



## 20CrMnTiH 连续冷却相变预测模型

杨 婷, 段路昭, 刘 需, 白丽娟, 张云飞, 孙 力  
(河钢材料技术研究院, 石家庄 050000)

**摘 要:**采用 DIL805 型淬火变形膨胀仪测定了三种不同成分 20CrMnTiH 实验钢在不同冷却速度下的热膨胀曲线, 对室温显微组织进行观察, 并绘制连续冷却转变(CCT)曲线。实验结果表明:成分波动主要影响 20CrMnTiH 钢冷却转变过程中贝氏体与马氏体相变冷却区间, 对临界相变温度影响较小。采用 K-M 方程拟合了三种实验钢的马氏体相变动力学参数。结合优化的 Li 经验模型及临界转变温度的回归关系式, 建立了 20CrMnTiH 钢在连续冷却过程中的铁素体、珠光体与贝氏体的相变预测模型, 成功预测了成分波动对实验钢 CCT 曲线的影响。进而, 采用有限元分析方法建立了 20CrMnTiH 钢端淬仿真模型, 较好地预测成分波动对实验钢淬透性的影响, 此方法可为齿轮钢的成分优化设计与合理选材提供参考。

**关键词:**20CrMnTiH 钢; CCT 曲线; 相变动力学; 成分波动; 相变模型

**DOI:**10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00114 **中图分类号:**TG142

## Continuous Cooling Phase Transformation Prediction Model of 20CrMnTiH

Yang Ting, Duan Luzhao, Liu Xu, Bai Lijuan, Zhang Yunfei, Sun Li  
(HBIS Material Technology Research Institute, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** The thermal expansion curves of 20CrMnTiH test steel with three compositions at different cooling rates were measured by DIL805 type quench deformation expansion instrument, and the microstructures at room temperature were observed, the continuous cooling transition (CCT) curves were drawn. The test results show that the composition fluctuation mainly affects the cooling range of bainite and martensite phase transformation during the cooling transformation of 20CrMnTiH, and has little effect on the critical phase transformation temperature. The kinetic parameters of martensitic transformation of the three test steels were fitted by using K-M equation. Combined with the optimized Li empirical model and the regression equation of critical transition temperature, a prediction model of phase transformation prediction model of ferrite, pearlite and bainite during continuous cooling of 20CrMnTiH was established, the influence of composition fluctuation on CCT curve of the test steels were predicted successfully. Furthermore, the end-quenching simulation model of 20CrMnTiH steel was established by finite element analysis method, which can better predict the influence of composition fluctuation on the hardenability of the test steel. This method can provide reference for the composition optimization design and material selection of gear steel.

**Key Words:** 20CrMnTiH Steel; CCT Curves; Phase Transition Dynamics; Composition Fluctuation; Phase Transition Model

20CrMnTi 钢是一种具有优良性能的低合金结构钢, 经热处理后常用于制造传动齿轮、轴类等关键部件<sup>[1-2]</sup>。热处理作为齿轮产品制造的必要环节, 其组织性能调控及热处理工艺优化是提升产品综合性能的重要研究内容<sup>[3]</sup>。热处理工艺影响参数多、过程复杂, 数值模拟技术在组织性能预测等方面有着显著的优势。已有学者针对齿轮材料开展了一系列的热处理过程的数值模拟研究<sup>[4-6]</sup>。孙思源等<sup>[7]</sup>以 20CrMnTi 半轴齿轮为研究对象, 应用 Deform 有限元软件模拟了齿轮在渗碳淬火及深冷处理后的齿轮变形特征。乔靖乾等<sup>[8]</sup>绘制了 20CrMnTi 钢的 TTT 曲线, 并采用 JMAK 方程分别建

立了 20CrMnTi 钢的扩散型相变和非扩散型相变动力学模型。郑彬等<sup>[9]</sup>建立了 20CrMnTi 变速器齿轮的淬火有限元模型, 分析了淬火过程中温度场、应力场及热变形的情况。姜辉等<sup>[10]</sup>应用 Deform 有限元分析软件研究了薄壁齿轮在渗碳淬火过程的变形机制。张星等<sup>[11]</sup>建立了 20CrMnTiH 与 20CrMnTiL 齿轮钢的渗碳淬火模型, 分析成分波动对齿轮变形及淬火组织分布的影响。

