

等温温度对低碳齿轮钢带状组织的影响

蔡珍¹ 黄运华² 张跃^{1,2} 周立新³ 陈长西³ 李博鹏³

(北京科技大学 1 新金属材料国家重点实验室; 2 材料科学与工程学院, 北京 100083;

3 湖北新冶钢有限公司, 黄石 435001)

摘要 通过计算铁素体形核孕育期和形核率探讨了等温温度对带状组织的影响机理,并观察了齿轮钢 SAE8822H(∕% :0.22C,0.20Si,0.98Mn,0.60Cr,0.46Ni,0.36Mo)在管式炉经 930 ℃ 10 min 降至 703 ~ 579 ℃ 等温 1 h 空冷,或 710 ~ 570 ℃ 等温处理 2 h 炉冷后钢中带状组织演变。结果表明,贫、富溶质区铁素体形核孕育时间差和铁素体形核率差异是造成等温转变时产生带状的原因;等温温度降低时,贫、富溶质区的孕育期时间差缩短,相对形核率减少,带状减轻;齿轮钢 SAE8822H 在 570 ℃ 等温可使带状组织消失,这时相对形核率为 6.3%。

关键词 齿轮钢 带状组织 等温温度 孕育期时间差 相对形核率

Effect of Isothermal Temperature on Banded Structure in Low Carbon Gear Steel

Cai Zhen¹, Huang Yunhua², Zhang Yue^{1,2}, Zhou Lixin³, Chen Changxi³ and Li Bopeng³

(1 State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, 2 School of Material Science and Technology, University of Science and Technology, Beijing 100083; 3 Hubei Xinyesteel Corp Ltd, Huangshi 435001)

Abstract The mechanism of effect of isothermal temperature on banded structure is delved by calculation of ferrite incubation period and nucleation rate, and the evolution of banded structure in sample of gear steel SAE8822H (∕% : 0.22C, 0.20Si, 0.98Mn, 0.60Cr, 0.46Ni, 0.36Mo) heated in tube furnace at 930 ℃ for 10 min and isothermal-treated at 703 ~ 579 ℃ for 1 h, air cooling, or isothermal-treated at 710 ~ 570 ℃ for 2 h, furnace cooling is observed. Results show that the difference of incubation period and difference of nucleation rate of ferrite between solute-depleted zone and solute-richened zone are the causes to produce banded structure; with decreasing the isothermal temperature, the difference of incubation period between solute-depleted and solute-richened zone reduces and the relative nucleation rate also decreases, lead to relieving the banded structure of steel; for steel SAE8822H, isothermal treatment at 570 ℃ is available to eliminate banded structure, in this case the relative nucleation rate is 6.3%.

Material Index Gear Steel, Banded Structure, Isothermal Temperature, Difference of Incubation Period, Relative Nucleation Rate

一般要求齿轮钢的带状组织^[1]不超过 3 级^[2]。在机械加工前,齿轮钢必须具有均匀的显微组织^[3],所以,齿轮钢一般采用等温转变,一方面可以保证均匀的组织,另一方面可以避免产生贝氏体,改善齿轮钢的切削加工性^[4]。

带状组织产生的根本原因在于合金元素的枝晶偏析,其中影响带状组织程度最大的是 Mn 和 Si 元素^[5]。等温转变能够有效防止带状组织的产生^[6,7],可采用中子去极化实验测定了等温转变曲线,研究等温温度对带状组织的影响^[8]。

1 理论及计算过程说明

亚共析钢的过冷奥氏体等温转变可由 TTT (Time Temperature Transformation) 曲线(又称 C 曲线)表示^[9]。等温转变一般在 A_1 以下某一温度进

行^[10],孕育期时间长短代表着奥氏体的稳定性,影响孕育期长短的因素有温度、碳含量、合金元素的含量等^[9]。

带状组织根本上是由枝晶偏析导致其产生的,一般情况下,贫溶质区和富溶质区分别对应于先结晶的枝晶干和后结晶的枝晶间。贫溶质区和富溶质区的孕育期时间差越大,碳扩散的距离就越长,带状组织就越严重^[11]。孕育期可由式(1)计算^[12]:

$$\tau_i = \frac{12a^4 k_B T \sigma_\alpha}{\Delta G_v^2 x_\gamma \nu_\alpha^2 D_C^\gamma} \quad (1)$$

