

论贯穿于冷卷圆簧制造工艺全过程的残余应力

王仁智

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 论述了贯穿于冷卷圆簧制造工艺全过程的残余应力, 包括冷卷、回火、渗氮、喷丸、施加预应力处理等工艺中的残余应力变化。研究表明, 弹簧的残余应力状态 (包括残余应力的正负量值与方向) 是唯一贯穿于弹簧制造过程的物理量, 控制每道工艺簧内的残余应力状态, 就是控制了弹簧的疲劳抗力、应力松弛抗力以及永久变形抗力。

关键词: 弹簧; 残余应力; 疲劳抗力

中图分类号: TH135

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)06-0001-12

Review on the Residual Stress Through the Course of Manufacture Technique for the Cold Formed Circular Coil Spring

WANG Ren-zhi

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

Abstract: The changes of residual stress through the course of manufacturing technique including cold forming, annealing, nitriding, shot peening and prestressed treatment for the cold forming coil spring were discussed. It was found out that residual stress state of spring is the only physical parameter through the course manufacturing technique. To grasp and control the residual stress state during every manufacturing process is to control the fatigue resistance stress relaxation resistance as well as permanent deformation resistance.

Key words: spring; residual stress; fatigue stress relaxation and deformation resistance

0 引言

仔细分析弹簧冷卷工艺的全过程不难发现, 每道关键工艺 (包括冷卷、回火、表面渗氮、表面喷丸、施加预应力处理) 无不涉及到弹簧的残余应力状态及其变化: 冷卷时钢丝截面发生非均匀塑性变形过程中, 弹簧内、外圆表层分别引入轴向与环向残余应力; 随后的回火工艺温度场使引入的残余拉应力因松弛而降低; 喷丸工艺又是旨在向内、外圆表层引入残余压应力场; 立定、冷/热强压以及蠕变回火工艺, 也是影响簧内残余应力的变化。由此可见, 上述所有的制造工艺无不与弹簧的残余应力发生紧密的联系, 弹簧的残余应力状态 (残余应力的正负量值与方向) 是其唯一能贯穿于整个制造工艺过程的物理量。

每道工艺都会使弹簧的残余应力状态发生某

种变化, 冷卷簧主要依靠一系列制造工艺最终引入适宜的残余应力场, 由此来提高其疲劳抗力。从一定意义上讲, 控制每道工艺引入簧内的残余应力状态, 就是控制弹簧的疲劳抗力。如果不了解也不去检测每道工艺引入簧内的残余应力, 就不会了解该工艺对簧的疲劳抗力究竟起着何种影响, 不会知晓如何通过改进每道加工工艺制度, 以获得适宜的残余压应力场。更不会知晓如何通过每道工艺的控制与整体工艺制度的协调, 最终使弹簧获得一个优化的残余压应力场或残余压应力场强度, 以便使簧具备高的疲劳抗力。一个制造厂商如果处在上述一种状况, 生产过程或服役过程中弹簧一旦出现早期疲劳失效, 就会迷失寻求失效原因的正确方向, 从而不能迅速而准确地查出那道工艺引起了疲劳抗力的降低。针对我国弹簧制造业中目前尚存在某种轻视残余应力以及它在提高疲劳抗力中的作用等现状, 文中主要阐述了如何通过检测和控制冷卷弹簧每道加工工艺引入的残余应力, 最终使弹簧或者获

收稿日期: 2006-09-12; 修回日期: 2006-11-13

作者简介: 王仁智(1932-), 男(汉), 山东烟台人, 研究员。

得一个优化的残余压应力场,或者获得一个更高的残余压应力场强度,由此获得更高的疲劳断裂抗力。

1 弹簧冷卷工艺中的应力状况及控制

冷卷成型后无需采取淬火处理的弹簧材料,通常是冷拔碳素钢丝、琴钢丝、不锈钢丝以及各种油

淬回火钢丝,还包括一部分铍青铜线材。

在有心卷簧机上或自动卷簧机上完成的冷卷弹簧,钢丝在弯曲成型时横截面上产生的非均匀塑性变形引入内圆与外圆表层的轴向残余应力,如图1所示。

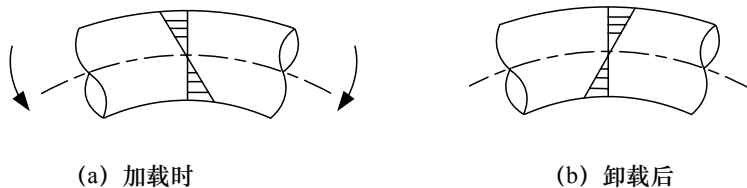


图1 应力沿横截面的分布

Fig.1 Distribution of stresses on the cross section: (a) loading; (b) unloading

外载引入簧中的残余应力(σ_r)沿表层深度(z)的分布曲线(σ_r - z 曲线),也称做残余应力剖面,或简称应力剖面(Stress profile),随着弹簧的旋绕比 C ($C=D_2/d$, D_2 —簧中径, d —线径)而变化。对于线径 d 恒定的簧,冷卷引入簧内的残余应力随旋绕比 C 的变小而增高,即应力剖面越高。

众所周知,室温高周疲劳强度受残余应力的影响最为敏感,对于超高强度钢($\sigma_b > 1600$ MPa),这种影响尤为显著。通常,残余压应力与残余拉应力对材料疲劳强度的影响完全相反,前者提高而后者又总是降低疲劳强度。材料力学的计算结果指出,圆柱螺旋弹簧在承受外载时,最大应力作用于内圆表面,如果冷卷又把残余拉应力引入内圆表层,无疑会极大地加快弹簧的疲劳断裂。不同抗拉强度的超高强度钢丝($\sigma_r = 1\ 700 \sim 2\ 200$ MPa)与不同旋绕比($C=2 \sim 8$)的弹簧,冷卷引入内圆表面上的残余拉应力通常处于 $\sigma_r = +200 \sim +400$ MPa的范围^[1],其分布深度约处于 $z_0 = 0.25 \sim 0.5$ mm的范围。只有对冷卷簧进行实际检测,才能了解所引入的 σ_r 与 z_0 的实际数值。通过调整和改进冷卷工艺,尽量降低引入内圆表层的残余拉应力水平,对疲劳抗力的有害作用降到最低限度。此外,降低冷卷引入的残余拉应力水平,一方面会减轻后续制定消除残余拉应力回火工艺制度中的难度,另一方面为后续喷丸工艺引入残余压应力创造有利条件。

