

# 时效硬化型渗氮模具钢 20Cr3MnMoV 的热处理工艺特点

杜树芳

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 研究了 20Cr3MnMoV 钢热处理工艺参数对力学性能和渗氮硬化性能的影响。结果表明: 20Cr3MnMoV 钢热处理由固溶处理、时效、预时效和渗氮组成。合理控制时效过程是 20Cr3MnMoV 钢热处理的主要工艺特点。分别采用固溶处理后充分时效, 无预时效直接渗氮和先预时效再渗氮等多种工艺, 可以适应于不同工作条件的模具和构件, 以满足耐磨性和强韧性的不同要求。20Cr3MnMoV 钢氮碳共渗处理, 可实现快速渗氮、深层渗氮硬化和基体强化, 有广泛应用前景。

关键词: 20Cr3MnMoV 钢; 时效硬化; 渗氮硬化; 时效; 预时效

中图分类号: TG156.8 文献标志码: A 文章编号: 0254-6051(2021)03-0071-05

## Heat treatment process characteristics of age-hardening 20Cr3MnMoV nitriding die steel

Du Shufang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun Jilin 130022, China)

**Abstract:** Effect of heat treatment process parameters on the mechanical properties and nitriding hardening properties of 20Cr3MnMoV steel was investigated. The results show that the heat treatment of the 20Cr3MnMoV steel is composed of solid solution treatment, aging, preaging and nitriding. Reasonable controlling the aging process is the main technological characteristics of the heat treatment of the 20Cr3MnMoV steel. By using respectively solid solution treatment + full aging, nitriding without preaging, and preaging + nitriding, it can be adapted for dies and components at different working conditions, so that it satisfies the different requirements of wear resistance and strength-ductility. Nitrocarburizing of 20Cr3MnMoV steel can be used to realize fast nitriding, deep layer nitriding-hardening, and matrix hardening, which has wide-spread prospects of application.

**Keywords:** 20Cr3MnMoV steel; age-hardening; nitriding-hardening; aging; preaging

收稿日期: 2020-10-21

作者简介: 杜树芳 (1938—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为离子热处理与真空热处理基础和工艺, 工程设计施工和技术开发, E-mail: 2382902228@qq.com

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2021.03.014

随着制造业向优质高效和智能化发展, 对模具制造业有了更高的要求。适应不同模具工作条件的新模具钢正在迅速发展, 而适应模具工作条件和材料特性的热处理和表面热处理工艺也同时得到迅速发展。要求表面高耐磨性和基体高强韧性的模具, 往往要求模

[9] 欧昊, 张祥林. 基于残余应力与磁畴观察的 2% Si 无取向硅钢冲裁冲片的最佳退火温度[J]. 材料热处理学报, 2019, 40(9): 95-99.  
Ou Hao, Zhang Xianglin. Optimum annealing temperature of 2% Si non-oriented silicon steel based on residual stress test and magnetic domain observation[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2019, 40(9): 95-99.

[10] Cao H, Hao L, Yi J, et al. The effect of punching process on residual stress and magnetic domain structure of non-oriented silicon steel[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2016, 406: 42-47.

[11] 张文康, 毛卫民, 白志浩. 退火温度对冷轧无取向硅钢组织结构和磁性能的影响[J]. 特殊钢, 2006, 27(1): 15-17.  
Zhang Wenkang, Mao Weimin, Bai Zhihao. Influence of annealing temperature on structure texture and magnetic properties of cold rolled non-oriented silicon steel[J]. Special Steel, 2006, 27(1): 15-17.

[12] Lu Y L, Zu G Q, Luo L, et al. Investigation of microstructure and properties of strip-cast 4.5wt% Si non-oriented electrical steel by

different rolling processes[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 497: 165975.

[13] Jenkins K, Lindenmo M. Precipitates in electrical steels[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008, 320(20): 2423-2429.

[14] 吕学均, 张峰, 王波, 等. 夹杂物对无取向硅钢磁性能的影响[J]. 特殊钢, 2012, 33(4): 22-25.  
Lü Xuejun, Zhang Feng, Wang Bo, et al. Effects of inclusions on magnetic properties of non-oriented silicon steel[J]. Special Steel, 2012, 33(4): 22-25.

