_{p0.2}$ )有所降低,断面伸长率 A、断面收缩率 Z 稍有增加。低温冲击性能有所提高,但稳定性差,平均值依然没有达到标准要求,这与局部存在魏氏组织有关。由于筒体轴径达 490 mm,比一般资料规定的直径范围大,选择常规热处理工艺参数难以满足性能要求。

3 热处理温度参数的计算与选择

因适当降低淬火温度可以提高 30CrMoA 钢的冲击韧性,并在 830 °C 淬火时可以得到强韧性较好的综合性能<sup>[2,6]</sup>。因此采用亚温淬火是优化淬火工艺的一个方向,而亚温淬火的关键就是温度的选择。根据 30CrMoA 的  $Ac_1$  为 730 °C,  $Ac_3$  为 795 °C<sup>[6]</sup>,由 Thermo-calc 软件按照平均成分计算 30CrMoA 的平衡相图见图 3。

### 3 热处理温度参数的计算与选择

从图 3 可以看出,  $Ac_3$  点温度在 800 °C 左右,这与文献中的数据很接近。实际加热存在一定的加热速度,因此实际加热时可以在  $Ac_3$  线上 20 °C 左右,取正常淬火的下限,则可能刚好达到合适的亚温淬火温度。

奥氏体相变再结晶法可以切断组织遗传,仅通

奥氏体相变再结晶法可以切断组织遗传,仅通

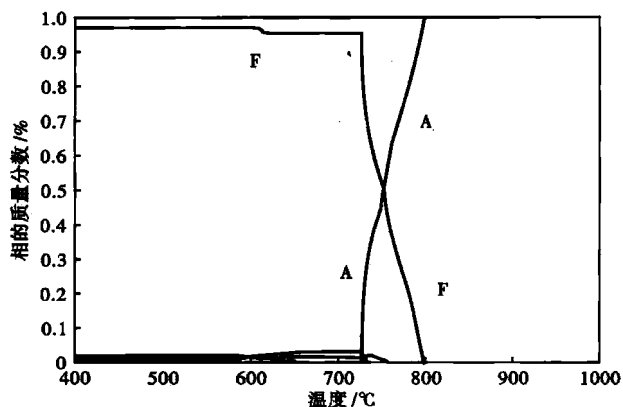


图 3 温度对 30CrMoA 钢中相的质量分数的影响

Fig. 3 Effect of temperature on mass fraction of phase in steel 30CrMoA

过一次高温正火(比  $Ac_3$  高 100 ~ 200 °C)就可以细化晶粒,而且比常规正火工艺效果更佳<sup>[7-8]</sup>。为了验证这个温度范围的准确性,将文献[9]中的 26Cr2Ni4MoV 钢做了验证,由 Thermo-calc 软件按照文中规定的化学成分计算其  $Ac_3$  点为 810 °C 左右,和文中通过实验得到奥氏体再结晶最佳温度 950 °C 相差 140 °C。目前有关最佳奥氏体再结晶温度的选择方面研究的文献很少,这个结论的准确性很难评价。姑且按照上面的结论,将相变重结晶  $Ac_3$  以上 150 °C 作为奥氏体在结晶温度进行试验。于是尝试将正火温度提高到 950 °C,利用相变再结晶来细化晶粒,在高温下加热有利于改善成分偏析以及带状组织,具体工艺如下:950 °C 正火 + 820 °C 淬火 + 660 ~ 670 °C 回火(图 4)。

处理后的金相组织结果表明,30CrMoA 筒壁厚壁锻件晶粒度明显细化,达到 8.0 级以上,魏氏组织也达到 1 级以上,极大地减少了魏氏组织的危害,其低温横向冲击性能得到明显改善。非金属夹杂物检

