

· 试验研究 ·

新型 H380 级别高强度钢轨热处理工艺的数值模拟

董嘉兵¹ 王慧军² 陈林¹ 赵桂英²

(1 内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010; 2 内蒙古包钢钢联股份有限公司包钢技术中心, 包头 014010)

摘要 通过计算机数值模拟计算对 H380 级别热处理钢轨的淬火过程进行了分析。钢轨热处理过程是一种鉴于等温转变与连续冷却转变之间的“连续等温转变过程”。计算表明: 对于 H380 级别热处理钢轨温降控制在 200 ~ 250 °C, 钢轨轨头相变温度不应超过 620 °C, 轨头抗拉强度取样位置处珠光体组织相变温度不应超过 650 °C, 相变孕育期为 22 ~ 30 s, 在此段加强冷却强度, 降低珠光体组织相变开始温度。有利于钢轨轨头淬硬层的深化, 提高该级别热处理钢轨抗拉强度。

关键词 H380 级别钢轨 钢轨热处理 数值模拟 力学性能

Numerical Simulation on Heat Treatment Process of H380 New High Strength Steel Rail

Dong Jiabing¹, Wang Huijun², Chen Lin¹ and Zhao Guiying²

(1 School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010; 2 Inner Mongolia Baotou Steel Co Ltd. Baotou Steel Technology Center, Baotou 014010)

Abstract The quenching process of H380 grade heat-treated steel rails is analyzed by computer numerical simulation. The rail heat treatment process is a “continuous isothermal transformation process” between the isothermal transition and the continuous cooling transition. The calculation shows that the temperature drop of the H380 grade heat treatment steel rail is controlled at 200 ~ 250 °C, and the rail head phase transition temperature should not exceed 620 °C, the pearlite structure phase transition temperature at the tensile strength sampling position at the rail head should not exceed 650 °C, and the phase change incubation period is between 22 ~ 30 s. In this section, the cooling intensity is strengthened and the pearlite phase transition temperature is lowered. It is beneficial to the deepening of the hardened layer of the rail head, to increase tensile strength of the heat-treated rail of this grade.

Material Index H380 Grade Rail, Rail Heat Treatment, Numerical Simulation, Mechanical Properties

随着铁路运输日益向重载、高速化发展, 因此对钢轨的耐磨性提出了更高要求, 钢轨强度是提高钢轨耐磨性的显著指标之一^[1-2], 故迫切需要开发高强度热处理钢轨。我国钢轨的组织类型基本分为珠光体组织钢轨和贝马复相组织钢轨^[3], 按是否经过热处理分为热轧态钢轨和热处理钢轨, 其中热处理钢轨按强度级别又可分为: 320HB 级别、340HB 级别及 370HB 级别钢轨, 其中最高级别 370HB 钢轨的抗拉强度 $\geq 1\ 280$ MPa, 为目前钢轨标准体系内最高强度级别钢轨。上述强度级别内钢轨均为高碳珠光体组织钢轨, 计算了珠光体钢轨的热处理过程, 得出钢轨轨头上圆角效应导致钢轨上圆弧冷却速度快于轨头踏面, 从而导致轨头上圆角内部易于出现异常组织, 引起钢轨抗拉强度不合格^[4]。珠光体组织片层间距细化, 控制过冷度是关键, 同时应该考虑构件内

部相变温度及孕育期, 对于结构复杂的大型构件更需注意^[5-6]。热处理过程中的过冷度, 往往是构件表面的冷却速度, 对于材料表面珠光体组织转变, 其片层间距与过冷度关系一致性较好, 对其内部珠光体组织片层间距的控制, 应进行精细化控制, 否则产生较大误差, 不能达到细化珠光体片层间距的目的。本文通过对 380HB (H380) 级别钢轨的热处理过程进行模拟计算, 解决了该级别热处理钢轨强度和踏面硬度不足的问题, 确定了该级别钢轨热处理过程中的操作要点, 优化了热处理工艺参数, 解决了钢轨抗拉强度不足的问题。

