

20CrMnTiH 齿轮钢的淬透性计算及窄淬透性带控制

王继臣 赵千水 李超群 白 刚
(本钢板材股份有限公司特殊钢厂, 本溪 117000)

摘 要 采用非线性方程计算法计算 20CrMnTiH 钢末端淬透性, 只需利用生产实际数据加以修正, 就能进行精确的淬透性计算和预报, 与实测值偏差不超过 2HRC。采用化学成分设计和控制, 保证 20CrMnTiH 钢 $\Delta[C]$ 不超过 0.007%, $\Delta[Si]$ 波动不超过 0.04%, $\Delta[Mn]$ 、 $\Delta[Cr]$ 不超过 0.02%, $\Delta[Ti]$ 不超过 0.01%, $\Delta[Al]$ 不超过 0.010%, $[Ni]$ 、 $[Cu]$ 不超过 0.05%, $[Mo]$ 、 $[W]$ 、 $[V]$ 不超过 0.03%, $[P]$ 、 $[S]$ 不超过 0.020%, $[N]$ 和 $[B]$ 分别不超过 0.006 0% 和 0.000 5%, 并控制碳偏析指数不超过 1.035%, 可实现国际先进水平的末端淬透性 HRC4 带宽控制。

关键词 20CrMnTiH 淬透性计算 窄淬透性带控制

Hardenability Calculation of 20CrMnTiH Gear Steel and Control of Narrow Hardenability Band

Wang Jichen, Zhao Qianshui, Li Chaoqun and Bai Gang
(Special Steel Plate Plant, Benxi Steel Plates Co, Ltd, Benxi 117000)

Abstract The calculation method of the nonlinear equation is used to calculate the hardenability of 20CrMnTiH steel, and it can only be corrected by the actual production data, and can be used to calculate and predict the hardenability accurately. The deviation between the calculated value and the measured value is not more than 2HRC. By chemical composition design and control 20CrMnTiH steel, it is to ensure $\Delta[C]$ less than 0.007%, $\Delta[Si]$ less than 0.04%, $\Delta[Mn]$, $\Delta[Cr]$ less than 0.02%, $\Delta[Ti]$ less than 0.01%, $\Delta[Al]$ less than 0.010%, $[Ni]$, $[Cu]$ no more than 0.05%, $[Mo]$, $[W]$, $[V]$ no more than 0.03%, $[P]$, $[S]$ no more than 0.020%, $[N]$ and $[B]$ no more than 0.006 0% and 0.000 5% respectively, and the control of carbon segregation index is less than 1.035%, the end quenching can achieve the international advanced level of the permeability of HRC4 bandwidth control.

Material Index 20CrMnTiH, Hardenability Calculation, Narrow Hardenability Band Control

淬透性是齿轮钢的重要特性, 它主要取决于过冷奥氏体稳定性的大小, 钢材淬透性的稳定与否对钢件热处理后变形影响很大^[1]。因此, 齿轮钢对于淬透性带宽有非常高的要求, 淬透性带越窄、离散度越小越有利于齿轮加工和提高啮合精度^[2]。淬透性的计算从 20 世纪 40 年代起就开始由定性描述到定量^[3]。20 世纪 40 年代初格罗斯^[4]提出描述淬透性的理想临界直径计算公式, 60 年代嘉斯特^[4]引领了采用回归方程计算端淬曲线的方法, 1997 年余柏海在文献[5]中公布了采用非线性方程计算端淬曲线的方法。

20CrMnTiH 钢作为一种典型的渗碳钢, 广泛应用于汽车、摩托车、农用车及各种工程机械的传动齿轮^[6]。20CrMnTiH 钢以其成本低、工艺性能好、价格低的优点且可以满足国内大多数齿轮材质的要求, 占据着中国汽车齿轮钢材制造用量的 50% 左右^[7]。但由于 20CrMnTiH 钢具有自身的特殊钢种特性, 因而其淬透性带宽的控制相对于其它齿轮钢难度更

大^[8]。

本文采用非线性方程计算法, 以供某企业产品为例进行末端淬透性计算和设计, 并以窄化学成分控制为目标, 实现末端淬透性的 4HRC 窄带控制。

1 淬透性计算

国内 20CrMnTiH 钢淬透性要求以 J9 值为例总区间在 26 ~ 44HRC, 不同企业根据具体使用要求选择不同的区间段。淬透性带宽控制, 国内先进水平能达到 4 ~ 6HRC, 国际高水平带宽能达到 4HRC。选择 J9 值要求 28 ~ 33HRC、J15 值要求 22 ~ 26HRC 的高端用途 20CrMnTiH 钢进行淬透性计算和窄带控制研究。

