

低合金结构钢相变特征参数预测及验证

宋月鹏¹ 丁旭毅¹ 张悦¹ 赵敬伟^{2*}

1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 山东 271018

2. 太原理工大学机械与运载工程学院, 山西 030024

摘要: 对钢相变特征冷速预测的梅尼尔预测模型和卡西预测模型进行了修正, 结合低合金结构钢相变特征温度 (Ac_1 、 Ac_3 、马氏体、贝氏体转变温度范围等) 预测公式, 建立了低合金结构钢相变特征参数 (相变冷速及相变温度) 的预测模型, 采用计算机数值计算方法, 对不同成分低合金结构钢相变特征参数进行预测, 验证结果表明, 相变特征参数预测模型具有较高的可靠性。

关键词: 低合金结构钢; 相变特征参数; 计算机数值计算; 可靠性验证

一、前言

钢的相变特征参数 (相变冷速及相变温度) 是零件选材、合理制定热处理工艺规程的重要依据^[1], 但是长期以来, 对于某一牌号低合金结构钢热处理工艺的确定, 一般需要通过查阅资料或实验来确定钢的相变特征参数。众所周知, 对于同一牌号结构钢, 不同批次的化学成分千差万别而导致钢件的热处理质量不稳定^[2], 因此, 工程上迫切需要一种以化学成分为变量的相变特征参数预测模型。

对于结构钢相变特征冷速的预测, 国内外相关专家进行了长期深入研究, 结构钢过冷奥氏体连续冷却转变 (Continuous Cooling Transformation, CCT) 曲线是应用较为广泛的预测工具。梅尼尔 (Ph. Maynier)、卡西 (M. Carsi) 等分别对众多结构钢CCT图的相关实验数据进行多重回归分析, 归纳出不同化学成分结构钢的合金元素含量与其相变临界冷速间的数理统计公式^[3], 但是由于该模型中给出的元素种类较少, 且模拟结果存在较大误差。宋月鹏等采用“试错法”, 利用文献^[4-7]给出的结构钢的相变特征冷速资料, 对该模型进行完善及改进, 达到了令人满意的模拟效果。

对于结构钢特征相变温度的预测, 若通过相变热动力学理论进行推导, 则分析难度和预测误差较大, 20世纪70年代, Andrews等人利用大量实验数据, 通过数理统计方法, 获得了结构钢化学成分与各特征温度间数学统计经验公式^[4]。这些公式不是通过理论推导获得的, 具有一定的缺陷, 但能够满足工程需要, 引起人们重视。

通过分析结构钢化学成分, 准确预测钢的相变特征参数对于钢件热处理工艺选择及其质量保证具有重要的实用价值, 基于此, 本文采用计算机数值计算方法, 建立了低合金结构钢相变特征参数 (相变冷速及相变温度) 的预测模型, 对不同成分低合金结构钢相变特征参数进行预测, 并对预测结果进行可靠性验证。

二、低合金结构钢相变特征冷速预测模型的建立

众所周知^[3, 4], 钢的组织结构决定了宏观性能, 冷却速度是影响钢相变组织及其相对含量的重要工艺参数, 其中马氏体相变、贝氏体相变的临界冷却速度最为重要。

20世纪70年代末, 梅尼尔 (Ph. Maynier) 等利用来源不同的300多个实测CCT图, 分析了不同成分的结构钢, 在不同冷速下组织及其相对含量的数值, 通过最小二乘法的多重回归计算, 建立了钢的化学成分、热处理工艺 (热处理温度及其奥氏体化时间) 对该钢不同临界冷却速度的计算公式, 其中三类临界冷却速度对钢组织性能影响最为关键, 分别是 V_{Ms} , V_B , V_F , 如图1所示^[3]。

*通讯作者: 赵敬伟, 1980年2月, 男, 汉, 河南宁陵人, 现任太原理工大学机械与运载工程学院副院长, 教授, 博士生导师, 博士。研究方向: 金属精密微成形、轧制技术与装备。

