

· 试验研究 ·

20CrMnTiH 圆钢精轧后控冷过程温度场有限元分析

程 满^{1,2} 洪慧平¹ 王 莉¹ 康永林¹ 金永春³

(1 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083; 2 中钢设备公司, 北京 100080; 3 首钢技术研究院, 北京 100041)

摘 要 通过对 20CrMnTiH 圆钢精轧后控制冷却过程温度场进行有限元模拟以及现场温度实测, 得出了 $\Phi 35$ mm 规格圆钢芯部、1/2 半径处和表层温度的分布曲线。分析说明, 轧后水冷却过程圆钢表层温度急速下降, 而芯部温度下降缓慢, 水冷时圆钢芯部与表面的最大温差约为 115 °C; 水冷后的空冷过程使得圆钢芯部和表层温度逐渐一致。20CrMnTiH 圆钢精轧后采用快速水冷并配合空冷工艺, 有利于抑制奥氏体晶粒长大并获得均匀细小的轧材组织。

关键词 20CrMnTiH 钢 圆钢 控制冷却 温度场 有限元分析

Finite Element Analysis on Temperature Field of Finishing Rolled 20CrMnTiH Steel Round Bar during Controlled Cooling

Chen Man^{1,2}, Hong Huiping¹, Wang Li¹, Kang Yonglin¹ and Jin Yongchun³

(1 School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Equipment Corporation, Sinosteel, Beijing 100080; 3 Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100041)

Abstract The temperature distribution curves at core, 1/2 radius and surface of the $\Phi 35$ mm round bar of 20CrMnTiH steel have been got by finite element simulating and situ temperature measuring to finishing rolled round steel bar during controlled cooling. Analysis results indicated that the temperature at surface of finished rolled round bar quickly dropped during water cooling while the temperature at core of steel decreased slowly; the maximum temperature difference between the surface and the core of round bar was about 115 °C during water cooling; and after water cooling the temperature of surface and core of round steel tended towards equality during air cooling. To adopt quick water cooling and combined air cooling process is available to inhibit austenite grain growth and obtain fine and dispersed structure of finished rolled 20CrMnTiH round steel products.

Material Index 20CrMnTiH Steel, Round Bar, Controlled Cooling, Temperature Field, Finite Element Analysis

当前汽车工业对高品质齿轮钢需求较大。在齿轮钢中 20CrMnTiH 钢具有晶粒长大倾向性小、加工性能优良及价格低廉等特点, 在我国齿轮行业中多年来占有重要地位^[1]。渗碳齿轮钢除了要保证末端淬透性等性能指标以外, 还要求具有适当细小和均匀的晶粒尺寸(通常晶粒度 ≥ 6 级), 这对稳定钢材的末端淬透性、减少齿轮热处理后的变形量、提高渗碳钢的脆断抗力具有重要意义。轧后控制冷却技术是改善和提高 20CrMnTiH 圆钢轧材组织及性能的重要措施之一。温度场模拟预测则是合理制定合金棒材控轧控冷工艺方案的技术基础。通过分析和总结从棒材芯部至表层温度的分布和变化规律, 能够为合理制定冷却工艺方案及改善组织和提高性能提供技术依据。

1 圆钢轧后控冷过程温度场模型

圆钢在轧后控制冷却过程的热传导方程可表示为^[2,3]:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{k}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: k - 热传导系数; ρ - 材料的密度; C_p - 热容; t - 时间; T - 温度。

方程(1)满足的传热边界条件包括:

(1) 空冷过程: 棒材与周围空气的热交换主要以辐射换热为主, 若忽略对流换热的影响, 其边界条件为^[3]:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = \varepsilon \sigma (T_f^4 - T_a^4) \quad (2)$$

式中: ε - 黑度; σ - 斯蒂芬-波尔兹曼常数; T_f - 棒材的表层温度; T_a - 空气温度。

(2) 穿水冷却: 棒材和水之间发生强制对流换热, 其边界条件为^[4]:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h_w (T_f - T_w) \quad (3)$$

式中: h_w - 棒材和水之间的强制对流换热系数; T_w -

冷却水温度。

2 控冷过程温度场模拟

2.1 圆钢精轧后控冷工艺特点

200 mm × 200 mm 断面连铸方坯从步进加热炉出来后,经过 14 个道次连轧的 Φ35 mm 20CrMnTiH 圆钢,以 5.60 m/s 终轧速度穿水冷却后通过运输辊道上冷床。在轧后水冷段的入口和出口处以及冷床的入口和出口处布置测温仪。20CrMnTiH 钢化学成分(%)为:0.21C、0.88Mn、0.24Si、1.04Cr、0.072Ti、0.029S、0.016P、0.026Al。

在圆钢轧后穿水冷却过程中,因温度变化较大,合金钢材料的物性参数随着组织状态和温度变化明显,故须考虑温度对相关物性参数的影响。热物性参数主要包括导热系数 λ 和定压热容 C_p ,取值如表 1 所示^[5]。

