

# 35CrMo钢强韧化工艺研究

曾刚,李惠,谢春生

(江苏科技大学材料科学与工程学院,江苏镇江 212003)

**摘要:**研究了35CrMo钢经不同工艺热处理后的组织和力学性能。结果表明,与经常规调质处理的35CrMo钢相比较,经790℃亚温淬火+高温回火或常规调质处理后再经790℃亚温淬火+高温回火的35CrMo钢具有更好的强韧性,特别是后者,其抗拉强度、屈服强度、断后伸长率、断面收缩率和冲击韧度分别达到了986 MPa、923 MPa、18%、41%和156 J/cm<sup>2</sup>。钢的塑性和韧性的提高是由于组织均匀细小、具有少量游离铁素体存在所致。

**关键词:**35CrMo钢;调质;亚温淬火;强韧性

**中图分类号:** TG142.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1008-1690(2010)01-0058-005

## Strengthening and Toughening for 35CrMo Steel

ZENG Gang, LI Hui, XIE Chun-sheng

(School of Materials Science and Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, Jiangsu)

**Abstract:** Microstructures and properties of 35CrMo steel which was heat treated by various processes were investigated. The results show that compared with 35CrMo steel subjected to conventional quenching and tempering treatments, 35CrMo steel quenched from intercritical temperature of 790℃ and high temperature tempered or first quenched and tempered by conventional process and then quenched from intercritical temperature of 790℃ and high temperature tempered can all achieve higher strength and higher toughness. In particular, for the latter, tensile strength, yield strength, elongation, percentage reduction in area and impact toughness are as high as 986 MPa, 923 MPa, 18%, 41% and 156 J/cm<sup>2</sup> respectively. Such an improvement on ductility and toughness arises from the fine-uniform microstructure and a spot of free ferrite present in the steel.

**Key words:** 35CrMo steel; quenching and tempering; quenching from intercritical temperature; strength and toughness

中碳合金结构钢广泛用于制造许多要求具有良好强韧性的重要机械零部件。金属材料的强度和塑性、韧性往往是一对矛盾,存在此消彼涨的关系,普通的热处理方法常常较明显地提高了材料的强度,但却降低了塑性、韧性。多年来,许多学者、热处理工作者一直致力于研究金属材料的强韧性问题,力求在提高材料强度的同时,改善和提高其塑性、韧性,挖掘现有材料的利用潜力,做到节能降耗、可持续发展。亚温淬火因其加热温度是在奥氏体与铁素体之间的双相区,比普通热处理温度低40~80℃,具有降低能耗、提高产品韧性、减少畸变与开裂倾向等优点,尤其在低、中碳钢以及低、中碳合金钢等材

料中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。本文选择较常用的35CrMo钢作为试验材料,比较系统地研究了该钢常规调质处理、亚温淬火+回火及调质后亚温淬火+回火等不同热处理工艺与组织和性能之间的关系,研究与探讨了35CrMo钢强韧化的热处理工艺参数,给实际生产以指导。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验材料为直径约22 mm、长约200 mm的35CrMo钢圆棒,其化学成分如表1所示。35CrMo钢的临界点Ac<sub>1</sub>和Ac<sub>3</sub>分别为755℃和800℃。

收稿日期:2009-07-20

作者简介:曾刚(1984-),男,江苏泗阳人,硕士生,研究方向为特种金属材料。联系电话:13861356722,

E-mail: zggandy@163.com

表 1 试验用 35C Mo 钢的化学成分 (质量分数, %)

Table 1 Chemical composition of 35C Mo steel for test (wt%)

C	S	Mn	P	Cr	Mo	Si
0.35	0.017	0.43	0.11	0.86	0.15	0.2

1.2 热处理工艺

对所有试样进行退火处理,以获得平衡态组织,退火工艺曲线图如图 1 所示。然后把退火后试样分成 3 组,一组为常规淬火,其工艺曲线图如图 2 所示;二组为直接亚温淬火,其工艺曲线图如图 3 所示;三组为调质处理加亚温淬火,其工艺曲线图如图 4 所示。在亚温淬火前需要一次调质处理 (即预处理),是因为钢的亚温淬火对原始组织有一定的要求。在亚温淬火后必需保证有一定取向的细小针状铁素体析出时,亚温淬火才有效,才能提高冲击韧度<sup>[2]</sup>。

