

· 组织和性能 ·

## NM400 马氏体耐磨钢静态 CCT 曲线

陈鑫 徐光 姚籽杉 王俊 魏智睿

(武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点试验室, 武汉 430081)

**摘要** 用 Gleeble3500 热模拟试验机测定的连续冷却膨胀曲线, 得出 NM400 钢临界相变点  $Ac_1 = 719.4\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $Ac_3 = 847.8\text{ }^\circ\text{C}$ , 结合金相法, 利用 Origin 软件绘制了试验钢的过冷奥氏体连续冷却转变 (CCT) 曲线。结果表明, 随着冷却速度增大, 钢的显微硬度逐渐增大, 显微组织逐渐由铁素体和珠光体过渡为贝氏体和马氏体, 铁素体量逐渐减少; 冷速小于  $1\text{ }^\circ\text{C/s}$  珠光体含量逐渐增多, 尺寸逐渐减小; 冷速大于  $5\text{ }^\circ\text{C/s}$ , 铁素体和珠光体逐渐消失, 贝氏体相变量随冷速增加而减少, 马氏体相变量逐渐增多。

**关键词** NM400 耐磨钢 CCT 曲线 热膨胀法 相变点 组织

## Static CCT Curve of Martensite Wear-Resistant Steel NM400

Chen Xin, Xu Guang, Yao Zishan, Wang Jun and Wei Zhirui

(State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract** By Gleeble3500 thermomechanical simulator to determine the dilation curves at continuous cooling conditions, the critical transformation points of steel NM400 are  $Ac_1 = 719.4\text{ }^\circ\text{C}$  and  $Ac_3 = 847.8\text{ }^\circ\text{C}$ , and combined with the metallographic method, the continuous cooling transformation (CCT) curves of super cooling austenite of tested steel are plotted using Origin software. The results show that with the increase of cooling rate, the microhardness of steel increases gradually, and the phase transformation gradually changes from ferrite and pearlite to bainite and martensite, and the ferrite content decreases gradually; when the cooling rate is less than  $1\text{ }^\circ\text{C/s}$ , the pearlite content increases gradually, and the grain size gradually decreases; when the cooling rate is greater than  $5\text{ }^\circ\text{C/s}$ , the ferrite and pearlite phase transition disappears, and with the increase of the cooling rate the bainite phase decreases and martensitic phase is gradually increasing.

**Material Index** Wear-Resistant Steel NM400, CCT Curve, Thermal Expansion Method, Phase Transition Point, Microstructure

CCT (Continuous Cooling Transformation) 曲线即过冷奥氏体连续冷却转变曲线, 是研究与分析钢铁材料固态相变理论的基础。开发新钢种时, 测定和研究 CCT 曲线是一项重要的基础工作<sup>[1-4]</sup>。

耐磨钢广泛应用于冶金、矿山、机械和铁路等领域。低合金高强度耐磨钢具有硬度高 (HB 不低于 360)、焊接性能好等特点, 具有良好的加工性能和耐磨性能, 使用寿命是传统结构钢板的数倍。此外, 耐磨钢生产工艺简单, 一般采用轧后淬火加回火获得回火马氏体组织, 或者通过控轧控冷工艺进行强化<sup>[5-9]</sup>。陈永南等<sup>[10]</sup>研究了 NM400 耐磨钢奥氏体化后连续冷却转变规律, 在高温转变区相变产物主要是先共析铁素体; 中温转变区相变产物主要为贝氏体; 低温转变区相变产物主要为马氏体 (含少量残余奥氏体)。随着冷却速度的增加, 组织会变得细小。宋红宇等<sup>[11]</sup>研究了微铌 Cr-B 系耐磨钢连续

冷却条件下的转变产物, 冷却速度为  $0.5 \sim 5\text{ }^\circ\text{C/s}$  时, 转变产物为先共析铁素体 + 珠光体 + 贝氏体; 冷却速度为  $5 \sim 20\text{ }^\circ\text{C/s}$  时, 转变产物为贝氏体 + 马氏体; 冷却速度大于  $20\text{ }^\circ\text{C/s}$  时, 转变产物为板条马氏体。此外, 郭秀斌等<sup>[12]</sup>研究了 NM550 耐磨钢的组织性能, 试验钢具有良好的淬硬性, 在冷速大于  $10\text{ }^\circ\text{C/s}$  时即可得到全马氏体组织, 维氏 HV 硬度值在 550 以上。

