

## 高强韧低合金冷作模具钢 SDC55 的组织 and 性能

邓黎辉, 汪宏斌, 李绍宏, 吴晓春  
(上海大学材料科学与工程学院, 上海 200072)

**摘要:** 研究了高强韧低合金冷作模具钢的组织 and 性能。利用 JMatpro 相图计算辅助进行合金成分设计。运用 SEM 和 TEM 等研究了 SDC55 的微观组织特征 and 强化机制。结果表明, 经过淬火回火后, SDC55 的组织为回火马氏体基体上均匀分布着弥散细小的碳化物颗粒, 残留奥氏体呈薄膜状包裹在马氏体边缘。经 930 °C 淬火 180 °C 两次两小时回火后, SDC55 的冲击韧性达到 158 J, 硬度达到 62 HRC。与 D2 钢比较, 硬度基本相当, 韧性显著提高。

**关键词:** 冷作模具钢; 热处理; 组织 and 性能

**中图分类号:** TG162.83      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1009-6264(2010)12-0080-05

### Microstructure and mechanical properties of a low alloy cold-working die steel SDC55

DENG Li-hui, WANG hong-bin, LI Shao-hong, WU Xiao-chun

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The microstructure and mechanical properties of a newly developed cold-working die steel SDC55 was investigated. The design of alloy composition was assisted with Jmatpro. The microstructure characterization and toughening mechanism were examined by means of scanning X-ray diffraction (XRD), electron microscopy (SEM) and transmission electron microscopy (TEM). The results show that after quenching and tempering, the microstructure of SDC55 steel consists of fine carbides uniformly and dispersively distributed in tempered martensitic matrix, and edges of the tempered martensite are wrapped by thin-film-like retained austenite. After quenching at 930 °C and tempering twice at 180 °C for two hours each time, the impact toughness and hardness of SDC55 steel are 158 J and 62 HRC, respectively. Comparing with D2 steel, the hardness of SDC55 steel is not changed obviously. However, its impact toughness is improved remarkably.

**Key words:** cold-working die steel; heat treatment; microstructure and mechanical property

冷作模具主要应用于金属或非金属材料的冲裁、拉伸、弯曲、冷挤、冷镦等工序。模具工作温度不高, 但由于模具一般在磨损、冲击等条件下工作, 因此要求冷作模具钢具有高强韧性以及高硬度和高耐磨性配合<sup>[1]</sup>。目前较广泛使用的 D2 钢具有良好的耐磨性能和硬度, 但是模具在使用过程中往往因韧性不足而失效。

本文研究的新型冷作模具钢(文中称为 SDC55)是上海大学和宝钢合作开发的低合金成本高强韧冷作模具钢。其合金成分在 D2 钢基础上降低了 C 以

及 Cr 含量, 以降低了碳化物的偏析以及网状碳化物。添加少量 Ni 在提高钢的强度同时能够保持良好的塑性和韧性, 添加适量的 Mo 和 V 以形成弥散的析出物, 以强化基体并阻碍奥氏体晶粒的长大, 提高材料的强韧性。

本文主要介绍新型低合金高强韧冷作模具钢 SDC55 的热处理工艺以及相应的组织和性能, 并且分析讨论了 SDC55 的强韧化机理。

### 1 实验材料及方法

实验用 SDC55 钢制备工艺为: 中频感应炉熔炼 → 电渣重熔 → 退火 → 锻造 → 退火。SDC55 钢及 D2 钢的化学成分如表 1 所示。冲击试样为 10 mm × 10 mm × 55 mm 无缺口试样。

使用冲击试验机 JB-30B (30 kg 锤) 进行冲击实验, 并在洛氏硬度机上测试试样硬度。试样经 4% 的硝酸酒精腐蚀后用立式金相显微镜 (LV150, Nikon

收稿日期: 2010-01-21; 修订日期: 2010-07-21

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划课题: 高品质模具钢锻材关键技术开发 (2007BAE51B04); 上海市重点学科建设项目 (S30107)

作者简介: 邓黎辉 (1985—), 男, 主要从事冷作模具钢开发研究, 电话: 021-56331153, E-mail: denglihui@shu.edu.cn。

通讯作者: 汪宏斌, 电话: 021-56334465。

Japan)、SEM 以及 TEM 观察钢的淬回火组织。用 X350A 型 X 射线应力仪测定残留奥氏体含量。

表 1 SDC55 钢及 D2 钢化学成分 (wt%)

Table 1 Chemical composition of the tested steels (wt%)

steel	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	V	Fe
SDC55	0.73	0.8	0.69	0.37	2.35	0.25	0.25	Bal.
D2	1.72	0.33	0.44	-	11.4	0.62	0.70	Bal.