[15] 缪乐德, 张毅, 张峰, 等. 不同牌号无取向硅钢夹杂物定性定量分析[J]. 冶金分析, 2012, 32(10): 7-15.  
Miao Ledede, Zhang Yi, Zhang Feng, et al. Qualitative and quantitative analysis of inclusions in non-oriented silicon steel with different trademark[J]. Metallurgical Analysis, 2012, 32(10): 7-15.

[16] Liu Y, Zhang X, Wang P, et al. Investigation on inclusions in non-oriented silicon steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2020, 51(1): 22-26.

具整体热处理后再做表面热处理。时效硬化型渗氮模具钢可以在模具整体固溶处理后,将整体时效和表面渗氮合并为一个工序,实现表面和心部同时强化。

传统高强韧模具钢往往合金元素含量较高,渗氮速度较慢。20Cr3MnMoV 低合金渗氮模具钢渗氮后模具表面可得到高硬度(950~1100 HV)和高耐磨性,同时模具心部保持 47.5~50 HRC 高硬度,渗氮时间可缩短 50% 以上。由于时效硬化钢本身的特性决定了热处理工艺具有一定特点,研究这些特点有助于制定合理的时效硬化钢热处理工艺。

## 1 试验材料与方法

试验用钢为自主研制的时效硬化渗氮钢 20Cr3MnMoV,其化学成分如表 1 所示。

表 1 20Cr3MnMoV 钢的化学成分(质量分数,%)  
Table 1 Chemical composition of the 20Cr3MnMoV steel (mass fraction, %)

C	Si	Mn	Cr	Mo	V	Nb
0.21	0.29	1.58	3.17	1.59	0.30	0.05

20Cr3MnMoV 钢在中频电炉中熔炼,共 2500 kg,铸锭改锻成圆棒电极,经电渣重熔后制成  $\phi 500$  mm 铸锭,再经开坯和改锻成  $\phi 50 \sim \phi 290$  mm 不同尺寸锻材。锻材经 780 °C 保温 3 h 退火后,硬度为 26~30 HRC。试样毛坯由  $\phi 50$  mm 锻材改锻后退火,加工成拉伸、冲击、热处理和渗氮试样。

热处理试样尺寸为  $\phi 15$  mm  $\times$  10 mm,端面精磨加工,固溶和时效处理后在洛氏硬度计上测定硬度,以及做金相分析。

渗氮试样尺寸为 12 mm  $\times$  12 mm  $\times$  25 mm,4 个侧面精磨加工,渗氮后从长度中间横向切断试样,中间断面镶嵌制备硬度梯度试块,在截面中心表面做显微硬度测试和金相分析。显微硬度计及金相分析仪型号为 HXD-1000TMC/LCD,测试载荷砝码为 100 g,保持时间 10 s。

渗氮试验在 LDMZ-150 型离子渗氮炉内进行。炉内  $\phi 700$  mm 底盘上设置一个  $\phi 120$  mm  $\times$  10 mm 平台,平台四周配置适量配件,平台中心穿入一支铠装热电偶,热电偶端部距平面表面 2 mm,渗氮气氛为  $\text{NH}_3$  或加入  $\text{H}_2$  调整含  $\text{N}_2$  量气氛,自动控制保温时气压为 250~300 Pa,电压 600~650 V,电流 10~20 A。

对试样进行了不同温度固溶处理空冷,不同温度时效和预时效,以及不同渗氮工艺处理,并对渗氮试样进行硬度梯度测定,基体硬度测定和金相分析,以及拉伸试验。对不同尺寸试块还进行了模拟淬透性测试。

## 2 固溶及时效后试验钢的力学性能分析

表 2 和表 3 为 20Cr3MnMoV 钢不同固溶和时效工艺处理后的力学性能,并给出了 4Cr5MoSiV1 (H13) 钢力学性能作为对比<sup>[1]</sup>。表 4 为 20Cr3MnMoV 钢 920 °C  $\times$  2 h 固溶处理空冷后(硬度 45 HRC)在 (520~600) °C  $\times$  6 h 和 (620~650) °C  $\times$  4 h 时效后硬度。

表 2 不同固溶温度下 20Cr3MnMoV 钢的力学性能  
Table 2 Mechanical properties of the 20Cr3MnMoV steel solution-treated at different temperatures

