

① 287-290

弹簧钢 60Si2Mn 脱碳层软化的表征与研究 *

李家宝 覃明 刘凤智 宋小平 盖秀颖
(中国科学院金属研究所材料疲劳与断裂国家重点实验室, 沈阳 110015)

摘 要 提出一种表征脱碳层软化的新方法, 该方法借助 X 射线应力分析技术测量屈服强度在脱碳层深度方向上的分布. 对弹簧钢 60Si2Mn 的脱碳层的屈服强度、X 射线衍射线半高宽和显微硬度的层深分布作了对比和分析, 在此基础上指出利用新方法进行软化表征有助于更深入阐明脱碳影响疲劳强度的机制, 并有望建立某些定量关系.

关键词 弹簧钢、脱碳层、屈服强度、X 射线应用分析、显微硬度

中图分类号 TG115.22, TG142.41

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2000)03-0287-04

软化

CHARACTERIZATION AND INVESTIGATION OF SOFTENING IN DECARBURIZED LAYER OF SPRING STEEL 60Si2Mn

TG142.41

LI Jiabao, QIN Ming, LIU Fengzhi, SONG Xiaoping, GAI Xiuying
State Key Laboratory for Fatigue and Fracture of Materials, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015

Correspondent: LI Jiabao, professor, Tel: (024)23843531-55344, Fax: (024)23891320

Manuscript received 1999-07-19, in revised form 1999-11-05

ABSTRACT A new method for characterization of softening in a decarburized layer is proposed. The core of the method is measurement of the depth distribution of yield strength in the layer using X-ray stress analysis technique. Comparison and analysis of depth distributions of yield strength, half-width of X-ray diffraction profile, and microhardness in the decarburized layer of spring steel 60Si2Mn was made, and the advantage of the new method was discussed.

KEY WORDS spring steel 60Si2Mn, decarburized layer, yield strength, X-ray stress analysis, microhardness

许多由钢铁材料制作的弹簧件(例如汽车或火车的板簧)或其它零件在热处理后未经过进一步的加工就送去使用. 这类零件的表层在热处理过程中不可避免地会脱碳软化, 从而使零件的疲劳性能大幅度下降^[1-6]. 为了表征脱碳层的软化程度, 常用的方法是测量显微硬度在该层内的分布^[1,3,6]. 但是, 显微硬度与材料的弹性、塑性、加工硬化指数、强度和韧性等有关, 是一个综合性的指标^[7], 而且材料的残余应力状态对其测量结果有较大的影响^[8-11]. 另一个可以用来表征脱碳层软化的参量是 X 射线衍射线的半高宽, 但该参量代表材料的结构状态, 只能间接地反映它的力学特性. 作者所在实验室不久前提出了一种利用 X 射线应力分析技术测量具有二维残余应力的金属表面的屈服强度的方法, 与化学或电化学等无应变剥离技术相结合, 利用该方

法还可以测量表层屈服强度在其厚度方向上的分布^[12-14]. 本文报道了运用这种方法测量脱碳层的屈服强度层深分布的试验结果, 并将其与显微硬度和衍射线半高宽的层深分布加以分析比较.

1 表面屈服强度测量方法简述

金属表面的残余应力往往是二维的, 其两个主方向在表面所处的平面上. 假设平板试样的纵向和横向是表面残余应力的两个主方向, 在这种条件下, 如果沿纵向对试样逐级加载, 表面的应力状态将仍然是二维的, 而且两个应力主方向保持不变.

利用电阻应变片和 X 射线应力分析技术测量汽车板簧用钢 60Si2Mn 脱碳表面在各级载荷下的纵向外载应变 ϵ_a 、表面纵向应力 σ_1 和表面横向应力 σ_2 , 结果如图 1 所示. 从图中可以看出, 在表面形变的弹性段, σ_1 和 ϵ_a 之间具有线性关系; 而在表面形变的塑性段, $\sigma_1-\epsilon_a$ 关系偏离线性规律.