2.2 模型的选择

表 1 20CrMnTiH 钢的热物性参数

Table 1 Physical parameters of 20CrMnTiH steel

温度/ ℃	导热系数/ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	定压热容/ ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
300	29.56	524
400	28.70	561
500	27.86	612
600	27.02	687
700	25.83	814
760	29.68	1 155
800	22.89	689
900	23.04	619
1 000	21.46	602

温度场有限元建模时,将圆钢断面作为扇形来处理。有限元模型使用平面四角八节点单元 PLANE77。在此采用了不同的网格划分形式与网格密度分别求解温度场,比较网格形式与网格密度对温度计算值的影响(见表 2)。图 1(a)为采用直角坐标方法划分网格,沿半径方向等分为 50 份,

表 2 不同网格划分对应的温度计算值

Table 2 Calculated value of temperature according to different meshing

温度/℃	计算时间/s	网格不同对应的温度/℃			温度偏差/℃	
		C-fan50	P-fan30	P-fan50	(P-fan50)-(C-fan50)	(P-fan50)-(P-fan30)
表层	1.63	815.23	815.22	815.23	0	0.01
	2.68	863.78	863.78	863.78	0	0
	13.77	873.55	873.52	873.51	-0.04	-0.01
芯部	1.63	930.00	929.99	929.99	-0.01	0
	2.68	929.71	929.63	929.63	-0.08	0
	13.77	900.15	899.42	899.43	-0.72	0.01

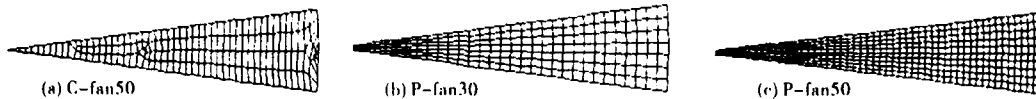


图 1 温度场有限元模型中 3 种网格划分

Fig. 1 Three types of meshing for finite element model of temperature simulation

用 C-fan50 表示。图 1(b)为采用极坐标方法划分的网格,沿半径方向等分 30 份,用 P-fan30 表示。图 1(c)采用极坐标方法划分网格,沿半径方向等分 50 份,用 P-fan50 表示。

为分析网格划分情况对温度场计算值的影响,采用图 1 所示 3 种不同网格密度条件,分别计算 20CrMnTiH Φ35 mm 圆钢轧后控冷过程相关时刻的温度偏差值(见表 2),其中 $t = 1.63\text{ s}$ 、 $t = 2.68\text{ s}$ 、 $t = 13.77\text{ s}$ 分别为对应于圆钢到达水冷段出口、水冷段出口测温点和冷床入口的时刻。最后采用图 1(c)所示的细密网格模型。为了避免在中心部位出现三角形单元,可取中心有限小半径,计算中按绝热

考虑。

3 温度场模拟结果与分析

图 2(a)为上冷床前圆钢芯部温度、1/2 半径处温度和表层温度随距离的变化曲线,图 2(b)为圆钢冷却过程温度随时间的变化曲线。可见,在水冷过程中圆钢表层的温度变化呈锯齿状,而芯部温度变化是较为连续平稳的降低过程,这是因为棒材表层受水冷和空冷的交替作用,存在表层温度的降低和回升;而圆钢芯部温度变化是内部热传导的结果,由于水冷时间短,芯部热量还来不及向外传递,故芯部温度变化相对平缓。

在穿水冷却过程中,圆钢芯部与表层最大温

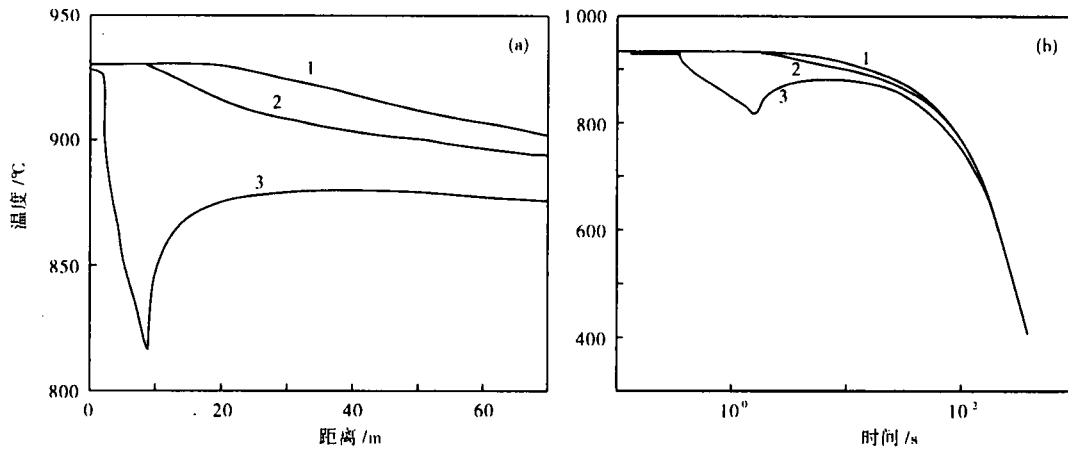


图2 20CrMnTiH $\Phi 35$ mm 圆钢轧后控冷过程温度曲线(1- 芯部;2- 1/2半径处;3- 表层):(a) 距离-温度;(b) 时间-温度