国内钢铁公司开发直接淬火型 NM400 马氏体耐磨钢 (DQ 型耐磨钢), 本文以开发钢种为研究对象, 通过热模拟试验和金相试验测定并分析以不同冷却速度连续冷却过程中的膨胀曲线和显微组织, 研究和绘制了所开发钢种的静态 CCT 曲线。

### 1 试验材料与方法

试验材料为中厚板厂开发试制的 DQ 型 NM400 级别的马氏体耐磨钢, 具体化学成分如表 1 所示。

通讯作者: 徐光, 二级教授, 博士生导师, 武汉科技大学省部共建耐火材料与冶金国家重点试验室, 武汉 430081 E-mail: xuguang@wust.edu.cn.

试验钢现场冶炼、连铸成板坯,然后送入加热炉加热,1 220 ℃ 出炉,在 1 100 ~ 1 000 ℃ 完成 5 道次粗轧,在 940 ~ 850 ℃ 完成 7 道次精轧,板坯厚度由 200 mm 轧制至 25 mm。

轧制完成后,850 ℃ 入水直接淬火,淬火终冷温度为 150 ℃。用轧制后的钢板加工静态 CCT 试样,尺寸为直径 6 mm、长度为 70 mm 的圆柱形试样,在 Gleeble 3500 热模拟试验机上进行静态 CCT 试验。

将试样进行编号(表 2),以 10 ℃/s 加热速度加热至 1 000 ℃,保温 600 s 后,分别以 0.1、0.2、0.5、1、5、10、20、50 ℃/s 的冷却速度冷却至室温。

将试验后的试样从高度中间切开,经过镶嵌、研磨、抛光以及 4% 硝酸酒精溶液腐蚀处理后,采用 Zeiss 金相显微镜观察组织。光学显微镜观察试样显微组织后,对已进行了研磨、抛光并在 4% 硝酸酒精溶液中浸蚀的金相试样,采用显微硬度计分别对不同冷却速度试样进行硬度测试,每个不同冷速下的试样取 4 处不同硬度值,然后取平均值。根据试验过程中测定的热膨胀量以及温度随时间变化的曲线,结合金相显微组织,采用切线法,确定试验钢的相变点(包括相变温度和时间),用 Origin 软件绘制试验钢种的 CCT 曲线。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 理论计算试验钢种 CCT、TTT 及相关参数

试验钢的连续冷却转变(CCT)曲线和时间-温度转变(TTT)曲线,如图 1(a,b)所示。

计算得到试验钢种的相变临界点  $Ac_1$ 、 $Ac_3$ 、铁素体开始相变点( $F_s$ )、珠光体开始相变点( $P_s$ )、贝氏体转变点( $B_s$ )和马氏体转变点( $M_s$ )如表 3 所示。

### 2.2 金相组织与显微硬度

静态 CCT 热模拟试验后的组织观察见图 2。由图 2(a)可以看出,0.1 ℃/s 冷却试样室温显微组织基本由白色块状铁素体和黑色絮状珠光体组成,其中珠光体均分布在铁素体晶界边缘,同时还能观察到极少量褐色条状贝氏体和小块状马氏体。由图 2(b)可以观察到,相对于 0.1 ℃/s 冷却试样,0.2 ℃/s 冷却试样中黑色絮状珠光体量明显增多,铁素体尺寸明显减小,同时观察到褐色条状贝氏体和小块状

表 1 试验 NM400 钢化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of tested NM400 steel / %

C	Si	Mn	Nb	Cr	Ni	Mo	B	Cu	Als	P	S
0.17	0.30	1.15	0.03	0.25	0.26	0.27	0.002 0	0.008	0.008	0.012	0.002 2