齿轮热处理性能的预测精度与应用的材料相变参数的准确性密不可分。钢的等温转变(TTT)曲线与连续冷却转变(CCT)曲线能够表征材料在奥氏体冷却过程中的组织转变情况, 支撑用户制定合理

的热处理工艺<sup>[12]</sup>。同一系列钢种在生产制造过程中,关键元素的含量变化会对材料相变过程及性能产生较大的影响。对于 20CrMnTiH 材料而言,C、Mn 等元素的波动会造成产品淬透性显著差异,从而影响产品质量<sup>[13]</sup>。为建立 20CrMnTiH 材料淬火热处理过程的精确数值分析模型,需要特定化学成分及奥氏体化条件下的 TTT 或 CCT 曲线。然而应用传统试验方法,成本既高又费时,不能满足研究需求。因此,研究成分波动对材料连续相变动力学的影响并建立准确的相变预测模型十分必要。

## 1 实验材料及方法

选用某钢厂生产的  $\phi 70$  mm 的 3 种不同淬透性 20CrMnTiH 齿轮钢棒材作为研究对象,其生产工艺流程为 60 t 转炉→LF 精炼→VD 炉→连铸→轧制,具体成分见表 1。按照 GB/T 225—2006 方法,从棒材上取样加工末端淬火试样并测定实验钢的淬透性。应用 Tukon2500 Minuteman 显微维氏硬度计分析端淬截面硬度分布。采用金相法对端淬截面组织进行定量分析。

表 1 20CrMnTiH 钢的化学成分(质量分数)  
Table 1 Chemical composition of 20CrMnTiH steel %

编号	C	Si	Mn	Cr	Ti	P	S	Ceq
1 <sup>#</sup>	0.19	0.23	0.89	1.12	0.07	≤0.02	≤0.02	0.571
2 <sup>#</sup>	0.19	0.26	0.97	1.15	0.05	≤0.02	≤0.02	0.586
3 <sup>#</sup>	0.194	0.28	1.03	1.17	0.06	≤0.02	≤0.02	0.608

从圆棒上线切割切取  $\phi 4$  mm×10 mm 的圆柱试样,采用 DIL805 型淬火变形膨胀仪测定 3 种试验材料的奥氏体连续冷却转变曲线。试样以 10 °C/s 的速率升温至 920 °C,保温 10 min,冷却速度为 0.5 ~100 °C/s,测定各冷速下的膨胀曲线。对热膨胀测试后的试样金相镶嵌、打磨、抛光,应用

显微维氏硬度计测定试样的硬度值。采用 4% 的硝酸酒精溶液对其表面进行腐蚀,在光学显微镜下观察显微组织。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 相变温度与静态 CCT 曲线

采用切线法对三组 20CrMnTiH 实验钢的膨胀量-温度曲线进行处理,测得不同冷速下的相变温度,并结合金相法确定室温显微组织。测定的 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 三组实验钢的  $A_{C1}$ 、 $A_{C3}$ 、 $A_{r1}$ 、 $A_{r3}$  温度见表 2。综合 3 种钢在实验条件下的所有实验数据绘制的静态 CCT 曲线如图 1 所示。由图 1 可知,三组曲线的形状与趋势一致,成分波动对实验钢临界相变温度影响较小。冷却速度在 0.5~13 °C/s 时,铁素体与珠光体转变温度无显著差异,在 600~740 °C。400~600 °C 为贝氏体转变区,随着实验钢碳当量增加,贝氏体转变区右移,马氏体与贝氏体转变的临界冷却速度降低。当冷却速度高于 13 °C/s 时,250~410 °C 为马氏体主要转变区域,且随着冷却速度的增加,马氏体转变起始点  $M_s$  与转变终止点  $M_f$  有降低的趋势。相较而言,3<sup>#</sup> 实验钢具有较高的 C、Mn 合金元素含量,淬透性高,具有较低的马氏体转变温度及较大的转变冷却区间。