1 钢轨淬火过程换热系数计算

H380 级别钢轨成分见表 1 所示。

根据热处理钢轨实际生产情况, 在 DEFORM-

表 1 H380 级别钢轨化学成分/%
Table 1 Chemical composition of H380 grade rail/%

C	Si	Mn	Cr	Nb
0.75~0.85	0.60~0.75	0.8~1.0	0.25~0.55	0.02~0.03

3D 中建立 75 kg/m 钢轨的计算模型,确定钢轨的热处理温降梯度,钢轨终轧温度 900~950 °C,终轧后经过空冷,最后进入淬火机组进行热处理。根据珠光体组织相变的平衡转变相图,钢轨进入淬火线的温度范围在 750~850 °C,考虑到淬火机组的冷却能力,调整钢轨入淬火线温度。模拟计算淬火速度 1 m/s,淬火过程温降分为四段,第一段温降 120 °C、第二段温降 30 °C、第三段温降 30 °C 及第四段温降 20 °C,总计温降 200 °C。

根据制定的模拟温降计算工艺,从开始淬火到淬火结束时间为 130 s,淬火温降分为四段,每段淬火时间 32 s。利用有限元反传热法计算温降节点处,不同温降梯度下对应的换热系数,计算结果见表 2 所示^[7-8]。

表 2 不同温降下钢轨各位置的换热系数/ $1000\text{w} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{k})^{-1}$
Table 2 Heat transfer coefficients at each position of the rail at different temperature drops/ $1000\text{w} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{k})^{-1}$

位置	930~750 °C	120 °C	30 °C	30 °C	20 °C
轨头	0.16	0.30	0.55	0.43	0.34
上三角区	0.16	0.40	0.47	0.68	0.56
轨腰	0.16	0.40	0.47	0.22	0.12
下三角区	0.16	0.30	0.55	0.68	0.34
轨底	0.16	0.36	0.56	0.535	0.35

2 计算结果及分析

通过钢轨不同位置,各个节点温度对应的换热系数,模拟计算钢轨从终轧 CCS (Cross Cut Shear) 后、经过走钢轨道、进入淬火机组及淬火后空冷过程的温度、组织变化,分析 H380 级别热处理钢轨踏面硬度不足、抗拉强度偏低等问题,对钢轨轨头踏面、上圆弧及侧面处监测点位置及对应的温降曲线见图 1 所示。

钢轨踏面珠光体组织转变所需孕育期 22 s,对应相变温度 621 °C;钢轨侧面珠光体组织转变所需

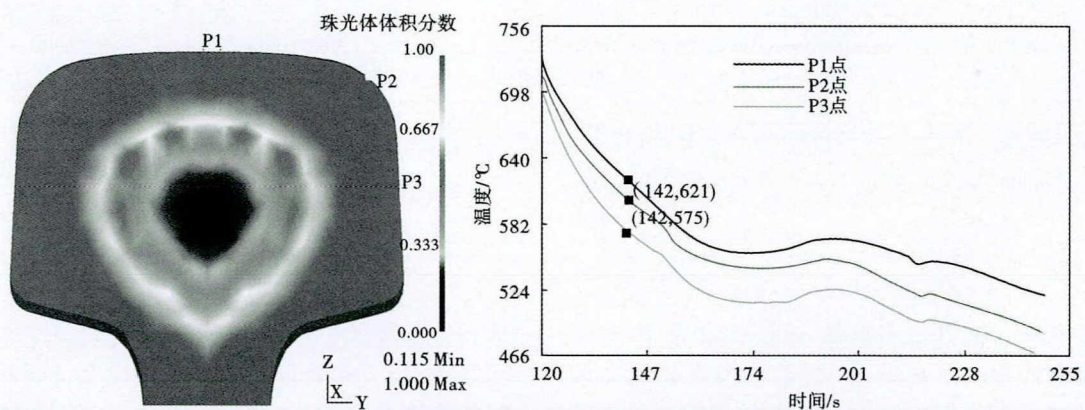


图 1 轨头位置取点及对应温降曲线

Fig. 1 Position of rail head and corresponding temperature drop curve

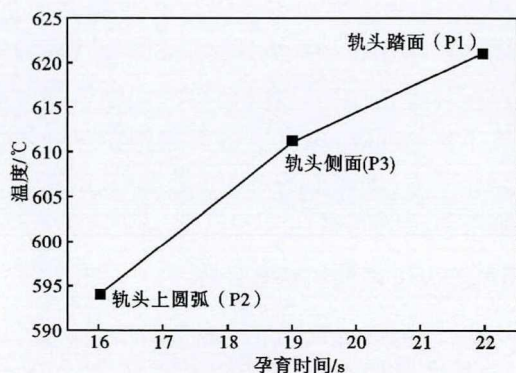


图 2 轨头三点处孕育期及相变温度曲线

Fig. 2 Curves of incubation period and phase transition temperature at three points of rail head