表 2 NM400 耐磨钢试样编号和冷却速度

Table 2 Sample number and cooling rate of tested wear-resistant steel NM400

试样号	冷却速度 / (℃ · s <sup>-1</sup> )
NJ-0.1	0.1
NJ-0.2	0.2
NJ-0.5	0.5
NJ-1	1
NJ-5	5
NJ-10	10
NJ-20	20
NJ-50	50

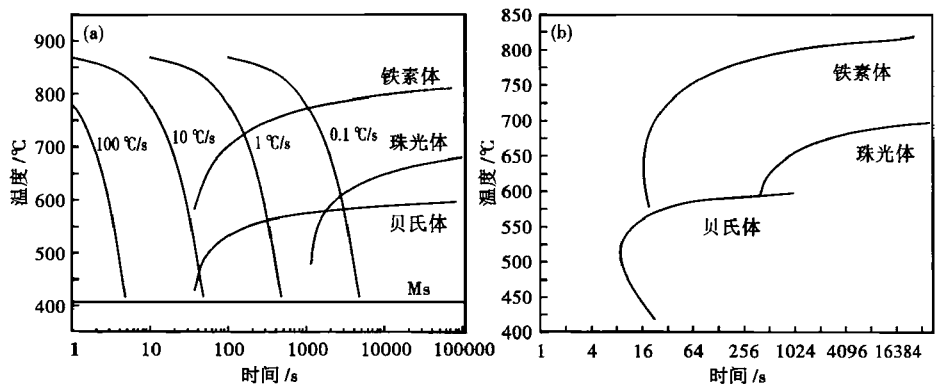


图 1 试验 NM400 钢 CCT(a) 和 TTT(b) 曲线

Fig. 1 Curves of CCT (a) and TTT (b) of tested steel NM400

表 3 理论计算试验钢 NM400 相变点 / ℃

Table 3 Theoretical calculated phase transformation points of tested steel NM400 / ℃

$Ac_1$	$Ac_3$	$F_s$	$P_s$	$B_s$	$M_s$
719.4	847.8	827.2	710.7	601.5	418.5

马氏体有所增加。图 2(c) 表明,当冷速上升到 0.5 ℃/s 时,试样铁素体和珠光体含量减少,贝氏体与马氏体含量相对增多。1 ℃/s 冷却试样显微组织中(图 2d),珠光体已基本消失,但仍能观察到少量的铁素体,贝氏体和马氏体量明显增多,其显微组织基本由贝氏体、马氏体和少量铁素体组成。当冷却速度达到 5 ℃/s(图 2e),试样显微组织中已观察不到明显的铁素体,组织由大量的板条状贝氏体和块状马氏体组成,说明试验钢种奥氏体化后冷却速度达到 5 ℃/s 即可避开高温铁素体相变区间。冷却速度继续增加到 10 ℃/s 时(图 2f),试样显微组织与 5 ℃/s 冷速试样显微组织基本类似,由板条状贝氏体和块状马氏体组成,但贝氏体含量相对减少,马氏体

