

· 试验研究 ·

### 44Si2CrV 钢弹簧的室温蠕变

刘德富

(东北特殊钢集团有限责任公司,大连 116031)

**摘要** 试验结果得出,44Si2CrV 钢弹簧经淬火 + 中温回火处理并除掉表面脱碳层后,在室温下所受应力超过临界蠕变应力值时即发生蠕变;钢的抗拉(或剪切)强度越高,临界蠕变应力越高。44Si2CrV 钢 900 °C 淬火,500 °C 回火,临界蠕变应力  $\tau_{cc} = 700$  MPa;900 °C 淬火,380 °C 回火,  $\tau_{cc} = 800$  MPa。蠕变开始时的塑性变形速率较大,之后急剧减小,在一定应力下保持一定时间后蠕变停止。经长时间压缩,蠕变变形已经停止的弹簧,于 200 °C 保温 2 h 后空冷,弹簧的自由高度伸长,并且在原来的应力下加载,弹簧蠕变又重新开始。

**关键词** 弹簧钢 室温蠕变 临界蠕变应力 回复

### Creep of Spring of Steel 44Si2CrV at Room Temperature

Liu Defu

(Donbei Special Steel Group Co Ltd, Dalian 116031)

**Abstract** Test results showed that the creeps of spring of steel 44Si2CrV quenched + medium tempering and removed decarburized layer happened at room temperature as stress was higher than critical creep stress value, and the higher tensile or shear strength, the higher critical creep stress. The critical creep stress  $\tau_{cc}$  of steel 44Si2CrV quenched at 900 °C and tempered at 500 °C was 700 MPa,  $\tau_{cc}$  quenched at 900 °C and tempered at 380 °C was 800 MPa. The plastic deformation speed was higher at creep beginning, then decreased abruptly. The creep stopped at certain stress for definite time. After loading for a long time and creep of spring stopped, as the spring was heated at 200 °C for 2 h air cooled, the free height of spring increased, and the creep of spring restarted again when it is loaded with original stress.

**Material Index** Spring Steel, Creep at Room Temperature, Critical Creep Stress, Recovery

室温下弹簧松弛是否由蠕变引起的问题尚有争论<sup>[1]</sup>,有人提出弹簧松弛属于循环软化和循环蠕变<sup>[2]</sup>。弹簧松弛又称为弹性减退,对弹簧钢弹性减退的研究工作可分为两类:(1)用实际弹簧进行试验,其中包括残余剪应变法及载荷损失和自由高度损失法<sup>[3,4]</sup>; (2)用扭转鲍申格效应试验来间接判断弹簧钢的抗弹减性<sup>[5]</sup>,弹簧钢的抗弹减性与鲍申格效应有较好的对应关系,鲍申格迟滞廻线面积越大,或廻线宽度越大,钢的抗弹减性越好。

44Si2CrV 钢弹簧在低于屈服强度的应力下长时间加载所造成的自由高度缩短由两部分组成,一是表面脱碳层的塑性变形造成对内部材料的牵制而使部分弹性变形不能恢复,二是钢的室温蠕变<sup>[6]</sup>。本文研究了 44Si2CrV 弹簧钢的室温蠕变特性。

#### 1 试验材料和方法

试验用一种 44Si2CrV 钢压缩螺旋弹簧,这种钢

是北满特钢为代替 60Si2CrVA 制造铁路货车转向架弹簧而试制的。其工艺流程为:电弧炉冶炼-轧制开坯-钢坯清理-轧制-退火-冷拔-磨光。钢的化学成分为(%): 0.44C、2.28Si、0.58Mn、0.014P、0.014S、1.42Cr、0.25V。弹簧钢丝直径 15 mm,螺旋弹簧中径为 70 mm,自由高度 191.72 mm,有效圈数 7.12 圈。

弹簧在 950 °C 加热卷制而成,其热处理工艺及机械性能见表 1。弹簧热处理后测得表面脱碳层深度为 0.3 mm,将其放入浓盐酸中腐蚀,使弹簧钢丝直径减小 1 mm,以保证彻底除掉表面脱碳层,然后将此弹簧用于室温蠕变试验。

弹簧压缩试验采用 WE-30B 型液压式万能试验机及 C-3 型持久强度试验机,在持久强度试验机上使用自制的卡具使弹簧受到压缩变形。弹簧钢丝直径及弹簧自由高度测量用游标卡尺,精度 0.02 mm。