试验钢	固溶温度/°C	时效工艺	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	$KV_2$ /J	硬度/HRC
20Cr3MnMoV	880	540 °C $\times$ 6 h	1521.06	1227.67	11.59	46.6	20.0	46.6
	920		1631.12	1269.67	12.29	48.8	22.7	48.4
	950		1610.39	1249.67	10.11	46.7	14.0	48.5
	980		1604.29	1273.00	5.19	30.8	10.4	50.0
4Cr5MoSiV1	1050 °C 油淬 + 620 °C 回火		1389.00	1189.00		46.6	21.0	43~44

表 3 不同时效温度下 20Cr3MnMoV 钢的力学性能(920 °C  $\times$  2 h 固溶)  
Table 3 Mechanical properties of the 20Cr3MnMoV steel aged at different temperatures (solution treated at 920 °C for 2 h)

时效温度/°C	时效时间/h	$R_m$ /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	$A$ /%	$Z$ /%	$KV_2$ /J	硬度/HRC
540	6	1631.12	1269.67	12.29	48.8	22.7	48.4
580		1480.00	1337.80	9.63	44.3	20.0	46.5
615		1438.30	1265.30	9.50	52.0	17.9	42.0

综合表 2~4 数据表明,920 °C 固溶处理空冷 + 540~560 °C 充分时效,可得到最佳时效硬化和最高强韧性。随着时效温度增高,超过 600~620 °C 出现过时效,钢

的基体硬度强度和韧性降低。因此选择 920 °C 固溶处理和 520~560 °C 时效 4~6 h,硬度 47~50 HRC 为最佳工艺。

表4 不同时效温度下 20Cr3MnMoV 钢的  
硬度(920 °C × 2 h 固溶)

Table 4 Hardness of the 20Cr3MnMoV steel aged at  
different temperatures ( solution treated at 920 °C for 2 h)

时效温度/°C	520	540	560	580	600	620	630	640	650
时效后硬度/HRC	49.8	48.4	47.5	46.5	43.5	37.5	34.6	28.8	27.5

### 3 工件尺寸对试验钢性能影响分析

工件尺寸因素对模拟淬火件的淬透性有一定影响。20Cr3MnMoV 钢固溶处理后组织以贝氏体为主<sup>[2]</sup> ,由于工件尺寸较大,致使固溶处理冷却速度减慢。以时效后硬化效应的变化来观察冷却速度的影响,为了保持各试块固溶后冷却条件的一致性,3种尺寸的钢试块固溶处理均在真空炉中加热,在冷室内 0.2 MPa 氮气压力下冷却至 300 °C 以下空冷。

如表5所示,选取 20Cr3MnMoV 钢不同有效厚度的试块,φ290 mm × 300 mm(有效厚度 290 mm), φ290 mm × 150 mm(有效厚度 150 mm) 和 290 mm × 160 mm × 150 mm(有效厚度 150 mm), 920 °C 固溶处理后时效,在 540 °C 透烧后保温 6 h 空冷,从试块中心线切割切断后测定试块截面中心部位平均硬度。

表5 试块尺寸对 20Cr3MnMoV 钢时效硬化效应的影响  
Table 5 Influence of specimen size on age-hardening  
effect of the 20Cr3MnMoV steel

试块尺寸/mm	920 °C 固溶后硬度/HRC	540 °C 时效后硬度/HRC
φ290 × 300	43.0	45.5
φ290 × 150	43.5	47.5
290 × 160 × 150	44.5	47.5

试验结果显示工件有效厚度在 300 mm 时,时效

表6 20Cr3MnMoV 钢不同温度固溶处理 2 h 及 520 °C × 40 h 渗氮后硬度梯度  
Table 6 Hardness gradient of the 20Cr3MnMoV steel solution treated at different temperatures  
for 2 h and nitrided at 520 °C for 40 h

固溶温度/°C	距表面距离处(mm) 硬度/HV0.1								基体硬度/HV0.1	渗氮层深/mm
	0.02	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6		
880	1018	1018	1018	580	527	514	500	475	475	0.42
920	1056	1056	1018	824	557	527	527	514	488	0.42
950	1056	1018	1018	824	586	542	527	514	514	0.40
980	1056	1056	1018	824	623	527	527	527	527	0.35