## 2 实验结果

### 2.1 淬火温度对冲击韧性以及硬度的影响

钢的冲击韧性和硬度对模具的使用寿命有重要的影响,图 1 为 SDC55 在不同淬火温度,180 °C 回火两次每次 2 h 后的冲击韧性以及硬度值。

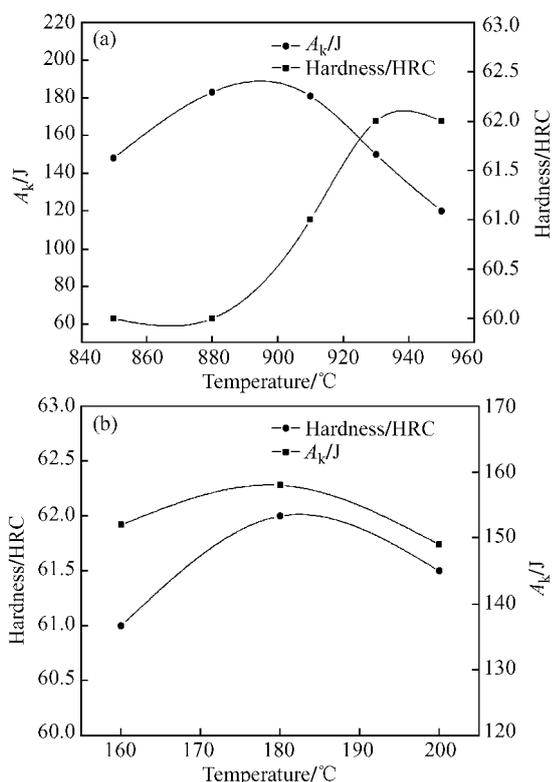


图 1 SDC55 不同淬火温度和回火温度冲击韧性及硬度

(a) 不同淬火温度; (b) 不同回火温度

Fig. 1 Toughness and hardness of SDC55 steel quenched and tempered at different temperatures

(a) after quenching at different temperature and then tempering at 180 °C for 2 h; (b) after quenching at 930 °C and then tempering at different temperatures for 2 h

从图 1(a) 可以看出,回火温度为 180 °C,淬火温度在 850 ~ 950 °C 时 SDC55 的冲击韧性在 120 J 以

上,硬度在 60 HRC 以上。淬火温度为 910 ~ 930 °C 时,其冲击韧性为 150 J 以上,硬度为 62 HRC 以上。淬火温度为 910 ~ 930 °C 时,SDC55 具有优良的强韧性配合。因此在研究回火温度对 SDC55 的冲击韧性和硬度影响时选定淬火温度为 930 °C。图 1(b) 为 SDC55 在 930 °C 淬火,不同温度回火后的冲击韧性及硬度曲线。930 °C 淬火 160 ~ 200 °C 回火两次每次 2 h 后,SDC55 的冲击韧性在 149 J 以上,硬度在 61 HRC 以上。当热处理工艺为 930 °C 淬火 180 °C 回火时,SDC55 的冲击韧性为 158 J,硬度为 62 HRC。

### 2.2 回火温度对冲击韧性及硬度的影响

通过图 1(a) 和图 1(b) 可以看出,SDC55 的推荐热处理工艺为 930 °C 淬火,180 °C 回火两次,每次 2 h。经过推荐工艺热处理后的 SDC55 性能和 D2 钢推荐工艺 (1030 °C 淬火,200 °C 回火) 热处理后性能比较如图 2。

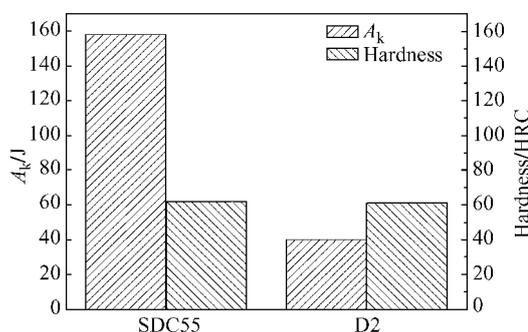


图 2 SDC55 与 D2 钢的冲击韧性和硬度比较

Fig. 2 Hardness and toughness of SDC55 and D2 steel

D2 钢在推荐热处理工艺热处理后冲击韧性为 40 J,硬度为 62 HRC。SDC55 与 D2 钢相比较,在硬度相当的情况下冲击韧性有大幅度提高,约为 D2 钢的 4 倍。结合图 1 中淬火温度对 SDC55 冲击韧性和硬度影响曲线看出,SDC55 的热处理温度范围比较宽。淬火温度范围 850 ~ 950 °C,回火温度范围 160 ~ 200 °C。可以根据性能需要来选定热处理工艺。