式中: a -铁素体和奥氏体相平均晶格常数; k_B -波尔兹曼常数; T -热力学温度; σ_α -无序铁素体的界面能,一般取 0.705 J/m^2 ^[13]; D_C^γ -碳在奥氏体中的扩

散系数; x_γ - 碳在奥氏体中的摩尔浓度; v_α - 铁素体中一个铁原子的体积; ΔG_v - 形核过程中铁素体体积自由能的改变量^[14]。

由于合金元素含量不同, 贫、富溶质区的铁素体形核驱动力也不同, 形核率也就不一样。一般贫溶质区的形核驱动力较大, 那么铁素体形核速率就较快, 相比于富溶质区排出的碳较多, 这些富余的碳会向富溶质区扩散。同样的, 贫、富溶质区的铁素体形核率差异越大, 贫溶质区向富溶质区扩散的碳越多, 带状组织就越严重。铁素体相对形核率 r_c 如下^[8]:

$$r_c = \frac{I_{Fp} - I_{Ff}}{I_{Fp}} \quad (2)$$

式中: I_{Fp} 、 I_{Ff} - 贫、富溶质区的铁素体形核率, 形核率的计算公式^[15]如式(3)所示:

$$I_F = \frac{k_1 D_c}{T^{1/2}} \exp\left(-\frac{k_2}{RT\Delta G^2}\right) \quad (3)$$

其中 $k_1 = 476\,528 \text{ cm/K}^{1/2}$, $k_2 = 1.14 \times 10^9 \text{ J}^3/\text{mol}^3$, ΔG 是铁素体形核自由能变化。

2 计算过程及结果分析

实验钢为钢厂生产的 SAE8822H 钢 (/%): 0.22C-0.20Si-0.98Mn-0.60Cr-0.46Ni-0.36Mo, 断面尺寸为 $\Phi 130 \text{ mm}$ 。最终经过的热处理为等温正火: 930 °C 1 h, 620 °C 2 h 后空冷至室温, 热处理后带状组织级别为 2.5 级, 如图 1 所示。

为了考察合金元素在贫、富溶质区的含量, 切取轧向试样后先进行退火, 使枝晶偏析完全显现, 磨制、抛光、腐蚀后, 用 JEOL JXA-8100 电子探针 X 射线显微分析仪对铁素体带和珠光体带中的主要合金

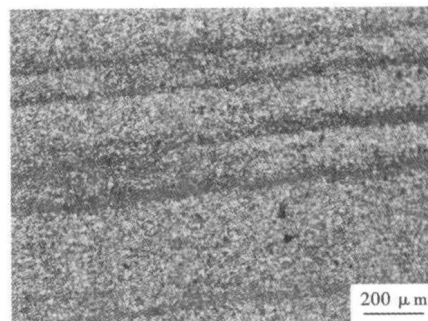


图 1 SAE8822H 钢原始带状组织形貌

Fig. 1 Morphology of original banded structure of steel SAE8822H

表 1 珠光体带和铁素体带的平均溶质含量/%

Table 1 Average solute concentration in ferrite band and pearlite band / %

组织区域	Mn	Si	Mo	Ni	Cr
珠光体带	0.67	0.18	0.38	0.46	0.85
铁素体带	0.51	0.15	0.27	0.36	0.71

元素分别进行定量检测, 得出铁素体带和珠光体带的平均化学成分如表 1 所示。

钢中合金元素对奥氏体中碳的活度存在影响^[16], 根据文献^[17]计算出贫溶质区与富溶质区的碳浓度差约为 0.063 3%。

用式(1)计算贫溶质区和富溶质区析出铁素体的孕育期, 温度对铁素体孕育时间的影响如图 2(a) 所示。从图 2(a) 可以看出, 随着温度的降低, 不管是贫溶质区还是富溶质区, 铁素体孕育时间都缩短, 这是由于等温温度降低会使过冷度增大, 进而增大形核驱动力。另外, 贫溶质区的孕育时间比富溶质区的孕育时间短, 这与合金元素使 C 曲线右移是相符合的。