2 弹簧回火工艺中的应力状态及控制

弹簧是个受力件,作用于其上的既有外施应力又有残余应力(即内应力)。应力是个矢量,不仅有大小、正负(即拉、压)之分,还有作用方向之别。在一切情况下残余拉应力对弹簧的疲劳与应力腐蚀(氢脆)断裂抗力总是起削弱和降低作用;恰好相反,残余压应力对上述力学性质却总是起提高和改善作用。因此,制造工艺的全过程应尽量避免引入残余拉应力。如一旦引入残余拉应力(例如冷卷工艺),则应立即采取措施予以降低或消除。但是至今许多著作和手册中凡提到回火消除残余应力时,很少明确指出需消除的是什么性质(或状态)的残余应力。因此,这里明确指出,借助于回火工艺消除的只是那些起有害作用的残余拉应力,至于引入于簧中的残余压应力不仅不应该降低或削弱,反而还应加以保护和提高。所以,笼统地只提回火消除残余应力,而不明确指明应消除的是哪种性质的残余应力,至少会模糊人们对残余应力性质及其作用的认识以及疏忽对残余拉应力的提防。

对于冷卷工艺衔接的回火工艺,主要是用来消除冷卷工艺中引入的残余拉应力。所以大部分著作和手册中,常把它简称为“去应力回火”。但是,消除拉应力只是它的作用之一,归纳起来,回火工艺有以下几种目的。

2.1 消除钢丝冷拔与弹簧冷卷引入的残余拉应力

无论是用冷拔碳素钢丝还是油淬回火钢丝冷卷制成的圆簧,其内圆表层都会不同程度地引入残

余拉应力,它对弹簧产生两种有害作用:①引起内圆表面开裂;②阻碍后续喷丸引入残余压应力。因此,冷卷后弹簧必须采取回火处理。

2.1.1 防止弹簧产生表面开裂

已经提到,依钢丝抗拉强度的不同,冷卷引入内圆表面上的残余拉应力通常可达到 $\sigma_r=+200\sim+400$ MPa。该应力与环境中氢的共同作用,经过一段孕育期,内圆表面上可能产生应力腐蚀开裂(SCC)。对于弹簧这种超高强度钢($\sigma_b>1700$ MPa),其开裂的性质实质上就是氢脆开裂。为了防止这种开裂,生产上通常规定冷卷后需在2 h之内(即在发生开裂的孕育期内)及时进行消除残余拉应力回火处理。如果弹簧的内、外圆表层内不存在残余拉应力或只存在残余压应力,就不会由于氢的渗入而导致发生这种开裂^[2]。

2.1.2 为后续喷丸引入残余压应力做准备

许多残余应力的测定结果表明^[3,4],冷卷引入簧内的残余拉应力,对后续喷丸引入残余压应力将起着严重的阻碍作用。因此,必须采用中、低温进行消除拉应力的热处理。对这种热处理有的称做回火,而有的称做退火,总之其目的主要是旨在消除残余拉应力,所以无必要深究其称谓。为了叙述的方便,更是为了建立一些残余应力(σ_r)及其分布深度(z)在数量级方面的概念,以及残余应力剖面在回火温度场中的松弛量级变化的概念,对 σ_r 、 z 、 t (保温时间)等均假设了具体的数字。一个具有代表性的残余拉应力剖面在回火中的变化过程,具有以下特征。

(1) 冷卷引入表层的残余拉应力 σ_r - z 曲线(应力剖面)呈单调变化(图2, a 曲线),即最大拉应力处于表面上,向内呈单调递减。通常对于线径为2~6 mm的圆簧, $+\sigma_r$ 的深度约处于 $z_0=0.25\sim0.35$ mm,而对于线径为11~17 mm的簧, $+\sigma_r$ 的深度约为 $z_0=0.30\sim0.60$ mm。

(2) 残余拉应力随回火保温时间而逐渐降低,但并不是整个应力剖面等值均匀下移,而是不同深度上的拉应力松弛量各不相同。应力剖面松弛过程中的某一阶段, σ_r - z 曲线会呈现极大值,如图2, b、c曲线所示。当回火时间足够长,松弛后的应力剖面达到稳态或亚稳态阶段时,其残余应力剖面如图2, d 曲线所示。对于热强性较低的冷拔碳素钢丝,通常在较低的温度($T\approx 300$ °C)下便可达到亚稳态

的残余应力剖面。而对于热强性较高的油淬回火超高强度钢丝,通常需要在更高的回火温度(~ 420 °C)和更长的保温时间,残余应力剖面才能达到亚稳态。

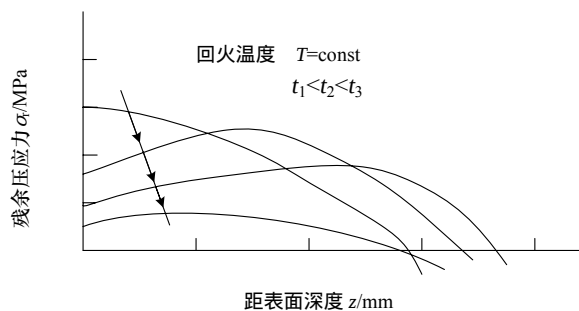


图2 冷卷引入弹簧内圆表层的 σ_r - z 剖面a以及在回火温度(T)不同保温时间(t)处理后的 σ_r - z 剖面b、c、d示意图

Fig.2 Schematic σ_r - z profile of spring treated by shot peening a, as well as the σ_r - z profiles of shot peening + annealing with different T and time (t) b, c, d.