## 3 分析讨论

### 3.1 SDC55 的合金成分优化设计

马氏体中碳含量对体钢的强度和硬度有重要影响,Cr 的作用主要是提高钢的淬透性,Cr 也是形成网状碳化物的主要元素。因此相比较 D2 钢来说,SDC55 的 C 和 Cr 的含量都适当的降低了,从而使 SDC55 的组织更加均匀,如图 3(a) 为 SDC55 经过 930 °C 淬火 180 °C 回火后显微组织,图 3(b) 为 D2 钢

经过 1030 °C 淬火 200 °C 回火后的显微组织。通过比较可以看出,SDC55 的组织均匀性比较好,而 D2 钢组织上存在着碳化物的偏析现象。

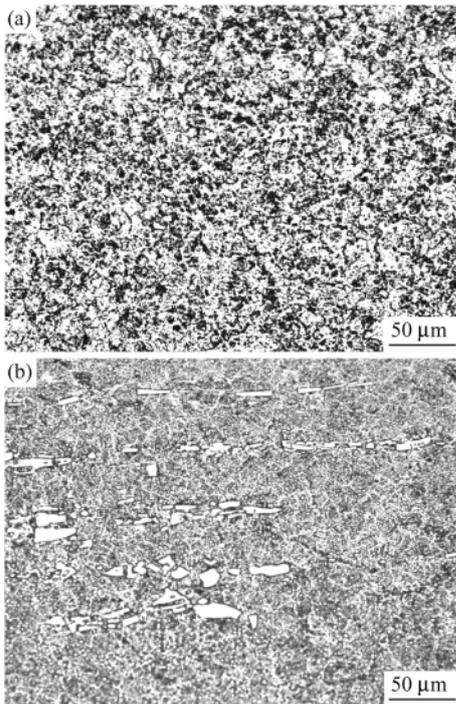


图 3 SDC55 和 D2 钢淬火回火后的显微组织  
(a) SDC55 钢; (b) D2 钢

Fig. 3 Metallographs showing microstructure of SDC55 and D2 steel after quenching and tempering  
(a) SDC55 steel; (b) D2 steel

图 4(a) 和 4(b) 分别为利用 Jmartpro 软件对 D2 钢和 SDC55 进行相图计算。通过计算得知 SDC55 和 D2 钢组织中都含有大量的  $M_7C_3$  型碳化物。但是从图 4(b) 中 SDC55 相图中可以看出,当选择 930 °C 奥氏体化时只有少量的碳化物没有熔入基体,而 D2 钢在 1030 °C 奥氏体化时存在大量的未熔的  $M_7C_3$  型碳化物。大量未熔的碳化物使淬火后 D2 钢基体上存在大量的粗大的一次碳化物,这与图 3 中的组织比较符合。SDC55 一次未溶的碳化物少,因此淬火后能够得到比较均匀的组织,从而其韧性比较好。SDC55 组织常温下主要存在 MC 型和  $M_7C_3$  型碳化物,并含有少量的渗碳体。多类型碳化物钢淬火时易溶解的碳化物可提高较低淬火温度时的奥氏体固溶度,未溶解的碳化物可阻碍奥氏体晶粒长大,使淬火温度加宽。回火时不同碳化物的析出、长大速度不同可提高抗回火性<sup>[2]</sup>。而 MC 型碳化物能够阻碍奥氏体晶粒的长大,并细化马氏体的组织,从而提高钢的强韧性并提