Fig. 2 Temperature distribution curves of $\Phi 35$ mm round bar of 20CrMnTiH steel during controlled cooling: (a) distance vs temperature and (b) time vs temperature; 1- core; 2- 1/2 radius; 3- surface

差约为 $115\text{ }^{\circ}\text{C}$, 在水冷段出口 ($t = 1.63\text{ s}$ 时刻) 圆钢断面径向的温度梯度最大。水冷后的空冷阶段, 芯部热量向表层传递, 导致表层温度回升而芯部温度下降, 同时内外温度趋于一致并缓慢下降。

由于水冷段出口测温点与水冷箱出口之间有一定的空冷距离, 圆钢表层温度有所回复, 圆钢在水冷段出口测温点时的断面温度梯度减小。圆钢在上冷床和下冷床过程中, 其径向的温度梯度逐渐减小。由图 2(b) 可见, 在下冷床时 ($t = 400\text{ s}$ 时刻) 圆钢芯部和表层温度已经趋于一致。表 3 说明在水冷段入口处与出口测温点的温度实测值与圆钢表层温度模拟值是一致的。

从温度场模拟结果和实际生产显示, 20CrMnTiH 圆钢精轧后快速水冷并配合空冷, 有利于抑制奥氏体晶粒长大并获得均匀细小的轧材组织(图 3 所示)。

表 3 20CrMnTiH $\Phi 35$ mm 圆钢冷却过程表层温度实测值与模拟值比较

Table 3 Comparison between simulated and measured temperature of $\Phi 35$ mm bar of 20CrMnTiH steel during cooling process

测温点	对应冷却时间/s	表层温度/ $^{\circ}\text{C}$	
		实测值	模拟值
水冷段入口	0.5	930.0	929.9
水冷段出口	2.7	860.0	864.6
下冷床	400.0	400.0	399.3

4 结论

(1) 通过温度场有限元模拟值与实测值比较分析, 得到了 20CrMnTiH $\Phi 35$ mm 圆钢控冷过程芯部至表层温度场变化规律, 为合理制定控冷工艺方案提供了技术依据。

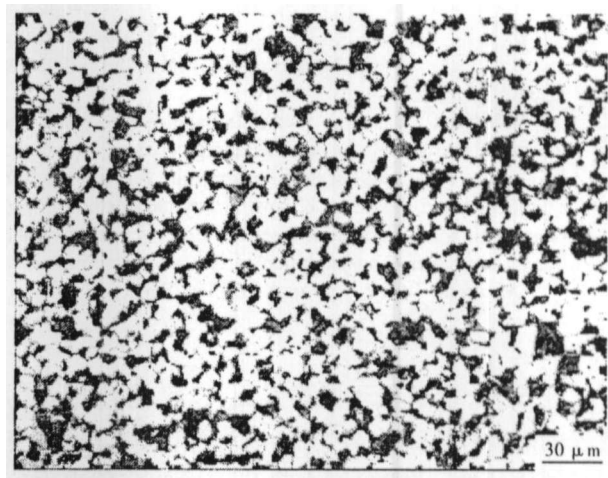


图 3 20CrMnTiH $\Phi 35$ mm 圆钢精轧控冷后的组织

Fig. 3 Structure of $\Phi 35$ mm bar of controlled water cooled 20CrMnTiH steel

(2) 20CrMnTiH 圆钢精轧后采用快速水冷加空冷工艺, 有利于改善 20CrMnTiH $\Phi 35$ mm 圆钢的轧材组织。

参考文献

- 1 吴树漂, 刘占江, 武云峰, 等. 我国齿轮钢的生产与应用. 特殊钢, 2003, 24(5): 30
- 2 孔祥谦. 有限元法在传热学中的应用. 北京: 科学出版社, 1998
- 3 Morales R D, Lopez A G, Olivares I M. Heat Transfer Analysis during Water Spray Cooling of Steel Rods. ISIJ International, 1990, 30: 48
- 4 Laasraoui A, Jonas J J. Prediction of Temperature Distribution, Flow Stress and Microstructure during the Multipass Hot Rolling of Steel Plate and Strip. ISIJ International, 1991, 31: 97
- 5 谭 真, 郭广文. 工程合金热物性. 北京: 冶金工业出版社, 1994

程 满 (1963-), 男, 博士生, 材料成形过程控制与模拟仿真。

收稿日期: 2006-12-08