从图 2(b) 可以看出, 等温温度降低时, 贫、富溶

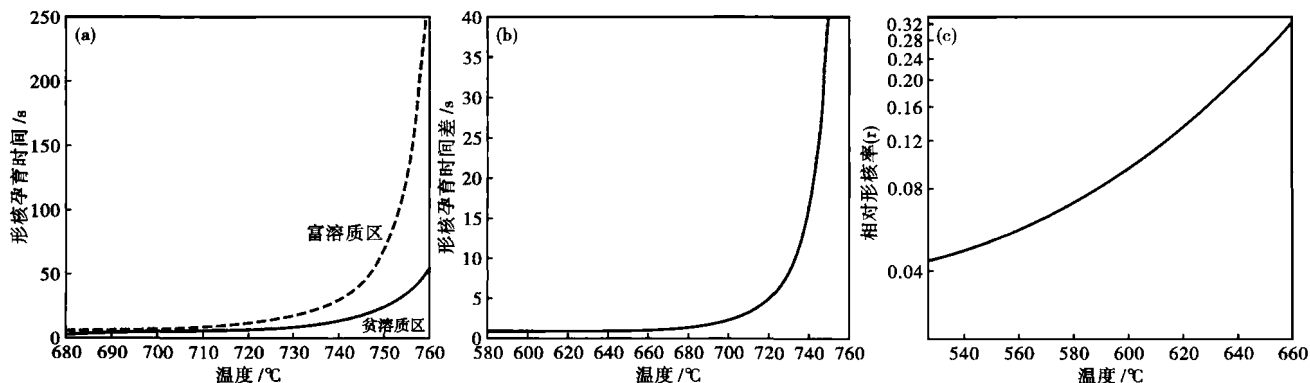


图 2 温度对先共析铁素体孕育时间(a)、形核孕育时间差(b)和相对形核率差异(c)的影响

Fig. 2 Effect of temperature on proeutectoid ferrite incubation period (a), difference of ferrite nucleation incubation period between solute-depleted and -richened zone (b) and difference of ferrite relative nucleation rate between solute-depleted and -richened zone (c)

质区铁素体形核孕育期时间差减少,特别是在 730 ℃ 以上时,孕育期时间差随温度降低下降特别快,当温度在 660 ℃ 左右时,贫、富溶质区差不多同时开始铁素体形核。

随着温度的降低,铁素体相对形核率减少,即贫溶质区和富溶质区的形核率差异减小(图 2c)。

3 实验结果及分析

奥氏体化温度选为 930 ℃,采用长型热电偶测量了中心温度为 930 ℃ 时石英管内的温度分布。实验时将试样按照温度分布规律放入石英试管中,将石英试管拖到管式炉中心(中心一段均为 930 ℃),使试样在管式炉中心奥氏体化后,将石英管拉到较低温度区,刚好使这几个试样分别处于设定的温度进行等温转变,如图 3 所示。

试样在 930 ℃ 保温 10 min 后迅速降温至等温转变温度,保温 1 h 后空冷。703、668、630、579 ℃ 等温转变后的组织形貌如图 4 所示。

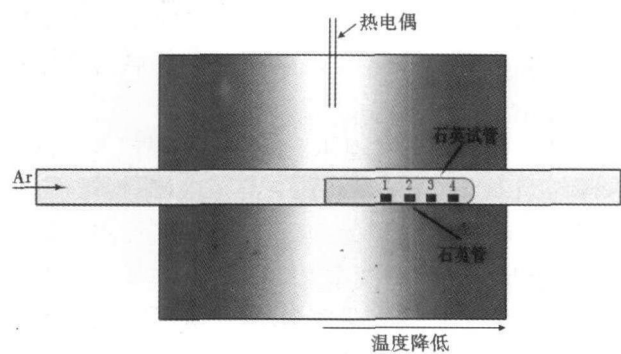


图3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematics of experimental device

在 703、668、630 ℃ 保温 1 h 空冷后,试样中出现非平衡组织-贝氏体,说明奥氏体未完全转变,而在 579 ℃ 等温的试样中组织为铁素体和珠光体组织。可以看出,等温 1 h 后,随着等温温度降低,非平衡相所占体积分数越少,即温度越低,奥氏体转变速率越大(这时孕育期时间很短),这与 C 曲线的规