1.1 化学成分及末端淬透性要求

实例 20CrMnTiH 钢主要化学成分要求范围如表 1 所示。

1.2 计算公式

采用余柏海建立的计算淬透性曲线的非线性回归方程进行设计计算, 其方程形式如公式(1)所示。

表1 20CrMnTiH 钢的化学成分要求/%

Table 1 Requirement of Chemical component of 20CrMnTiH steel/%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Alt
0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.80 ~ 1.20	≤ 0.035	≤ 0.035	1.00 ~ 1.35	≤ 0.25	≤ 0.05	≤ 0.25	0.015 ~ 0.060

$$J_e = J_0^2 / \{ J_0 + 16 \{ [1 + C_r \cdot E / (E_s + E)] E / (E_s + C_r \cdot E^2 / (E_s + E)) \}^{Cb} \} \quad (1)$$

公式(1)中: J_e -距离淬火端距离 e 的 HRC 硬度值; E -距淬火端的距离/mm; J_0 -淬火端马氏体 HRC 硬度值; C_r 、 C_b -分别为曲率系数和曲率指数,其值大小代表端淬曲线下下降速率及下限渐近线高低; E_s -半马距/mm; G -晶粒度级别; M -合金化当量,相当于钢中所含元素综合影响奥氏体稳定性的定量参数。其中:

$$J_0 = (4 + 212[C]^3) / (0.1 + 3.2[C]^3) - 2[C] \quad (2)$$

$$C_r = M/5 + 3[V] / (1 + 3[V]^2) + (4/3) ([Mo] + [W]) / (1 + ([Mo] + [W])^2) \quad (3)$$

$$C_b = 4 + [(170[B])^3 / (1 + (630[B])^4)] / ([N](0.15 + [C])) \quad (4)$$

$$E_s = [12 / (5 + G)] [M/12 + (M/8.5)^4 + 1] / [1 + 25[C]^3 / (1 + 5[C]^4)] \quad (5)$$

$$M = [Cr] (39 - [Cr]) / (5 + [Cr]) + [Mn] (4 + [Mn]) + 8[Si] / (5 + [Si]) + 0.3[Ni] (5 + [Ni]) + 7[Ti] / (1 + 120[Ti]^2) + [Nb] / (0.1 + 98[Nb]^2) + 3[N] / (0.1 + 300[N]^2) + [Al] / (0.1 + 130[Al]^2) + 2[P] / (0.1 + 300[P]^2) + 9[V] / (1 + 3[V]^2) + 12([Mo] + [W]) / (1 + ([Mo] + [W])^2) + [(170[B])^3 / (1 + (630[B])^4)] / ([N](0.15 + [C])) - [S] + [Cu] \quad (6)$$

1.3 设计计算与验证

采用公式(1)进行化学成分设计计算,根据实际生产统计数据将 $[Ni]$ 、 $[Mo]$ 含量设定为 0.02%, $[W]$ 、 $[V]$ 、 $[Cu]$ 含量设定为 0.01%, $[N]$ 和 $[B]$ 含量分别设定为 0.005 0% 和 0.000 2%, $[Nb]$ 含量过低不予考虑,晶粒度设定为 7 级,然后对主要化学元

素含量分三个组别计算 J9 和 J15 末端淬透性值,化学成分组别及拟定的主要元素含量数值如表 2 所示。

将表 2 中数值及其它设定的元素含量及晶粒度代入公式(1)~(6)中分组计算 J9 和 J15 末端淬透性值,结果如表 3 所示。

由表 3 可见,1 组计算结果符合产品对末端淬透性范围的要求,因此,以 1 组为目标成分,试验生产 3 炉,对末端淬透性计算结果与实际生产检验结果进行对比分析。实际生产 3 个炉次的化学成分,其具体含量见表 4。

1.4 计算公式修正

由表 5 可见,计算值及实测值都满足产品标准要求,但所有计算值都高于实测值,其中 B 炉 J15 计算值与实测值偏差为 3HRC。

在末端淬透性的诸多影响因素中化学成分最为重要,其中又以碳的影响最大。而钛对 20CrMnTiH 钢的淬透性的影响较为复杂,它是强碳化物形成元素。当其含量较低,淬火溶入奥氏体时,起降低临界冷却速度的作用,提高淬透性。而当奥氏体固溶钛量达到饱和形成 TiC 时,不但加入的钛不能起到提高淬透性的作用,而且还夺取碳,使其不溶于奥氏体,从而降低钢的淬透性^[9]。计算值偏高,与钛化合部分碳,使得有效碳含量降低有关。故此,对计算公式加以修正,并得到修正后 J9 和 J15 的计算公式(7)和(8)。