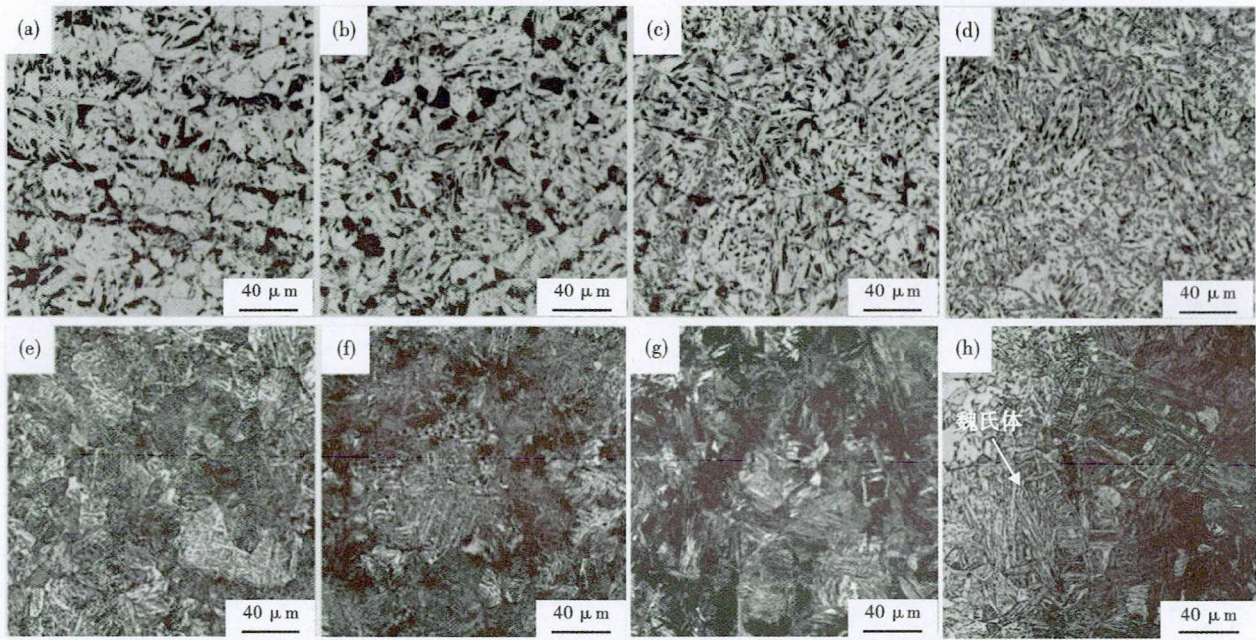


图2 NM400 试验钢不同冷却速度/( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (a)0.1; (b)0.2; (c)0.5; (d)1; (e)5; (f)10; (g)20; (h)50 的金相组织

Fig.2 Metallographic structure of tested steel NM400 with different cooling rate /( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ) (a) 0.1; (b) 0.2; (c) 0.5; (d) 1; (e) 5; (f) 10; (g) 20; (h) 50

表4 NM400 试验钢在不同冷却速度下 HV 显微硬度值  
Table 4 HV microhardness value under different cooling rate of tested steel NM400

冷速 / ( $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ )	试样测量区域				HV 平均值
	1	2	3	4	
0.1	205	210	216	190	205
0.2	220	218	221	216	219
0.5	231	238	232	248	237
1	244	242	268	259	253
5	261	272	314	285	283
10	344	336	319	356	339
20	392	421	400	402	404
50	410	418	413	410	413

含量增多。当冷却速度为 20  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, 试样显微组织中贝氏体含量继续减少, 主要由板条状马氏体组成 (图 2g), 50  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  冷速时试样基本由板条状马氏体组成 (图 2h)。

试样分别检测四处硬度值后取平均, 结果如表 4 所示。可以看出, 不同冷却速度条件下, 试验钢的硬度随着冷却速度的增加而增加。这是由于冷却速度较低时, 试样组织基本由铁素体和珠光体组成, 硬度值偏低。而当冷却速度增加时, 试验钢组织逐渐由贝氏体与马氏体所代替, 硬度值上升。当冷却速度达到 50  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, 试样组织中基本全部由板条马氏体组成, 此时硬度值最高。

### 2.3 膨胀量-温度曲线

在 Gleeble-3500 热模拟机上进行加热冷却试验, 利用 Origin8.0 绘制不同处理工艺下膨胀量随温

度变化曲线, 截取冷却过程中 900  $^{\circ}\text{C}$  以下曲线。通过测量冷却过程中膨胀量-温度曲线拐点, 结合 Jmat-Pro 软件计算结果和试验观察的实际组织, 得到不同冷却速度下的相变类型, 结果如表 5 所示。由表 5 可以看出, 各试样加热过程中  $\text{Ac}_1$  在 880  $^{\circ}\text{C}$  左右,  $\text{Ac}_3$  基本稳定在 750  $^{\circ}\text{C}$  左右, 均高于 Jmat-Pro 软件计算结果, 这是由于冷却速度不一样。