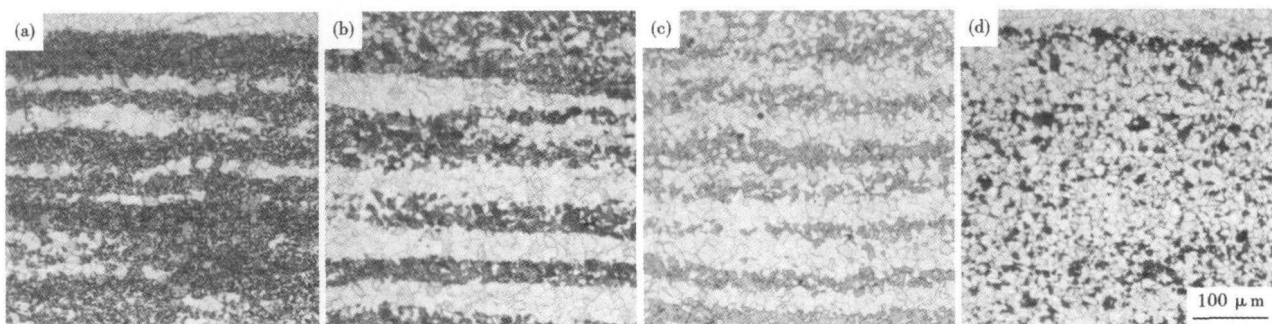


图4 (a)703 ℃,(b)668 ℃,(c)630 ℃,(d)579 ℃等温 1 h 后空冷 SAE8822H 钢试样的组织形貌

Fig. 4 Morphology of structure of steel SAE8822H sample isothermal-treated at 703 ℃ (a), 668 ℃ (b), 630 ℃ (c) and 579 ℃ (d) for 1 h, air cooling

律是符合的,说明采用管式炉控制等温温度的试验方法是可行的。

图 4(a, b, c) 中的带状组织分别是等温时生成的铁素体条带和残余奥氏体在空冷时生成的贝氏体,说明铁素体优先在贫溶质区形核并发展为铁素体条带,而富溶质区内铁素体转变受到抑制,揭示了等温转变时带状组织的形成过程。值得注意的是,在 668 ℃ 等温空冷后时,贝氏体条带内有一些铁素体组织,说明在此温度保温时,贫、富溶质区孕育期时间差很短,这与之前的计算结果符合。

为了使奥氏体在等温时完全转变,将保温时间延长到 2 h,选取为 710、665、633、604、570 ℃ 等温转变后炉冷至室温,其组织形貌如图 5 所示。

在 710 ℃ 保温 2 h 后,“竹节状”的珠光体带分

布在铁素体基体上,说明该位置上的原奥氏体晶粒完全转变为珠光体,铁素体带和珠光体带界面清晰,带状程度严重。在 665 ℃ 保温 2 h 后,由于等温温度较低,铁素体晶粒比 710 ℃ 时要小,“竹节状”消失,部分珠光体条带内铁素体数量增多。在 633 ℃ 等温时,几乎所有的珠光体条带内铁素体数量增多。在 604 ℃ 等温时,珠光体带状变为“链状”,意味着富溶质区铁素体数量继续增加,此外贫溶质区也出现了珠光体组织。在 570 ℃ 等温时,铁素体和珠光体分布均匀,没有明显的铁素体带和珠光体带,带状组织基本消失。

综上所述,随着等温温度的降低,首先是贫、富溶质区的铁素体孕育期时间差随温度降低而缩短,在 660 ℃ 左右贫、富溶质区几乎同时形核,富溶质区

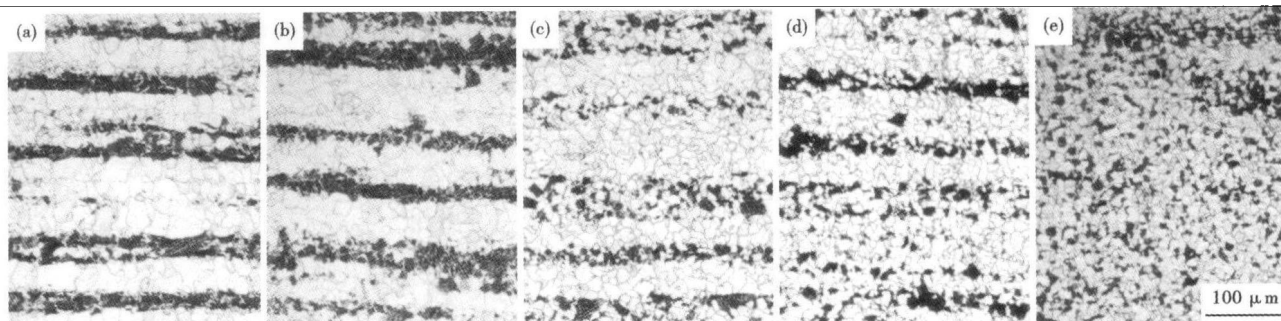


图 5 (a)710 °C, (b)665 °C, (c)633 °C, (d)604 °C, (e)570 °C 等温 2 h 后炉冷 SAE8822H 钢试样的组织形貌