基金项目: 国家自然科学基金 (51975398); 山东省自然科学基金 (ZR2019MEE092); 山东省现代农业产业技术体系果品产业创新团队资金 (SDAIT-06-12); 山东农业大学“双一流”奖补资金 (SYL2017XTTD07)

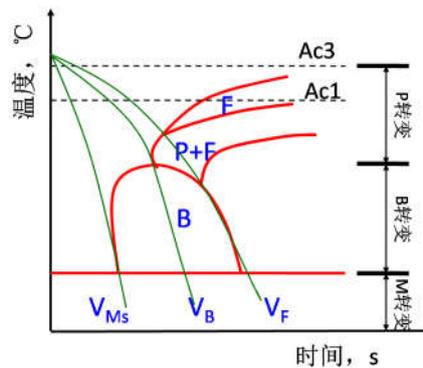


图1 Maynier相变特征冷速的预测模型

其主要含义为：

V_{Ms} ：上临界冷却速度（全部为马氏体的最小冷却速度），大于该冷速下，钢件获得100%马氏体组织。

V_B ：没有铁素体+珠光体的最小冷却速度。

V_F ：下临界冷却速度（全部为铁素体—珠光体的最大冷却速度），低于该冷速下，低合金结构钢钢件将全部为铁素体-珠光体机械混合物组织。

除此之外，梅尼尔等还建立了其他相变特征冷速的预测公式，如马氏体及贝氏体分别转变90%、50%、10%等的临界冷却速度。

进一步研究发现，这些相变特征冷却速度的对数值（ $\log V$ ）与合金的化学成分、奥氏体化条件之间呈显著的线性数学关系，众所周知，CCT曲线位置（相变特征冷速数值）不仅与钢的化学成分有直接关系，并且与奥氏体化条件（奥氏体化温度及时间等）也有重要关系，因此，梅尼尔模型的回归方程通式如公式（1）所示：

$$\log V = K - (AC\% + BMn\% + DNi\% + ECr\% + FMo\% + GPA) \quad (1)$$

式中， K 为常数， A 、 B 、 D 、 E 、 F 、 G 分别是系数，梅尼尔和卡西分别给出了非常接近的数值^[3]， PA 为奥氏体化参数，其值由公式（2）给出：

$$PA = \left(\frac{1}{T} - \frac{R}{\Delta H} \ln \frac{t}{t_0} \right)^{-1} \quad (2)$$

式中： T 为奥氏体化温度（K）； R 为理想气体常数； ΔH 为过程的激活能（kJ/mol）； t 为奥氏体化时间（h）， t_0 为时间单位（1h）。

此回归方程适用于下列含量（质量百分数，wt%）以下的低合金结构钢：0.7% C、0.6% Si、1.6% Mn、1.6% Cr、0.5% Mo、9.9% Ni。该预测模型在实际工程应用方面取得了较好效果，通过对零件上某处的实际冷却速度与相同成分钢的各临界冷却速度进行对比，可以实现对该处组织的预测，而后利用内插法还可以进一步计算出淬火组织中各转变产物的含量，进而利用加权相加法计算出混合组织的各类性能指标。

由上述分析可以看出，梅尼尔模型中，公式（1）（2）中的系数确定非常关键，将直接影响到模拟结果的可靠性。国外学者利用梅尼尔模型对某些钢的相变特征冷速进行了较为准确的预测^[3]，但是，进一步研究结果表明，该模型对国产某些钢的预测结果误差较大，同时，梅尼尔模型中给出的合金元素种类很少，没有包含诸如V、Nb、Ti等微合金化元素，预测模型的普适性较差。

随后，意大利人卡西（M. Carsi）对梅尼尔预测模型进行了修正，梅尼尔和卡西分别给出了非常接近的数值，两者之间的数值略有些差异，这与他们推导公式时所依据的资料来源不完全相同有关。相比而言，卡西模型中相变特征冷速的方程更多，在预测特征冷速及热处理组织分布方面更有可操作性。