冷卷后假如不经过消除应力回火(或采用不合理的制度进行回火)处理,弹簧表层仍为残余拉应力,应力剖面如图3(a)所示。当弹簧进入后续的喷丸工艺,喷丸引入的残余压应力剖面示于图3(a)。上述拉/压残余应力沿层深一一叠加后,最终的总残余压应力剖面也示于图3(a)。另一种为冷卷后经过适宜的消除应力回火后再经喷丸处理,最终获得的总残余压应力剖面示图3(b)。比较图3中的(a)与(b)两图可知,只有通过适宜的消除应力回火降低或消除冷卷引入的残余拉应力,喷丸工艺才能引入足够高的残余压应力或残余压应力场强度(Intensity of residual stress field-ISF) $\int \sigma_r(z) dz$ 。

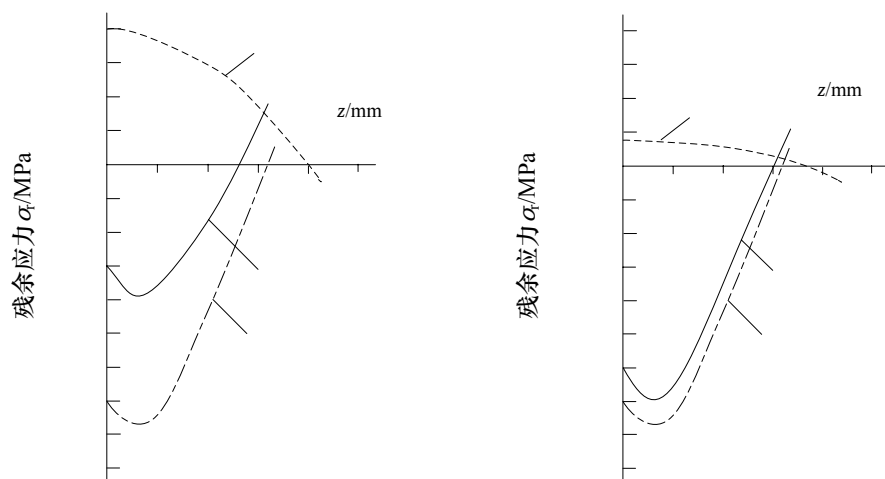
以往的许多残余应力测定结果指出^[1],回火制度应能使表面上的残余拉应力下降至 $\sigma_{r,s} \leq +50 \sim +100$ MPa的范围,这样才能有利于后续喷丸工艺引入更高的残余压应力剖面。

对各种材料的钢丝,弹簧手册中推荐的回火制度如下^[5]:冷拔碳素钢丝与琴钢丝温度240~340 °C,保温20~35 min;油淬回火合金钢丝温度360~460 °C,保温20~35 min;奥氏体不锈钢丝温度280~360 °C,保温20~40 min

通常,回火温度越高,越能更快、更彻底的消除残余拉应力。但这又会引起钢丝的抗拉强度降

低,由此导致弹簧强度下降,严重者会因超差而报废。文献[5]给出了14种弹簧钢的抗拉强度与回火温度间的关系曲线。各种钢的抗拉力强度均随回火温度的上升而降低。以60Si2MnA钢为例,在

350~500℃之间回火,每升高10℃,抗拉强度下降35MPa。经400℃回火的 $\sigma_b=1\ 814\text{ MPa}$,如升高到450℃回火,抗拉强度降至 $\sigma_b=1\ 630\text{ MPa}$,即下降约10%。



(a) 冷卷引入簧表层内的残余拉应力 ($\sigma_{r,c}-z$), 喷丸引入的残余压应力 ($\sigma_{r,sp}-z$) 以及二者叠加后的总残余压应力 (σ_r-z)
(b) 冷卷后回火的残余应力 ($\sigma_{r,temp}-z$) 与总残余压应力 (σ_r-z)

图3 冷卷、喷丸及回火后的弹簧应力

Fig.3 Schematic σ_r-z profile of springs suffering working technique: (a) $\sigma_{r,c}-z$ profile after cold forming, $\sigma_{r,sp}-z$ profile after shot peening as well as σ_r-z profile of both resulting; (b) $\sigma_{r,temp}-z$ profile after cold forming and tempering as well as σ_r-z profile of both resulting.

回火工艺对弹簧既能消除残余拉应力,也能降低弹簧的强度。因此,应设法寻求最适宜的回火制度,经过该制度的回火处理,残余拉应力既能大幅度降低,同时又不至于引起弹簧强度的明显下降。

2.2 获得改善钢丝力学性质的亚结构组织

冷拔使钢丝整体遭受较均匀的塑性形变,而冷卷又使钢丝经受非均匀的塑性形变。该塑变除了引入残余拉/压应力(即宏观应力)之外,还使钢丝的晶体亚结构发生如下变化:位错大量增值,点阵严重畸变,亚晶粒极大碎化等。或者笼统地说引入较高的微观应力。塑变获得的这种亚结构是一种非稳态的组织,其力学性质表现为抗拉强度增高,硬度增高,但塑性下降,韧性降低,特别是应力松弛抗力降低。在回火温度场作用下,塑变晶体的位错密度与点阵畸变逐渐下降,多边形化进程促使形成新的细化的亚晶粒(嵌镶块),或者说微观应力降低。塑变形成的非稳态亚结构组织在回火处理中逐渐转变成一种稳态或亚稳态的具有精细亚结构的组

织。这种亚结构组织对于冷拔碳素钢丝表现为静强度(如 $\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_{0.1}$ 、 $\sigma_{0.05}$ 等)明显提高^[6],弹簧的应力松弛抗力获得改善,而对于油淬回火钢一方面表现为静强度性能($\sigma_{0.2}$ 、 $\sigma_{0.1}$ 、 $\sigma_{0.05}$)的提高,屈服比 $\sigma_{0.2}/\sigma_b$ 在宽广温度范围(300~480℃)内的提高,另一方面也使弹簧的应力松弛抗力获得提高^[7]。

2.3 稳定弹簧的几何尺寸

不经回火处理的冷卷弹簧,在经历后续的加工工艺和服役中,其几何尺寸会发生较大的变化。回火处理能使引起尺寸变化的非稳态的亚结构组织以及非稳态的宏观残余应力向稳态或亚稳态转变,与此同时微观应力也随之降低,由此导致弹簧的尺寸趋于稳定。经过回火处理的弹簧,通常直径与总圈数发生变化,并且其变化幅度还随旋绕比的增高而增大。通过试验掌握了弹簧几何尺寸的变化规律,再将其反馈去调整冷卷工艺参数,由此便可获得符合设计图纸规定的几何尺寸。