分别对 3 炉实验钢材制取试样,按 GB/T 225-2006 标准检验钢的末端淬透性实测值,所有数值如

表2 20CrMnTiH 钢主要化学元素分组设定值/%

Table 2 Defined values of main chemical elements of 20CrMnTiH steel/%

组别	C	Si	Mn	P	S	Cr	Alt
1	0.21	0.26	0.86	0.015	0.005	1.06	0.030
2	0.22	0.30	0.90	0.025	0.008	1.10	0.045
3	0.20	0.20	0.82	0.012	0.002	1.02	0.025

表3 末端淬透性计算值

Table 3 Calculated value of end-quenched hardenability

组别	1	2	3	范围要求
J9(HRC)	31.7	34.9	29.3	29~33
J15(HRC)	25.7	28.1	23.9	22~27

表4 实验钢的熔炼成分,3 炉/%

Table 4 Melting composition of tested steel, 3 heats/%

炉别	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Ti	Cu	W	V	N	B	Alt
A	0.200	0.27	0.85	0.016	0.002	1.07	0.02	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.004 8	0.000 3	0.030
B	0.208	0.25	0.86	0.012	0.002	1.07	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.004 2	0.000 2	0.034
C	0.210	0.26	0.87	0.012	0.002	1.06	0.01	0.01	0.07	0.01	0.01	0.01	0.004 4	0.000 1	0.027

表 5 设计公式末端淬透性计算值与实测值

Table 5 Calculated and measured value of end quench hardenability

炉别	计算值(HRC)		实测值(HRC)		对比值(HRC)	
	J _{9j}	J15 _j	J _{9s}	J15 _s	J _{9j-s}	J15 _{j-s}
A	31.9	25.8	30.5	24	1.4	1.8
B	31.0	25.0	29.5	22	1.5	3.0
C	31.6	25.5	30.5	25	1.1	0.5

注:下标 J 表示计算值,下标 S 表示实测值,下标 J-S 表示计算值与实测值的差值

表 6 修正公式末端淬透性 HRC 硬度计算值和实测值

Table 6 Calculated and measured value of HRC hardness of end quenched hardenability by amended equation

炉别	计算值(HRC)		实测值(HRC)		对比值(HRC)	
	J _{9j}	J15 _j	J _{9s}	J15 _s	J _{9j-s}	J15 _{j-s}
A	30.4	24.5	30.5	24	-0.1	0.5
B	29.9	23.6	29.5	22	0.4	1.6
C	30.1	24.2	30.5	25	-0.4	-0.8

注:下标 J 表示计算值,下标 S 表示实测值,下标 J-S 表示计算值与实测值的差值

表 5 所示。

$$J_9 = J_0^2 / \{ J_0 + 16 \{ [1 + 9C_r / (E_s + 9)] 9 / (E_s + C_r \cdot 9^2 / (E_s + 9)) \}^{Cb} \} - 35.96C + 6.03 \quad (7)$$

$$J_{15} = J_0^2 / \{ J_0 + 16 \{ [1 + 15C_r / (E_s + 15)] 15 / (E_s + C_r \cdot 15^2 / (E_s + 15)) \}^{Cb} \} + 11.38C - 3.7 \quad (8)$$

按修正后的计算公式计算的 J₉ 和 J₁₅ 值、实测值,以及二者之间的差值如表 6 所示。

由表 6 可见,修正后的计算公式所计算的末端淬透性值与实测值相差不超过 1.6HRC,主要差值区间处于 ±0.8HRC 内,预测精度较高,达到实用要求。

2 窄淬透性带控制

2.1 化学成分对窄淬透性带控制

一般而言,化学成分对钢淬透性起着决定性的作用。20CrMnTi 属于亚共析合金结构钢,对其淬透性贡献最大的元素是碳^[10]。在常用的合金元素中,对降低临界冷却速度从而使钢容易淬火的影响来说,以锰为最强烈,其次为钼、铬、铝、硅、镍,再次是其它元素^[11]。硼突出的作用是微量(0.001%)的硼可以成倍地增加钢的淬透性^[12],就对淬透性的影响而言微量的硼比其它元素对淬透性的影响显著,因此为了保证淬透性的稳定性,应将硼控制在含量较低且稳定的范围内。钕含量不同的试样,其端淬硬度分布比较接近;硬度曲线上的拐点位置相同;而且随着距淬火末端距离的不同,其组织变化规律基本相似。由此可见钕含量不影响钢的淬透性^[13]。