合理利用渗氮硬化和时效硬化的叠加效应,正确选择渗氮工艺,可以在进行时效硬化的同时促进渗氮硬化的发展。如果在渗氮前预先进行时效处理,可以调整渗氮硬化效果,调整基体硬度,消除加工应力和控制尺寸变化,满足特殊应用场合的需求。表8表明无预时效直接渗氮处理可获得最高近表层和深层的渗氮硬化。

硬化后硬度稍有降低,时效硬化后金相检查(500 倍显微镜下)三者组织相同,时效硬化效果降低原因待查。因此,可以认为 20Cr3MnMoV 钢有效厚度在 150 mm 以下,可保证工件穿透均匀硬化。

## 4 固溶及预时效对渗氮层影响分析

### 4.1 固溶处理

固溶处理温度对时效后强化效果有明显影响,试验确定 900 ~ 920 °C 固溶处理后,钢组织以粒状贝氏体为主,含有少量板条马氏体和残留奥氏体,超过 940 °C 固溶处理,显微组织为粗大下贝氏体、马氏体和残留奥氏体。表2数据表明,950 °C 以上温度固溶处理晶粒粗大,塑性和韧性下降。表2和表3数据表明,920 °C 固溶处理 540 °C 时效处理后,硬度为 48.4 HRC,强韧性最高。

不同温度固溶处理 2 h 和 520 °C × 40 h 渗氮后,检测渗氮层硬度梯度见表6,表明 920 °C × 2 h 固溶处理后渗氮层较深,硬度梯度良好,金相检查 880 ~ 920 °C 固溶处理渗氮层无脉状组织呈细针状,而 950 ~ 980 °C 固溶处理渗氮层有网状和脉状组织,呈粗针叶状。可见 920 °C × 2 h 固溶处理渗氮层兼有硬度梯度好,组织细,渗氮层深和基体硬度高的优势。

### 4.2 预时效处理

时效硬化钢固溶处理后在渗氮温度 520 ~ 540 °C 长时间保温,合金碳化物和金属间化合物从基体共格析出,产生析出硬化效应,硬度从固溶态 44 ~ 46 HRC,提高至 47 ~ 50 HRC(见表7)。渗氮时表层在同样温度下发生渗氮固溶强化和氮化物的析出硬化,渗氮与时效同时进行,产生渗氮硬化和时效硬化的叠加效应。

固溶处理后先经短时(2 ~ 4 h)预时效处理,使基体只达到初始时效状态,或者基体少量过时效,再经较长时间渗氮(充分时效)后会产生二次硬化,基体时效硬化硬度增量与未预时效的相近。采用时效峰值温度 540 ~ 560 °C 预时效,可实现渗氮前的正常时效,不影响渗氮后的基体硬度。只有部分过时效(600 ~ 620 °C)

才会引起渗氮层次表层渗氮硬化效应降低,造成基体硬度降低。如表7和表8所示,540℃预时效不产生过时效,只少影响渗氮层近表层的渗氮硬化,不影响渗层的深层渗氮硬化;600~620℃部分过时效,产生的析出相阻碍了氮原子向次表层的扩散,降低了次表

层的渗氮硬化效应,对表面下0.1mm以内近表层渗氮硬化影响不大,对更深层氮的扩散不利。600~620℃以上温度充分过时效,造成碳化物和金属间化合物大量析出及析出相聚集长大,影响渗氮硬化和造成基体软化。

为了调整固溶处理后的硬度,以利于切削加工,并

表7 20Cr3MnMoV钢不同预时效工艺和不同渗氮工艺处理后的基体硬度

Table 7 Matrix hardness of the 20Cr3MnMoV steel with different preaging processes and different nitriding treatments

工艺	参数	无时效硬度/ HRC	不同预时效工艺下硬度/HRC						
			540℃×4h	560℃×4h	580℃×4h	600℃×4h	620℃×4h	620℃×6h	630℃×4h
固溶	920℃×2h	45.0	48.4	47.0	46.5	43.5	37.5	36.0	34.6
渗氮	520/540℃×50h	48.5				46.0			
	540℃×10h	47.5						40.0	
	530℃×15h	49.5				44.5	39.5		
	540℃×20h	47.5	48.5	47.5	47.5				38.0