3 弹簧表面渗氮工艺的应力状况及控制

通常与回火工艺衔接的是喷丸工艺, 只有某些需引入更高残余压应力的气门簧, 在回火与喷丸工艺之间增加一道表面渗氮工艺。

表面渗氮不仅能提高弹簧的表面硬度 ($HV > 900$), 改善簧的耐磨性, 更重要的是能引入渗层残余压应力场, 由此提高簧的疲劳抗力。目前内燃机的一些气门簧已采用了低温离子渗氮工艺, 使弹簧表层形成约 $1\mu\text{m}$ 厚的氮化物白亮层。渗入钢丝表层的氮原子处于基体晶格的间隙位置, 在此引起基体晶体点阵发生畸变而导致钢丝表层形成残余压应力 (图4)。与非均匀塑变引入的残余压应力相比, 渗氮引起的残余应力更为稳定, 在交变应力场与温度场中不易发生松弛。因此, 渗氮引起的是一个较稳定的残余压应力场。

应该说目前对弹簧尚无采用单一的渗氮处理作为改善疲劳抗力的强化工艺, 而是与喷丸工艺一起作为一种表面复合强化工艺加以应用。渗氮+喷丸这种复合强化工艺使弹簧获得更高的残余压应力场 (图4), 因此可获得比单一的强化工艺更高的疲劳抗力。

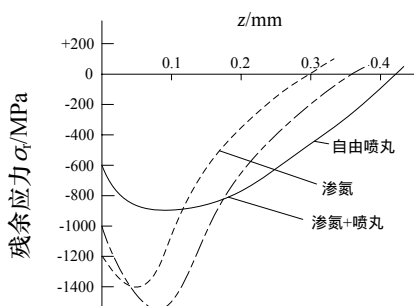


图4 渗氮工艺与渗氮+喷丸复合强化工艺引入弹簧表层的残余压应力示意图

Fig.4 Schematic σ_r - z profile of spring treated by nitriding and nitriding+shot peening.

4 喷丸工艺

喷丸工艺是利用高硬度 (55~62 HRC)、高速度 ($V=70\sim 90\text{ m/s}$) 运动的弹丸冲击靶材 (弹簧) 表面, 靶材表层产生非均匀塑变的过程中引入残余压应力 (图5), 对于弹簧这是采用喷丸工艺的唯一目的。比较图2与图5上的应力剖面可见: 冷卷引入表层的残余拉应力曲线呈单调变化, 即最大值处于表面, 向内逐渐降低; 喷丸 (包括渗氮) 引入的残

余压应力曲线呈非单调变化, 应力剖面上出现极大值, 且处于次表面上。

为了实际测定和研究喷丸工艺参数对残余压应力分布的影响, 以及该残余应力剖面对疲劳抗力的影响, 通常采用 σ_r - z 曲线上的4个特征参量 σ_r , $\sigma_{r,\max}$, z_c 和 z_0 来描述引入表层内的残余应力剖面 (见图5)。有时需要利用4个特征参量来计算引入的残余压应力场强度 (ISF), 来研究ISF与弹簧疲劳抗力的关系。

但是, 不适宜的喷丸工艺会因表面粗糙度 (R_a) 的增高而产生应力集中效应。残余压应力能提高而应力集中效应又会降低弹簧的疲劳抗力。为此, 有时采用二次喷丸工艺来提高表面光洁度以弥补一次喷丸造成的表面应力集中效应带来的不利影响。此外, 采用二次喷丸也能进一步提高最大残余压应力深度 (z_c) 层内的残余压应力水平 (见图5), 所以它也是使弹簧获得二次强化的工艺。

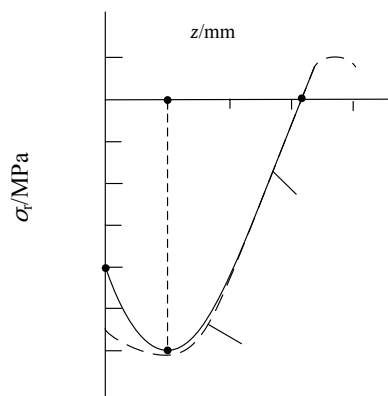


图5 一次和二次喷丸的残余压应力的示意图: σ_{rs} -表面残余压应力, $\sigma_{r,\max}$ -最大残余压应力, z_c -最大残余压应力深度, z_0 -残余压应力深度

Fig.5 Schematic σ_r - z profile treated by primary and secondary shot peening: σ_{rs} -surface compressive residual stress, $\sigma_{r,\max}$ -maximum compressive residual stress, z_c -depth of $\sigma_{r,\max}$ from surface, z_0 -depth of compressive residual stress.

以气门簧和悬架簧为代表的两类弹簧的线径尺寸与实际工况的不同, 使得它们具有各自不同的材质, 不同的表面完整性, 不同的服役条件以及承受不同的加载条件, 所以各自具有完全不同的疲劳断裂寿命。一类为长寿命 ($N_f \geq 2.3 \times 10^7$ 周), 如气门簧与调压簧等; 另一类为中等寿命 ($N_f = (2.5 \sim 5.0)$

$\times 10^5$ 周),如汽车悬架簧,摩托车减震簧等,(表1)。大量的疲劳试验数据指出,在应力比($\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$)恒定的条件下,交变载荷越高,疲劳裂纹萌生的寿命(N_i)越短,疲劳断裂总寿命(N_f)也较短, N_i/N_f 比值也就越小,当表面存在应力集中时,该比值更进一步降低,疲劳裂纹扩展的寿命(N_p)相对较长;与此相反,交变载荷越低,疲劳裂纹萌生寿命(N_i)越长,疲劳断裂总寿命(N_f)也越长,而疲劳裂纹扩展在此所占的寿命相对较短。对于高寿命簧疲劳裂纹萌生(N_i)占据绝大部分的断裂寿命,即 $N_i \approx 0.8 N_f$;对于中等寿命簧疲劳裂纹扩展(N_p)占据绝大部的断裂寿命,即 $N_p \approx 0.8 N_f$,根据表1对这两类簧所规定的使用总寿命,分别估算出的 N_i , N_p 近似值如下:

气门簧: $N_i = 1.84 \times 10^7$ 周, $N_p = 0.46 \times 10^7$ 周, $N_f = 2.3 \times 10^7$ 周

悬架簧: $N_i = 0.75 \times 10^5$ 周, $N_p = 3.0 \times 10^5$ 周, $N_f = 3.75 \times 10^5$ 周

根据以上所述,因为两类弹簧的材质,表面完整性、服役工况以及对疲劳断裂寿命要求之不同,所以控制二者疲劳断裂的机制也各不相同。对于长寿命簧,控制其疲劳断裂机制的主要是疲劳裂纹的萌生;而对于中等寿命簧,其疲劳断裂则主要受控于疲劳裂纹扩展(表1)。为了提高簧的疲劳断裂抗力,对于不同的疲劳断裂机制,喷丸工艺引入的残余压应力场也应区别对待。