表 1 试验弹簧的热处理工艺及机械性能、临界蠕变应力

Table 1 Heat treatment process, mechanical properties and critical creep stress of test spring

淬火	回火	$\sigma_{0.2}$ /MPa	$\sigma_b$ /MPa	$\delta$ /%	$\psi$ /%	$A_k$ /J	HRC 值	$\tau_{p0.3}$ /MPa	$\tau_b$ /MPa	$\tau_{cc}$ /MPa
900 °C 1 h 油	500 °C 3 h 空	1 550	1 660	11	30	29	47	990	1 340	700
	380 °C 3 h 空	1 910	2 080	9	36	31	55	1 240	1 720	800

$$\text{弹簧应力计算公式: } P = \frac{\tau \pi d^3}{8KD}$$

式中:  $P$ - 弹簧载荷/N;  $\tau$ - 弹簧应力/MPa;  $D$ - 螺旋弹簧的平均直径/mm;  $d$ - 弹簧钢丝的直径/mm。

$$K = \frac{4c-1}{4c-4} + \frac{0.615}{c}; \text{ 式中: } c = \frac{D}{d}$$

## 2 试验结果及分析

### 2.1 应力对室温蠕变的影响

对两种经不同热处理工艺(表 1)处理的弹簧, 分别得到该弹簧自由高度随应力变化的曲线如图 1。在每一载荷(应力)长时间压缩之前, 先将弹簧按预定载荷压缩并保持 1 min, 卸载测量弹簧的自由高度, 均未发现弹簧自由高度有明显变化, 说明弹簧自由高度的变化不是在加载后瞬间形成的。然后再按此载荷在持久试验机上加载压缩 72 h 后卸载测弹簧自由高度, 所测得的弹簧自由高度变化是在长时间加载过程中逐渐产生的。

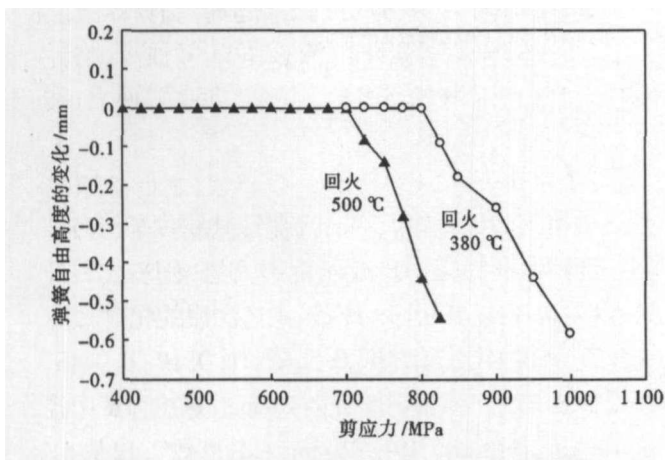


图 1 剪应力对弹簧自由高度变化的影响(加载时间 72 h; 弹簧初始自由高度 191.72 mm)

Fig. 1 Effect of shear stress on free height change of spring, loading time- 72 h, original free height of spring- 191.72 mm

由图 1 可见, 对于 500 °C 回火的弹簧, 当应力超过 700 MPa 后, 经 72 h 压缩弹簧自由高度下降, 且随应力增加弹簧的自由高度继续下降, 说明弹簧发生了室温蠕变。而对于 380 °C 回火的弹簧, 当应力超过 800 MPa 后, 经 72 h 压缩弹簧自由高度下降, 且随应力增加弹簧的自由高度继续下降, 说明弹簧发生了室温蠕变。如果把保持不发生室温蠕变的最大应力称为临界蠕变应力, 用  $\tau_c$  表示, 则可以看出临界蠕变应力  $\tau_c$  与钢的抗拉(或剪切)强度有关。抗拉或剪切强度越高, 临界蠕变应力也越高。500 °C 回火的弹簧抗拉强度 1 660 MPa, 剪切强度 1 340

MPa, 其临界蠕变应力为 700 MPa; 而 380 °C 回火的弹簧抗拉强度 2 080 MPa, 剪切强度 1 720 MPa, 其临界蠕变应力为 800 MPa(表 1)。