表8 预时效工艺对20Cr3MnMoV钢渗氮硬化的影响

Table 8 Effect of preaging on nitriding hardening of the 20Cr3MnMoV steel

时效工艺	渗氮工艺	渗氮气氛	距表面距离处(mm)硬度/HV0.1					层深/mm	
			0.02	0.1	0.2	0.3	0.4		
无	540℃×20h	12% N <sub>2</sub>	1056	946	946	642	527	475	0.42
540℃×4h	540℃×20h	12% N <sub>2</sub>	1097	913	852	681	542	488	0.45
无	520/540℃×50h	15% N <sub>2</sub>	1097	1056	1018	913	572	488	0.50
600℃×4h	520/540℃×50h	15% N <sub>2</sub>	1056	1056	981	557	537	452	0.44

改善心部(基体)强韧性,以及消除渗氮前工件的加工应力,可采用600~620℃预时效或去应力退火,将固溶处理后基体硬度降低为36~38HRC,渗氮后基体硬度通过时效硬化提高到40~45HRC。

## 5 渗氮工艺影响分析

含Cr、Mo、V、Nb元素的时效硬化钢,在渗氮过程中,由于时效硬化和渗氮硬化的叠加作用,使渗氮层的近表层(0.1mm)和次表层(0.1~0.4mm)硬化效果显著,高硬度层厚,硬度梯度好,基体硬度高(47.5~50HRC)。如图1所示,520/540℃×70h渗氮后,渗氮层800HV0.1以上层厚接近0.4mm,渗氮层600HV0.1以上层厚超过0.5mm,基体硬度保持47.5HRC(475HV0.1),渗氮层深为0.78mm。

20Cr3MnMoV钢由于低碳和Cr、Mo、V、Nb元素适量配比,使此钢具有优异的渗氮硬化特性,当要求薄层渗氮时可实现表面下0.1mm以内高硬度(>900HV0.1),当要求深层渗氮时可实现深层硬化至0.4~0.5mm,硬度大于600~800HV0.1。金相检查表明,控制渗氮过程气氛和配合适宜的温度时间扩散条件,可实现渗氮表面无化合物层和近表面无脉状组织,获得高韧性

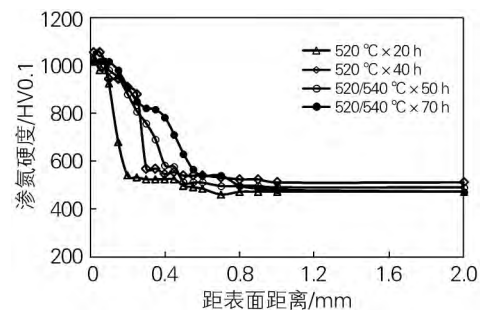


图1 20Cr3MnMoV钢离子渗氮硬化曲线  
Fig. 1 Hardness profiles of the plasma nitrided 20Cr3MnMoV steel

渗氮层。

时效硬化钢采用氮碳共渗,可实现快速渗氮、深层渗氮硬化和基体强化的目标。普通渗氮钢或碳素钢氮碳共渗后,表面硬度低(见表9),扩散层硬化效果差,表现为这种钢氮碳共渗后承载能力低。时效硬化钢采用氮碳共渗大大缩短渗氮时间,570℃×4h氮碳共渗可达到530℃×(10~15)h渗氮的同样渗氮层深和渗层硬化效果,可保证深层表面高硬度和高耐磨性,而扩散层硬度梯度好,更重要的是基体硬度高,可明显提高渗氮件的承载能力。

表9 三种钢氮碳共渗效果  
Table 9 Nitrocaburizing results of three steels

处理工艺	气氛	钢号	距表面距离处( mm) 硬度/HV0.1								层深/mm
			0.02	0.05	0.08	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	
570 °C × 4 h	NH <sub>3</sub> + C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	20Cr3MnMoV	1018	946	913	882	824	606	500	475	0.27
		H13	1018	946	642	542	488	488			0.13
		45	351	280	232	224	224	206	181	168	0.20

## 6 热处理工艺特点分析

20Cr3MnMoV 钢热处理由固溶处理、时效、预时效和渗氮组成。这种钢的时效硬化特征决定了它的热处理工艺特点。正确运用这些特点,合理控制时效过程,可适用于不同零件服役条件下制定不同的热处理工艺。