4.1 喷丸工艺引入长寿命簧的残余压应力场

表1中列出了以气门簧为代表的线径为3~6 mm的冷卷簧,喷丸引入内圆表层的残余压应力场的主要作用是用以抑制疲劳裂纹在内圆表面上的萌生,迫使疲劳裂纹萌生于表皮下的次表面上。为达到此目的,喷丸引入的残余压应力剖面应处于图6所示的应力剖面分布带内^[2]。图6上的分布带下限为未经渗氮而只经喷丸处理的 σ_r -z剖面。分布带的上限为渗N+喷丸复合强化工艺处理的 σ_r -z剖面。根据理论计算与疲劳试验结果的归纳,图6上同时给出了表征这类弹簧残余压应力分布带中4个特征参量的波动范围。

通过综合调控由冷卷到喷丸全过程中的各道工艺参数,最终使所制造的簧获得处于图6所示分布带内的一个优化残余压应力场,与不存在任何残

余应力场的同类弹簧相比,该应力场将会使簧的疲劳强度极限($N_f = 2.3 \times 10^7$ 周)提高35%,即提高1.35倍^[8]。

4.2 喷丸工艺引入中等寿命簧的残余压应力场

与长寿命的簧比较,中等寿命簧的抗拉强度(σ_b)稍低,钢丝表面完整性稍差,服役承载水平较高以及工况条件较为恶劣等(表1),所以这类簧通常过早的萌生疲劳裂纹。一旦疲劳裂纹萌生(工程上通常定义其尺寸约为0.25~0.3 mm),控制其断裂寿命的主要是疲劳裂纹扩展(N_p)。只有引入更高的残余压应力水平和更深的残余压应力场,才能有效的降低疲劳裂纹扩展速率,延长裂纹的扩展寿命,由此提高此类弹簧的疲劳断裂抗力。

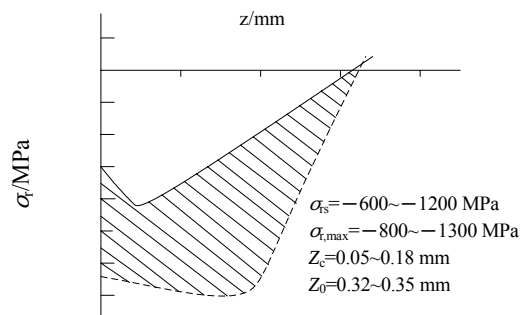


图6 线径为3~6 mm的冷卷圆簧内圆表层的残余压应力剖面分布带示意图

Fig.6 Schematic distribution band of compressive residual stress profile of cold forming spring with 3~6mm wire diameter

喷丸引入残余压应力值的高低,首先取决于材料的单调拉伸硬化指数(n)。对于低硬化指数($n=0.05\sim0.09$)的超高强度弹簧钢,喷丸引入表面上的残余压应力($\sigma_{r,s}$)与其屈服强度之间存在以下经验关系^[9]:

$$\sigma_{r,s} = -(0.5 \sim 0.65) \sigma_{0.2} \quad (1)$$

采用传统的自由喷丸工艺已经不能获得所需的残余压应力场,为此近年来又开发出应力/应变喷丸工艺和热喷丸工艺。这些新工艺可使簧引入更高的残余压应力场强度,由此抑制和降低疲劳裂纹在残余压应力场中的扩展速率,延长疲劳裂纹的扩展寿命。由图7示出的应力/应变喷丸后的残余应力剖面可见^[10,11],该喷丸工艺能给出更高的残余应力剖

面与更大的残余压应力场强度ISF。根据被劳试验获得的两种钢材各种样品的表面疲劳极限 σ_{ws} 值^[12]，再由图 7 上所示各条 σ - z 曲线计算出的ISF值，以 σ_{ws} 、ISF分别为纵、横座标绘图，就可获得图 8 所示

的关系。由图 8 上两种钢的 σ_{ws} 与ISF之间的关系可见，它们为线性关系，可用以下公式表达：

$$\sigma_{ws}=900+2.37.ISF \text{ (SAES160 钢)}$$
$$\sigma_{ws}=20+1.66.ISF \text{ (55SiMnVB钢)}$$

(2)

表 1 气门、喷油器调压弹簧与悬架弹簧各种技术要求（指标）的相对比较

Table 1 Relative comparison of specification requirement between valve spring pressure controlling spring and chassis spring.

No	钢丝的组织、性能，尺寸 以及表面强化工艺	气门、调压弹簧	汽车悬架簧、其它减震簧
1	钢材的原始晶粒度/ μm 与钢材中的非金属夹杂物	显微晶粒度级别数 G:10~14 ($d=11.2\sim2.8$) 夹杂物含量少且尺寸也小	油淬回火钢 G:7 ($d=31.8$) 感应加热钢 G:>9 ($d=15.9$) 夹杂物含量较高，尺寸较大
2	弹簧钢材线径/mm	3~6	11~17
3	钢材的抗拉强度 σ_b /MPa	2000~2200	1850~2050
4	钢 表面脱碳层深/mm	~0	0.03~0.05
	丝 表面粗糙度 R_a / μm	$R_a<0.5$	$R_a<10.0$ (冷卷) $R_a>10.0$ (热卷)
	表 形变强化引入表层的残余后应	表面残余压应力: $\sigma_{rs}\geq-600$ 最大	$\sigma_{rs}=-600\sim-1000$
	面 力场特征参量(应力单位: MPa; 完整 应力场强度: MPa•mm; 深度: 性 mm)	$\sigma_{r,max}\geq-800\sim-1200$ 残余压应力场深: $Z_0=0.2\sim0.4$ 残余压应力场强度: ISF=140~300	$\sigma_{r,max}=-900\sim-1200$ $z_0=0.4\sim0.8$ ISF = 300~500 (ISF = $\int \sigma_r(z)dz$)
5	表面喷丸（形变）强化工艺处理	(1) 传统（自由式）喷丸 强化工艺 (2) 渗 N+传统喷丸强化工艺	(1) 传统（自由式）喷丸强化工 艺 (2) 预应力/应变喷丸强化工艺 (3) 热喷丸强化工艺
6	服役 最大切应力 τ_{max} (MPa)或	$\tau_{max}=990\sim1000$	$\tau_{max}=1050\sim1200$
	或 τ_{max}/σ_b	$\tau_{max}/\sigma_b=0.45\sim0.50$	$\tau_{max}/\sigma_b=0.52\sim0.62$
	试 疲劳加载频率 f (Hz)	高, $f=14\sim25$	低, $f=5\sim11$ (空气中) $f<6$ (腐蚀介质中)
7	疲劳加载方式	恒幅加载	恒幅加载
	对疲劳强度/寿命的要求	高的疲劳断裂寿命 空气: $N_f\geq2.3\times10^7$ 周	中等的疲劳断裂寿命 腐蚀介质: $2.5\times10^5\sim5\times10^5$ 周 空气: 10^6 周
8	控制疲劳断裂的主要机制	受控于疲劳裂纹的萌生/形核	受控于疲劳裂纹的扩展