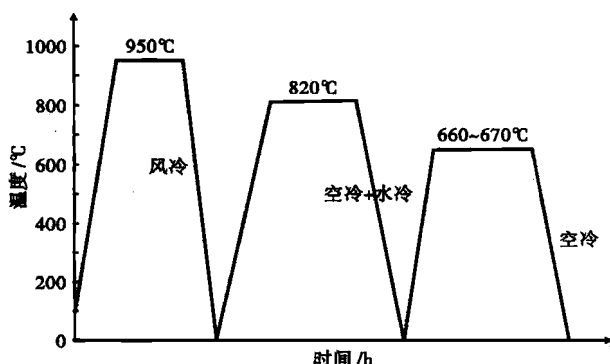


图 4 30CrMoA 钢优化热处理工艺

Fig. 4 Optimum heat treatment process for steel 30CrMoA

表 3 30CrMoA 钢优化工艺热处理后的横向力学性能  
Table 3 Transverse mechanical properties of steel 30CrMoA with optimum heat treatment process

回火温 度/°C	$R_m$ / MPa	$R_{p0.2}$ / MPa	A/ %	Z/ %	室温 $A_{KV}$ /J	-40°C $A_{KV}$ /J	硬度值 (HB)
660	700	525	21	63	113/114/65	25/23/23	248/225/242
670	685	500	22	66	69/71/110	28/26/23	215/202/197

测,硫化物 1.5 级,氧化物 0.5 级,检测结果满足技术标准要求,力学性能检测结果如表 3。

从表 3 可见,在 660 °C 回火时只有外表面硬度略有点偏高,而将回火温度稍微提高至 670 °C 时,硬度指标也满足要求。实验结果表明,30CrMoA 筒壁厚壁锻件在锻后经过 950 °C 高温奥氏体化再结晶预处理 + 820 °C 亚温淬火 + 660 ~ 670 °C 高温回火,可以显著地细化组织,消除大锻件的组织遗传性,从而获得良好的低温横向力学性能。

#### 4 结论

(1) 常规多次预处理和调质工艺难以改善 30CrMoA 钢的横向冲击功,采用 950 °C 正火 + 820 °C 淬火 + 660 ~ 670 °C 回火的热处理工艺可以有效细化调质组织,满足标准力学性能要求。

(2) 采用 Thermo-calc 软件进行热力学计算,为奥氏体再结晶温度以及亚温淬火温度提供依据,可以减少实验次数,节约时间和成本。

#### 参考文献

- [1] 张英云,闫建安,牛玉温,等. 30CrMo 钢轴套的热处理工艺及改进[J]. 热处理,2009,24(5):59-61.
- [2] 张承峰,汤晶晶,刘志勇,等. 除砂器装置用 30CrMoA 钢锻件的研制[J]. 大型铸锻件,2007(5):28-30.
- [3] 安会芬,李燕,高志一. 30CrMo 轴套的热处理工艺分析及改进[J]. 热加工工艺,2010,39(2):139-141.
- [4] 马柏生,翟鸿生,李友荣,等. 中碳 Cr-Ni-Mo-V 钢“双重预热—正火”的预先热处理工艺研究[J]. 南京理工大学学报,1997,21(6):561-563.
- [5] 张淑平,邵玉,张景海,等. 双重正火热处理工艺对 30CrMoA 钢力学性能的影响[J]. 钢铁,1998,33(12):44-47.
- [6] 刘同湖,张文辉,王兴齐. 改善 30CrMoA 钢大锻件晶粒度的研究[J]. 大型铸锻件,2007(5):6-8.
- [7] 周翠兰,郑有才. 高温正火消除 85Cr2Mn2Mo 钢组织遗传的研究[J]. 材料科学与工艺,2000,8(3):73-75.
- [8] 程巨强,何鹏,康沫狂. 正火消除准贝氏体铸钢组织遗传性的研究[J]. 铸造技术,2002,23(3):187-192.
- [9] 崔占全,徐长置,吕英怀,等. 加热制定对奥氏体再结晶消除组织遗传的影响[J]. 东北重型机械学院学报,1994,18(1):17-22.

杨新武(1986-),男,硕士研究生,冶金新材料和热处理。

E-mail:1215797361@qq.com

收稿日期:2013-02-23