1.3 力学性能试验

(1) 硬度试验 把经常规调质处理、亚温淬火

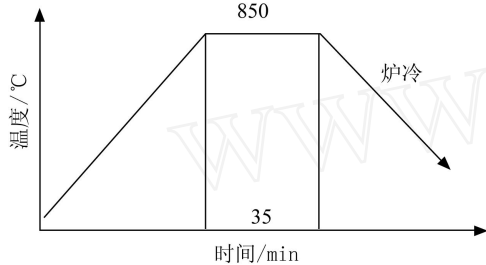


图 1 35C Mo 钢退火工艺

Fig 1 Annealing process for 35C Mo steel

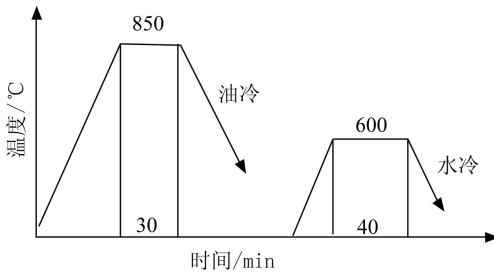


图 2 35C Mo 钢常规调质工艺

Fig 2 Conventional quenching and tempering processes for 35C Mo steel

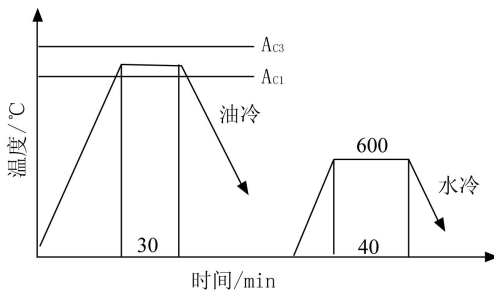


图 3 35C Mo 钢亚温淬火处理工艺

Fig 3 Quenching from intercritical temperature and tempering for 35C Mo steel

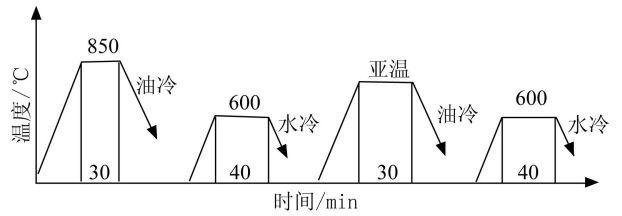


图 4 35C Mo 钢常规调质加亚温淬火调质处理工艺

Fig 4 Quenching from conventional temperature and tempering processes, follow by quenching from intercritical temperature and tempering processes for 35C Mo steel

加高温回火处理及调质处理加亚温淬火加高温回火处理后的试样,按 GB/T 230.1-2004《金属洛氏硬度试验 第 1 部分:试验方法 (A、B、C、D、E、F、G、H、K、N、T 标尺)》用数显洛氏硬度计 (HRS-150) 测试硬度。

(2) 拉伸试验 经热处理后的棒材按 GB/T 228-2002《金属材料室温拉伸试验方法》加工成标准拉伸试样,室温下在 CMT5205 微机控制电子万能试验机上进行拉伸试验。

(3) 冲击试验 把经热处理后的 35C Mo 钢按 GB/T 229-2007《金属材料夏比摆锤冲击试验方法》加工成 10 mm × 10 mm × 55 mm 标准冲击试样,在 JBD-30 型冲击试验机上进行常温冲击试验。

2 试验结果

2.1 力学性能

35C Mo 钢经不同工艺热处理后的硬度如表 2 所示。35C Mo 钢的 Ac1 为 755 °C, Ac3 为 800 °C<sup>[3]</sup>, 760 °C 与 790 °C 在 Ac1 与 Ac3 之间,属于亚温淬火。从表 2 中可以看出,从 760 °C 亚温淬火加高温回火和调质后亚温淬火加高温回火的硬度值略低于常规调质处理的硬度,而从 790 °C 亚温淬火加高温回火和调质后亚温淬火加高温回火的硬度均高于常规调质处理后的硬度,硬度值达 31 HRC 以上。

表 2 经不同工艺热处理后 35C Mo 钢的硬度

Table 2 Hardnesses of 35C Mo steel after being heat treated by varying processes

热处理工艺	硬度 /HRC
850 淬火 + 600 回火	30
760 淬火 + 600 回火	28
790 淬火 + 600 回火	31
850 淬火 + 600 回火 + 760 淬火 + 600 回火	29
850 淬火 + 600 回火 + 790 淬火 + 600 回火	32