- 9 表面残余压应力在改善疲劳强度中的作用。
- 间接的强化作用：把疲劳源由表面推进内表面，由此获得更高的内部疲劳极限。
- 直接的强化作用：疲劳强度与表层的残余压应力场强度 ISF 成正比。

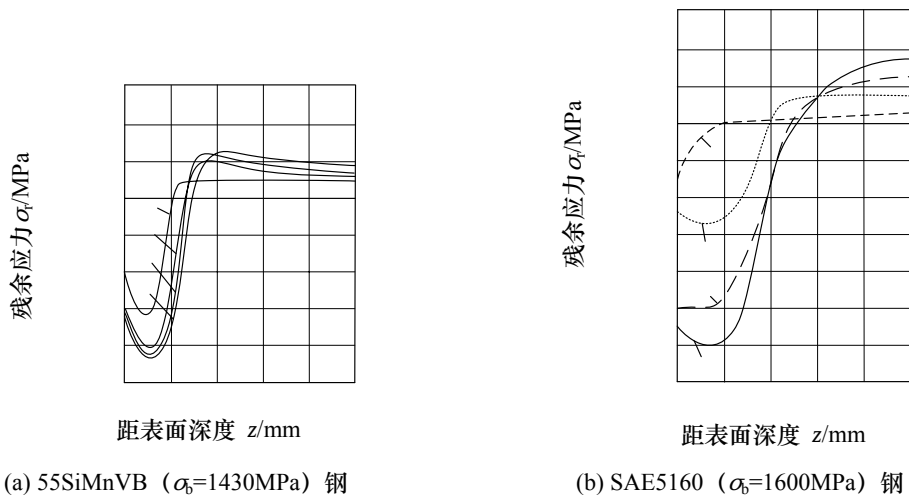


图 7 传统的自由喷丸与预应力/应变喷丸弹簧钢的表层应力 σ_t - z 剖面

Fig.7 σ_t - z profile of spring treated by traditional and strain shot peening: (a) for 55SiMnVB steel ($\sigma_b=1430\text{MPa}$); (b) SAE5160 steel ($\sigma_b=1600\text{MPa}$)

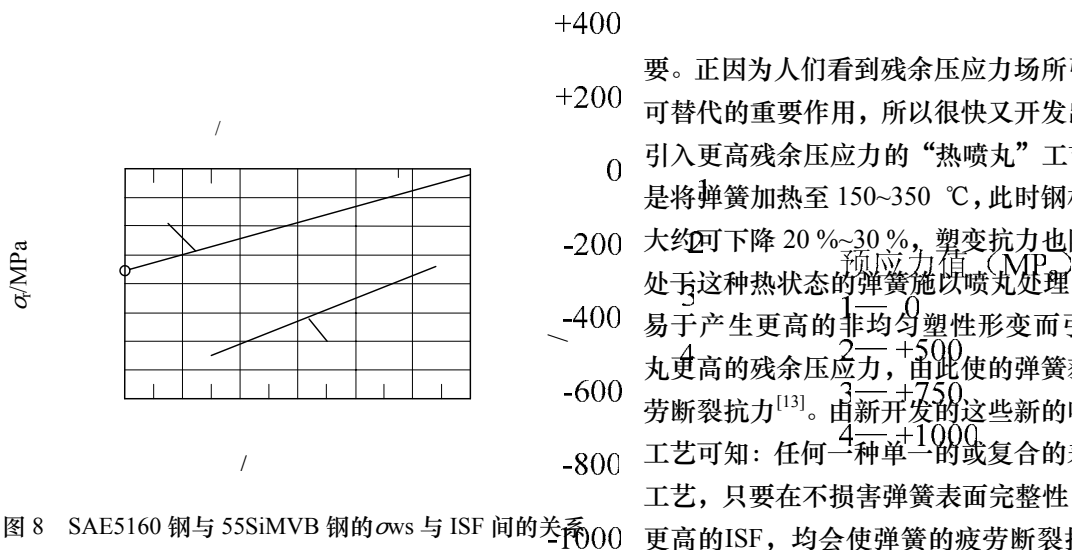


图 8 SAE5160 钢与 55SiMnVB 钢的 σ_{ws} 与 ISF 间的关系

Fig.8 Relationship between σ_{ws} vs ISF for SAE5160 and 55SiMnVB steels

分析图 8 中的数据可知，传统的自由喷丸工艺只能使两种弹簧钢的表面疲劳强度提高 18%。而通过预应力/应变喷丸工艺能使弹簧表层获得更高的 ISF，使 55SiMnVB 钢和 SAE5160 钢的 σ_{ws} 值在自由喷丸的基础上分别提高 90% 和 48%。由此可得出这样一个重要的结论，除了采用引入残余压应力场强度以提高疲劳强度 σ_{ws} 之外，任何其它加工工艺包括更换更优质的材质在内，都无法给出比这种特种强化工艺更高的 σ_{ws} 值。上述结论在工程上极为重

要。正因为人们看到残余压应力场所引起的这种不可替代的重要作用，所以很快又开发出另一种旨在引入更高残余压应力的“热喷丸”工艺。热喷丸就是将弹簧加热至 150~350℃，此时钢材的屈服强度大约可下降 20%~30%，塑变抗力也随之降低。对处于这种热状态的弹簧施以喷丸处理，因弹簧表层易于产生更高的非均匀塑性形变而引入比自由喷丸更高的残余压应力，由此使的弹簧获得更高的疲劳断裂抗力^[13]。由新开发的这些新的喷丸形变强化工艺可知：任何一种单一的或复合的表面形变强化工艺，只要在不损害弹簧表面完整性，能引入表层更高的 ISF，均会使弹簧的疲劳断裂抗力提高到一个新的水平。