* 国家自然科学基金资助项目 59771069

收到初稿日期: 1999-07-19, 收到修改稿日期: 1999-11-05

作者简介: 李家宝, 男, 1940 年生, 研究员

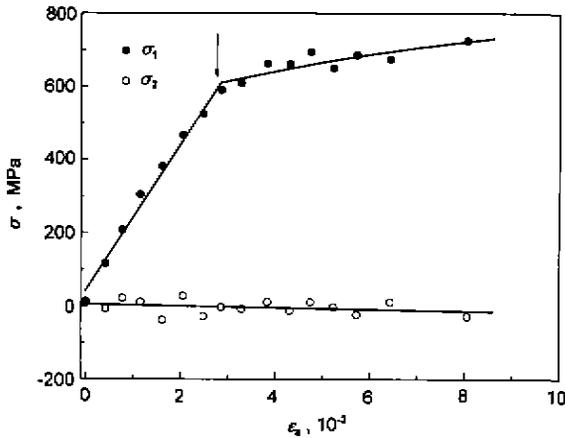


图1 60Si2Mn 弹簧钢脱碳表面的纵向应力 σ_1 、横向应力 σ_2 与外载应变 ε_a 之间的关系

Fig.1 Longitudinal and transverse stresses, σ_1 and σ_2 , vs Applied strain, ε_a , for decarburized surface of spring steel 60Si2Mn

各级载荷下的表面等效应力 $\bar{\sigma}$ 为

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \quad (1)$$

根据 Hooke 定律, 可将表面等效弹性应变 $\bar{\varepsilon}^e$ 写作

$$\bar{\varepsilon}^e = \frac{2(1+\nu)}{3E} \bar{\sigma} \quad (2)$$

式中, E 和 ν 分别为 Young's 模量和 Poisson 比.

在文献 [12—14] 中已经证明, 可由图 1 所示曲线塑性段的每两相邻测量点的 $\sigma_1, \sigma_2, \varepsilon_a$ 的测量值和 $\bar{\sigma}$ 的计算值, 求出由外载应变增量 $\Delta\varepsilon_a$ 所导致的表面等效塑性应变增量 $\Delta\bar{\varepsilon}^p$, 并进而采用求和方法计算各测量点的等效塑性应变总量 $\bar{\varepsilon}^p$.

利用下式定义一个称作等效单轴弹性应变的新参量 $\bar{\varepsilon}_t^e$

$$\bar{\varepsilon}_t^e = \frac{\bar{\sigma}}{E} \quad (3)$$

并利用下列二式定义等效单轴应变 $\bar{\varepsilon}_t$

对于弹性形变阶段

$$\bar{\varepsilon}_t = \bar{\varepsilon}_t^e \quad (4)$$

对于塑性形变阶段

$$\bar{\varepsilon}_t = \bar{\varepsilon}_t^e + \bar{\varepsilon}^p \quad (5)$$

则可以证明, 在 Descartes 坐标系里, 由式 (1) 算出的 $\bar{\sigma}$ 和由式 (4) 或式 (5) 算出的 $\bar{\varepsilon}_t$ 之间的关系曲线, 即具有二维残余应力的金属表面的等效应力 - 等效单轴应变曲线可以与常规单轴拉伸试验得到的应力 - 应变曲线直接比较. 因此, 可以利用常规单轴拉伸试验求取屈服点的方法来求取金

属表面被应力测定所用特征 X 射线有效穿透的薄层的屈服强度.

2 实验方法

试样取自汽车板簧所用坯料——60Si2Mn 带钢, 其化学成分 (质量分数, %) 为: Fe-0.61C-1.89Si-0.73Mn-0.020P-0.0087S, 横截面尺寸为 3 mm×10 mm, 横截面均匀部分的长度为 36 mm. 淬火处理在板簧生产厂随板簧同炉进行 (加热设备为步进式煤气淬火炉, 加热时间 12 min, 出炉温度为 880 °C、油淬), 回火采用汽车板簧的回火工艺 (470 °C 保温 1 h) 在箱式炉内进行. 金相观察结果表明, 回火后的表面明显脱碳, 带脱碳层时表面硬度 HRC 为 38, 去除脱碳层后的硬度 HRC 为 47.

为了测定 X 射线衍射线半高宽和屈服强度在脱碳层内的分布, 采用化学腐蚀和电解抛光方法对试样进行逐层剥离. 表面屈服强度测量按本文第 1 节介绍的方法进行. 采用单轴拉伸加载方式进行逐级加载, 把敷贴在试样正、反两面上的 5 只电阻应变片的读数值的平均值作为各级载荷下的外载应变值 ε_a , 测量各级载荷下的表面纵向 (加载方向) 应力 σ_1 和横向应力 σ_2 所用的特征 X 射线和衍射晶面分别为 $\text{CrK}\alpha$ 和 $\alpha\text{-Fe}(211)$, $\text{CrK}\alpha$ 特征 X 射线对试样表面的有效穿透深度为 5.4 μm . 显微硬度测量在试样的横断面上进行, 所用设备为 Buehler Micromet II 型数字式显微硬度计, 载荷 50 g, 载荷保持时间 10 s.