选择硬度值较高的 790 °C 作为从 850 °C 淬火、高温回火后的亚温淬火的温度。将经调质处理、790

亚温淬火加高温回火和调质处理后再 790 亚温淬火加高温回火后的试样,进行拉伸和冲击试验,结果如表 3 所示。

表 3 经不同方法热处理的 35C Mo 钢的力学性能

Table 3 Mechanical properties of 35C Mo steel after being heat treated by different methods

热处理工艺	$R_m$ /MPa	$R_p$ /MPa	A (%)	Z (%)	$k$ /J·cm <sup>-2</sup>
常规热处理	940	835	16	30	106
亚温热处理	980	913	18	40	147
调质处理加亚温处理	986	923	18	41	156

表 3 数据表明,与常规调质处理相比,35C Mo 钢经亚温淬火加高温回火处理和调质处理后亚温淬火加高温回火处理后的力学性能均有不同程度的提高,其中调质处理亚温淬火加高温回火处理后的抗拉强度达到 986 MPa,屈服强度达到 923 MPa,室温冲击韧度比常规热处理的高 50 J/cm<sup>2</sup>。

## 2.2 显微组织

将经各种工艺热处理后的试样制成  $\phi 22$  mm  $\times$  12 mm 金相试样,经 3% ~ 5% 硝酸酒精溶液腐蚀后在金相显微镜下观察。35C Mo 钢淬火前为退火态,其显微组织由铁素体 + 珠光体组成,见图 5。

35C Mo 钢不同热处理状态的显微组织如图 6 所示。从图中可以看出,从 850 常规淬火后获得针状 + 板条状马氏体混合组织,图 6 (b) 和图 6 (c) 所示的 760 和 790 亚温淬火后的显微组织为针

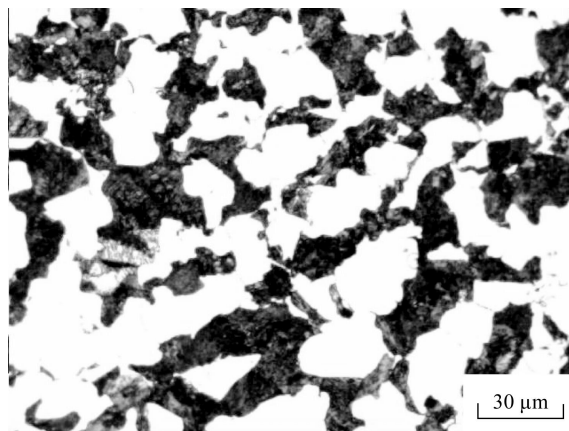


图 5 退火态组织

Fig 5 As-annealed microstructure

状和板条状马氏体 + 铁素体,比较图 6 中的前三幅显微组织图片,图 6 (a) 中的马氏体板条比图 6 (b) 和图 6 (c) 中的马氏体板条粗大,图 6 (a) 中板条马氏体组织不是很均匀,出现很宽的板条。图 6 (b) 和图 6 (c) 中马氏体的晶界上分布着白色小块状铁素体,图 6 (b) 中铁素体比图 6 (c) 中的铁素体的块状大且多。图 6 (d) 和图 6 (e) 分别为经 850 淬火 + 600 回火调质处理后再从 760 和 790 亚温淬火后获得的显微组织,均为马氏体 + 铁素体 + 弥散分布的细小残留奥氏体,观察显微组织,可以看出图 6 (d) 和图 6 (e) 中的马氏体和铁素体明显细化,并分布均匀,且图 6 (e) 中的铁素体比图 6 (d) 中的更细小,呈细针状。