表 2 实验钢的临界相变温度

Table 2 The critical transformation temperature of experimental steel

实验钢	$A_{C1}$	$A_{C3}$	$A_{r1}$	$A_{r3}$
1 <sup>#</sup>	743	846	674	769
2 <sup>#</sup>	747	840	677	764
3 <sup>#</sup>	746	859	675	764

### 2.2 显微组织分析

3 组实验钢在不同冷速下的室温组织如图 2 所示。在冷速 <1.5 °C/s 时,均为先共析铁素体和珠光

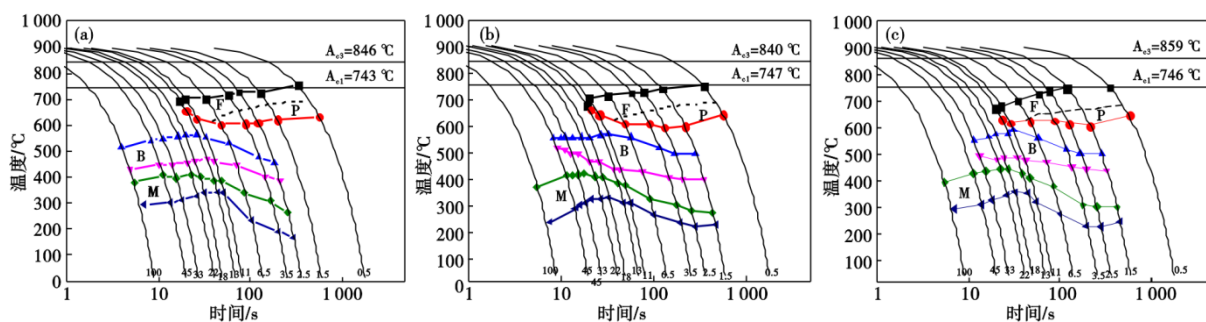


图 1 20CrMnTiH 实验钢的静态 CCT 曲线:(a)1<sup>#</sup>, (b)2<sup>#</sup>, (c)3<sup>#</sup>

Fig. 1 The static CCT curves of 20CrMnTiH experimental steel : (a) 1<sup>#</sup>, (b) 2<sup>#</sup>, (c) 3<sup>#</sup>

体。当冷速  $> 1.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , 2# 与 3# 实验钢开始出现少量的贝氏体组织。随着冷速的增加, 贝氏体含量增多, 珠光体与铁素体含量降低。在  $6.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$  的冷速下, 1# 实验钢的贝氏体与马氏体组织含量明显低于其它两组。冷速为  $45 \text{ } ^\circ\text{C/s}$  时, 1# 与 2# 实验钢的组织主要为马氏体组织, 仍存在少量贝氏体, 硬度在 400HV 以下; 3# 实验钢获得全部的马氏体组织, 硬度在 420HV 以上。

### 3 相变预测模型

#### 3.1 数学模型

连续冷却转变过程包括扩散型和非扩散型相变方式。王中钰首次提出了铁素体和珠光体的计算模型<sup>[14]</sup>, 之后 Sounders 等在此基础上提出了 TTT 曲线的一般描述形式<sup>[15]</sup>:

$$\tau(X, T) = \frac{F(C, Mn, Si, Ni, Cr, Mo, G)}{\Delta T^n \exp(-Q/RT)} S(X) \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为孕育期;  $S(X)$  为反应速率项;  $F$  为化学成分质量分数和晶粒尺寸  $G$  的函数;  $Q$  为扩散激活能;  $R$  为气体常数;  $\Delta T$  为过冷度, 过冷度的指数  $n$  为与扩散机制相关的经验常数, 铁素体、珠光体为 2, 贝氏体为 3。

