

冷却速度对热轧40CrMo圆钢组织的影响

邓素怀 王丽萍 杨子森 易敏

(首钢技术研究院,北京100043)

摘要 连续式棒材轧机生产Φ70~80 mm 40CrMo系圆钢(∕%: 0.40~0.41C, 0.97~1.05Cr, 0.17Mo)时,由于轧制道次少,终轧后无控制冷却装置,易出现珠光体+铁素体和贝氏体+马氏体两种类型组织。通过Gleeble-2000热模拟试验机测试炉批No1和炉批No2这两类原始组织试样的连续冷却转变(CCT)曲线和研究了该钢150℃保温5 min后以10℃/s冷至900℃停留10 s,以变形速率20 s⁻¹变形30%再以0.2~10℃/s冷却至200℃的组织 and 微区成分。结果表明,轧后冷却速度大则产生马氏体组织,40CrMo系圆钢在0.1~1℃/s冷却速度下可获得正常的贝氏体组织和珠光体组织。

关键词 40CrMo钢 圆棒材 热轧 冷却速度 组织

Effect of Cooling Rate on Structure of Hot Rolled Round Bar of Steel 40CrMo

Deng Suhuai, Wang Liping, Yang Zisen and Yi Min

(Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043)

Abstract Owing to less rolling passes and non-control cooling rate device after finishing rolling, the two kinds of structure-pearlite + ferrite and bainite + martensite in Φ70 ~ 80 mm round bar of steel 40CrMo (∕%: 0.40 ~ 0.41C, 0.97 ~ 1.05Cr, 0.17Mo) produced by continuous rolling mill strain easily occur. By using Gleeble-2000 thermal simulation machine the continuous cooling transformation (CCT) curves of two kinds of original structure specimens of heat batch No1 and No2 are measured, and the structure and micro-region analysis of finished products by heating at 150℃ for 5 min then cooling with 10℃/s to 900℃ for 10 s and deforming 30% with strain rate 20 s⁻¹ and cooling with 0.2 ~ 10℃/s to 200℃ are studied. Results show that the martensite structure occurs as the finished products is cooling with large cooling rate after rolling; with cooling speed 0.1 ~ 1℃/s for round bar after rolling the steel 40CrMo can get normal structure i. e. bainite and/or pearlite structure.

Material Index Steel 40CrMo, Round Bar, Hot Rolling, Cooling Rate, Structure

近年来,国内企业陆续引进新的棒材生产线多采用连续式轧机进行生产,圆钢产品规格为Φ14~150 mm^[1]。

由意大利引进的POMINI棒材生产线,其生产的规格范围为Φ14~80 mm,产品以合金结构钢、齿轮钢、抽油杆钢、轴承钢等特殊钢为主。该条生产线在粗轧、中轧机组后配置了机间冷却装置和轧后冷却装置。通过水冷装置对棒材进行控冷轧制,可获得合适的组织性能,尤其适用于轴承钢网状碳化物的控制^[2]。对于Φ70~80 mm的40CrMo系圆钢,经过10架轧机后出成品,在热轧组织中出现珠光体+铁素体和贝氏体+马氏体两种类型组织,后者组织中存在较多的硬相组织,在加工下料时耗费锯条,并且需要较长的软化退火时间。由于设备条件的限制,圆钢终轧后无法采用水冷装置进行控制冷却,轧后的冷却速度难以控制,因此要对圆钢的显微组织进行控制存在较大的难度。

1 试验材料和方法

试验料取自两批采取相同工艺生产的Φ80 mm

表1 试验40CrMo钢的化学成分/∕%
Table 1 Analysis of test steel 40CrMo /∕%

炉批	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
No1	0.40	0.23	0.77	0.012	0.011	0.97	0.17
No2	0.41	0.24	0.80	0.017	0.007	1.05	0.17

40CrMo系热轧圆钢分别记为No1, No2(表1)。该钢生产工艺流程为210 t转炉-LF-180 mm×180 mm方坯连铸-连续式棒材生产线。从心部截取试验料并加工成Φ8 mm×12 mm试样,在Gleeble-2000热模拟试验机上进行CCT曲线测量。