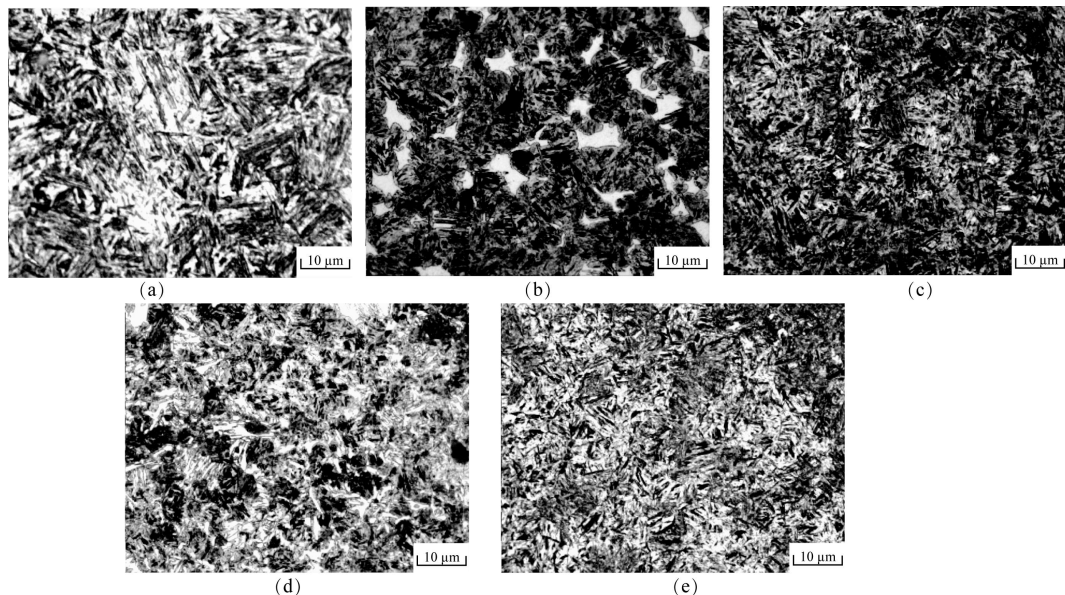


图 6 35C Mo 钢不同热处理状态的显微组织

(a) 850 淬火; (b) 760 淬火; (c) 790 淬火; (d) 850 淬火 + 600 回火 + 760 淬火;  
(e) 850 淬火 + 600 回火 + 790 淬火

Fig 6 Microstructures of 35C Mo steel under different heat treating conditions

(a) 850 quench; (b) 760 quench; (c) 790 quench; (d) 850 quench + 600 temper, followed by 760 quench;  
(e) 850 quench + 600 temper, followed by 790 quench

35CrMo钢分别从 850 、760 、790 淬火、850 淬火调质处理 +760 淬火、850 淬火调质处理 +790 淬火后,再经 600 高温回火,获得的显微组织如图 7所示。在回火组织中,马氏体分解,析出细小颗粒状第二相,并呈弥散分布。图 7(a)为

回火索氏体组织,(b)和(c)均为回火索氏体 +铁素体,(d)和(e)为回火索氏体 +铁素体 +弥散分布的细小残留奥氏体。图 7(b)和(d)的铁素体量明显多于图 7(c)和(e),且前者多为大块状,后者分布均匀细小。