Li 等<sup>[16]</sup>提出了针对低合金钢优化的  $S(X)$  以及  $F$  的表达式。该模型在 A668 钢、S34MnV 钢的 CCT

曲线预测中取得良好的应用效果<sup>[17-18]</sup>。通过对 Li 模型参数进行优化分析, 获得实验钢的 CCT 曲线预测模型, 具体表达形式如下:

$$S(X) = \int_0^X \frac{dX}{X^{0.4(1-X)}(1-X)^{0.4X}} \quad (2)$$

$$FC = \exp(3 + 6.31C + 1.78Mn + 0.31Si + 1.21Ni + 2.70Cr + 4.06Mo) \quad (3)$$

$$PC = \exp\left(-4.5 + 4.12C + 4.36Mn + 0.44Si + 1.71Ni + 3.33Cr + 5.19\sqrt{Mo}\right) \quad (4)$$

$$BC = \exp(-7 + 10.18C + 0.85Mn + 0.55Ni + 0.9Cr + 0.36Mo) \quad (5)$$

马氏体转变为非扩散型相变, 通常采用 Koistinen-Marburger 方法(K-M 方程)进行描述<sup>[19]</sup>:

$$f = 1 - \exp[-\alpha(Ms - T)] \quad (6)$$

式中:  $f$  为马氏体转变量;  $\alpha$  为材料有关参数;  $Ms$  为马氏体相变起始温度;  $T$  为某一转变时刻的温度。

根据三组实验钢的热膨胀数据, 应用杠杆定律<sup>[20]</sup>计算 33、45、 $100 \text{ } ^\circ\text{C/s}$  冷速条件下马氏体的转变体积分数。1# 实验钢的马氏体转变体积分数-温度 ( $f$ - $T$ ) 曲线如图 3 所示。采用 K-M 方程分别对各样品的相变动力学数据进行拟合分析, 获得马氏体相变参数  $\alpha$  和马氏体相变起始点  $Ms$ , 见表 3。

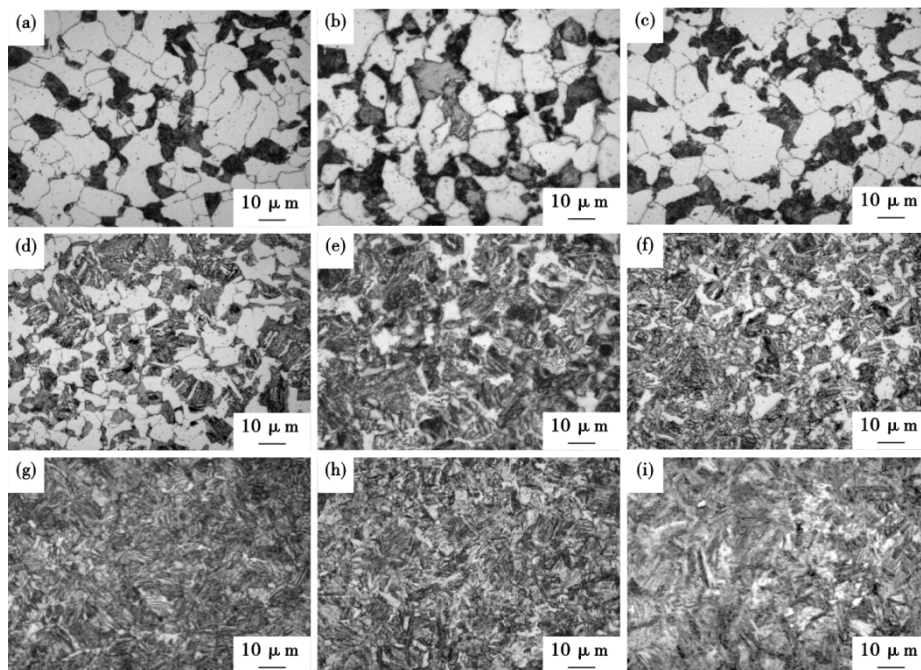


图2 三种实验钢不同冷速下的显微组织:(a)1#- $0.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (b)2#- $0.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (c)3#- $0.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (d)1#- $6.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (e)2#- $6.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (f)3#- $6.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (g)1#- $45 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (h)2#- $45 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (i)3#- $45 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

Fig. 2 Microstructures of the three experimental steels at different cooling rates : (a)1#- $0.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (b)2#- $0.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (c)3#- $0.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (d)1#- $6.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (e)2#- $6.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (f)3#- $6.5 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (g)1#- $45 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (h)2#- $45 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ , (i)3#- $45 \text{ } ^\circ\text{C/s}$

