

高碳钢线材组织和屈服强度关系的数学模型

陈礼斌¹ 冯运莉² 张宁宁² 孙 静²

(1 唐山钢铁有限公司技术中心,唐山 063016; 2 河北理工大学金属材料工程系,唐山 063009)

摘 要 通过光学和扫描电子显微镜,运用定量金相技术,分析计算高碳钢(0.56~0.63C、0.60~0.71Mn、0.23~0.28Si)铁素体含量和珠光体片间距,建立高碳钢线材的组织和屈服强度(σ_s)之间关系的数学模型: $\sigma_s(\text{Pa}) = 104.52 \times 10^6 + 161.70(1 - f_s^{1/3})S^{-1}(\text{m})$,其中 f_s -铁素体的体积百分数, S -珠光体的片层间距。模型的计算值与实验值的相对误差为2.9%。

关键词 高碳钢 线材 组织 屈服强度 数学模型

Mathematical Model for Relationship between Structure and Yield Strength of High Carbon Steel Wire

Chen Libin¹, Feng Yunli², Zhang Ningning² and Sun Jing²

(1 Technologic Centre, Tangshan Iron and Steel Co Ltd, Tangshan 063016;
2 Metal Material Engineering Department, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009)

Abstract Based on analyzed and calculated ferrite content and pearlite lamellar spacing in (0.56~0.63C, 0.60~0.71Mn, 0.23~0.28Si) high carbon steel by optical and scanning electron microscope using quantimet technique, the mathematical model for relationship between structure and yield strength of high carbon steel wire has been established that is yield strength $\sigma_s(\text{Pa}) = 104.52 \times 10^6 + 161.70(1 - f_s^{1/3})S^{-1}(\text{m})$, where f_s - volume fraction of ferrite, S - pearlite lamellar spacing. The relative error of the calculated value by model with examined value is 2.9%.

Material Index High Carbon Steel, Wire, Structure, Yield Strength, Mathematical Model

1 试验材料及方法

试验用钢取自唐钢生产 $\Phi 6.5 \text{ mm}$ 的 60 号和 65

号钢,其化学成分、力学性能和铁素体含量见表 1。

在扫描电子显微镜下拍摄的照片上,逐一测量

表 1 试验用钢的化学成分、力学性能、铁素体含量和珠光体的片间距

Table 1 Chemical composition, ferrite content, pearlite lamellar spacing and mechanical properties of test steels

试样号	化学成分/%					力学性能			铁素体含量/ %	珠光体的 片间距/ μm
	C	Mn	Si	S	P	σ_b/MPa	σ_s/MPa	$\delta_{10}/\%$		
60-1	0.56	0.71	0.23	0.026	0.023	939.76	834.28	12.86	2.84	0.159 2
60-2	0.56	0.71	0.23	0.026	0.023	934.61	806.78	14.28	3.22	0.157 0
65-1	0.63	0.60	0.28	0.023	0.031	1 008.36	902.18	12.51	2.18	0.146 1

了每个试样的各个视场的珠光体片间距,求出统计平均值,典型珠光体形貌示于图 1。由于试样磨制时对每个珠光体球团切割的角度不同,在扫描电子显微镜下观察到的片间距往往差异很大,只有当试样被切割的平面与珠光体片层垂直时,所测得的片层间距才接近真实的片层间距,所以在金相试样上观察到的片间距一般比真实的片间距大 1 倍^[1],所以测量的平均片间距乘以 50%,作为真实的片间距,各试样的片间距见表 1。

2 显微组织与屈服强度间数学模型

较高碳含量的铁素体-珠光体组织参数与屈服

强度之间的关系应服从下述关系式^[2]:

$$\sigma_s = f_s^{1/3} \sigma_s + (1 - f_s^{1/3}) \sigma_{pe} \quad (1)$$

式中: f_s -铁素体的体积百分数; σ_s -铁素体的屈服应力; σ_{pe} -珠光体的屈服应力。

珠光体的屈服应力 σ_{pe} 可用下式表示^[2]:

$$\sigma_{pe} = \sigma_i + KS^{-1} \quad (2)$$

式中: σ_i -摩擦应力; K -常数; S -珠光体的片层间距。

研究表明,珠光体受力拉伸时,塑性变形基本上发生在铁素体片层内,而渗碳体对滑移起阻碍作用^[3],故式(2)中的 σ_i 即为 σ_s ,这样式(2)可写成:

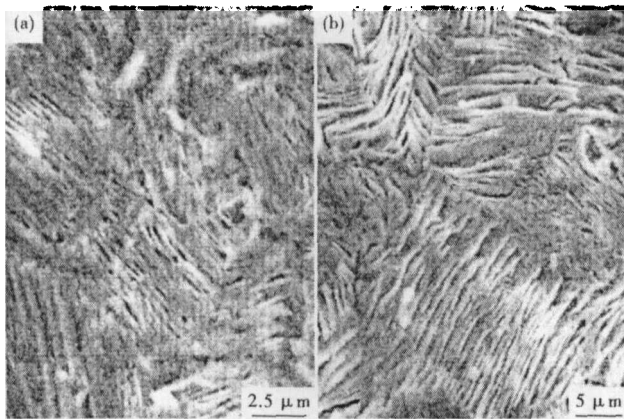


图1 试验钢珠光体形貌:试样65-1(a);60-2(b)