孕育期 19 s,对应相变温度 611 °C;钢轨上圆弧珠光体组织转变所需孕育期 16 s,对应相变温度 594 °C,见图 2 所示。

由图 2 可知,钢轨轨头上圆弧珠光体组织转变所需相变孕育期最短,相变开始温度最低,轨头侧面相变温度及所需孕育期次之,轨头踏面珠光体组织转变所需相变孕育期最长,且相变开始温度最高,钢轨轨头三个位置的扫描组织形貌,见图 3 所示,三个位置对应的珠光体组织片层间距见表 3 所示。

由表 3 珠光体组织片层间距测量值和图 2 计算值可知,轨头踏面珠光体组织片层间距最大,轨头踏面珠光体组织转变温度最高、孕育期最长;轨头上圆

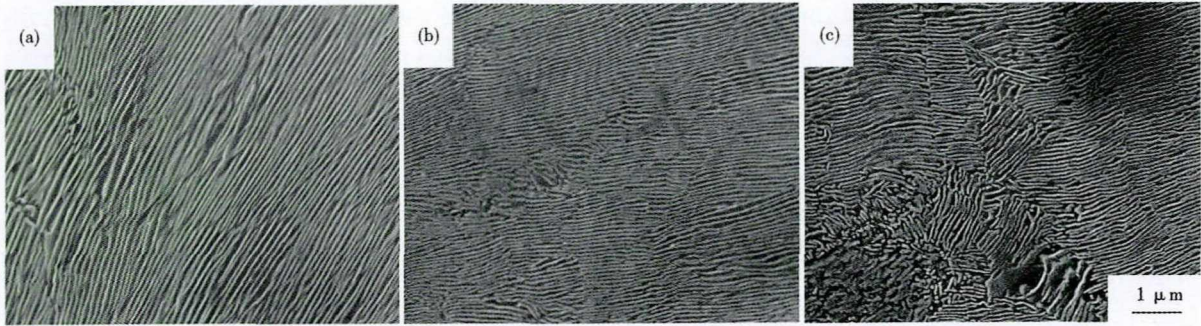


图 3 轨头表面组织形貌:(a)踏面;(b)上圆弧;(c)侧面
Fig.3 Morphology of structure of rail head surface:(a) tread;(b) upper arc;(c) side