5 施加预应力处理工艺

与喷丸工艺相衔接的是施加预应力处理工艺 (Prestressed treatment-PT)，简称预应力处理工艺。该工艺可在常温也可在加温中进行。

该工艺名称明确地表明与对弹簧再度施加应力有直接关系。预应力处理工艺的主要目的是：①稳定弹簧的应力松弛抗力；②稳定弹簧的几何尺寸 (防止过大的永久变形)。有些著作中认为，PT 是一种强化工艺，凡经 PT 处理的弹簧其承载能力与

疲劳寿命均可获得提高,孰不知这是有条件限制的。对于一些未经表面形变强化处理的弹簧,只有在极有限的条件下经过 PT 处理后才能取得一定的强化作用。对此文献[14]已经作了充分的论述。需知 PT 工艺会使喷丸引入的残余压应力因松弛而降低,但残余压应力的松弛量对由于正应力引起的疲劳断裂抗力影响不大。

对于经过表面单一或复合形变强化处理的弹簧,影响其应力松弛抗力的因素有两个:①钢丝材料的亚结构(其中包括位错密度与组态,晶体点阵畸变,嵌镶块结构等)组织的稳定性;②引入残余应力的稳定性。当然,残余应力的稳定性也取决于材料亚结构的稳定性。归根结底,材料的一切力学性能包括应力松弛抗力都取决于材料的组织结构[15]。但是,可以通过对引入弹簧中的残余压应力在 PT 工艺过程中的松弛变化,来评定和选择适宜的 PT 工艺,经过该 PT 工艺处理后弹簧可获得更稳定的应力松弛抗力。为此,首先需要了解残余压应力在各种外施应力与温度环境中的松弛规律。

依靠非均匀塑性形变引入的残余应力以及形成的亚结构组织是非稳态的,服役中在工作应力和环境温度分别或共同作用下,它们将逐渐向稳态或亚稳态转变,这一转变过程的力学行为表现为残余应力因发生松弛而降低以及由此导致弹簧应力松弛抗力(或刚度)逐渐趋于稳定。为加速这种变化以使应力松弛抗力尽快达到稳态或亚稳态,或者说提高弹簧服役中应力松弛抗力的稳定性,PT 工艺的作用就是于常温或加热至适当的温度,对弹簧预先施加到其工作应力或稍高于工作应力,然后加载-卸载一次或若干次,或加载后经过一段驻留时间后卸载(图 9)。这是目前使弹簧获得具有高稳定应力松弛抗力所广泛应用的 PT 工艺。

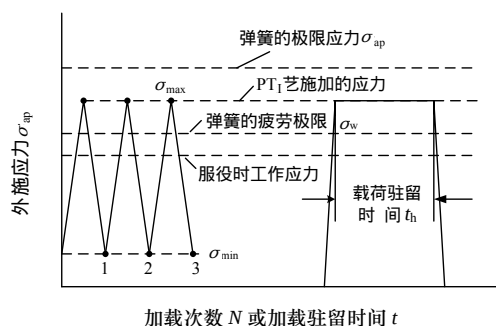


图 9 PT 工艺采用的施加应力水平与加载方式示意图

Fig.9 Schematic diagram of applied stresses and method in the PT technology

综上所述可知,只有了解并掌握了在外载(包括恒定的和交变的)和温度分别或共同作用条件下,残余应力松弛的一般规律,才能制定出适合于具体弹簧的适宜的 PT 工艺制度。文献[15]是目前我国系统论述弹簧应力松弛的唯一的专著。

5.1 残余应力在外施应力场中的松弛规律

冷拔碳素钢丝、琴钢丝、不锈钢丝以及油淬回火低合金超高强度钢丝,冷卷塑变过程形成的非稳态亚结构组织(碎化了的亚晶粒与点阵畸变)对弹簧松弛抗力的影响,通过前期的回火工艺已经基本获得解决。但是,喷丸以及各种复合形变处理工艺重新引入表层的更高量级的非稳态残余压应力以及非稳态的亚结构组织,前者是主要的后者是次要的影响弹簧应力松弛稳定性的因素。在此情况下,解决应力松弛稳定性的最好途径是强迫弹簧在不同的加载方式下(见图 10),使存在于弹簧内的非稳态的残余压应力转变为亚稳态或稳态的残余压应力。

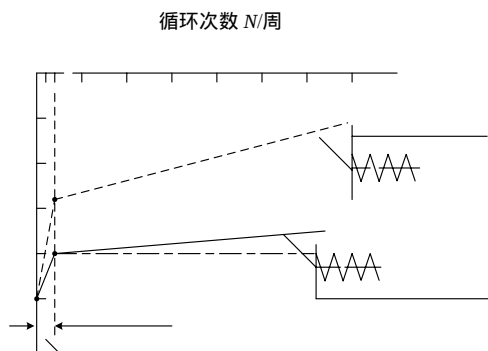


图 10 残余压应力在外施交变应力场中松弛过程的示意图: 第一阶段—静载松弛; 第二阶段—动载松弛

Fig.10 Schematic residual stress relaxation diagram in the applied alternating stress field: the first stage-static relaxation; the second stage-dynamic relaxation

残余压应力在交变应力场中表现出以下几种松弛规律。

(1) 残余压应力的静载松弛与动载松弛。

喷丸以及复合强化工艺引入弹簧的均为残余

压应力,所以文中主要阐述残余压应力在交变应力场中的松弛规律。图 10 为样品表面的喷丸残余压应力在交变应力作用下发生松弛过程的示意图。加载的 1~3 次之内残余压应力迅速发生大幅度的松弛,为应力松弛的第一阶段,称做静载松弛(Static relaxation-SR);SR之后残余压应力的松弛进入第二阶段,称做动载松弛(Dynamic relaxation-DR),该阶段内松弛后的残余压应力 $\sigma_{r,dyn}$ 与应力循环数的对数 $\lg N$ 之间存在以下线性关系^[16]:

$$\sigma_{r,dyn} = \sigma_{r,sr}^{ten} - b \lg N$$

$$\sigma_{r,dyn} = \sigma_{r,sr}^{com} - b \lg N \quad (3)$$

式中 $\sigma_{r,sr}^{ten}$ 和 $\sigma_{r,sr}^{com}$ 分别为拉-拉脉动和压-压脉动载荷条件下,静载松弛后的残余压应力; b -直线斜率。由上述可见,静载松弛与动载松弛二者构成了残余压应力在交变应力场中总的松弛量。