图 1(a) 中 0.1  $^{\circ}\text{C}/\text{s}$  冷速条件下, 冷却曲线经过

表5 实际测量的不同冷却条件下 NM400 钢相变温度点  
Table 5 Measured phase transition temperatures of steel NM400 at different cooling conditions

试样号	$\text{Ac}_1$	$\text{Ac}_3$	相变起始 温度/ $^{\circ}\text{C}$	相变结束 温度/ $^{\circ}\text{C}$	相变组织
NJ-0.1	739	877	816	788	铁素体 珠光体 贝氏体 马氏体
			773	720	
			633	565	
			416	303	
NJ-0.2	743	876	811	705	铁素体 + 珠光体 贝氏体 马氏体
			629	536	
			432	312	
NJ-0.5	755	886	808	715	铁素体 + 珠光体 贝氏体 马氏体
			628	523	
			407		
NJ-1	749	903	798	703	铁素体 贝氏体 + 马氏体
			623	463	
NJ-5	743	882	582	402	贝氏体 + 马氏体
NJ-10	742	884	558	378	贝氏体 + 马氏体
NJ-20	760	891	465	356	贝氏体 + 马氏体
NJ-50	742	874	671	628	魏氏组织 马氏体
			454	305	

F + P + B + M 四个相区,测定 0.1 °C/s 膨胀量曲线也出现 4 个拐点,其中第 1 个拐点区间为 788 ~ 816 °C,温度未达到珠光体相变区,故该温度区间发生铁素体相变;第 2 个拐点区间为 720 ~ 773 °C,该温度区间发生珠光体相变;第 3 个温度区间为 565 ~ 633 °C,该温度区间发生贝氏体相变;416 °C 时曲线出现第 4 个拐点区间,该温度以下发生马氏体相变。冷却速度为 0.2 °C/s 时,膨胀量曲线出现 3 个拐点,其中第 1 个拐点区间为 705 ~ 811 °C,温度位于铁素体和珠光体相变区,故该温度区间发生铁素体和珠光体相变;第 2 个拐点区间为 536 ~ 629 °C,该温度区间发生贝氏体相变;432 °C 时曲线出现第 3 个拐点区间,该温度以下发生马氏体相变。冷却速度为 0.5 °C/s 时,膨胀量曲线与 0.2 °C/s 时趋势一致,结果如表 5 所示。

图 1(a) 软件计算 CCT 结果显示,1 °C/s 和 5 °C/s 冷速条件下,冷却曲线经过 F + B + M 三个相区,测定 1 °C/s 膨胀量曲线在 703 ~ 798 °C 存在一拐点区间,故该区间应该发生铁素体相变,在 463 ~ 623 °C 存在一拐点区间,由于没达到马氏体转变温度,此区间内只发生贝氏体转变,在最后冷却过程中形成少量马氏体。然而,5 °C/s 膨胀量曲线未发现明显的铁素体相变区间,仅存在一个拐点区间 402 ~ 582 °C,该区间内发生贝氏体相变,冷却到室温的过程中形成少量的马氏体。根据图 1(a) 可以得知,10 °C/s 冷却速度已足够避开铁素体相变区,测定 10 °C/s 和 20 °C/s 膨胀量曲线拐点区间分别为 378 ~ 558 °C、356 ~ 469 °C,该区间内应该发生的是贝氏体 + 马氏体相变。冷却速度进一步增加到 50 °C/s 膨胀量曲线在 628 ~ 671 °C 出现明显拐点,该温度拐点是于魏氏组织引起的。