宋月鹏等人的研究结果表明^[8]，梅尼尔及卡西模型对国产低合金钢特征冷速的预测存在较大偏差，文献^[7]给出了近100种钢的过冷奥氏体转变曲线，同时还给出了每种钢过冷奥氏体曲线中三个比较重要的临界冷却速度 V_{Ms} 、 V_B 与 V_F 相关数值，其中20CrNiMo钢 V_{Ms} 、 V_B 与 V_F 的数值分别是：50.5℃/s、16.0℃/s和0.05℃/s，卡西预测的冷却速度分别为：265.3℃/s、85.8℃/s及0.36℃/s，预测值与实际值相差3~5倍。因此，宋月鹏等通过对文献^[4-7]给出的近100种合金结构钢

的过冷奥氏体转变曲线进行研究,采用“试错法”,对卡西预测模型又进行了修正及预测结果的验证,该修正模型在端淬试样、钢件感应淬火组织预测方面取得较好应用效果^[9, 10]。

三、钢相变特征温度预测模型的建立

众所周知^[3-5],奥氏体化温度是钢件热处理工艺重要的参数,而不同成分钢奥氏体相变特征温度(加热转变的临界温度 Ac_1 和 Ac_3)也是有所差别的,同时,热处理过程中,马氏体、贝氏体转变温度范围是影响钢件热处理组织性能分布及其质量重要的相变特征温度参数。

Andrews等^[4, 11]利用不同成分结构钢热处理的特征相变温度参数资料,分析了150种以上的亚共析钢 Ac_1 和 Ac_3 温度测定结果,经过数理统计处理,得到以下公式:

$$Ac_1(^{\circ}C) = 723 - 20.7Mn - 16.9Ni + 29.1Si + 16.9Cr + 290As + 6.38W \quad (3)$$

$$Ac_3(^{\circ}C) = 910 - 203\sqrt{C} - 15.2Ni + 44.7Si + 104V + 31.5Mo + 13.1W \quad (4)$$

公式(3)的计算偏差值为 $11.5^{\circ}C$,而公式(4)的计算偏差值为 $16.7^{\circ}C$ 。

对于钢化学成分与其马氏体开始转变温度 Ms 之间的定量公式,Grange、Payson、Nehrenberg及Andrews等都做过较为深入地研究,其中Andrews研究的钢种最多,共184种,他给出了一个考虑元素间交互作用的经验公式^[4, 11]:

$$Ms(^{\circ}C) = 512 - 453C - 16.9Ni + 15Cr - 9.5Mo + 217C^2 - 71.5C \cdot Mn - 67.6C \cdot Cr \quad (5)$$

其计算偏差值不超过 $25^{\circ}C$ 。

此外,Steven和Haynes给出了在冷却过程中,马氏体转变10%、50%、90%及转变结束时的温度。另外,两人通过大量的研究,得到了贝氏体开始转变温度的经验公式^[4, 11]:

$$Bs(^{\circ}C) = 830 - 270C - 90Mn - 37Ni - 70Cr - 83Mo \quad (6)$$

计算偏差为 $\pm 25^{\circ}C$,另外还给出了贝氏体转变50%及转变结束时的温度。

公式(3)~公式(6)中的化学符号均表示钢中该种元素含量的质量百分数(wt%)。宋月鹏等利用这些公式,对主要化学成分(质量百分数,wt%)为0.32C、0.59Si、0.85Mn、0.6Cr的合金结构钢相变特征温度进行了预测,取得较好的应用效果,并认为虽然这些公式并不是由相变热动力学理论推导而出,尚存在一定的缺陷,但是完全可以满足工程的需要^[11]。

四、低合金结构钢相变特征参数预测模型的可靠性验证

低合金结构钢相变特征参数预测模型中,所采用的经验公式均是在分析了大量的实验数据基础上得到的,具有一定的可靠性,可以满足实际热处理工艺参数选择需要,在钢的相变特征冷速及相变特征温度模型基础上,通过计算机编程,建立了基于梅尼尔模型结构钢热处理组织硬度预测系统^[12]。