将试样以30℃/s速度加热到150℃,保温5 min,然后以10℃/s冷却到900℃,保温10 s,变形30%,变形速率为20 s⁻¹,然后以0.2~10℃/s的冷却速度冷却至200℃,记录冷却过程的膨胀量-温度曲线。采取激光共聚焦显微镜OLS3100对组织进行观察。采取扫描电镜JSM-7001F进行微区成分分析。

2 试验结果与分析

No1试样显微组织为铁素体+珠光体(图1a);

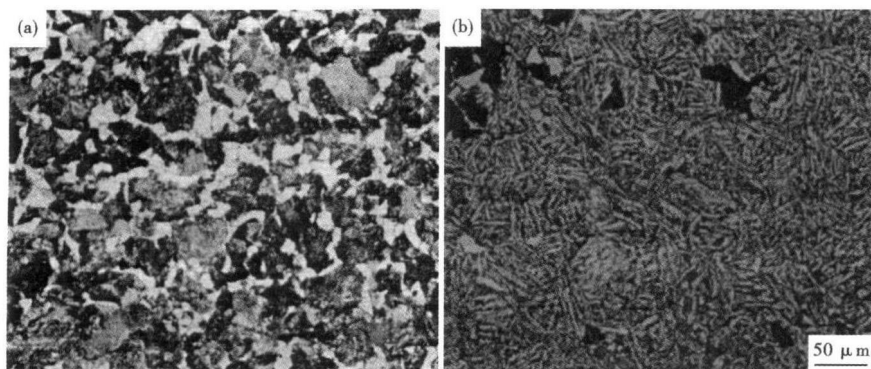


图 1 40CrMo 钢 Φ80 mm 热轧材的组织形貌(横向):炉批 No1 (a) 铁素体 + 珠光体;No2 (b) 贝氏体 + 马氏体

Fig. 1 Morphology of structure of Φ80 mm hot rolled products of steel 40CrMo (cross section): heat batch No1, ferrite + pearlite (a); and No2, bainite + martensite (b)

表 2 40CrMo 钢炉批 No1 和 No2 Φ80 mm 热轧材显微硬度 (HV0.1)

Table 2 Microhardness (HV0.1) of Φ80 mm hot rolled products of heat batch No1 and No2 of steel 40CrMo

炉批	边部	1/4 部位	心部
No1	191,220,191	257,274,246	207,191,214
No2	284,288,281	269,267,260	353,265,353

注:No2 试样中马氏体显微硬度 HV0.1 为 506。

No2 试样显微组织为贝氏体 + 马氏体(图 1b),两者组织差异很大。显微硬度见表 2。

从图 2 可见,在低冷却速度下(0.2 °C/s),No1 试样相变开始点为 730 °C, No2 的相变点向温度低一侧移动,铁素体相变被推迟,相变开始点在 600 °C。在 0.35 ~ 2 °C/s 冷却速度范围内,两者的相变区域重叠,当冷却速度大于 5 °C/s 时, No2 试样组织为马氏体。在同样的冷却速度下, No1 比 No2 硬度 HV0.1 低 50 ~ 100。

从图 2 ~ 图 4 的 CCT 曲线和对应的显微组织可以看出, 40CrMo 系圆钢要获得 P + F 组织,冷却速度要低于 0.35 °C/s,当冷却速度大于 0.5 °C/s 即进入贝氏体区域。

由表 1 可知, No2 比 No1 的 C 含量高 0.01%, Mn 高 0.03%, Cr 高 0.08%, Mo 含量相同,均在冶炼控制的化学成分波动范围内。横向组织未见由成分偏析引起的组织偏析(图 1)。