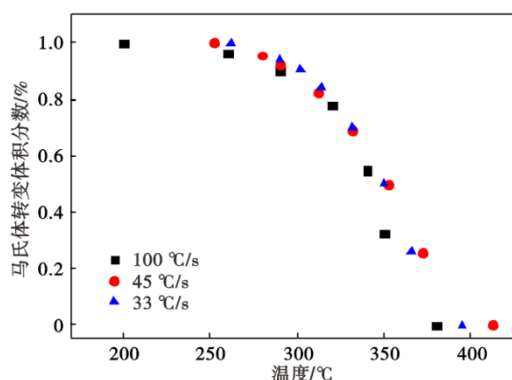


图 3 1#实验钢的马氏体相变动力学数据

Fig. 3 Martensitic transformation kinetics data of 1# experimental steel

表 3 实验钢的 K-M 方程拟合参数

Table 3 K-M equation fitting parameters of experimental steel

实验钢	参数	33 °C/s	45 °C/s	100 °C/s	平均值
1#	$\alpha/K^{-1}$	0.020 06	0.015 58	0.021 57	0.019 07
	$M_s/^\circ C$	391.7	407.3	378.1	392.366 7
2#	$\alpha/K^{-1}$	0.016 67	0.013 93	0.020 87	0.017 157
	$M_s/^\circ C$	397.8	397.7	365.0	386.833 3
3#	$\alpha/K^{-1}$	0.020 84	0.014 48	0.018 68	0.018
	$M_s/^\circ C$	402.1	413.1	379.4	398.2

Trzaska 等<sup>[21]</sup>利用 300 张建筑及工程用钢材的 CCT 曲线,建立了化学成分对临界转变温度的回归关系式:

$$A_{C1}=739.3-22.8C-6.8Mn+18.2Si+11.7Cr-15Ni-6.4Mo-5V-28Cu \quad (7)$$

$$A_{C3}=937.3-224.5C^{0.5}-17Mn+34Si-14Ni+21.6Mo+41.8V-20Cu \quad (8)$$

$$B_s=752-223.5C-55Mn-21.6Si-46.8Cr-36.9Ni-47.4Mo-70V-11Cu \quad (9)$$

$$M_s=532.6-396.7C-33Mn-1.4Si-14Cr-18Ni-11Mo+49.7V+31Cu \quad (10)$$

采用式(7)计算实验钢的  $A_{C1}$  值与实验值的误差为  $-0.5\% \sim +0.4\%$ , 计算结果吻合良好。采用式(8)计算实验钢的  $A_{C3}$  值与实验值的误差为  $1\% \sim 3\%$ , 计算结果偏高。采用式(9)与式(10)计算实验钢的  $B_s$  值及  $M_s$  值与实验值误差小于  $6\%$ ,  $B_s$  计算值偏低,  $M_s$  计算值偏高。因此,根据实验结果对回归关系式进行适当修正。

### 3.2 CCT 曲线预测

应用上述相变模型对表 1 三组成分实验钢的连续冷却转变曲线进行预测。预测曲线与试验曲线对比结果如图 4 所示。在相同的冷速下,铁素体、贝氏体与马氏体转变预测时间与实验测定时间的相对偏差小于  $5\%$ 。预测模型可以反映出成分波动对贝氏体相变区的影响,与实验结果有良好的一致性。因此,应用研究建立的预测模型可减少 CCT 曲线重复性测定工作,为 20CrMnTiH 齿轮用钢的选材和热处理提供参考。