为了进一步验证该预测模型的可靠性,对20CrNiMo钢的相变特征冷速进行了预测与验证,前已述及,文献^[7]给出的20CrNiMo钢的临界冷却速度 V_{Ms} 、 V_B 与 V_F 的数值分别是:50.5 $^{\circ}C/s$ 、16.0 $^{\circ}C/s$ 和0.05 $^{\circ}C/s$,利用修正的预测模型,获得的三个临界冷却速度分别为:45.3 $^{\circ}C/s$ 、13.4 $^{\circ}C/s$ 和0.1 $^{\circ}C/s$,与文献^[7]给出的结果比较接近。

40CrNiMoA钢是一种重要的调质钢,可以用作要求高强度、高韧性、截面尺寸较大的和较重要的调质零件,如卧式锻造机的传动偏心轴、锻压机曲轴等。经调质后使用,该钢可用于制作要求塑性好,强度高及大尺寸的重要零件。如重型机械中高载荷的轴类、直径大于250 mm的汽轮机轴、叶片、高载荷的传动件、紧固件、曲轴、齿轮等。此外,还可以进行氮化处理后用来制作特殊性能要求的重要零件。

实际生产中,该钢热处理后常见的质量缺陷有淬火显微组织过热、欠热、淬火裂纹、硬度不够、热处理变形、表面脱碳、软点等,这些缺陷与该钢相变特征冷速及相变特征温度选择有较大关系,因此,合理选择热处理参数对于保证该钢热处理质量至关重要。

文献^[11]对40CrNiMoA钢CCT曲线上相变特征冷速及相变特征温度进行了验证,取得了较好的效果,但特征冷速的误差偏大。利用基于梅尼尔模型结构钢热处理组织硬度预测系统^[12],重新对该钢的相变特征参数进行预测验证,按文献^[5]给出的化学成分及热处理参数进行数值计算,模拟条件为:奥氏体化温度为 $840^{\circ}C$,时间为20 min(0.333 h),化学成分(质量百分数,wt%)为:0.405C、0.27Si、0.65Mn、0.75Cr、1.45Ni、0.2Mo。预测结果如表1所示。

表1 40CrNiMoA钢相变特征参数的预测

	马氏体相变				贝氏体相变				珠光体相变	
	开始 (V_{Ms})	90%	50%	10%	结束	开始 (V_B)	90%	50%	10%	V_F
冷速 (°C/min)	141	118.8	70.8	22.2	3.6	19.8	25.8	6.6	1.2	3.6
温度 (°C)	309.6 ± 25	299.6 ± 3	262.6 ± 9	206.6 ± 12	94.6 ± 15	539.4 ± 25	/	479.4 ± 25	/	419.4 ± 25
临界温度	Ac ₁ = 726.4°C ± 11.5°C Ac ₃ = 798.9°C ± 16.7°C Ms = 309.6°C ± 25°C									

由表1的预测结果可以看出，对于40CrNiMoA钢，三种特征临界冷却速度 V_{Ms} 、 V_B 与 V_F 的数值分别是：141°C/min（如图2点划线所示，文献^[1]的数据为148°C/min）、19.8°C/min和3.6°C/min，而图2中40CrNiMoA钢CCT曲线来自于文献^[5]，显示的特征相变冷速数据分别为： $V_{Ms} = 79\text{°C} \sim 159\text{°C}/\text{min}$ ， $V_B \approx 17\text{°C}/\text{min}$ ， $V_F = 3.3\text{°C}/\text{min}$ 。由此可见，相变特征冷速的预测结果与实际测量结果比较吻合，可以满足工程需要。

