

44Si2CrV 钢弹簧弹性减退机理的研究

刘德富 徐德祥

(东北特殊钢集团有限责任公司,大连 116031)

摘要 研究了影响 44Si2CrV 钢弹簧在低于屈服强度的应力下长时间加载引起自由高度变化的因素。结果表明,44Si2CrV 钢弹簧在 900 MPa 的应力下压缩 72 h,自由高度的缩短由两部分组成: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,由此所造成的弹簧自由高度缩短占总变形量的 84%;钢的室温蠕变,占自由高度缩短的 16%。

关键词 44Si2CrV 弹簧钢 脱碳 弹性减退 室温蠕变

Study on Mechanism of Elasticity Attenuation of Steel 44Si2CrV Spring

Liu Defu and Xu Dexiang

(Dongbei Special Steel Group Co Ltd, Dalian 116031)

Abstract The factors to effect change of free height of steel 44Si2CrV spring during long time loading for 72 h under stress to be lower than yield strength of steel has been studied. The results show that the reduction of free height of steel 44Si2CrV spring under compressive stress 900 MPa consists of two parts: plastic deformation of surface decarburized zone to hinder elastically deformed internal material recovering, making up 84% of total reduction of free height and creep of steel at ambient temperature making up 16% of total reduction of free height.

Material Index Spring Steel 44Si2CrV, Decarburization, Elasticity Resistance, Creep at Ambient Temperature

弹簧在低于屈服强度的应力下长时间加载,会使其自由高度发生变化,称为松弛;弹簧松弛的原因,普遍认为是弹簧钢发生了弹性减退。弹簧钢弹性减退的试验方法分为两类,一类是用实际弹簧进行测试,另一类是用试样进行测试。在用试样进行测试中常用的试验方法是鲍申格效应法^[1],利用钢的鲍申格效应来判断其抗弹减性;也有利用一定温度(高于室温,如 100 ℃)下的蠕变性能来判断钢的抗弹减性的优劣^[2]。室温下弹簧松弛是否由蠕变引起的问题尚有争论^[3];也有人提出弹簧松弛属于循环软化和循环蠕变^[4]。本试验利用一种压缩弹簧研究了表面脱碳层塑性变形对弹簧松弛的影响。

1 试验材料和方法

试验材料为 44Si2CrV,所用压缩弹簧钢丝直径 16.52 mm,螺旋弹簧中径 70 mm,自由高度 194.26 mm,有效圈数 7.12 圈,该钢化学成分见表 1。

弹簧在 950 ℃ 加热卷制而成,热处理工艺为 900 ℃ 90 min 油冷;420 ℃ 3 h 空冷。弹簧脱碳层深度为 0.3 mm(图 1)。其机械性能如表 2,表 2 中的 τ_b 及 $\tau_{p0.3}$ 分别为抗扭强度和规定非比例扭转应力。

表 1 44Si2CrV 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel 44Si2CrV / %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	V
0.44	2.28	0.58	0.014	0.014	0.05	1.42	0.25

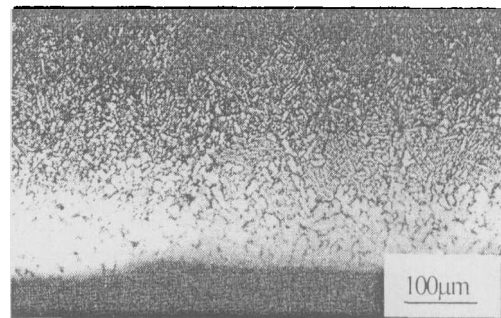


图 1 试验弹簧的表面脱碳

Fig. 1 Surface decarburization of test spring

表 2 44Si2CrV 钢弹簧的机械性能

Table 2 Mechanical properties of steel 44Si2CrV spring

σ_b / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	δ / %	ψ / %	A_k / J	硬度 (HRC)	τ_b / MPa	$\tau_{p0.3}$ / MPa
1 880	1 600	10	34.6	29	53	1 510	1 030

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

使用自制卡具压缩弹簧。

2 试验结果及分析

2.1 弹簧的压缩

弹簧热处理后测得自由高度为 194.26 mm, 将此弹簧于 900 MPa 的应力下(载荷 16.5 kN)压缩。第 1~3 次压缩均保持 1 min 后卸载, 测量弹簧自由高度, 然后在持久强度试验机上以同样载荷压缩保

持 72 h, 卸载后测量弹簧自由高度。由表 3 可见, 每次压缩弹簧的自由高度都在缩短, 经 4 次压缩后弹簧的自由高度一共缩短了 2.62 mm。在此过程中, 弹簧所受应力 900 MPa 远低于其屈服强度及规定非比例扭转应力(见表 2), 但弹簧的自由高度却发生了明显的缩短。

大部分塑性变形是在第 1 次压缩时完成的, 此

表 3 初始自由高度为 194.26 mm 的弹簧压缩试验中自由高度的变化

Table 3 Change of free height of spring in compressive test, original free height of spring- 194.26mm