### 3.3 相变预测模型的应用

宋月鹏等<sup>[22]</sup>基于梅尼尔模型应用大量实测 CCT 图数据进行回归分析,提出了马氏体、贝氏体、铁素体+珠光体硬度计算的公式。应用 ABAQUS 二次开发技术,将基于成分的 20CrMnTiH 钢相变预测模型与硬度回归模型进行编译,对 1#与 3#实验钢的端淬组织与硬度进行预测分析,结果如图 5 所示。由实验结果可知,在距端淬试样端面  $1.5 \sim 10 \text{ mm}$ , 3#较 1#实验钢获得更多的马氏体组织及较高的表面硬度与心部硬度,具有更高的淬透性。由仿真结果可知,端淬试样端部与心部的预测结果与实验结果重合度良好;在  $8 \sim 11 \text{ mm}$  的端淬距离内,马氏体转变量与硬度的预测结果有一定偏差,可进一步对冷却参数或马氏体相变参数进行修正。综上,此种方法能够预测评估 20CrMnTiH 成分波动对淬透性的影响。

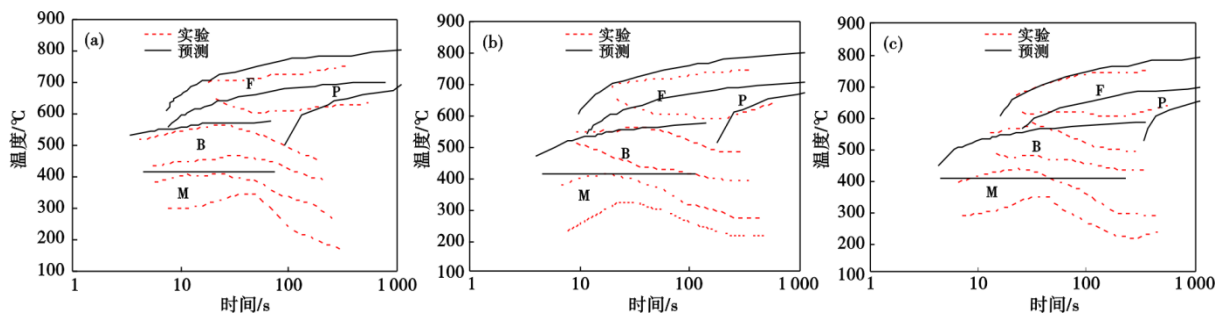


图 4 实验钢预测 CCT 曲线与实验 CCT 曲线的对比:(a)1#,(b)2#,(c)3#

Fig. 4 Comparison of predicted and experimental CCT curves of experimental steel : (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#

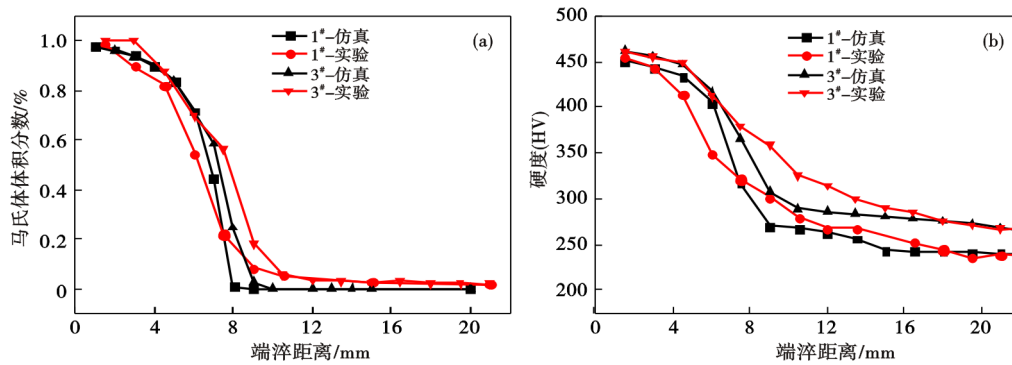


图5 实验钢的实测与预测结果:(a)端淬组织,(b)硬度

Fig. 5 The measured and predicted results of experimental steel: (a) end-quenched microstructure, (b) hardness

#### 4 结论

(1)采用切线法对3种成分的20CrMnTiH钢的热膨胀曲线进行分析,确定了实验钢的相变临界点并绘制了连续冷却转变曲线。成分波动主要影响20CrMnTiH钢冷却转变过程的中贝氏体与马氏体相变冷却区间,对临界相变温度影响较小。