钢水窄成分控制对齿轮钢淬透性带宽控制意

表 7 20CrMnTiH 钢的目标成分及控制范围

Table 7 Target and control range of chemical composition of 20CrMnTiH steel

项目	C	Si	Mn	Cr	Ti	Al
目标	0.203	0.26	0.86	1.06	0.06	0.030
内控	±0.007	±0.04	±0.02	±0.02	±0.01	±0.010

义重大,也是实现齿轮钢窄淬透性带控制的必要手段。因此,基于化学成分对末端淬透性各自不同的影响,确定碳元素分析精度为 0.001%,设定碳、硅、锰、铬、钛、铝元素的目标成分及内控范围如表 7 所示。

其它影响相对较小或者微小含量的元素,根据其淬透性的影响差异限定其最高含量,规定:[Ni]、[Cu]含量不超过 0.05%, [Mo]、[W]、[V]含量不超过 0.03%, [P]、[S]含量不超过 0.020%, [N]和[B]含量分别不超过为 0.006 0% 和 0.000 5%, [Nb]含量过低且对淬透性无影响不予考虑。

2.2 化学成分对窄淬透性带控制

为实现化学成分窄范围设计要求,实现化学成分的窄范围控制,一是要保证钢水化学成分的精确控制,二是要控制钢材化学成分均匀性,减少化学成分偏析,特别是碳元素的偏析。

化学成分以表 7 目标值为目标进行控制,电弧炉出钢时以表 7 内控目标的下限为目标依次加入增碳剂、渣料及硅、铬、锰合金,钛铁在精炼炉中加入。化学成分精确控制,要控制好钢水精炼到连铸的关键环节。精炼期间分两次加入总量 3~7 kg/t 的扩散脱氧剂,根据化学成分第二次全分析结果微调化学成分,精炼全程保持白渣,同时采用吹氩操作,避免造成因操作不当或下渣严重而导致钢水增碳、增氮和回磷。在不同精炼时期控制好底吹氩量,精炼期间控制氩气压力 0.2~0.4 MPa,精炼后期调整氩气压力 0.1~0.3 MPa 静吹氩,保证钢液面不裸露,防止钢水与空气接触而氧化,要求静吹氩时间不低于 15 min,促使夹杂物聚集长大以排除夹杂物,避免夹杂物过多而消耗有效的合金元素。连铸采用低温浇铸,控制过热度 15~30℃,相邻炉次波动范围不超过 ±5℃,同时做好保护浇铸,防止钢水二次氧化。化学成分偏析的控制除同样采取上述措施外,还要合理控制钢坯的加热温度,保证 1 100℃ 以上的均温时间不少于 1.5 h,减小合金元素偏析并促使碳化物充分溶解。

2.3 窄淬透性带控制生产验证

按照窄化学成分设计目标,采取上述工艺措施

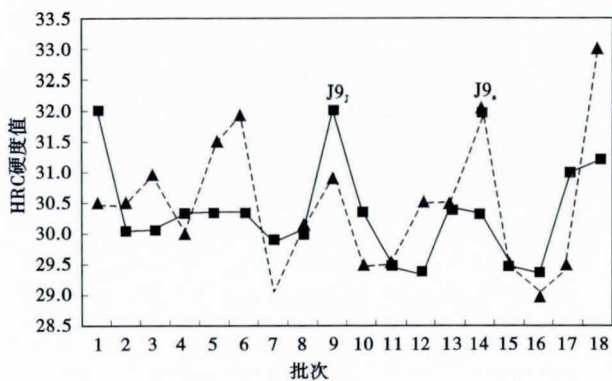


图1 20CrMnTiH 钢 J9 计算值和实测值对比

Fig. 1 Comparison between calculated and measured values of J9 of 20CrMnTiH steel

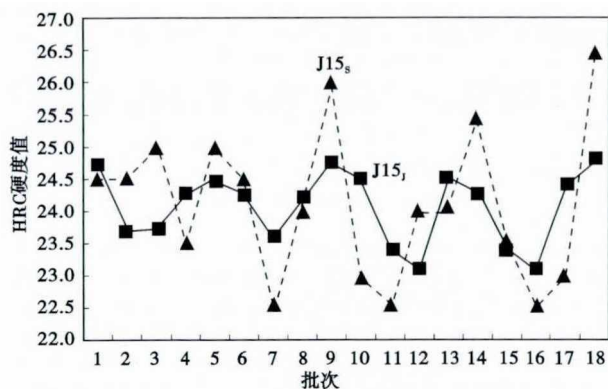


图2 J15 计算值和实测值对比

Fig. 2 Comparison between calculated and measured values of J15 of 20CrMnTiH steel