压缩次序	载荷/kN	应力/MPa	保持时间	卸载后自由高度/mm	自由高度缩短/mm	累计自由高度缩短/mm	累计残余剪应变
1	16.5	900	1 min	192.34	1.92	1.92	1.23×10^{-3}
2	16.5	900	1 min	192.26	0.08	2.00	1.28×10^{-3}
3	16.5	900	1 min	192.20	0.06	2.06	1.32×10^{-3}
4	16.5	900	72 h	191.64	0.56	2.62	1.67×10^{-3}

后, 每次压缩所造成的塑性变形量在逐渐减小。第 4 次压缩时间较长(72 h), 所发生的塑性变形量又有所增加, 说明塑性变形量与承受载荷的时间有关。

2.2 弹簧压缩后的恢复

对于弹簧压缩后自由高度的缩短, 可作如下推测, 虽然弹簧所受应力 900 MPa 远低于其屈服强度, 但弹簧表面具有脱碳层, 可以肯定表面脱碳层的屈服强度 ≤ 900 MPa, 所以弹簧在 900 MPa 的应力下(载荷 16.5 kN)压缩, 表面脱碳层已发生了明显的塑性变形, 卸载后已不能恢复原来的形状。加载时脱碳层以下的材料虽然仍处于弹性变形阶段, 但由于受已发生塑性变形的表面层的牵制, 卸载后将有部分弹性变形不能恢复, 所以弹簧的自由高度必然发生明显缩短。如果将已发生塑性变形的表层逐渐除掉, 即逐渐解除表面塑性变形层对内部材料的牵制, 内部材料的弹性变形将逐渐恢复而使弹簧的自由高度逐渐伸长。

为验证这一推测, 对于经压缩已发生自由高度缩短的弹簧进行了恢复试验, 即将弹簧放入盐酸中进行腐蚀, 每隔一定时间, 亦即每腐蚀一定深度测量一次自由高度和簧丝直径, 发现随表面塑性变形层被逐渐腐蚀去除, 弹簧的自由高度逐渐伸长。同时考虑因腐蚀而造成的弹簧自由高度损失, 得到弹簧自由高度随簧丝直径减小而伸长的曲线如图 2。

试验结果表明, 经一定时间的腐蚀, 簧丝直径由 16.52 mm 减小到 15.00 mm, 弹簧的自由高度由压缩后的 191.64 mm 最终伸长到 193.84 mm, 总共伸长了 2.20 mm。前面已经提到, 经 4 次压缩弹簧的自由高度共缩短了 2.62 mm, 则可以看到, 在恢复试验中,

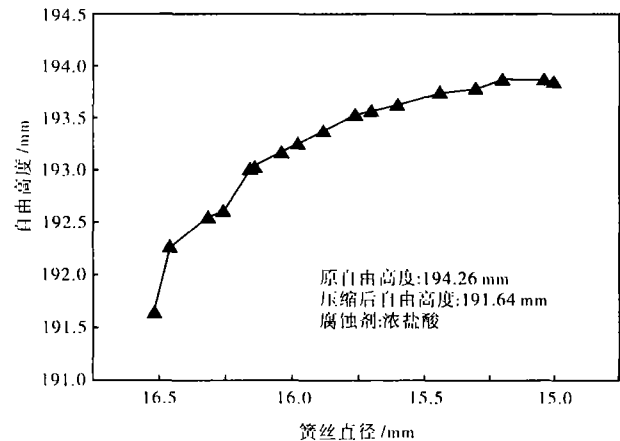


图 2 弹簧自由高度随簧丝直径的变化

Fig. 2 Change of free height of spring with spring wire diameter

由于弹簧表面脱碳层被腐蚀去除, 前面压缩造成的弹簧自由高度缩短的 84% 得到了恢复。说明表面脱碳层的塑性变形是造成弹簧松弛的主要原因。

2.3 弹簧钢的室温蠕变

在对经长时间压缩而发生自由高度缩短的弹簧进行腐蚀试验时发现, 弹簧的自由高度虽然随簧丝直径的减小而逐渐伸长, 但最终并不能完全恢复到压缩前的初始高度。簧丝直径由 16.52 mm 减小到 15.00 mm, 弹簧的自由高度由 191.64 mm 伸长到 193.84 mm, 由图 2 可见, 簧丝直径继续减小弹簧的自由高度已不再变化, 曲线已趋向水平, 说明弹簧的自由高度已不可能恢复到原来的 194.26 mm, 还有 0.42 mm 没有恢复。弹簧这部分不能恢复的自由高度减小, 是由弹簧钢本身的塑性变形而引起, 而这种塑性变形是在室温下、且远低于屈服强度的应力下

长时间加载造成的,应属于室温蠕变。

为进一步证实弹簧钢的室温蠕变,将经腐蚀去除脱碳层的弹簧在不同载荷(应力)下进行 3 次长时间压缩,第 1 次压缩载荷 11.5 kN($\tau = 812$ MPa),保持 28 h 后卸载测量弹簧自由高度;然后再以 12.74 kN 载荷($\tau = 900$ MPa)压缩,保持 67 h 后卸载测量弹簧自由高度;然后再以 13.45 kN 载荷($\tau =$