#### 2.4 静态 CCT 曲线

使用 Origin 绘制出不同冷却速度冷却曲线,如图 3 所示。图 3 中由于从膨胀量曲线上无法区分珠

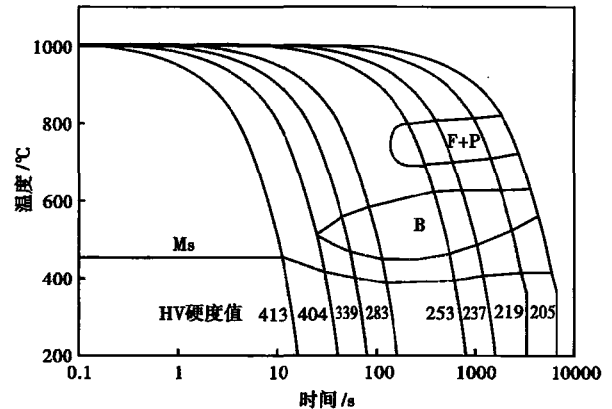


图 3 NM400 试验钢静态 CCT 曲线  
Fig. 3 Static CCT curves of tested steel NM400

光体和铁素体转变,因此把铁素体相变和珠光体转变合在一起(图 3 中符号 F + P 所标记区域)。此外,5 ~ 20 °C/s 冷却试样贝氏体和马氏体转变发生在膨胀量曲线上同一拐点区间无法区分,故将 1 °C/s 贝氏体相变结束点与 20 °C 贝氏体 + 马氏体相变开始点以直线连接(图 3 中符号 B 所标记区域)。不同冷却速度膨胀量曲线只有 0.1、0.2、0.5 °C/s 有明显的马氏体相变拐点,故将这三个点与计算的 Ms 点(418.5 °C)进行线性连接得到马氏体相变起始线(图 3 中 Ms 所示线段)。

#### 3 结论

(1) 随着冷却速度增大,NM400 钢相变类型逐渐由铁素体和珠光体相变转变为贝氏体和马氏体转变,铁素体量逐渐减少,试样显微硬度逐渐增大。

(2) 冷速小于 1 °C/s,NM400 钢珠光体含量逐渐增多,铁素体晶粒尺寸逐渐减小;冷速大于 5 °C/s 铁素体和珠光体相变消失,组织由贝氏体和马氏体组成,贝氏体相变量随冷速增加而减少,马氏体相变量逐渐增多。

湖北省重大专项课题 2017AAA116

#### 参考文献

- [1] Xu G, Wan L and Yu S F, et al. A New Method for Accurate Plotting Continuous Cooling Transformation Curves[J]. Materials Letters, 2008, 62(24): 3978-3980.
- [2] 廉晓洁, 成生伟, 周杰, 等. 20Cr1Mo1V 钢 CCT 曲线的测定与分析[J]. 热加工工艺, 2014, 43(20): 28-30, 33.
- [3] Zhou M X, Xu G and Yang H L, et al. Study on the Heat Treatment Process of Ultra Thick Plate of 12Cr2Mo1R Pressure Vessel Steel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 556-562: 476-479.
- [4] 赵宝纯, 李桂艳, 柳永浩, 等. 含 Mo 低碳微合金钢 CCT 曲线的测定和分析[J]. 材料热处理技术, 2008, 37(22): 37-39.
- [5] 王星贺, 杨漆心, 谢敬佩, 等. 低中合金耐磨钢的研究现状及发展趋势[J]. 热加工工艺, 2012, 41(10): 76-78, 81.
- [6] 唐春霞, 曹文全. 耐磨钢的国内生产现状及发展前景[J]. 宽厚板, 2018, 24(3): 37-39.
- [7] 刘军刚, 袁林, 王玮, 等. 耐磨钢生产研究现状与分析[J]. 山东冶金, 2011, 33(2): 7-9.
- [8] 李文斌, 费静, 曹忠孝, 等. 我国低合金高强度耐磨钢的生产现状及发展方向[J]. 机械工程材料, 2012, 36(2): 6-10.
- [9] 罗丽军. 国外高强度耐磨钢生产概述. 宽厚板, 14(3): 46-49.
- [10] 陈永南. NM400 耐磨钢连续冷却过程相变研究[J]. 山东冶金, 2017, 39(3): 34-35.
- [11] 宋红宇. 微铌 Cr-B 系高强低合金 NM400 耐磨钢的研究开发[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [12] 郭秀斌. NM550 级低合金高强度耐磨钢的组织性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.

陈鑫(1996-),男,武汉科技大学硕士研究生,金属材料组织和性能研究。E-mail:101558526@qq.com

收稿日期:2020-11-20