图2还显示，贝氏体转变结束的冷却速度要低于3.3°C/min，预测结果也证明了这一点（10%贝氏体转变量的相变特征冷速为1.2°C/min）。

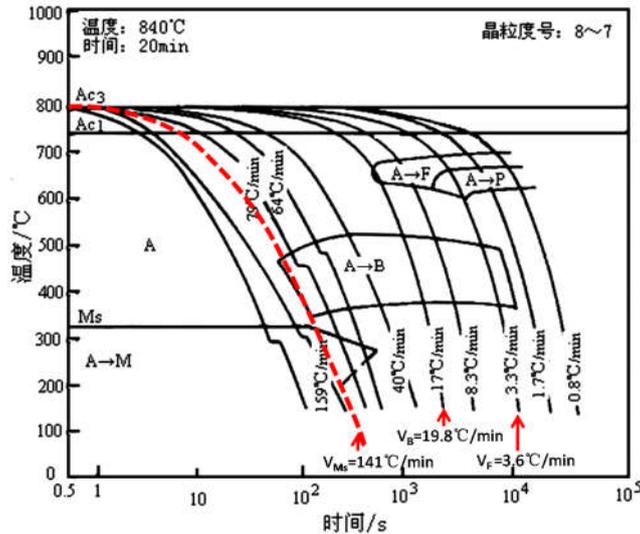


图2 40CrNiMoA钢的CCT曲线^[5]

对于40CrNiMoA钢相变特征温度预测结果也具有较高的可靠性，如表1所示的预测结果，该钢的马氏体开始相变温度 (M_s) 为 $309.6\text{°C} \pm 25\text{°C}$ ，文献^[5]给出的数值为 325°C 。该钢的 Ac_1 温度为 732°C ，预测结果为： $726.4\text{°C} \pm 11.5\text{°C}$ （文献^[1]的数据为 $705.6\text{°C} \pm 11.5\text{°C}$ ），预测结果与实验结果较为吻合，由此可以看出，预测模型的可靠性较高。

利用基于梅尼尔模型结构钢热处理组织硬度预测系统^[12]，对30CrMnSi钢和微合金非调质钢YF35MnV相变特征参数进行预测，按照文献^[6, 13]给出的两种钢的热处理条件（奥氏体化温度、时间及化学成分等）进行数值计算模拟，模拟结果与文献^[6, 13]给出的结果比较进行比较，如表2，表3所示。需要说明的是，表2，表3中，分子上的数值为计算机模拟预测结果，而分母上的数值（括号内数值）为文献^[6, 13]给出的结果。

表2 30CrMnSi钢相变特征参数的预测及验证

	马氏体相变				贝氏体相变				珠光体相变	
	开始 (V_{Ms})	90%	50%	10%	结束	开始 (V_B)	90%	50%	10%	V_F
冷速 (°C/s)	17.2/ (14.7)	14.1	13.5	2.8	0.22	6.6/ (6.7)	6.3	4.0	0.77	0.3/ (0.28)
温度 (°C)	311 ± 25 / (300)	298 ± 3	261 ± 9	205 ± 12	85 ± 15	586 ± 25	/	526 ± 25	/	466 ± 25
临界温度	Ac ₁ = 750°C ± 11.5°C / (750°C) Ac ₃ = 844.6°C ± 16.7°C / (850°C) Ms = 311°C ± 25°C									

表3 YF35MnV钢相变特征参数的预测及验证

	马氏体相变					贝氏体相变				珠光体相变
	开始 (V_{Ms})	90%	50%	10%	结束	开始 (V_B)	90%	50%	10%	V_F
冷速 ($^{\circ}\text{C/s}$)	23.3/ (23)	13.0	10.7	2.37	0.55	16.3/ (17)	12.9	7.3	1.56	1.2/ (1.6)
温度 ($^{\circ}\text{C}$)	331 ± 25 / (351)	321 ± 3	284 ± 9	228 ± 12	116 ± 15	606 ± 25	/	545 ± 25	/	485 ± 25
临界温度	$Ac_1 = 712.3^{\circ}\text{C} \pm 11.5^{\circ}\text{C}$ / (708 $^{\circ}\text{C}$) $Ac_3 = 808.7^{\circ}\text{C} \pm 16.7^{\circ}\text{C}$ / (798 $^{\circ}\text{C}$) $Ms = 331^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$									

