

60Si2MnA 弹簧钢盘条脱碳层控制工艺的优化

马志军¹ 王鲁义² 方元杰¹

(江苏永钢集团有限公司 1 钢研院;2 第五线材厂,张家港 215628)

摘 要 60Si2MnA 弹簧钢 $\Phi 9 \sim \Phi 12$ mm 盘条的生产流程为 100 t BOF-LF-VD-150 mm $\times$ 150 mm 坯连铸-高速线材轧制工艺。讨论了脱碳机理和分析了脱碳的影响因素。通过适当降低二加热段温度,提高均热段温度,铸坯总加热时间由 2.7 h 降至 1.5 h,控制加热炉内氧含量 3% ~ 5%,开轧和吐丝温度分别从 $(1\,000 \pm 20)^\circ\text{C}$ 和 $(850 \pm 15)^\circ\text{C}$ 降至 $(950 \pm 20)^\circ\text{C}$ 和 $(820 \pm 20)^\circ\text{C}$,减少 727 $^\circ\text{C}$ 以上温度的风冷时间等工艺措施,使 60Si2MnA 弹簧钢盘条的全脱碳层由 0.072 mm 降至 0,总脱碳层由 0.142 mm 降至 0.063 mm,弹簧的疲劳寿命由 17.7 万次提高到 23.2 万次。

关键词 60Si2MnA 弹簧钢 $\Phi 9 \sim \Phi 12$ mm 盘条 脱碳 工艺控制

Optimization on Control Process of Decarburization layer of Spring Steel 60Si2MnA Wire Rod

Ma Zhijun¹, Wang Luyi² and Fang Yuanjie¹

(1 Iron and Steel Research Institute, 2 Fifth Wire Rod Plant, Jiangsu Yonggang Group Co Ltd, Zhangjiagang 215628)

Abstract The production flowsheet of $\Phi 9 \sim \Phi 12$ mm wire rod of spring steel 60Si2MnA is 100 t BOF-LF-VD-150 mm $\times$ 150 mm billet casting-high speed wire rolling process. The decarburization mechanism is discussed and the effective factors on decarburization are analyzed. With the process measures including suitable decreasing the temperature of second heating zone and rising the temperature of soaking zone, decreasing the total heating time of billet from 2.7 h to 1.5 h, controlling oxygen content in furnace being 3% ~ 5%, decreasing beginning rolling temperature and finishing rolling temperature respectively from $(1\,000 \pm 20)^\circ\text{C}$ and $(850 \pm 20)^\circ\text{C}$ to $(950 \pm 20)^\circ\text{C}$ and $(820 \pm 20)^\circ\text{C}$, reducing the wind cooling time for wire rod at temperature more than 727 $^\circ\text{C}$, the full ferrite decarburization layer of wire rod of spring steel 60Si2MnA decreases from 0.072 mm to 0, the total decarburization layer decreases from 0.142 mm to 0.063 mm, and the fatigue life of spring increases from 17.7×10^4 to 23.2×10^4 .

Material Index Spring Steel 60Si2MnA, $\Phi 9 \sim \Phi 12$ mm Wire Rod, Decarburization, Process Control

弹簧在使用过程中承受往复压缩运动,起着缓冲和减震作用,因此对弹簧钢的疲劳性能要求特别高^[1]。按照行业规定,汽车悬架簧的疲劳寿命为 500 万次、制动簧疲劳寿命为 22 万次合格。

弹簧钢表面脱碳将严重损害弹簧的疲劳性能,疲劳强度随着表面碳含量的降低而降低,若弹簧钢表面出现铁素体的全脱碳,弹簧疲劳极限可降低 50%^[2]。因此,汽车、火车等重要交通工具使用的悬架簧、气门簧要求使用的弹簧钢线材必须避免出现全脱碳(或铁素体脱碳)。

因此,无论是日本标准 JISG4801-2005 还是 GB/T1222-2007 标准对油淬火阀门弹簧钢丝明确规定钢丝表面不允许有全脱碳层。

通常使用量最大的弹簧钢为 60Si2MnA,该钢种使用量占弹簧钢总量的 30% ~ 40%,甚至有资料称,该牌号在合金弹簧钢中占比约为 60%^[3]。

用户制成弹簧后进行疲劳试验,对弹簧疲劳试验不合格的盘条进行组织检验,其表面出现严重的

脱碳,盘条的组织检验如图 1 所示。为此钢厂进行了降低脱碳层深度的攻关。

1 弹簧钢的生产流程

钢厂开发的弹簧钢的工艺流程为:

100 t 转炉 $\rightarrow$ 100 t LF 精炼 $\rightarrow$ VD 真空脱气 $\rightarrow$ 150 mm $\times$ 150 mm 小方坯连铸 $\rightarrow$ 步进梁式加热炉加热 $\rightarrow$ 高速线材轧制 $\rightarrow$ 风冷线控制冷却 $\rightarrow$ 精整、打包。

2 60Si2MnA 弹簧钢中各成分的作用

(1) 钢中碳含量越高,对钢材的强度和弹性的贡献越大,但是碳含量越高,与氧的结合能力越大,增加了脱碳程度,因此较高档的弹簧钢一般使用中碳而不是低碳钢或者高碳钢。

(2) 锰能够提高钢的淬透性,改善钢的热加工性能,随着锰含量的增加,能提高钢的耐磨性和降低钢的脱碳趋势。

(3) 硅含量的增加,可以显著提高钢的弹性极限、屈服点和抗拉强度,但是硅可以提高碳的活度,在提高钢材淬透性及抗弹性减退能力的同时增加了

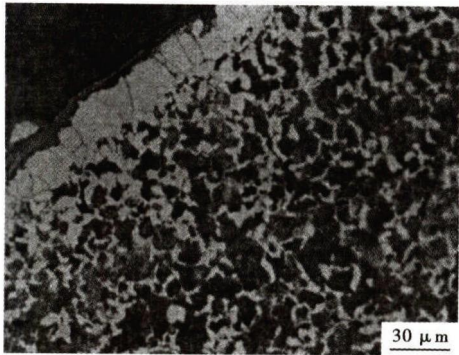


图 1 工艺优化前 60Si2MnA 弹簧钢盘条的全脱碳层形貌
Fig.1 Morphology of full ferrite decarburization layer of wire rod of spring steel 60Si2MnA before optimization of process

钢材的脱碳倾向^[4]。在碳素弹簧钢中硅含量一般在 1.5% 以上。

(4) 铬是强碳化物形成元素,能够降低 Si 在钢中进行球化退火时的石墨倾向,具有降低脱碳深度的能力,在显著提高强度、硬度和耐磨性的同时,又能提高钢的抗氧化性和耐腐蚀性以及钢材的淬透性,铬、锰、硼等元素含量的增加,有利于减少钢的脱碳^[5]。因此一般情况下,在 60Si2MnA 中添加适量的 Cr 合金。

生产实践表明,在加热工艺完全相同的前提下,60Si2MnA 脱碳层深度的控制难度远大于 60Si2CrA 甚至 50CrVA、55SiCrA 等其它合金钢。

3 脱碳的机理

高温时钢坯表面的 C 原子与 O₂ 发生如下反应:2C + O₂ = 2CO;碳在钢中的扩散遵照菲克定律:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x_1^2} \tag{1}$$

$$D = D_0 \times \exp(-Q_1/RT) \tag{2}$$

式中:C- 碳含量/%;t- 时间/s;x₁- 脱碳深度/m;D- 扩散系数/(m² · s⁻¹);D₀- 碳在 γ-Fe 中的扩散系数/(m² · s⁻¹);T- 绝对温度/K;R- 气体常数,8.314 J/(K · mol);Q₁- 扩散活能/J。

在高速线材车间的风冷线上,盘条在 727 ℃ 以上的温度区间不会超过 4 min,在此时间,最主要的作用是进行奥氏体向索氏体组织或者其它组织的转变,很难造成脱碳现象。而钢坯在加热炉内 700 ℃ 以上的时间一般在 1.0 ~ 1.5 h,炉内温度一般在 1 200 ~ 1 300 ℃,因此脱碳主要发生在此阶段。

4 脱碳的影响因素分析

本次缺陷的脱碳层主要分为两层:完全脱碳层和部分脱碳层,其中完全脱碳层约 40 μm,主要是粗

大的等轴铁素体,与盘条表面垂直,方向性强;部分脱碳层约 90 μm,主要特点是沿着晶界呈网状或者半网状分布(图 1)。解决脱碳首先是完全解决全脱碳层,其次降低部分脱碳层的深度。由表示钢的高温氧化动力学的阿累尼乌斯(Arrhenius)公式进行推算、整理可得:

$$\ln(\Delta W) = \frac{1}{n} \ln \tau + \frac{1}{n} \left(\ln K_0 - \frac{Q_2}{RT} \right) \tag{3}$$