Fig. 1 Morphology of pearlite in test steels: specimen 65-1 (a); 60-2 (b)

$$\sigma_{pe} = \sigma_a + KS^{-1} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)整理得:

$$\sigma_s = \sigma_a + (1 - f_a^{1/3})KS^{-1} \quad (4)$$

将60-2和65-1试样的铁素体体积百分数 f_a ,屈服强度 σ_s 及珠光体片层间距 S 分别代入式(4)得到如下方程组:

$$\sigma_s + 4.343 \times 10^6 K = 806.78 \times 10^6$$

$$\sigma_s + 4.932 \times 10^6 K = 902.18 \times 10^6$$

解此方程组得:

$$K = 161.70 \quad \sigma_a = 104.52 \times 10^6 (\text{Pa})$$

将 $K = 161.70$, $\sigma_a = 104.52 \times 10^6$ 代入式(4)即得到高碳钢线材的屈服强度与显微组织的数学模型:

$$\sigma_s (\text{Pa}) = 104.52 \times 10^6 + 161.70(1 - f_a^{1/3})S^{-1} (\text{m})$$

3 数学模型的合理性和适用条件

根据实验中使用的60钢和65钢的化学成分(表1),对铁素体起固溶强化作用的元素主要是C、Mn和Si。由于实验中使用的60钢和65钢在斯太尔摩控冷线上的冷却条件相同,故铁素体中固溶的碳含量相同。但试样中的Mn、Si含量稍有不同,由表1可知,60钢的Mn、Si质量百分数分别为0.71%和0.23%;65钢的Mn、Si质量百分数分别为0.60%和0.28%。1%Mn和1%Si对铁素体的强度贡献分别是32MPa和83MPa^[4],因此65钢Mn和Si对铁素体固溶强化的贡献为42.4MPa,而60钢中Mn和Si的贡献为41.8MPa,两者之差为0.6MPa,仅占铁素体屈服强度的0.57%,其差异可忽略不计。因此,把两者的屈服强度视作相等是合理的。

模型适用条件为:(1)在建立数学模型 $\sigma_s (\text{Pa}) = 104.52 \times 10^6 + 161.70(1 - f_a^{1/3})S^{-1} (\text{m})$ 的过程中,应用了文献[2]中较高碳含量的铁素体-珠光体组织的屈服应力与组织参数间的关系 $\sigma_s = f_a^{1/3}\sigma_a + (1 - f_a^{1/3})\sigma_{pe}$,因此该模型适用于较高碳含量的铁素体-珠光体组织的碳钢。

(2)在建立数学模型 $\sigma_s (\text{Pa}) = 104.52 \times 10^6 + 161.70(1 - f_a^{1/3})S^{-1} (\text{m})$ 的过程中,采用了试样中的铁素体屈服强度相等的假设,碳对铁素体的屈服强度有重要的贡献,当钢相变时冷却条件相同或相近,碳在铁素体中的固溶度相同或相近,因此对铁素体固溶强化的贡献才相同或相近。因此该模型适用于相变时冷却条件相同或相近的较高碳含量铁素体-珠光体组织的碳钢。

(3)碳钢中除碳外,Mn和Si是对铁素体固溶强化起主要作用的元素,所以该模型适用于与所取试样Mn、Si含量相同或相近的较高碳含量铁素体-珠光体组织的碳钢。

4 数学模型的验证

将表1中试样60-1的显微组织参数 $f_a = 2.84\%$, $S = 0.1592 \mu\text{m}$ 代入公式 $\sigma_s (\text{Pa}) = 104.52 \times 10^6 + 161.70(1 - f_a^{1/3})S^{-1} (\text{m})$,得 $\sigma_s = 810.33 \text{ MPa}$,与实验实测值834.28MPa比较,模型的计算值与实验值的相对误差为2.9%,可见所建立的数学模型具有较高的精度。

5 结论

(1)通过使用定量金相技术和扫描电子显微镜测量高碳钢线材的显微组织参数,建立了显微组织参数与屈服强度之间关系的数学模型 $\sigma_s (\text{Pa}) = 104.52 \times 10^6 + 161.70(1 - f_a^{1/3})S^{-1} (\text{m})$ 。

(2)此模型适用于与所用试样的Mn、Si含量相同或相近,且相变时的冷却条件与之相同或相近的高碳钢线材。

参考文献

- 1 刘云旭. 金属热处理原理. 北京:机械工业出版社,1982
- 2 R W 卡恩 P. 材料与科学技术丛书. 钢的组织与性能. 北京:北京科学出版社,1999
- 3 刘永铨. 钢的热处理. 北京:冶金工业出版社,1987
- 4 宋维锡. 金属学. 北京:冶金工业出版社,1997

陈礼斌(1967-),男,高级工程师,北京科技大学毕业,轧制新技术和工艺优化。