弧珠光体组织片层间距最小,所对应的珠光体组织转变温度最低、孕育期最短。

由图 4(a) 钢轨截面组织转变云图可知,当 P1 点处轨头侧面组织转变 100% 时,钢轨截面上轨头踏面珠光体组织转变量厚度为 6.4 mm,轨头上圆弧

表 3 钢轨轨头珠光体片层间距
Table 3 Pearlite laminar distance of rail head

轨头位置	间距/ μm
轨头踏面(P1)	0.152 3
轨头上圆弧(P2)	0.070 2
轨头侧面(P3)	0.092 7

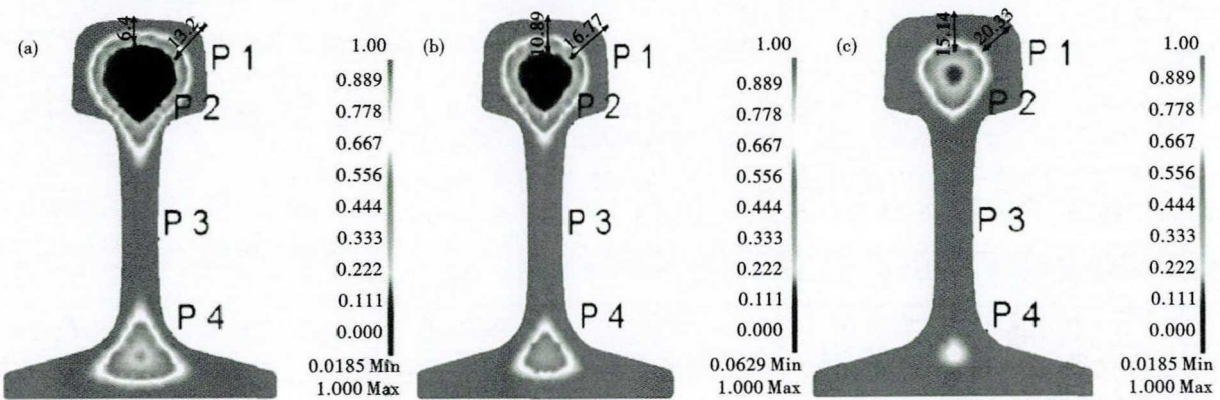


图 4 P1 点珠光体转变 100% (a), P1 ~ P4 点珠光体转变 100% (b) 和钢轨出淬火线(c) 钢轨断面珠光体组织转变量
Fig.4 Transformation amount of pearlite structure of rail profile as P1 point pearlite transformation 100% (a), P1 ~ P4 point pearlite transformation 100% (b) and rail left quenching line (c)

珠光体组织转变量厚度为 13.2 mm,整个轨头未转变的珠光体量所占轨头百分含量 58.16%。

由图 4(b) 组织转变云图可知,当监测四点组织转变达到 100% 时,钢轨轨头踏面珠光体组织转变厚度 10.89 mm,轨头上圆弧珠光体组织转变量厚度 16.77 mm,整个轨头未转变的珠光体量所占轨头百分含量 49.29%。

钢轨后,钢轨轨头截面珠光体组织转变量,轨头踏面厚度为 15.14 mm,轨头上圆弧厚度为 20.33 mm,整个轨头未转变的珠光体量所占轨头百分含量 28.74%,见图 4(c) 所示。