### 2.2 蠕变变形量与时间的关系

在超过临界蠕变应力的一定载荷下, 压缩弹簧使其发生室温蠕变, 隔一定时间卸载测弹簧的自由高度, 然后继续加原载荷压缩, 这样得到在某一恒定应力下蠕变变形量随时间变化的曲线如图 2。由图可见在恒定的应力下, 弹簧最初的蠕变速度较大, 然后随时间的延长而迅速减小, 最后在某一时刻蠕变完全停止而使曲线变为水平。对于 500 °C 回火的弹簧, 900 MPa 1 326 h 后蠕变停止; 对于 380 °C 回火的弹簧, 1 000 MPa 864 h 后蠕变停止。

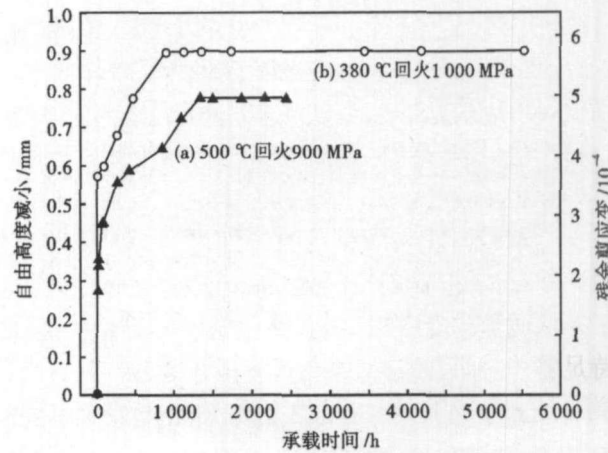


图 2 弹簧自由高度和残余剪应变随加载时间的变化

Fig. 2 Change of spring free height and retained shear strain with loading time

在高温蠕变试验中, 变形量是在试样加载的情况下测量。但室温蠕变带载荷测量有两个问题不好解决: (1) 室温蠕变的变形量非常小, 本试验中每次测量弹簧的剪应变在  $10^{-5}$  数量级, 经上千小时压缩后弹簧的累计蠕变变形量也只能达到  $10^{-4}$  数量级, 测量这样微小的变形量必然非常困难, 而对于弹簧来说, 这样微小的变形量在多圈内积累起来已使其自由高度产生明显的变化, 用游标卡尺即可测出; (2) 带载荷的情况下测得的变形量包括滞弹性变形, 而且滞弹性变形必然占总变形量的绝大部分, 这种滞弹性变形在卸载后将恢复, 不属于塑性变形。在本试验中, 卸载后测量弹簧的变形量, 所测得的完全是塑性变形。

室温弹簧剪应变变量公式为:

$$\text{剪应变变量} = \frac{\text{自由高度} - \text{室温蠕变后高度}}{\text{有效圈数} \times \pi \times \text{螺旋弹簧中径}}$$

500℃回火的弹簧,900 MPa 1 326 h后,自由高度从190.98 mm减小到190.20 mm,总计减小0.78 mm,剪应变量为 $4.9 \times 10^{-4}$ ,蠕变停止;380℃回火的弹簧,在1 000 MPa 864 h后,自由高度从188.50 mm减小到187.60 mm,总计减小0.9 mm,剪应变量为 $5.7 \times 10^{-4}$ ,蠕变停止。

室温蠕变是在低于屈服强度的应力下随着时间的延长而逐渐产生的塑性变形,与高温蠕变不同的是室温蠕变的变形量很小,并且经一定时间后变形停止。室温蠕变的这种特点可从其微观组织及位错运动的规律来解释。金属材料内部组织具有不均匀性,当受到的应力高于临界蠕变应力时,尽管此应力低于屈服强度,也可能使材料内部的可动位错发生运动和滑移,从而使材料发生塑性变形,即发生蠕变。随着蠕变的进行,一些异号位错在运动中相遇而相互抵消,一些位错运动到晶界处受阻塞积,这样就使得可动位错的数量减少,塞积的位错对进一步滑移产生阻力,达到一定程度时塑性变形就停止了,亦即停止了蠕变。

采取措施防止表面脱碳,再根据弹簧钢室温蠕变的特点,在弹簧制造的最后一道工序——预调整中采取适当的冷强压工艺,使弹簧在较高应力下保持足够的时间,使其基本完成室温蠕变,则可以保证弹簧在正常使用中自由高度稳定,不发生松弛现象。