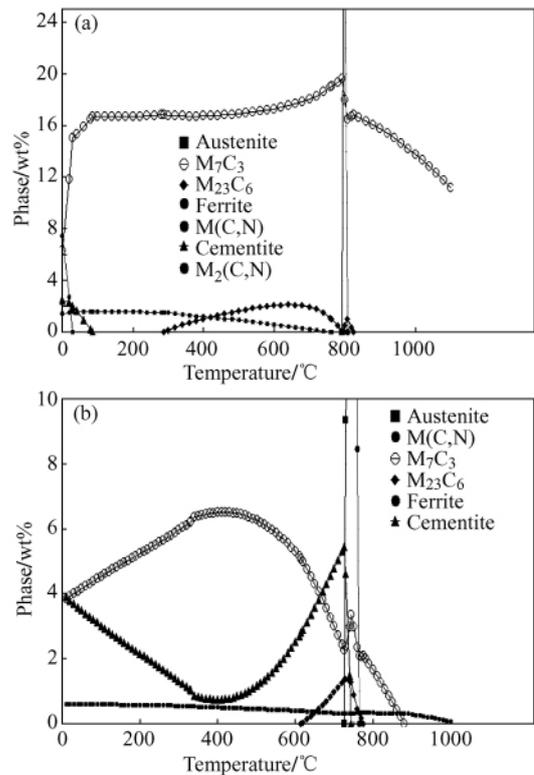


图 4 相图计算 (a) D2 钢; (b) SDC55 钢

Fig. 4 Phase diagram calculated by Jmartpro for (a) D2 and (b) SDC55 steel

高钢的耐磨性。同时合金渗碳体是钢中合金元素为渗碳体所吸收并进而取代铁原子所造成的,合金渗碳体的形成可以降低系统的自由焓。渗碳体的铁原子可以被 Mn、Cr 或者 Mo 和 V 等代替。 $M_7C_3$  型碳化物也可以作为弥散析出的二次强化相,提高钢的强韧性。

根据相关文献<sup>[3]</sup>,马氏体钢的屈服强度与各强化因素之间的关系可以用下式来表示:

$$\sigma = \sigma_{Fe} + \sum_i \sigma_{ss}^i + \sigma_c + \sigma_\theta + \sigma_d + \sigma_w \quad (1)$$

$\sigma_{Fe}$  为纯铁的退火强度,  $\sigma_{ss}^i$  为置换元素的固溶强化,  $\sigma_c$  为碳的固溶强化,  $\sigma_\theta$  为碳化物的弥散强化,  $\sigma_d$  为位错强化,  $\sigma_w$  为马氏体板条尺寸的强化。

碳的固溶强化可以表示为:

$$\sigma_c = 1171.3X^{1/3} \quad (2)$$

其中  $X$  为马氏体中碳含量。

碳化物的弥散强化可以表示为:

$$\sigma_\theta \approx 0.52V_\theta \Delta^{-1} \quad (3)$$

其中  $V_\theta$  为析出碳化物的体积,  $\Delta$  为碳化物间距离。

板条马氏体尺寸对强度的贡献可以表示为:<sup>[4]</sup>

$$\sigma_w = 115w^{-1} \quad (4)$$

式中  $w$  为板条的平均宽度,单位为  $\mu\text{m}$ 。

从图 3 和图 5 中 SDC55 的金相和 SEM 图片看出,SDC55 的组织中碳化物非常弥散细小,根据公式(1)和公式(3)可以知道,组织中碳化物的尺寸和弥散度对于钢的强度有重要的贡献。文献认为<sup>[4]</sup>:板条宽度小于  $0.5 \mu\text{m}$  时,强化效应较显著。通过 TEM 研究从图 6 中可以看出,SDC55 的组织中存在着板条马氏体,通过比较发现,图 6(b) 中暗场像的板条马氏体的宽度小于标尺的长度  $0.5 \mu\text{m}$ ,能够显著强化材料。并且板条马氏体的亚结构为位错,从图 6(a) 和图 6(b) 中都能够看到一些其他的高密度位错缠结而成的板条马氏体存在,因此能够通过位错强化的机制使材料得到强化。

### 3.2 SDC55 微观组织分析

模具钢的微观组织对于最后的性能有决定性的影响。鉴于冷作模具钢的工作环境的恶劣性以及工作中受到复杂的作用力。首先要求 SDC55 的组织能够均匀,其次在 SDC55 基体上能够存在弥散细小的碳化物从而能够强韧化基体。对 SDC55 钢进行组织以及 SEM 分析。