式中:ΔW- 单位面积氧化增加的质量,对同一规格的盘条来讲,可以理解为盘条被氧化的深度(脱碳层的厚度);τ- 时间/s;n- 反应级数(一般取 0.98);K₀- 频率因子;R- 气体常数;Q₂- 氧化反应激活能。

当温度越高时,分子氧化的内部能量越多,反应激活能越大。因此盘条的氧化层深度与加热时间、加热温度以及反应激活能有直接的关系。

由 Fe-C 相图可知,在理论温度为 727 ~ 910 ℃ 的两相区加热时,有铁素体 α 析出,在此过程中,较低碳含量的 α 沿着先前析出的 α 表面生长,形成带有方向性的厚大而致密的铁素体层(全脱碳层),当加热温度升高到 γ 单相区域时,脱碳仅仅发生在奥氏体的表面,无法析出铁素体,此时 γ 发生铁素体 + 珠光体的转变,从而可以形成部分脱碳层。保持合理的加热炉温度、控制加热炉气氛、提高加热炉温度控制的准确性、稳定性和均匀性,缩短高温段的加热时间、采取快速加热减少碳的扩散时间,是控制 60Si2MnA 表面脱碳、提高盘条以及弹簧使用寿命的最主要途径。

5 生产工艺的对比分析及优化

5.1 弹簧钢盘条的轧制工艺

60Si2MnA 的成分控制如表 1,发生全脱碳层弹簧钢盘条的轧制工艺如表 2。

分析得出,该批盘条存在着加热时间长,冷却时间在 727 ℃ 以上温度段停留时间长的现象,同时对加热炉内的气氛不能明确标识。

5.2 优化后 60Si2MnA 盘条生产工艺

结合现场实际和设备条件,采用如下措施:

表 1 60Si2MnA 弹簧钢的成分控制/%						
Table 1	Control of composition of spring steel 60Si2MnA / %					
项目	C	Si	Mn	P	S	Cr
GB/T1222-2007	0.56 ~ 0.64	1.60 ~ 2.00	0.70 ~ 1.00	≤ 0.025	≤ 0.025	≤ 0.35
内控成分	0.57 ~ 0.59	1.60 ~ 1.75	0.75 ~ 0.85	≤ 0.015	≤ 0.010	0.15 ~ 0.20

表 2 优化前 60Si2MnA 弹簧钢的轧制工艺参数
Table 2 Parameters of rolling process of spring steel 60Si2MnA before optimization

加热炉各段温度控制/℃			加热炉 总时间/ h	开轧 温度/℃	吐丝 温度/℃	风冷线总 时间/min
一加热段	二加热段	均热段				
850 ± 50	1 050 ± 50	1 100 ± 40	2.7	1 000 ± 20 980 ~ 1 000 (目标)	850 ± 15 840 ~ 850 (目标)	5.2

表 3 优化后 60Si2MnA 弹簧钢控轧控冷工艺参数
Table 3 Parameters of rolling process of spring steel 60Si2MnA after optimization

加热炉各段温度控制/℃			加热炉 总时间/ h	开轧 温度/℃	吐丝 温度/℃	风冷线总 时间/min
一加热段	二加热段	均热段				
850 ± 50	1 040 ± 50	1 120 ± 40	1.5	950 ± 20 930 ~ 950 (目标)	820 ± 20 820 ~ 830 (目标)	4.5

表 4 工艺优化前后弹簧钢 60Si2MnA 盘条的脱碳层深度及弹簧疲劳寿命

Table 4 Depth of decarburization layer of wire rod of spring steel 60Si2MnA and fatigue life of spring before and after optimization of process

工艺	规格/ mm	GB/T1222- 2007	脱碳层(全脱碳/ 过渡层)/mm	图例	制动弹簧的 疲劳寿命
优化前	Φ9.0	2.0% × D	0.142 (0.072/0.070)	图 1	GB/T134- 1992 17.7 万次
优化后	Φ9.0	2.0% × D	0.063 (0/0.063)	图 2	22 万次 23.2 万次