3 实验结果与讨论

图 2 为脱碳层的金相照片. 图 1 给出了脱碳层表面在加载条件下的纵向应力 σ_1 和横向应力 σ_2 与纵向外载应变 ε_a 之间的关系. 图中箭头所指测量点为弹性形变段和塑性形变段的分界点.

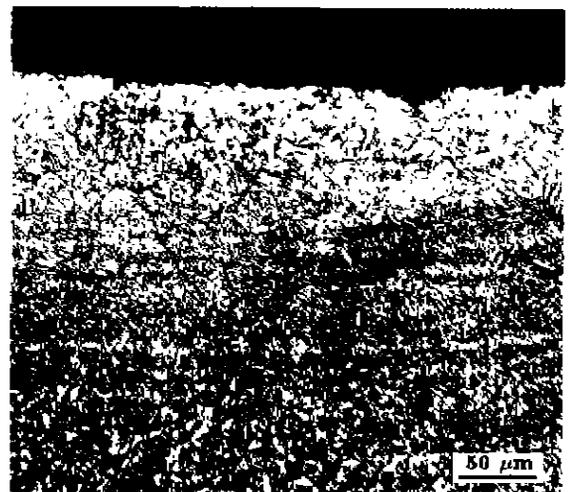


图2 脱碳层的金相照片

Fig.2 Optical photograph of decarburized layer

图 3 为利用本文第 1 节所介绍方法对图 1 所给数据进行处理得到的 60Si2Mn 带钢脱碳层表面厚约 5.4 μm 的一层的等效应力 $\bar{\sigma}$ 与等效单轴应变 $\bar{\epsilon}_1$ 的关系曲线；图中的两条点划线分别为求取残留塑性应变等于 0.1% 和 0.2% 的条件屈服点 $\sigma_s^{0.1}$ 和 $\sigma_s^{0.2}$ 的作图线。

图 4 分别给出 $\sigma_s^{0.1}$, $\sigma_s^{0.2}$ 和 X 射线衍射线半高宽 b_h 在脱碳层深度方向上的分布。图 5 用符号 ● 表示显微硬度实测值在脱碳层深度方向上的分布。

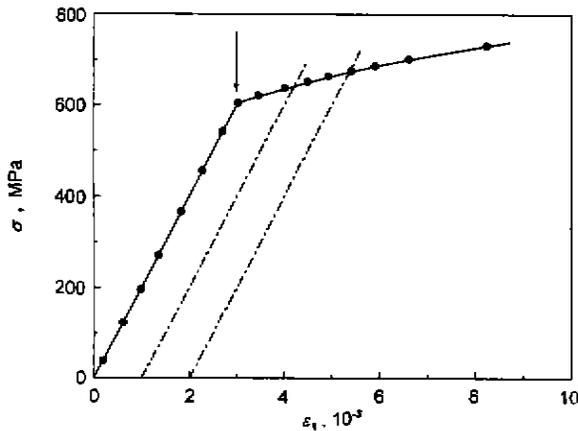


图 3 脱碳表面等效应力 $\bar{\sigma}$ 与等效单轴应变 $\bar{\epsilon}_1$ 之间的关系

Fig.3 Relationship between effective stress $\bar{\sigma}$ and effective uni-axial strain $\bar{\epsilon}_1$ of decarburized surface

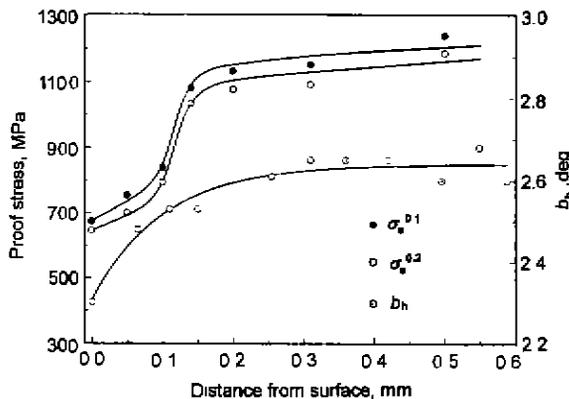


图 4 脱碳层的屈服强度和半高宽沿层深分布

Fig.4 Depth distributions of yield strength σ_s and half-width b_h in decarburized layer