由表2、表3中可以看出,计算机预测结果与文献^[6, 13]给出的结果比较吻合,如对于微合金钢YF35MnV,文献^[6]给出的马氏体的最小冷却速度 V_{Ms} 及马氏体开始相变温度 Ms 数值分别为23.3 $^{\circ}\text{C/s}$ 、331 $\pm 25^{\circ}\text{C}$,该钢其他相变特征温度(Ac_1 及 Ac_3)预测结果与实验的结果也极为接近,如文献给出的 Ac_1 及 Ac_3 分别为:708 $^{\circ}\text{C}$ 、798 $^{\circ}\text{C}$ 。预测数值分别为:712.3 $^{\circ}\text{C} \pm 11.5^{\circ}\text{C}$ 、808.7 $^{\circ}\text{C} \pm 16.7^{\circ}\text{C}$ 。以上结果充分说明,低合金钢相变特征冷速及相变特征温度预测模型具有较高的可靠性,在工程应用方面具有重要的应用价值。

利用低合金钢相变特征冷速及相变特征温度预测模型,可以实现对任一成分钢相变特征冷速及温度较为准确的预测,这对于确定热加工工艺路线,材料设计及选择具有较高的可靠性和实用性。

五、结论

综上所述,本文针对低合金结构钢工件热处理参数的合理选择以保证热处理质量工程问题开展研究工作,对梅尼尔模型及卡西模型进行修正,结合相变特征温度经验公式,建立了一种以化学成分、热处理参数(奥氏体化温度及时间等)为变量的低合金结构钢相变特征参数(相变特征冷速及相变特征温度)预测模型。通过对多种低合金结构钢相变特征参数进行计算机数值模拟计算,结果表明,预测结果与实际结果比较吻合,能够满足工程应用需要,从而验证了该模型具有较高的可靠性,实现了对不同成分低合金结构钢相变特征温度及冷速的预测。

参考文献:

- [1] 龚雪婷,武志广,李鑫,贾红帅.2.25Cr1Mo钢大型锻件热处理工艺数值模拟[J].金属热处理,2019,44(3):192-196.
- [2] T Inoue, K Funatani, G Totten. Processing Modeling for Heat Treatment: Current Status and Future Development[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000,E5(1):16-25.
- [3] 吴季恂,周光裕,荀毓民.钢的淬透性应用技术[M].北京:机械工业出版社,1994.
- [4] 康大韬,郭成熊.工程用钢的组织转变与性能图册[M].北京:机械工业出版社,1992.
- [5] 周玉.材料分析方法[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [6] 董成瑞,任海鹏,金同哲,等.微合金非调质钢[M].北京:冶金工业出版社,2000.
- [7] 冶金工业部钢铁研究总院.钢的过冷奥氏体转变曲线文集[M].北京:冶金工业出版社,1979.
- [8] 宋月鹏.保证淬透性钢的计算机优化设计研究[D].北京科技大学博士学位论文,2006年4月.
- [9] 宋月鹏,刘国权,刘建涛,尹江辉,王延龙.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.
- [10] 冯媛媛,宋月鹏,陈克丰,纪文文.感应淬火零件组织和硬度分布的计算机预报及试验验证[J].金属热处理,2009,34(3):92-95.
- [11] 宋月鹏,刘国权,汪崧,韩玲,文伟,白宁.低合金结构钢相变特征温度和冷速的计算机预报预测及实验验证[C].2005年全国计算材料、模拟与图像分析学术会议论文集,2005,148-154.
- [12] 山东农业大学.基于梅尼尔模型结构钢热处理组织硬度预测系统V1.0[P].中华人民共和国国家版权局 计算机软件著作权,2016SR249064,2016年09月06日.
- [13] 孙珍宝,朱谱藩,林慧国,等.合金钢手册(下册)[M].北京:冶金工业出版社,1992.