950 MPa)压缩,保持 72 h 后卸载测量弹簧自由高度;结果如表 4。由表 4 可见,将弹簧压缩并保持较长时间,压缩载荷逐次增加,但应力均低于钢的屈服极限,而每次压缩后弹簧的自由高度都在缩短,说明每次压缩弹簧都在发生塑性变形,这种在低于屈服极限的应力下长时间加载造成的塑性变形应为室温蠕变。

将经热处理(淬火 900℃、回火 500℃)后并经

表 4 弹簧经长时间压缩后自由高度的变化,弹簧初始自由高度 192.32 mm

Table 4 Change of free height of spring during long time compressing, original free height of spring- 192.32mm

载荷/ kN	剪应力/ MPa	保持时间/ h	卸载后自由 高度/mm	自由高度 缩短/mm	残余剪 应变	累计自由 高度缩短/mm	累计残余 剪应变
11.50	812	28	192.20	0.12	7.66×10^{-5}	0.12	7.66×10^{-5}
12.74	900	67	191.94	0.26	1.66×10^{-4}	0.38	2.43×10^{-4}
13.45	950	72	191.60	0.34	2.17×10^{-4}	0.72	4.60×10^{-4}

腐蚀除掉脱碳层的弹簧,经持久试验机 825 MPa 的应力长时间压缩,隔一定时间卸载测量弹簧的自由高度,然后继续加原载荷压缩,得到弹簧自由高度随加载时间变化的曲线(图 3)。应该说明的是,扭转试验测得经 900℃ 淬火、500℃ 回火的试样 $\tau_{p0.3} = 990$ MPa,所以压缩试验所采用的 825 MPa 的应力低于 $\tau_{p0.3}$ 。由图 3 可见,在 825 MPa 的应力下,弹簧的自由高度随加载时间的增加而逐渐缩短,说明该弹簧钢在低于屈服强度的应力下可发生明显的室温蠕变,但在 168 h 以后,弹簧的自由高度不再随加载时间而变化,说明此时在此应力水平下钢的室温蠕变已经停止。

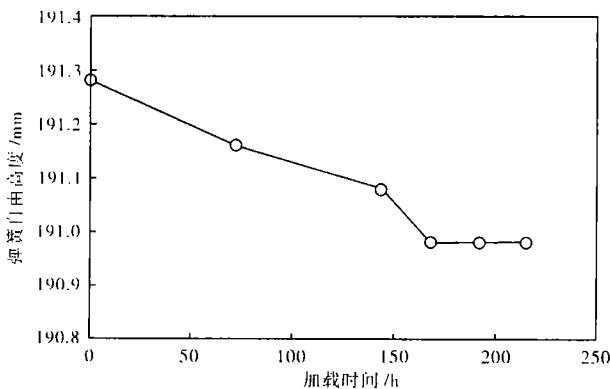


图 3 弹簧自由高度随加载时间的变化, $\tau = 825$ MPa

Fig.3 Change of free height of spring with loading time, $\tau = 825$ MPa

2.4 无脱碳层与有脱碳层弹簧应力松弛的比较

无脱碳层与有脱碳层弹簧应力松弛的比较如表 5。可见在应力相同保持时间接近的情况下,弹簧自由高度的变化相差很大,残余剪应变相差一个数量

表 5 有、无脱碳层弹簧应力松弛的比较

Fig.5 Comparison of stress relaxation of spring with and without decarburization zone

表面脱碳层/ mm	应力/ MPa	保持时间/ h	自由高度 缩短/mm	残余剪 应变
0.3	900	72	2.62	1.67×10^{-3}
无	900	67	0.38	2.43×10^{-4}

级。由此可见,如果弹簧没有脱碳层,则应力松弛现象将大为减轻。

3 结论

(1) 44Si2CrV 钢弹簧在低于屈服强度(1 030 MPa)的应力(900 MPa)下压缩 72 h,自由高度的缩短由两部分组成,一是表面脱碳层的塑性变形,造成弹簧自由高度的缩短,占总变形量的 84%;二是钢的室温蠕变,占自由高度缩短的 16%。

(2) 44Si2CrV 弹簧钢在淬火 + 中温回火的状态下,在 825 MPa 应力下,可发生明显的室温蠕变,经 168 h 后,剪应变达 2.17×10^{-4} ,室温蠕变停止。

参考文献

- 1 Furr S T. Development of a New Laboratory Test Method for Spring Steels. Journal of Basic Engineering, 1972(3):223
- 2 Ikubo Tomohito. High Strength Spring Steel. EUR. Pat. EP 0265273, 1988
- 3 苏德达. 弹簧(材料)应力松弛及预防. 天津:天津大学出版社, 2002
- 4 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

刘德富(1947-),男,博士,教授级高工,从事特殊钢新材料的研究开发。