显微硬度和半高宽是当前用来表征表面硬化层（如渗碳、渗氮层，以及喷丸、滚压和机加工的影响层）或软化层（如脱碳层）的力学性质沿层深分布的最常用指标。许多研究者建立了该二参量与一些力学性质参量之间的定量关系。如对于结构钢，Kurita 等人 [15] 提出了如下关系

$$HV = 330\sqrt{\alpha - 0.5} + 137w_c + 35 \quad (6)$$

式中， w_c 为钢的含碳量（质量分数，%）； α 为反映衍射线宽度的一个参量，它与半高宽 b_h 的关系为 [16]

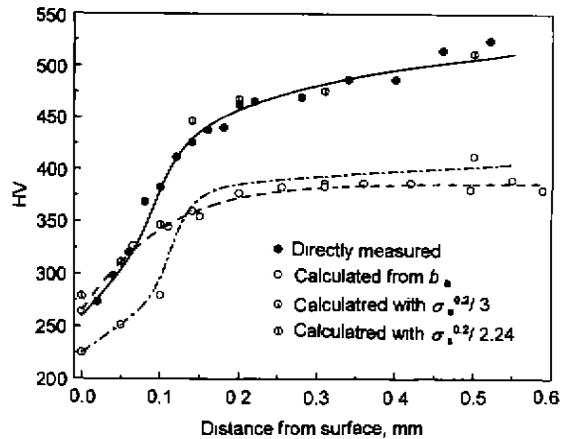


图 5 脱碳层的显微硬度沿层深分布

Fig.5 Depth distribution of microhardness HV in decarburized layer

$$\alpha = \frac{b_h - 0.382}{1.954} \quad (7)$$

把式 (7) 代入式 (6)，可得

$$HV = 330\sqrt{\frac{b_h - 0.382}{1.954} - 0.5} + 137w_c + 35 \quad (8)$$

假定试样表面的含碳量为零，并根据图 2、4、5 所给的金相照片、屈服强度和半高宽的层深分布以及显微硬度实测值的层深分布，假定脱碳层厚度为 0.25 mm（即到表面的距离等于或超过 0.25 mm 的任何位置的含碳量都是 0.61%），同时根据参考文献 [3] 所给的脱碳层的含碳量的层深分布规律假定从脱碳表面到其下部 0.25 mm 处的碳含量变化遵循抛物线关系式 $w_c = \sqrt{l/a}$ (l 为到表面的距离，由 $l=0$ 和 0.25 mm 对应着 $w_c=0$ 和 0.61% 可算出常数 $a=0.672$)，即可算出脱碳层不同深度处的含碳量，并进而利用式 (8) 将图 4 的 b_h 数据转换成 HV 数据，其结果用符号 ⊙ 记在图 5 中。

如果材料的加工硬化指数不大，则可根据做功的原理推导出下式 [17]

$$HV = \frac{1}{3}\sigma_s \quad (9)$$

式中， σ_s 为屈服强度。利用幂函数来拟合图 3 所示塑性形变段的 $\bar{\sigma} - \bar{\epsilon}_1$ 关系可以求得脱碳表面的加工硬化指数为 0.179，而且图 4 所示各屈服强度测量深度的加工硬化指数均不超过 0.298。因此，可以利用 $\sigma_s^{0.2}$ 作为 σ_s 代入式 (9) 来计算 HV，计算结果用符号 ⊙ 记在图 5 中。图 5 中的符号 ⊙ 所给的数据是利用 1/2.42 代替式 (9) 中的 1/3 进行计算得到的结果。