从图 5 可见, No1 带状组织明显,在珠光体和铁素体基体上分布着明显的偏析带, No2 带状组织不明显。No1 偏析带和基体的微区成分平均值见表 3。

从图 5 可以看出, No1 试样中在珠光体 + 铁素体基体上分布着马氏体偏析带,微区成分分析结果表明,偏析带中 Cr、Mo 的偏析较为严重。No2 试样中在贝氏体基体上分布着马氏体偏析带,但微区成分分析偏析带和基体成分差别不大(表 3)。

3 讨论

3.1 圆钢实际冷却曲线

由 CCT 曲线可知, 40CrMo 系圆钢在空冷条件下组织为贝氏体 + 少量铁素体,获得珠光体 + 铁素体需要非常缓慢的冷却速度。No1、No2 试样轧制时,圆钢从终轧 10# 轧机出口至剪切时的冷却曲线(图 6)。

从图 6 可以看出,圆钢在 10# 出口之后, 915 ~

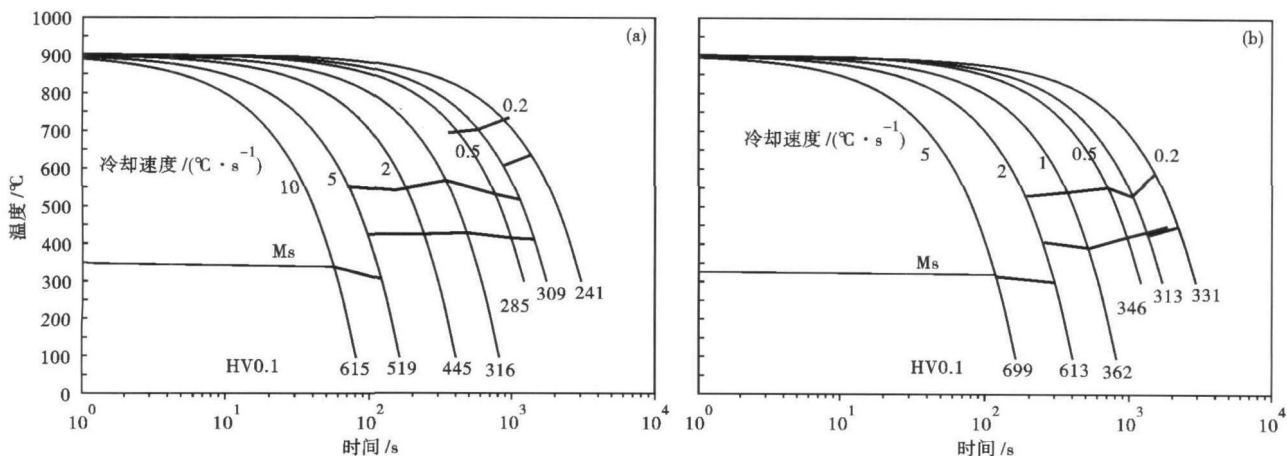


图 2 40CrMo 钢 Φ80 mm 热轧材的 CCT 曲线:炉批(a) No1;(b) No2

Fig. 2 CCT curves of Φ80 mm hot rolled products of steel 40CrMo: heat hatch No1 (a) and No2 (b)