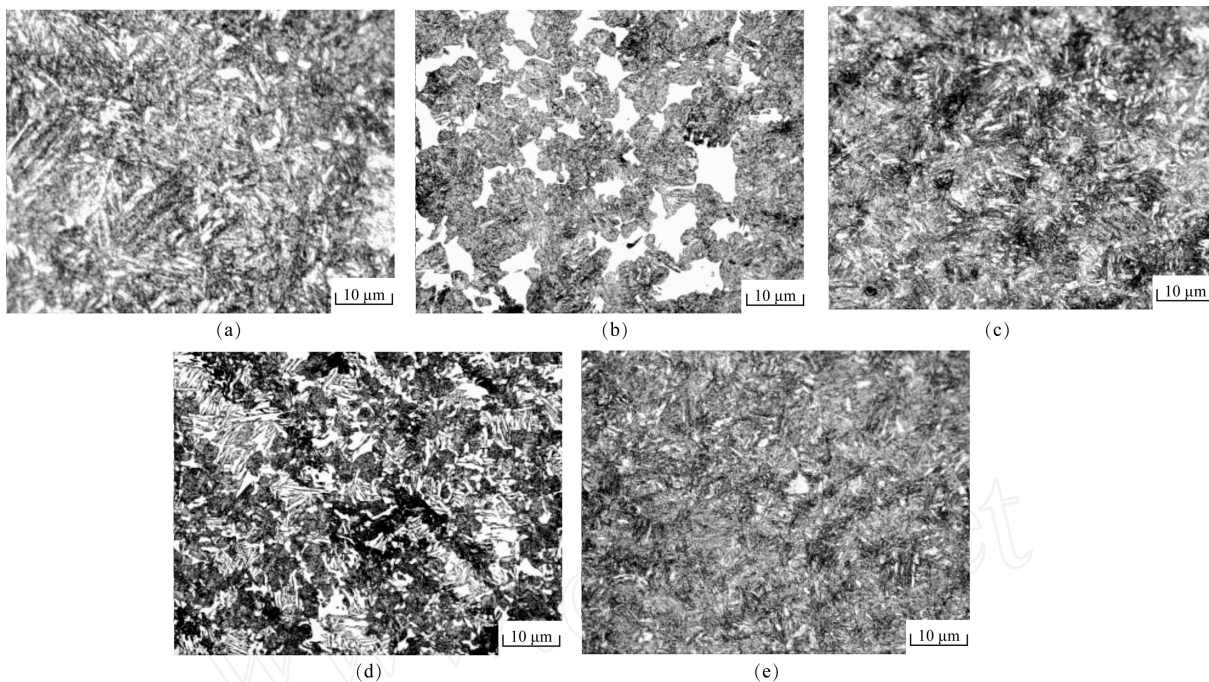


图 7 35CrMo钢调质态显微组织

(a) 850 淬火 +600 回火; (b) 760 淬火 +600 回火; (c) 790 淬火 +600 回火;  
(d) 850 淬火 +600 回火 +760 淬火 +600 回火; (e) 850 淬火 +600 回火 +790 淬火 +600 回火

Fig 7 Microstructures of 35CrMo steel after quenching and high temperature tempering

(a) 850 quench +600 temper; (b) 760 quench +600 temper; (c) 790 quench +600 temper;  
(d) 850 quench +600 temper, followed by 760 quench +600 temper;  
(e) 850 quench +600 temper, followed by 790 quench +600 temper

### 3 分析与讨论

从以上试验结果可以看出,亚温淬火、调质处理加亚温淬火与常规调质热处理比较,35CrMo钢的强韧性均有显著提高。经分析,原因如下:

(1) 35CrMo钢的两种亚温淬火工艺都是从低温加热进入临界区,故原铁素体(韧性相)尚未完全溶解,而尚未溶解的铁素体细小且均匀分布,这对35CrMo钢韧性的提高有良好的作用。35CrMo钢调质处理加亚温处理后的显微组织为回火索氏体 +少量游离铁素体 +弥散分布的残留奥氏体。由于残留奥氏体的存在使裂纹的扩展变得困难(因受塑性变形或产生部分马氏体转变而使应力松弛),使钢的脆性降低,韧脆转变温度下降了近 20 [4]。另外,裂纹也会在铁素体处受到阻碍而延缓发展。当然,铁素体的这种作用与其数量、形态、大小和分布有关,文献[5]认为组织中存在为 5% ~ 9%的弥散未

溶铁素体为最好。

(2) 不同原始组织钢加热到两相区同一温度时,所形成的奥氏体量可以认为基本相同。而经调质处理后的回火索氏体,再经亚温淬火后的性能明显优于原始组织为退火态直接亚温热处理后的性能。这种性能的差异主要与所形成的马氏体和铁素体的形态、分布等有关。原始组织为回火索氏体的钢,亚温淬火后,马氏体在铁素体条间形成并同向长大,即形成马氏体 +铁素体条状组织。这种组织类似“纤维增强复合材料”[6],即韧性相条状铁素体包围了强化相纤维状马氏体,这种组织形态对钢的强度提高起了有益的作用。此外,由于条状铁素体中的位错密度明显高于块状铁素体[7],因此,它对提高亚温淬火钢的强度也有一定的贡献。而退火态原始组织钢经亚温淬火后则形成块状铁素体,这种块

(下转第 66 页)

热占总热损失的较大比例,因此降低炉外壁温度,减少能源损耗,是工业炉的重要节能措施之一。近年来,设备制造厂为此采取了很多改进措施,如采用优质保温绝热材料,改进炉子结构,增加密封性能等,炉子外壁的温升明显降低。但目前正在使用的不少工业炉,由于役龄长,密封性能差,炉衬结构不合理,保温材料质量差等诸多因素,运行中的炉外壁温度达到甚至超过 100℃,热损失严重。若要对这些工业炉进行全面改造,投资大,周期长,难以实现。而在炉外壁安装保温盒,具有增加热阻,减少对流热损失和辐射热损失的功能,不仅投资省,而且方法简便,见效快,是一种行之有效的节能措施,值得重视。上

海交通大学的“保温盒”专利技术,已在实施中取得了明显的效果,是工业加热炉的一种新型节能技术,如推广应用,将能获得可观的节能效果和经济效益。

## 参考文献

- [1] 赵钰,胡江,等. 工业炉节能技术探讨[J]. 科技情报开发与经济, 2002, 12(3): 8-12
- [2] 潘健生,徐兴宝,顾剑锋,等. 在炉外壳安装保温盒以减少工业炉外壳热损失的方法[P]. 中国专利: 2006100293696. 8
- [3] 《热处理设备及设计》编写组. 热处理设备及设计[M]. 济南: 山东人民出版社, 1977: 33-34.
- [4] 《热处理手册》编委会. 热处理手册第3卷第4版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 859.