Fig. 5 Morphology of structure of steel SAE8822H sample isothermal-treated at 710 °C (a), 665 °C (b), 633 °C (c), 604 °C (d) and 570 °C (e) for 2 h, furnace cooling

中开始析出铁素体组织。等温温度继续降低,珠光体条带中铁素体数量相对增多,珠光体条带变得不连续,这是由于铁素体相对形核率减小,在贫溶质区内铁素体形核时,富溶质区的铁素体核心数量相对增多。随着等温温度进一步降低,相对形核率继续减少,贫溶质区向富溶质区扩散的碳减少,珠光体在贫溶质区出现,珠光体和铁素体分布越来越均匀。温度降到 570 °C 后,这时相对形核率为 6.3%,贫、富溶质区的反应进度几乎一样,铁素体带和珠光体带基本消失,这与 Offerman^[8] 得出当相对形核率减小到 6%~8% 时,带状组织消失的结论是一致的。

4 结论

(1) 贫、富溶质区铁素体产生的孕育期时间差

以及铁素体形核率差异是造成等温转变时带状组织产生的原因。

(2) 等温温度越低,奥氏体转变的孕育期越短,转变速率越高。

(3) 贫、富溶质区的孕育期时间差随温度降低而缩短,在 660 °C 左右贫、富溶质区几乎同时形核;温度进一步降低,贫、富溶质区的相对形核率对带状程度起决定作用,且相对形核率随温度降低也减少。

(4) 随着等温温度降低,带状程度减轻。SAE8822H 采用 570 °C 保温 1 h 空冷时,相对形核率为 6.3%,珠光体和铁素体分布均匀,没有明显的带状组织。

国家自然科学基金项目资助(51172022)

参考文献

- 张延玲,刘海英,阮小江. 中低碳齿轮钢中合金元素的偏析行为及其对带状组织的影响. 北京科技大学学报, 2009, 31(增刊): 199
- 陈 铁, 张德顺, 诸葛增钰. 世界内燃机材料与工艺进展. 北京: 中国内燃机学会材料与工艺分会, 1991
- 北京齿轮厂. 格利深锥齿轮技术资料译文集. 北京: 机械工业出版社, 1983
- 武汉齿轮厂, 湖北齿轮厂, 武汉大学金属物理教研室. 低合金渗碳齿轮钢中的粒状贝氏体组织. 武汉大学学报(理学版), 1978, 3: 43
- Samuels L E. Light Microscopy of Carbon Steels. New York: ASM International, 1999
- 王 鹏, 曹明宇. 消除与改善渗碳钢带状组织的措施. 金属热处理, 2010, 35(2): 109
- 谢文新, 李国忠, 曹红福. 热处理工艺对 SAE8620H 低碳齿轮钢带状组织的影响. 特殊钢, 2009, 30(1): 58
- Offerman S E, Vandijk N H, Rekveldt M T. Ferrite/Pearlite Band Formation in Hot Rolled Medium Carbon Steel. Materials Science and Technology, 2002, 18: 297
- 赵 品, 谢辅洲, 孙振国. 材料科学基础教程. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002
- 刘永铨. 钢的热处理. 北京: 冶金工业出版社, 1987
- Grossterlinden R, Kawalla R, Lotter U. Formation of Pearlitic Banded Structures in Ferritic-pearlitic Steels. Steel Research, 1992, 63(8): 331
- 王平吉, 周晓光, 吴 迪. 连续冷却过程中铁素体相变温度的模拟. 材料与冶金学报, 2006, 5(1): 57
- Capdevila C, Garcia De Andres C, Caballero F G. Incubation Time of Isothermally Transformed Allotriomorphic Ferrite in Medium Carbon Steels. Scripta Mater, 2001, 44: 129
- 徐祖耀. Fe-C 合金贝氏体相变热力学(KRC 模型). 金属学报, 1985, 21(2): 107
- 刘振宇, 许云波, 王国栋. 热轧钢材组织-性能演变的模拟和预测. 沈阳: 东北大学出版社, 2004
- Bodsworth C, Davidson M I, Atkinson D. Thermodynamic Properties of Interstitial Solution of Iron-base Alloys. Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 1968, 242: 1135
- 郑成悌, 陈 政. 用活度计算扩散过程中的碳浓度. 金属热处理学报, 1991, 12(2): 43

蔡 珍(1987-), 女, 硕士研究生, 2009 年武汉科技大学毕业, 特殊钢带状组织研究。

收稿日期: 2012-01-26