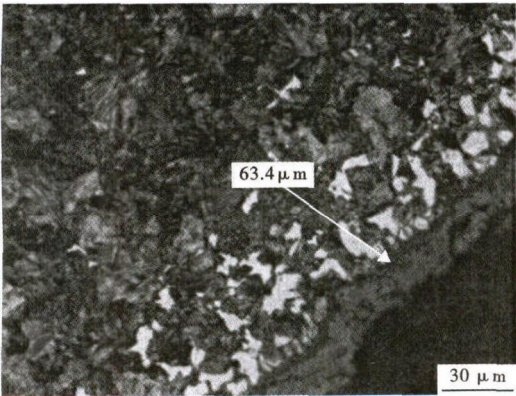


图 2 工艺优化后 60Si2MnA 弹簧钢盘条脱碳形貌
Fig. 2 Morphology of decarburization layer of wire rod of spring steel 60Si2MnA after optimization of process

(1)对 60Si2MnA 的成分进行内控调整,在国标要求的基础上,降低 Si、增加 Mn、Cr 的含量,降低脱碳层动力学因素,同时使得冷却碳曲线发生偏移,有利于组织的控制;(2)对铸坯进行表面修磨,特别是对容易产生表面缺陷的铸坯角部以及表面的裂纹、凹陷等缺陷的检测;(3)采用独特的装钢方式,减少钢

坯在加热炉的时间,使得钢坯总加热时间缩短近 1.0 ~ 1.2 h;(4)优化加热工艺,在保证开轧温度的前提下,降低二加热段的温度,提高均热段温度;(5)加装了残氧仪,控制炉内气氛,将加热炉内的氧含量控制在 3% ~ 5%;(6)增加炉内微正压压力,防止炉外气体进入加热炉内;(7)降低了开轧温度和吐丝温度;(8)优化风冷线的延迟冷却模式,调整风冷线辊道速度,在减少风冷线 727 ℃ 以上温度段时间的同时增加相变时间,有利于盘条组织转变。优化后的生产工艺如表 3。

工艺优化后的 60Si2MnA 盘条取样,进行组织检验如图 2。

5.3 用户使用情况

该批规格 Φ12.0 mm 的盘条共计 53.2 t,发售到浙江诸暨的汽车弹簧钢厂,用户分别经过酸洗→磷化→拉拔→下料→绕簧→调质热处理→表面规整→表面涂镀→包装等程序,顺利生产完毕,在厂内的成分、组织、疲劳寿命检测中,均达到其内控标准,判定合格。

表 4 为该厂对使用的 60Si2MnA 盘条优化工艺前后对比及制作制动弹簧疲劳寿命检测情况。该优化后的工艺,现已经生产近 5 000 t 不同规格的盘条,均已使用完毕,用户反映良好。

6 结论

通过适当降低二加热段温度和提高均热段温度,将铸坯总加热时间由 2.7 h 降至 1.5 h,控制加热炉内氧含量 3% ~ 5%,降低开轧温度 ~ 50 ℃、吐丝温度 ~ 30 ℃,以及减少 727 ℃ 以上温度的风冷时间等工艺措施,可使 60Si2MnA 弹簧钢 Φ9 ~ Φ12 mm 盘条的全脱碳层由 0.072 mm 降至 0。

参考文献

[1] 王丽萍,柳洋波. 60Si2Mn 弹簧钢全脱碳的影响[J]. 金属热处理,2014,39(3):7-12.
[2] 温宏权,向顺华. 60Si2Mn 弹簧钢加热温度对表面脱碳的影响[J]. 宝钢技术,2008(3):44-47.
[3] 孙汝林. 60Si2Mn 弹簧钢热轧盘条研制与开发[J]. 金属制品,2012,41(4):29-30.
[4] 石如星,姚春发,惠卫军,等. Si 对中碳弹簧钢氧化脱碳行为的影响[J]. 特殊钢,2008,29(3):19-20.
[5] 乔蔡方. 加热炉[M]. 北京:冶金工业出版社,2007.

马志军(1971-),男,高级工程师,1996 年武汉冶金科技大学(本科)毕业,钢铁材料研究及产品开发。
E-mail:HNAGMZJ@163.COM

收稿日期:2016-02-03