图 5(a) 为 SDC55 在  $930 \text{ }^\circ\text{C}$  淬火  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  回火后的 SEM 图,可以看出大部分的碳化物颗粒呈均匀弥散分布,尺寸细小。这种弥散细小的碳化物分布在基体上能够有效的强韧化基体。并且碳化物的边沿比较圆滑没有尖锐的尖角,从而能够减小组织中应力集中。图 5(b) 为对应的碳化物能谱分析,主要含有 Cr 及少量的 Mo、V。

Mo 和 V 在钢中形成弥散的细小二次强化相,这些弥散的析出物不仅能够起到沉淀强化作用,而且能够有效地阻碍奥氏体晶粒的长大,同时有研究指出,Ni 和 Si 通过降低初生碳化物长大速度而使其细化,最终提高材料的强韧性<sup>[5]</sup>。

图 6 为 SDC55 在  $930 \text{ }^\circ\text{C}$  淬火  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  回火后的 TEM 照片,(a) 为明场相,(b) 为暗场像。从图 6 中看到,马氏体的周围包裹着残留奥氏体。组织中存在一些板条马氏体能够很好的强韧化基体。

利用 XRD 测量 SDC55 钢中的残留奥氏体含量,图 7 为 SDC55 经过  $930 \text{ }^\circ\text{C}$  淬火  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  回火后 XRD 曲线,经过测定, $180 \text{ }^\circ\text{C}$  回火后 SDC55 的残留奥氏体的含量为  $15.9\%$ 。残留奥氏体对钢的塑性有重要的作用,有研究指出残留奥氏体薄膜包裹在马氏体边缘能

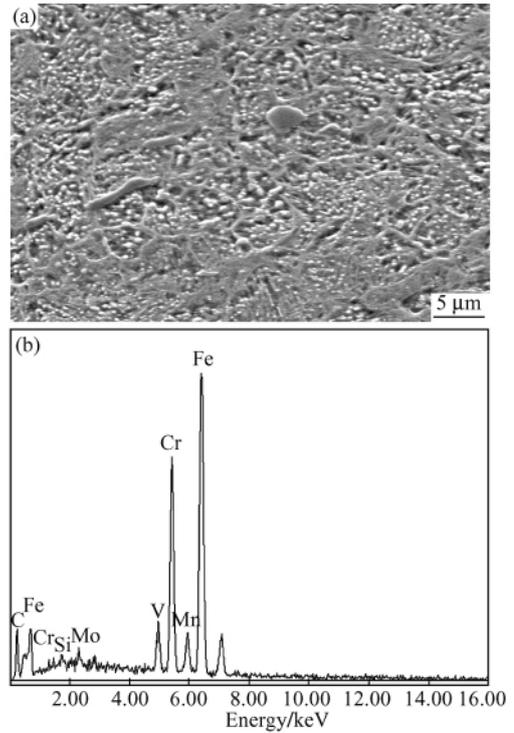


图 5 SDC55 在  $930 \text{ }^\circ\text{C}$  淬火  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  回火后的 SEM 以及能谱  
Fig. 5 SEM micrograph and EDS spectrum of SDC55 steel after quenching at  $930 \text{ }^\circ\text{C}$  and tempering at  $180 \text{ }^\circ\text{C}$

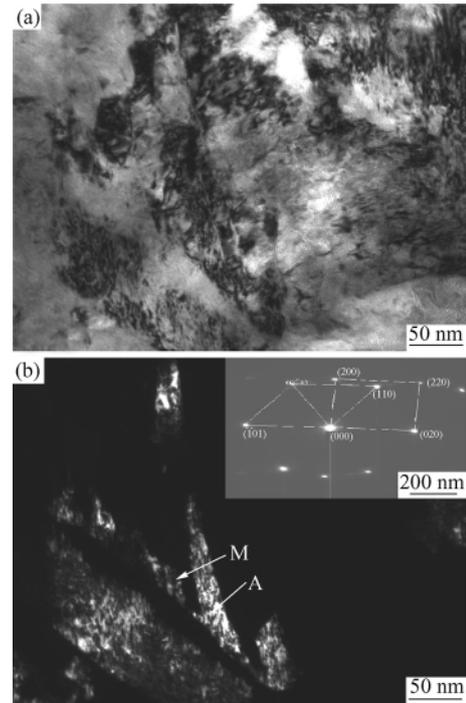


图 6 SDC55 在  $930 \text{ }^\circ\text{C}$  淬火  $180 \text{ }^\circ\text{C}$  回火后的 TEM  
Fig. 6 TEM images of SDC55 steel after quenching at  $930 \text{ }^\circ\text{C}$  and tempering at  $180 \text{ }^\circ\text{C}$   
(a) bright field; (b) dark field