### 2.3 蠕变后的回复处理

对于上述在1 000 MPa应力下经过5 502 h蠕变试验的弹簧,自由高度已变为187.60 mm,在此应力下蠕变变形已经停止。将此弹簧在200℃保温2 h后空冷,测其自由高度,变为188.02 mm,即伸长了0.42 mm。然后再将此弹簧重新放回持久试验机上,加上原来的载荷11.43 kN,相当于剪应力1 000 MPa,弹簧的蠕变变形又重新开始,弹簧自由高度及残余剪应变随加载时间变化的曲线如图3。

室温蠕变属于冷塑性变形,此后于200℃保温相当于回复退火处理。将图3与图2(b)比较可见,经回复处理后重新进行蠕变试验时,经3 816 h蠕变变形停止,这较回复处理前蠕变试验时816 h蠕变停止的时间大大延长了。而且弹簧的自由高度较回复处理前(187.60 mm)又有所缩短,最后达到187.40 mm时蠕变停止。

## 3 结论

(1)44Si2CrV钢在淬火+回火的状态下,室温所受应力小于某一临界值时,不发生蠕变,所受应力

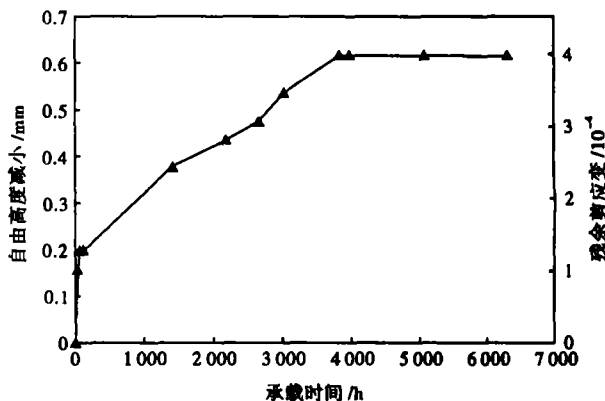


图3 弹簧自由高度和残余剪应变随加载时间的变化(380℃回火,剪应力1 000 MPa室温蠕变停止后再进行200℃2 h回复处理,剪应力1 000 MPa)

Fig. 3 Change of spring free height and retained shear strain with loading time, 380℃ tempered, shear stress 1 000 MPa, after creep at room temperature stopped then recovery-treated at 200℃ for 2 h, shear stress 1 000 MPa

超过某一临界值时即发生蠕变,将此临界应力值称为临界蠕变应力。

(2)钢的抗拉(或剪切)强度越高,临界蠕变应力越高;44Si2CrV钢900℃淬火,500℃回火,临界蠕变应力 $\tau_{cc} = 700$  MPa;900℃淬火,380℃回火,临界蠕变应力 $\tau_{cc} = 800$  MPa。

(3)蠕变开始时的变形速率较大,之后急剧减小,在一定应力下保持一定时间后蠕变停止。

(4)经长时间压缩,蠕变变形已经停止的弹簧,于200℃保温2 h后空冷,弹簧的自由高度伸长,并且在原来的应力下蠕变变形又重新开始。

### 参考文献

- 1 苏德达. 弹簧(材料)应力松弛及预防. 天津:天津大学出版社, 2002
- 2 Wang Zhirui. Cyclic Softening and Cyclic Creep of Spring Steels—a New Outlook on a Material's Sag and Stress Relaxation Behavior. Wire Journal International, 2000(1):84
- 3 Yamamoto. Spring Steel Having a Good Sag-resistance and a Good Hardenability. U. S. Patent 4544406 Oct. 1, 1985
- 4 Atsushi Sugimoto, Osamu Nakano, Shigeru Yasuda, et al. Spring Steel Having Good Durability and Sag Resistance. United States Patent 5009843 Apr. 23, 1991
- 5 Furr S T. Development of a New Laboratory Test Method for Spring Steels. Journal of Basic Engineering, 1972(3):223
- 6 刘德富,徐德祥. 44Si2CrV钢弹簧弹性减退机理的研究. 特殊钢, 2007, 28(2):4

刘德富(1947-),男,教授级高级工程师,博士。1984年东北重型机械学院毕业,特殊钢新材料的研究和开发。

收稿日期:2007-01-16