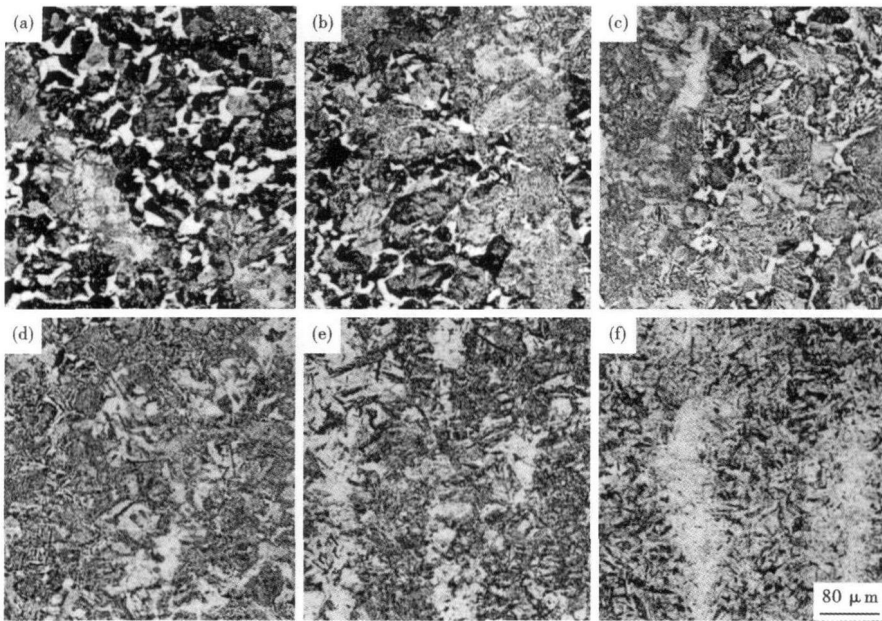


图3 900 °C形变后冷却速度对40CrMo钢炉批No1组织的影响:冷却速度/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)- (a)0.2;(b)0.35;(c)0.5;(d)1;(e)2;(f)5

Fig.3 Effect of cooling rate after deformation at 900 °C on structure of heat batch No1 of steel 40CrMo: cooling rate /($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)- (a) 0.2; (b) 0.35; (c) 0.5; (d) 1; (e) 2; (f) 5

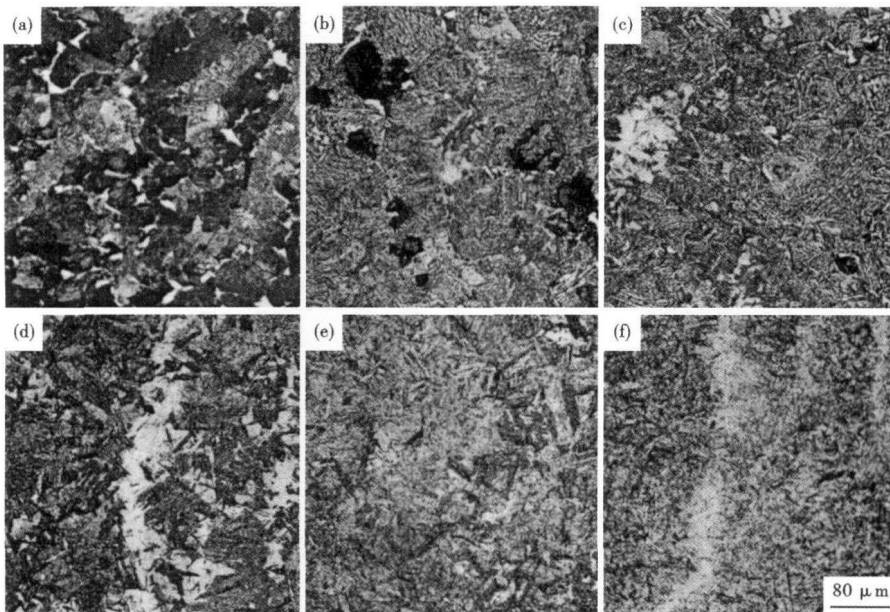


图4 900 °C变形后冷却速度对40CrMo钢炉批No2的组织的影响:冷却速度/($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)- (a)0.2;(b)0.35;(c)0.5;(d)1;(e)2;(f)5

Fig.4 Effect of cooling rate after deformation at 900 °C on structure of heat batch No2 of steel 40CrMo: cooling rate /($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)- (a) 0.2; (b) 0.35; (c) 0.5; (d) 1; (e) 2; (f) 5

计算的圆钢冷却速度为0.8 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$,边部和心部温度差30~40 $^{\circ}\text{C}$,从高温侧到低温侧边部心部温度逐渐趋于一致。该计算基于温度场分布沿圆钢长度方向逐渐达到均匀变化,圆钢在空气中的冷却过程考虑:圆钢内部为热传导,圆钢与外部发生热辐射及其与空气对流传热。