共结合合同生产 20CrMnTiH 齿轮钢 18 炉,所有炉次化学成分都达到内控要求,内控合格率 100%。

化学成分均匀性采用成品钢材 1/2R 处(半径 1/2 处)的碳成分与熔炼成品样进行比较,对碳偏析情况(碳偏析指数 = $C_1/2r_r/C_{成品}$)进行分析^[14],结果

表明 1/2R 处碳含量普遍高于熔炼成品成分,实际计算碳偏析指数最高不超过 1.035%,表明化学成分偏析控制较好。

对 18 炉批钢材按 GB/T 225-2006 标准实测末端淬透性值,同时按修正后的非线性方程计算末端淬透性值,J9 计算值和实测值,对比散点图如图 1 所示,J15 计算值和实测值,对比散点如图 2 所示。

由图 1 和图 2 可见,采用化学成分窄范围设计和控制,J9 实测值带宽不超过 HRC4,与计算值偏差不超过 HRC2,J15 实测值带宽不超过 HRC4,与计算值偏差也不超过 HRC2,进一步验证了非线性方程计算末端淬透性的精确性,同时也实现了末端淬透性带宽控制在 HRC4 范围内的国际先进水平。

3 结论

(1)从实际应用看,非线性方程计算法计算 20CrMnTiH 钢末端淬透性值,具有计算步骤清晰、贴合现场生产实际、预测精度高等优点,只需利用生产实际数据加以修正,就能进行精确的淬透性计算和预报,与实测 HRC 硬度值偏差不得超过 2。

(2)设定合适的目标成分,采用化学成分窄范围设计和控制,保证 20CrMnTiH 钢主要元素 [C] 含量波动不超过 0.007%, [Si] 含量波动不超过 0.04%, [Mn]、[Cr] 含量波动不超过 0.02%, [Ti] 含量波动不超过 0.01%, [Al] 含量波动不超过 0.010%, [Ni]、[Cu] 含量不超过 0.05%, [Mo]、[W]、[V] 含量不超过 0.03%, [P]、[S] 含量不超过 0.020%, [N] 和 [B] 含量分别不超过 0.006 0% 和 0.000 5%,并控制碳偏析指数不超过 1.035%,可实现国际先进水平的末端淬透性 HRC4 带宽控制。

参考文献

- [1] 史志强,李晶,余健,等. 20CrMnTi 齿轮钢淬透性控制技术[J]. 炼钢,2008,24(6):47-49.
- [2] 程雷,陈清. 浅析 20CrMnTi 齿轮钢的淬透性[J]. 机电信息,2011(18):204-205.
- [3] 黄涛,宋满堂,梁启华,等. 基于非线性方程法的齿轮钢淬透性计算模型[J]. 中国冶金,2012,20(3):14-17.
- [4] Grossman M A. Correlation Between Jominy Test and Quenched Round Bars[J]. Trans AIME,1942,150(6):227-231.
- [5] Just E. Formulas for Calculating Hardenability Curves[J]. Metal Progress,1969,96(11):871-874.
- [6] 张素萍,王勇,郑永瑞. 化学成分对 20CrMnTi 淬透性影响[C]. 2009 年河北省轧钢技术与学术年会论文集,2009:236-239.
- [7] 乐为. 20CrMnTiH 齿轮钢的发展与质量要求[J]. 考试周刊,2011,73:164-166.
- [8] 王信康,郭子强. 轿车用 20CrMnTiH 齿轮钢窄淬透性控制实践[J]. 河北冶金,2016(11):10-13.
- [9] 张健,周砚池. 化学成分对 20CrMnTi 钢淬透性影响的研究[J]. 四川冶金,1996(4):69-70.
- [10] 丁礼权,吴润,罗国华,等. 20CrMnTi 齿轮钢淬透性试验研究[J]. 武钢技术,2016,54(3):26-32.
- [11] 傅代直. 钢的淬透性手册[M]. 北京:机械工业出版社. 1973:19-20.
- [12] 冶金工业部钢铁研究院主编. 合金钢手册[M]. 北京:上册第一分册:中国工业出版社,1971:184-185.
- [13] 柳洋波,崔京玉,佟倩,等. Nb 含量对 20CrMnTi 钢淬透性的影响[J]. 金属热处理,2014,39(5):47-50.
- [14] 陶建军,朱惠刚,吴小林. 碳偏析和残余 B 对 20CrMnTiH1 齿轮钢淬透性的影响[J]. 特殊钢,2007,28(5):58-59.

王继臣(1969-),男,高级工程师,1992 年东北大学(本科)毕业,特殊钢生产工艺技术研究. E-mail: bgwangjichen@ sina.com

收稿日期:2018-09-06