(上接第 61 页)

状铁素体也较易成为裂纹扩展通道,再加上块状铁素体中的位错密度低于条状铁素体中的位错密度,所以,直接亚温淬火后钢的强度明显低于经调质处理加亚温淬火的钢。

(3)冲击韧度的提高以调质处理加亚温淬火后再较高温度回火的效果最好,也就是说低温回火不能发挥亚温淬火复相组织的强韧化效果。这是由于马氏体与铁素体的强度相差较大时,复相组织中各相的强度相差不大,微裂纹主要起源于相界面,断裂主要呈韧性断裂<sup>[8]</sup>。因此,亚温淬火后进行高温回火更好些。

(4)试验中发现,35CrMo 钢亚温淬火和调质处理加亚温淬火后的硬度没有降低甚至比常规淬火的略高。这是因为,铁素体的存在不会使钢的硬度下降,一方面是由于铁素体因相硬化而增加其硬度;另一方面对马氏体而言,铁素体的存在虽使马氏体不产生自身相硬化,但由于马氏体的含碳量高于钢的平均含碳量而使其硬度高于常规淬火硬度<sup>[5]</sup>。

## 4 结论

(1) 35CrMo 钢经常规淬火后获得马氏体组织,其硬度较高,高温回火后其室温冲击韧度为 106 J/cm<sup>2</sup>,屈服强度为 835 MPa,抗拉强度为 940 MPa,断后伸长率为 16%,断面收缩率为 30%。

(2) 35CrMo 钢经 790℃ 直接亚温热处理后,硬度与常规调质处理的相比略高,其屈服强度达到 913 MPa,抗拉强度为 980 MPa,断后伸长率为 18%,断面收缩率达到 40%,室温冲击韧度提高显著,  $k_{IC}$  可达到 147 J/cm<sup>2</sup>。

(3) 35CrMo 钢经过调质处理加 790℃ 亚温热处理后,硬度均略高于经常规调质处理和直接亚温处

理的,其屈服强度达到 923 MPa,抗拉强度为 986 MPa,断后伸长率为 18%,断面收缩率达到 41%,室温冲击韧度提高尤为显著,  $k_{IC}$  可达到 156 J/cm<sup>2</sup>。

(4)亚温淬火强韧化效果与两相区加热温度有关,随着两相区加热温度的降低,马氏体的体积百分数下降,强度和硬度逐渐下降,塑性逐渐提高。35CrMo 钢经 850℃ 淬火 + 600℃ 回火 + 790℃ 淬火 + 600℃ 回火工艺处理后,得到铁素体 + 马氏体 + 弥散分布的残留奥氏体,综合性能最佳。

(5)亚温淬火后的强度不仅取决于强化相马氏体的含量,而且取决于韧性相铁素体的形态和分布。实际生产中,由于调质处理加亚温处理工艺复杂,能耗较大,在性能满足要求的情况下,直接亚温处理,既可以提高生产效率,又降低能耗。

## 参考文献

- [1] 万秀颖,田峰,宁欣,等. 亚温淬火在实际生产中的实验研究[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(2): 124-125.
- [2] 汪国栋. 40Cr 钢亚温淬火强韧化机理的试验研究[J]. 龙岩师专学报, 2004, 22(3): 43-44.
- [3] 朱广奎. 35CrMo 钢调制处理工艺的改进[J]. 辽宁科技大学学报, 2008, 31(2): 129-131.
- [4] 雷廷权,等. 热处理工艺方法 300 种[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [5] 高金华,冯俊杰,杨国正. 27SiMn 钢亚温淬火工艺试验研究[J]. 矿山机械, 2004, 12: 29-30.
- [6] 肖纪美. 金属的韧性与韧化[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.
- [7] 董玉顺. 马氏体加铁素体纤维状双相组织形成机理[J]. 金属热处理学报, 1990, 11(2): 19-21.
- [8] 王传雅. 低碳钢亚温淬火[J]. 金属热处理, 1983, 8(6): 47-79.