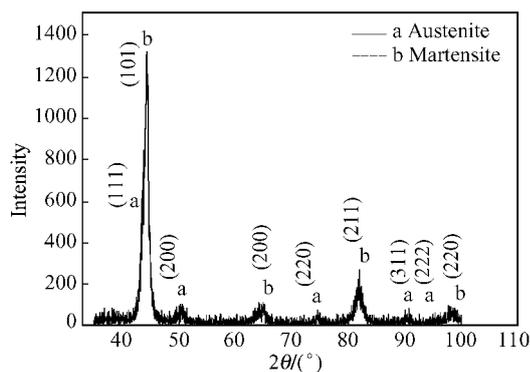


图7 SDC55钢经过930℃淬火180℃回火后的残留奥氏体XRD曲线

Fig. 7 XRD spectrum of SDC55 steel after quenching at 930 °C and tempering at 180 °C

够有效提高材料的韧性和塑性,适量的残留奥氏体的能够使材料有最佳的强韧性配合<sup>[6-8]</sup>。马氏体板条间的残留奥氏体薄膜可阻止裂纹扩展,残留奥氏体是软相,可以松弛应力。同时残留奥氏体也可以通过应力诱发马氏体相变吸收能量从而改善韧性<sup>[9]</sup>。

## 4 结论

1) SDC55钢具有较宽的热处理温度范围,淬火温度850~950℃、回火温度160~200℃。经过淬火回火后其冲韧性在120J以上,硬度在61HRC以上。SDC55在930℃淬火180℃回火后与D2钢1030℃淬火200℃(D2钢推荐热处理工艺)回火后两者比较,硬度相当,SDC55的韧性约为D2钢的4倍;

2) SDC55钢淬火回火的组织为马氏体周围包裹着残留奥氏体,并且基体上均匀地分布着弥散细小的碳化物颗粒。

## 参 考 文 献

- [1] 晁拥军. 工模具材料强化处理应用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2008.
- [2] 马永庆,齐育红,张占平,等. 多类型超细碳化物冷作模具钢DM9[J]. 材料热处理学报,2003,24(3):50-53.  
MA Yong-qing, QI Yu-hong, ZHANG Zhan-pin, et al. Study on heat treatment process of a cold-working die steel DM9 with multiple types of ultra fine carbides [J]. Transactions of Materials Heat Treatment, 2003, 24(3): 50-53.
- [3] Young, Bhadeshia. The strength of mixtures of bainite and martensite [J]. Materials Science Technology, 1994, 10(3):209-214.
- [4] Horn R M, Robert O Ritchie. Mechanisms of tempered martensite embrittlement in low alloy steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1978, 9(8):1039-1053.
- [5] 黄光辉,曹念荪,孙培祯,等. Ni和Si在超高强韧低合金冷作模具钢(GD钢)中的作用[J]. 材料研究学报,1994,8(2):134-141.  
HUANG Guang-hui, CAO Nian-sun, SUN Pei-zhen, et al. Effects of Ni and Si in a high-strength high-toughness low alloy cold-working die steel (GD Steel) [J]. Chinese Journal of Materials Research, 1994, 8(2): 134-141.
- [6] 文翠娥,孙培祯,谢长生,等. 残余奥氏体对GD钢等温处理强韧性的影响[J]. 热加工工艺,1992,(03):16-18.  
WEN Cui-e, SUN Pei-zhen, XIE Chang-sheng. The effect of retained austenite on the strength and toughness of GD Steel after Isothermal Treatment [J]. Hot Working Technology, 1992, (03): 16-18.
- [7] Lai G Y, Wood W E, Clark R A, et al. The effect of austenitizing temperature on the microstructure and mechanical properties of as-quenched 4340 steel [J]. Metall Trans, 1974, 7(5):1663-1670.
- [8] Karl-Heinz Schwalbe. On the influence of microstructure on crack propagation mechanisms and fracture toughness of metallic materials [J]. Eng Fract Mech, 1977, 4(9):795-832.
- [9] 孙佰文,杨玉贵. Cr12MoV模具钢深冷工艺研究[J]. 模具工业,1991,(8):51-54.  
SUN Bai-wen, YANG Yu-gui. The study of cryogenic technology of the cold die steel Cr12MoV [J]. Die & Mould Industry, 1991, (8): 51-54.