图 5 为钢轨拉伸试样的取样位置,由图 3 ~ 图 4 钢轨截面组织转变图可以看出,钢轨出淬火线后,轨头上圆弧珠光体组织转变厚度为 20.33 mm,即:淬

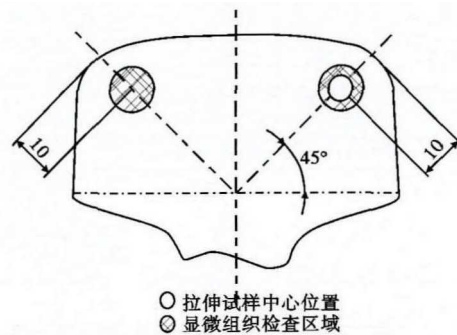


图 5 拉伸试样取样图示
Fig.5 Sampling of tensile sample

火过程中硬化层厚度为 20.33 mm,根据钢轨拉伸实验的取样方式,变形区直径 $S_0 = 5 \text{ mm}$ 。

当拉伸试样变形区直径为 5 mm 时,钢轨上圆

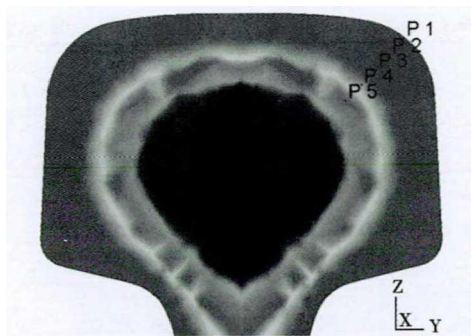


图 6 轨头 B 线上取样 5 点处
Fig. 6 Sampling at 5 points on rail head B line

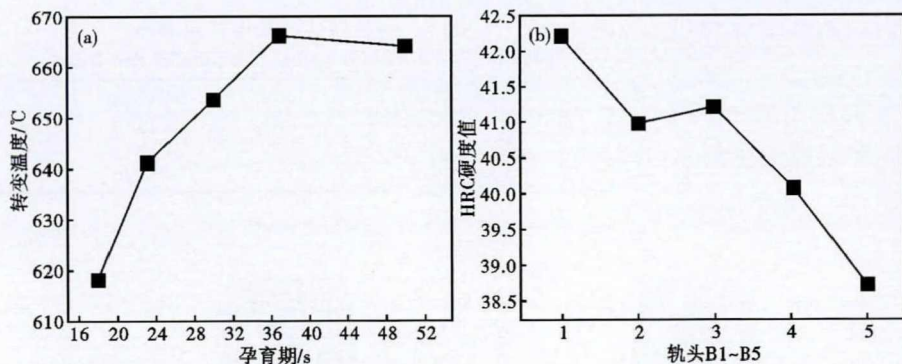


图 7 轨头 B 线五点孕育期及对应转变温度(a)和洛氏硬度值(b)
Fig. 7 Five-point incubation period of rail head B line and corresponding transition temperature (a) and Rockwell hardness value (b)

弧取样为淬火组织,至少厚度应为 12.5 mm,这个厚度为最小厚度,另外在试样加工过程中产生的取样误差,使得淬火后上圆弧珠光体组织转变厚度应大于 12.5 mm 时,才能保证抗拉强度的合格率,否则就容易引起抗拉强度不合格。这也是 60 kg/m 钢轨淬火合格率高,75 kg/m 钢轨淬火不容易合格的问题所在。

在钢轨轨头 B 线上取 5 点进行跟踪观察,取点位置见图 6 所示。分析钢轨断面组织转变时间及对应温度,进一步分析引起热处理钢轨抗拉强度不合格的原因,将钢轨轨头 B 线(与轨头踏面垂线夹角成 45°)五点处,组织转变 1% 时为该点相变开始点,对应温度为相变温度,淬火开始到相变量 1% 时的时间为相变的孕育期,五点的相变温度和相变孕育期,见图 7(a)所示。

由图 7(a)可以看出,进入淬

火线后从 P1 点 ~ P5 点相变的孕育期增长,相变温度提高,最短孕育期为 18 s,最低相变温度 618 °C,最长孕育期 50 s,最高温度 664 °C。珠光体钢轨淬火过程即“非等温转变也非典型的连续冷却转”,是一种鉴于二者之间的近似连冷等温转变,那么问题在于淬火过程中主要的目的是细化珠光体组织的片层间距,冷速增大片层细化明显,钢轨强度、硬度相应提高显著。对于钢轨淬火这种近似连冷转变过程,细化珠光体组织片层间距,是否单一依靠增加冷速到达细化的目的,课题组认为有待进一步研究和

论证,因为在钢轨内部其冷速是较为缓慢的,对于这种相对特殊的淬火工艺,课题组认为钢轨进入淬火线后较短的相转变孕育期和低的相变温度是影响珠光体钢轨片层间距粗细的主要原因。

由图 7(b)可以看出,钢轨轨头 B 线横断面洛氏硬度的递减规律,与轨头 B 线五点孕育期和对应相变温度曲线变化成负相关,即孕育期越短、相变温度越低,对应的洛氏硬度越

高,相应的珠光体组织的片层间距越细小。钢轨轨头 B 线 P2 和 P3 点为抗拉强度试样取样位置,此处相变孕育期为 22 ~ 30 s,应在此淬火开始后时间段

表 4 H380 级别钢轨优化热处理后的力学性能

Table 4 H380 grade steel rail mechanical properties by optimized heat treatment

熔炼号	抗拉强度/MPa	延伸率/%	踏面 HBW 硬度值				
			1 点	2 点	3 点	4 点	5 点
17805169	1 330	12.0	404	407	405	403	403
17805167	1 330	10.5	400	409	413	406	408
17805168	1 313	10.0	407	408	402	403	400

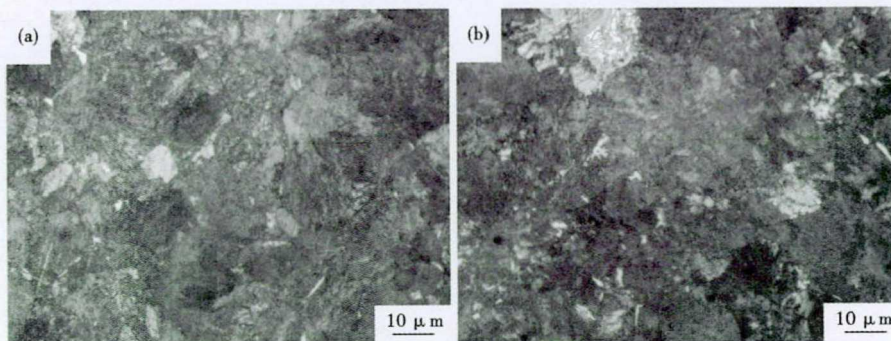


图 8 轨头踏面(a)及上圆弧(b)微观组织
Fig. 8 Microstructure of rail head tread (a) and upper arc (b)