从图 4、5 可以看到，由于碳含量的减小，脱碳层的屈服强度、半高宽和显微硬度测量值都明显下降。这些结果说

明该三参量都可以反映脱碳层的软化,但如果将它们的层深分布加以比较可以看出,正像对喷丸影响层的表征^[18]一样,三种层深分布所反映的软化规律存在某些差别,例如,在0.12 mm左右的层深区间,屈服强度和显微硬度测量值的变化幅度很大,而半高宽却不存在这种现象。此外,层深超过0.25 mm后,半高宽基本不变,但屈服强度和显微硬度的测量值仍有一定的上升趋势。表征脱碳层软化程度的主要目的是探讨它对材料力学性能,特别是疲劳性能的影响。金属材料的疲劳强度与其表层抵抗塑性形变的能力密切相关^[19],因此,当要求深入探讨脱碳影响疲劳性能的机制时,利用能够直接反映材料屈服抗力的屈服强度作为脱碳层软化的表征参量有望建立某些定量的关系。

图5说明,利用式(8)、(9)得到的显微硬度转换量与其实测的层深分布趋势大体相似,但数值差别较大。这些说明利用式(8)、(9)时要注意条件。显然,对于经过淬火和中温回火的60Si2Mn钢的脱碳影响层,用1/2.42代替1/3作为式(9)的转换因子,效果要好得多。

4 结论

(1) 60Si2Mn 弹簧钢在利用步进式煤气炉进行淬火加热的过程中,表层严重脱碳。

(2) X 射线衍射线半高宽和显微硬度均可作为脱碳层软化的表征参量,但二者表征结果所反映的规律存在某些差异。

(3) 利用 X 射线应力分析技术测得的屈服强度层深分布可以更直接地给出脱碳层屈服强度降低的幅度。在探讨脱碳影响疲劳性能的机制时,应用屈服强度作为脱碳层软化的表征参量有望建立定量的关系。

参考文献

- [1] Sfiogler B, Weiss B Z, Taub A. *J Iron Steel Inst*, 1964; 202: 509
- [2] Kaiser B. *Draht*, 1982; 33: 314
- [3] Kloos K H, Kaiser B. *Härterei Tech Mitt*, 1982; 37: 7
- [4] Kaiser B. *Draht*, 1984; 35: 253
- [5] Wohlfahrt H. In: Wohlfahrt H, Kopp R, Vöhringer O eds., *Proc 3rd Int Conf on Shot Peening*, Oberursel: DGM-Informationsgesellschaft, 1987: 563
- [6] Gassner R H. *Met Prog*, 1979; 115: 51
- [7] Writing Group for Mechanical Properties of Metal. *Mechanical Properties of Metal*. Beijing: Mechanical Industry Press, 1982: 23
(金属机械性能编写组. 金属机械性能. 北京: 机械工业出版社, 1982: 23)
- [8] Vöhringer O. In: Wohlfahrt H, Kopp R, Vöhringer O eds., *Proc 3rd Int Conf on Shot Peening*, Oberursel: DGM-Informationsgesellschaft, 1987: 185
- [9] Kagawa M. *Mater Test Techniq*, 1988; 33: 237
(香川胜一. 材料试验技术, 1988; 33: 237)
- [10] Kagawa M. *Mater Test Techniq*, 1989; 34: 287
(香川胜一. 材料试验技术, 1989; 34: 287)
- [11] Toska K, Iida K. In: Iida K ed., *Proc 4th Int Conf on Shot Peening*, Tokyo: Japan Society of Precision Engineering, 1990: 379
- [12] Li J B. *Chin J Mater Res*, 1998; 12: 287
(李家宝. 材料研究学报, 1998; 12: 287)
- [13] Li J B, Song X P, Chen R, He J W. In: Ericsson T, Odén M, Andersson A eds., *Proc 5th Int Conf on Residual Stresses*, Sweden: Linköping University, 1997: 1115
- [14] Li J B, Liu F Z, Ji V. *Surf Eng*, 1998; 14: 469
- [15] Kurita M, Sato T. In: Fujiwara H, Abe T, Tanaka K eds., *Proc 3rd Int Conf on Residual Stresses*. London: Elsevier Science Publishers, 1992: 208
- [16] Kurita M, Ihare I. *J Jpn Soc Mater Sci*, 1985; 34: 449
(栗田政则, 井原郁夫. 材料, 1985; 34: 449)
- [17] Ashby M F, Jones D R H. *Engineering Materials*. Oxford: Pergamon Press, 1980: 105
- [18] Gai X Y. *Thesis of Master's Degree*, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Sciences, 1993
(盖秀颖. 中国科学院金属研究所硕士学位论文, 1993)
- [19] Suresh S. *Fatigue of Materials*. London: Cambridge University Press, 1991