无论实际测温还是模拟计算,40CrMo系圆钢在相变冷却过程中,边部冷却速度在0.1~1 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。虽然该冷却速度范围较窄,冷却速度较慢,但从CCT曲线看出在该冷却速度范围,偏上限可以得到贝氏体,偏下限可以得到珠光体+铁素体。

3.2 微区成分分析

由CCT曲线可知,对于No1、No2试样在0.2 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 冷却速度下属于扩散型相变, No2相变点降低,说明No2中含有较高的Cr、Mo强碳化物形成元素,较难均匀化,造成局部出现Cr、Mo偏析,过冷奥氏体稳定使得铁素体相变点降低。当冷却速度大于0.2 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 时,相变由扩散型相变转变为切变型相变,受宏观成分影响而表现为相变点一致。

从微区成分分析看, No1有严重的Cr、Mo偏析带, No2 Cr、Mo偏析带不严重。No1为相对较慢冷却速度下获得的组织,碳能充分扩散到碳化物形成元素富化

830 $^{\circ}\text{C}$ 这个温度区间冷却速度较快,为0.65 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$; 830~550 $^{\circ}\text{C}$ 为在冷床上停留的温度范围,冷却速度较为平缓。各段冷却速度并不一样,分别为0.1、0.25、0.5 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$,平均冷却速度为0.25 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 。

利用有限元对该圆钢冷却曲线进行模拟(图7)。

区,形成明显的马氏体带,而No2为较快冷却速度下获得的组织,碳来不及或不能充分扩散到碳化物形成元素富化区,故而带状组织特征不明显。快冷可抑制碳的不均匀分布,不出现或减轻带状组织,但是不能根本消除钢中的合金元素偏析^[3],因此,带状

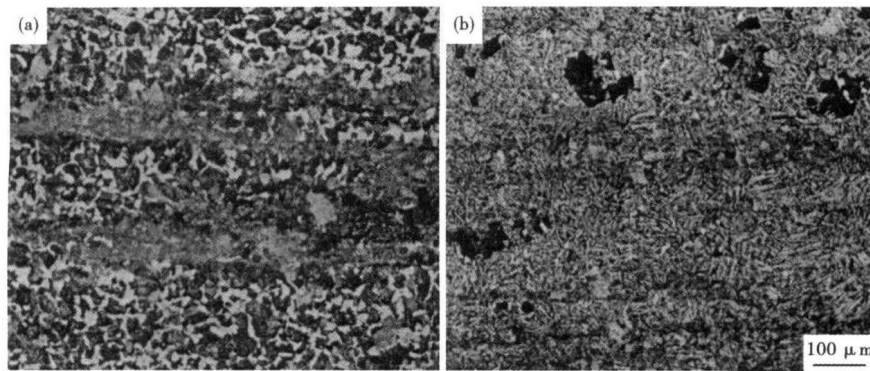


图 5 40CrMo 钢 Φ80 mm 热轧材的带状组织形貌(纵向): 炉批 No1(a); No2(b)
Fig. 5 Morphology of banded structure of Φ80 mm hot rolled products of steel 40CrMo (longitudinal section); heat batch No1 (a) and No2 (b)

表 3 40CrMo 钢炉批 No1 和 No2 Φ80 mm 热轧材基体和偏析带区的微区成分/%

Table 3 Analysis of micro-region of matrix and segregation banded area in Φ80 mm hot rolled products of heat batch No1 and No2 of steel 40CrMo

炉批	微区	C	Si	Cr	Mn	Mo
No1	基体	5.57	0.35	1.68	1.14	0
	偏析带区	3.26	0.4	2.8	1.16	3.10
No2	基体	4.10	0	1.01	0.74	0
	偏析带区	3.49	0	1.19	0.83	0