内加强冷却强度,降低此点处相变开始温度,且相变开始温度不应超过 650 ℃,达到细化珠光体组织片层的目的,是提高钢轨抗拉强度及踏面硬度的关键。

按钢轨生产技术规范,冶炼 3 炉(每炉单重 150 t),采用连铸工艺,连铸坯断面 280 mm × 380 mm,坯长 7.2 m。连铸坯采用三段式加热工艺,加热温度 1 100 ~ 1 280 ℃,加热时长 2.5 h 以上,钢轨开轧温度 1 080 ~ 1 130 ℃,钢轨经过粗轧和精轧后,终轧温度控制在 900 ~ 950 ℃。通过上述模拟计算结果确定的热处理工艺,按入淬火线温度(780 ± 10) ℃,钢轨表面温度 620 ℃时,加强冷却 10 s 以上,钢轨出淬火线温度(550 ± 20) ℃控制,生产现场进行热处理调试,调试结果见表 4 所示。

由表 4 可知,钢轨抗拉强度 ≥ 1 300 MPa,踏面 HB 硬度值 ≥ 380,延伸率 ≥ 9%,满足设计要求,钢轨显微组织(即细片状珠光体组织),见图 8 所示。

3 结论

(1)对于钢轨热处理,属于一种近似连铸冷却等温转变过程,仅仅通过钢轨表面过冷度,控制钢轨内部珠光体组织片层间距达到提高钢轨强度目的存在较大误差,需要对钢轨内部珠光体组织相变孕育期及相变开始温度进行精细化控制。

(2)H380 级别高碳珠光体钢轨的热处理,其淬火冷却强度应保证温降控制在 200 ~ 250 ℃,钢轨轨

头相变温度不应超过 620 ℃,轨头抗拉强度取样位置处珠光体组织相变温度不应超过 650 ℃,相变孕育期在 22 ~ 30 s,应加强冷却强度,降低珠光体组织相变开始温度,有利于深化钢轨轨头淬硬层和提高钢轨抗拉强度。

内蒙古重大专项资助项目(zdxx2018024)

参考文献

- [1]徐玉坡.重载铁路加强型钢轨接头研究[J].中国铁道科学,2017,27(1):22-27.
- [2]周清跃,王树青,张银花.加快全长淬火钢轨使用步伐形成钢轨使用良性循环[J].材料工程,1998,16(6):22-24.
- [3]张芳.贝氏体钢轨空冷过程中组织和应力的数值模拟分析[D].包头:内蒙古科技大学,2015.
- [4]刘天模,范镜弘,汪凌云.铁路重轨钢热处理过程的计算机模拟[J].钢铁研究学报,2003,15(2):38-43.
- [5]梁宇,余凌峰,梁益龙.珠光体钢微观组织与拉伸性能关系[J].材料热处理学报,2013,34(7):74-77.
- [6]吴庆辉,杨忠民,陈颖,等.奥氏体化温度对珠光体轨钢组织和性能的影响[J].热加工工艺,2012,41(14):111-114.
- [7]陈林,王慧军,陈昆宇.基于有限元法计算重轨钢淬火过程的换热系数[J].特殊钢,2016,37(4):13-17.
- [8]曾京威,李自良.雾化气体淬火时表面综合换热系数的计算[J].材料导报,2013,27(11):151-154.

董嘉兵(1988-),男,硕士生,2012年内蒙古科技大学(本科)毕业,金属材料性能工艺研究。
E-mail:1262433530@qq.com

收稿日期:2020-01-06

欢迎订阅《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号、新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社

电话:0714-6297386 6297313 0714-6297888-8010