(2)根据热膨胀实验数据获得20CrMnTiH钢的马氏体相变动力学参数。应用优化的Li经验模型

及临界转变温度的回归关系式,建立了实验钢在连续冷却过程中铁素体、珠光体与贝氏体的相变预测模型,成功预测了成分波动对实验钢CCT曲线的影响。

(3)结合有限元分析方法,采用相变预测模型与梅尼尔硬度回归模型对实验钢端淬过程的相变及硬度进行仿真预测。此方法能够预测评估实验钢成分波动对淬透性的影响,用于指导齿轮钢的成分优化设计。

#### 参考文献

- [1] 盛精,吕浩宇,向铁明,等. 20CrMnTi 淬硬钢的动态力学性能及其本构模型[J]. 机械科学与技术, 2023, 1-9.
- [2] 刘年富. 窄淬透性带 20CrMnTiH 齿轮钢的开发[J]. 特殊钢, 2018, 39(1): 41-43.
- [3] 陈国民. 齿轮热处理技术发展趋势[J]. 金属加工(热加工), 2011(17): 8-9.
- [4] 吴凯,唐进元,孙思源,等. 20CrMoH 与 8620H 材料的齿轮热处理变形分析[J]. 机械传动, 2019, 43(2): 89-93.
- [5] 徐广晨. 基于 Deform-HT 软件的齿轮热处理工艺数值模拟[J]. 热处理技术与装备, 2015, 36(4): 43-46.
- [6] 赵爱彬,张园园,李荣华. 20CrMnTi 齿轮渗碳淬火的数值模拟与实验验证[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2022, 42(1): 59-63.
- [7] 孙思源,唐进元,刘溢. 深冷处理工艺对半轴齿轮热处理变形的影响[J]. 机械传动, 2018, 42(2): 1-5.
- [8] 乔靖乾,冯玮. 20CrMnTi 钢的等温相变行为分析及动力学建模[J]. 金属热处理, 2020, 45(11): 115-121.
- [9] 郑彬,杨林森. 变速器斜齿轮淬火过程的有限元分析[J]. 热加工工艺, 2021, 50(22): 145-148.
- [10] 姜辉,陈文革,陈茂进. 20CrMnTi 薄壁齿轮渗碳淬火过程有限元模拟与调控[J]. 热加工工艺, 2023, 1-7.
- [11] 张星,唐进元. 20CrMnTi 材料成分波动对齿轮渗碳淬火热性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(8): 1979-1987.
- [12] 崔毅,张云飞,俞峰,等. 高温轴承钢 M50 连续冷却转变曲线的测定与分析[J]. 特殊钢, 2022, 43(03): 85-90.
- [13] 王芝林,何国宁,高建鹏,等. 20CrMnTiH 钢中残余硼对末端淬透性的影响及工艺控制[J]. 特殊钢, 2022, 43(2): 40-43.
- [14] 王中钰. 42CrMo 钢压缩及淬火过程数值模拟与实验研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [15] N Saunders, Z Guo, X Li, et al. The Calculation of TTT and CCT diagrams for General Steels[J]. Sente Software Ltd, 2004.
- [16] Li M V, Niebuhr D V, Meekisho L L, et al. A computational model for the prediction of steel hardenability[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1998, 29(3): 661-672.
- [17] 刘贤强,卜恒勇,李其,等. A668 钢 CCT 曲线的预测和验证[J]. 金属热处理, 2020, 45(10): 148-154.
- [18] 阎勇,李萌葵,卜恒勇,等. S34MnV 钢的连续冷却转变行为及相变动力学研究[J]. 材料导报, 2021, 35(20): 20129-20136.
- [19] 吴轲源,刘云鹏,李孔嵩,等. 17-4PH 不锈钢连续冷却转变及相变动力学[J]. 金属热处理, 2022, 47(6): 161-167.
- [20] 徐光. 金属材料 CCT 曲线测定及绘制[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.
- [21] J. Trzaska, L. A. Dobrzanski. Modelling of CCT diagrams for engineering and constructional steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, (192-193): 504-510.
- [22] 宋月鹏,刘国权,刘建源,等. 基于梅尼尔模型端淬试样组织分布的预报预测[J]. 金属热处理, 2006, 31(3): 93-95.