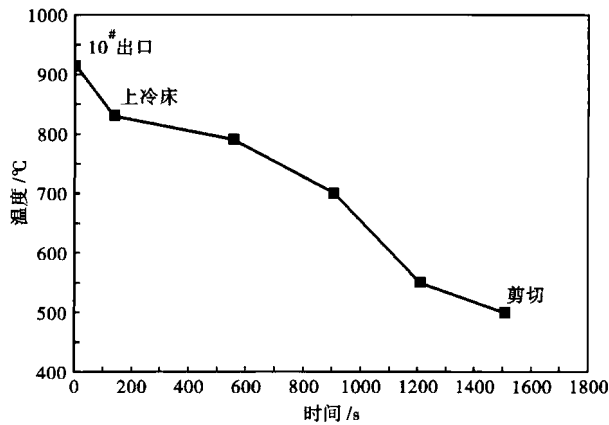


图 6 40CrMo 钢 Φ80 mm 圆钢轧后冷却曲线
Fig. 6 Cooling curve of Φ80 mm round steel 40CrMo after rolling

组织只是枝晶偏析受冷却速度快慢的表现形式, 并不能说明两者枝晶偏析程度的差异。

对于珠光体 + 铁素体组织, 虽然易于加工并可缩短软化退火时间, 但带状组织较为明显; 对于贝氏体 + 马氏体组织, 带状组织减轻但材料偏硬不利于软化退火处理。无论何种组织都可以通过对轧后圆钢的冷却方式来进行控制, 在轧后无水冷装置的情况下, 可以通过采取缩短冷床停留时间, 对圆钢进行堆冷等措施来延长在相变区的停留时间, 降低冷却

速度。对于 40CrMo 系圆钢易出现的 Cr、Mo 偏析带, 可以通过提高加热温度使合金元素扩散来减轻^[4]。

4 结论

(1) 40CrMo 系圆钢在较低的冷却速度(0.5 °C/s)下就能得到贝氏体, 在相变冷却过程中, 边部冷却速度是在 0.1 ~ 1 °C/s, 存在获得贝氏体的冷却条件。

(2) 珠光体 + 铁素体和贝

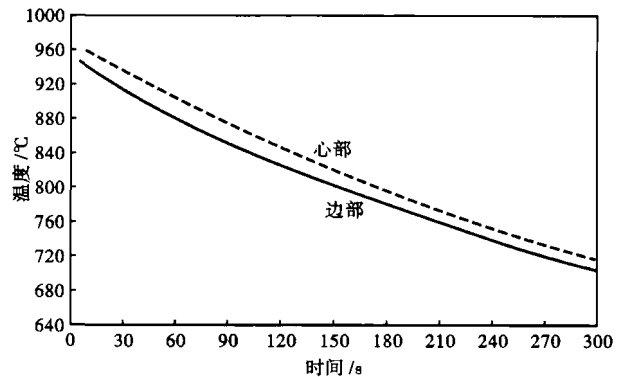


图 7 40CrMo 钢 Φ80 mm 圆钢中心与边部在 5 min 内的冷却曲线

Fig. 7 Cooling curves of Φ80 mm round steel 40CrMo at center and side within 5 min

氏体 + 马氏体两种类型组织在热轧冷却条件下均可能获得。

(3) 40CrMo 系圆钢出现带状组织只是枝晶偏析受冷却速度快慢影响的表现形式, 并不能说明枝晶偏析程度。

(4) 40CrMo 系圆钢的组织形态可以通过相变区的冷却速度来进行控制。

参考文献

- 1 赵洪涛, 李艳平, 刘健. 我国大规模棒材行业分析. 首钢科技, 2007(4): 1
- 2 刘剑恒. 轴承钢 GCr15 棒材产品低温精轧的研究. 钢铁, 2005, 40(11): 49
- 3 刘云旭. 低碳合金钢中带状组织的成因-危害和消除. 金属热处理, 2000, 25(12): 1
- 4 易敏, 陈明跃, 崔京玉, 等. 圆钢剪切端面裂纹研究. 首钢科技, 2007(4): 30

邓素怀(1976-), 女, 硕士, 工程师, 2000 年大连理工大学毕业, 棒线材产品研发。

收稿日期: 2011-11-15