综合表 2 和表 3 数据分析,可得出结论:20Cr3MnMoV 钢固溶处理(920 °C)和充分时效(520 ~ 560 °C)后,具有最佳强韧性,经过无过时效的预时效处理(540 ~ 560 °C),再经较长时间渗氮处理,可实现渗氮硬化和时效硬化的最佳配合,同时兼顾消除加工应力和减少渗氮变形。

预时效是调整基体强韧性和减少渗氮变形的重要手段。试验表明:正确运用少量过时效((600 ~ 620) °C × (2 ~ 4) h),可实现时效硬化钢渗氮硬化和基体时效硬化的合理配合。

比较不同模具钢离子渗氮效果(表 10)可见,20Cr3MnMoV 钢比 H13 钢有深层渗氮硬化特点,特别适合于重载耐磨工作条件,而且渗速较快。20Cr3MnMoV 钢采用氮碳共渗可实现快速渗氮、深层硬化和基体强化,是时效硬化钢渗氮技术新进展。

表 10 两种模具钢渗氮硬化对比  
Table 10 Comparison of nitriding hardening of the two die steels

材料	距表面距离处( mm) 硬度/HV0.1						基体	层深/mm
	0.02	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40		
20Cr3MnMoV	1056	1056	1018	946	557	500	500	0.33
H13	1056	1018	642	514	514	500	500	0.14

注:530 °C × 15 h, NH<sub>3</sub> 渗氮

## 7 结论

1) 时效硬化型渗氮模具钢 20Cr3MnMoV 热处理由固溶处理、时效、预时效和渗氮组成。这种钢适合用于制造有效厚度在 150 mm 以下,要求高耐磨性和高强韧性的模具和重载耐磨件。

2) 合理控制时效过程是 20Cr3MnMoV 钢热处理工艺的主要特点。

3) 采用 920 °C 固溶处理和 520 ~ 560 °C 充分时效后,该钢具有最佳强韧性和较高硬度(48 ~ 50 HRC),适合用于制造热作模具和高强度构件。

4) 采用 920 °C 固溶处理后,进行渗氮处理,可获得渗氮层最佳渗氮硬化和基体最高强韧性以及表面最高耐磨性的最佳配合,适合用于制造要求高耐磨性而对处理变形要求不严的重要模具和构件。

5) 采用 920 °C 固溶处理后,经无过时效的 540 ~ 560 °C 预时效处理,再经 520 ~ 540 °C 渗氮处理,可得到良好渗氮硬化渗氮层,基体较高强韧性和表面良好耐磨性的最佳配合,适用于制造要求处理变形严格的高耐磨性重要模具和构件。

6) 采用 920 °C 固溶处理后,先经少量过时效的预时效处理((600 ~ 620) °C × (2 ~ 4) h),再进行 520 ~ 540 °C 渗氮处理,可实现渗氮硬化和基体时效硬化的合理配合。固溶处理后硬度从 45 HRC 调整为 35 ~ 38 HRC,改善切削加工性。渗氮后基体时效硬化硬度提高至 40 ~ 45 HRC,适合用于制造要求切削加工性和减少处理变形的精密渗氮模具和构件。

7) 20Cr3MnMoV 钢固溶处理后采用氮碳共渗可实现快速渗氮、深层渗氮硬化和基体强化。

致谢:本试验在长春金马热处理公司完成,杜恒山、杨广林、张海崑和黄泽祥协助完成了大量试验,深表谢意! 郑州机械研究所卢金生高工协助完成了拉伸试验,特别感谢!

### 参考文献:

- [1] 王彤,李平安. 缓冲器锻件精密锻造成型模具用钢的选择与应用[J]. 金属热处理,2004,29(8): 58-61.  
Wang Tong, Li Ping'an. Selection and application of die steels to precision mould of buffer forgings[J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(8): 58-61.
- [2] 杜树芳. 时效硬化型 20Cr3MnMoV 渗氮钢[J]. 金属热处理,2017,42(12): 78-84.  
Du Shufang. Age-hardened 20Cr3MnMoV nitriding steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2017, 42(12): 78-84.
- [3] 杜树芳,杨广林,杜恒山. 时效硬化型渗氮模具钢[J]. 金属加工(热加工),2017,21(11): 41-43.