(2) 压-压脉动应力更易使残余压应力发生 SR 与 DR

残余压应力的松弛量 $\Delta\sigma_r$ 或 $\Delta\sigma_r/\sigma_r$ 还取决于加载方式。由图 10 可见,在平均应力的绝对值以及应力振幅都相同的条件下,压-压脉动应力总比拉-拉脉动应力更容易使残余压应力引起更高的 SR 和 DR。

(3) 在平均应力相同的条件下,静载松弛(SR)与动载松弛(DS)量均随外施应力振幅 σ_a 或最大应力 σ_{max} 的增大而增高,如图 11 所示^[15]。

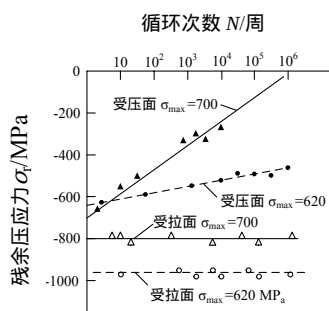


图 11 30CrMnSiNi2A 超高强度钢 ($\sigma_b=1700$ MPa) 板材喷丸残余压应力在恒幅弯曲交变载荷中(应力比 $R=0.1$)受拉/压面发生的静载与动载松弛(表面喷丸残余压应力约为 $\sigma_{rs}=-1000$ MPa)

Fig.11 Static and dynamic residual stress relaxation in the tensile and compressive planes for superhigh strength steel plate (30CrMnSiNi2, $\sigma_b=1700$ MPa)during alternating

bending fatigue test with stress ratio $R=0.1$ (surface residual stress $\sigma_{rs}=-1000$ MPa)

(4) 在外施拉-拉脉动应力(应力比 $R>0$)的条件下,当脉动应力中的最高应力 σ_{max} (或 τ_{max})等于或稍高于材料(或弹簧件)的疲劳极限 σ_w ($N \geq 5 \times 10^6$ 周)时(见图 12),表层的残余压应力 σ_r-z 剖面只发生少量的 SR 与 DR (图 12)^[4];在外施的拉-压全逆转应力($R=-1$)的条件下,当外施全逆转应力中的最大值等于或稍高于材料的疲劳极限 σ_w ($N \geq 5 \times 10^6$ 周)时,喷丸残余压应力则发生明显的静载松弛,而随后只发生少量的动载松弛(如图 13 所示)^[17]。

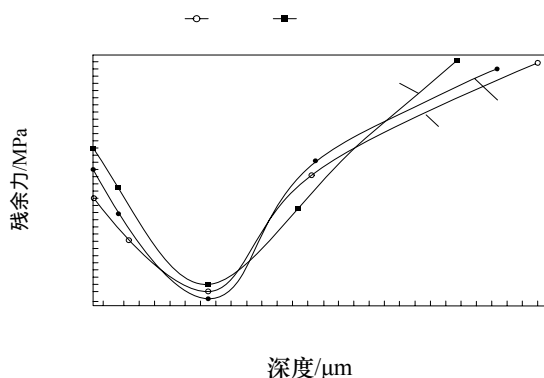


图 12 喷丸处理的圆柱螺旋弹簧(Si-Mn钢)疲劳试验前后外圆表层的 σ_r-z 剖面: 1-未经疲劳试验; 2- $\tau_{max}=1200$ MPa, $\Delta\tau=504$ MPa, $N=5.65 \times 10^5$ cycles; 3- $\tau_{max}=1200$ MPa, $\Delta\tau=817$ MPa, $N=51.15 \times 10^5$ cycles

Fig.12 Shot pecking σ_r-z profile of circular coil spring before and after fatigue test: 1-before fatigue test; 2-fatigue test: $\tau_{max}=1200$ MPa, $\Delta\tau=504$ MPa, $N=5.6 \times 10^5$; 3-fatigue test: $\tau_{max}=1200$ MPa, $\Delta\tau=817$ MPa, $N=51.15 \times 10^5$

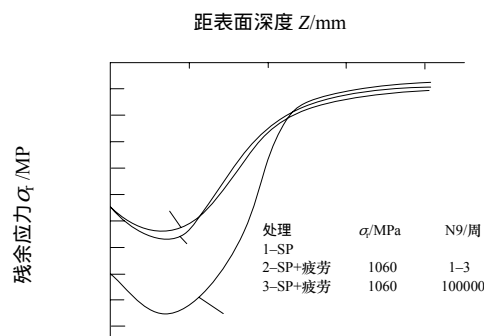


图 13 GC4 超高强度钢 ($\sigma_b=1900$ MPa) 喷丸圆

柱样品的旋转弯曲疲劳试验 ($R=-1$) 前后的表层 σ_r - z 曲线

Fig.13 Shot peening σ_r - z profile before and after rotating bending fatigue test ($R=-1$) for superhigh strength steel GC4 ($\sigma_b=1\ 900$ MPa).

冷卷圆柱螺旋压(拉、扭)弹簧(甚至包括板簧),与齿轮、轴类零件以及其它结构件在工作中所承受的交变应力相比,弹簧承受的交变应力中不存在反向应力成分,只承受同向的大拉与小拉应力(或大切与小切应力),即在服役中承受的均为拉-拉脉动应力。弹簧内残余压应力的松弛特性只对交变应力中与其反向的压应力成分敏感,而对交变应力中与其同向的拉应力则不敏感。因此,弹簧内残余压应力在交变应力场中比引入齿轮、轴类等零件的残余压应力具有更高的应力松弛抗力。

弹簧件残余压应力在特定的拉-拉脉动交变应力场中的下述若干松弛规律,对于选择制订PT工艺制度以获得稳定的残余压应力具有重要意义:①外施拉-拉交变应力的 $\sigma_{\max}$ (或 $\tau_{\max}$) 低于或接近于弹簧的条件疲劳强度 σ_w ($N \geq 5 \times 10^6$ 周) 时,残余压应力只发生少量的静载松弛,而基本上不发动载松弛。②外施拉-拉交变应力中的 $\sigma_{\max}$ (或 $\tau_{\max}$) 越高,或越接近弹簧的极限应力 (σ_e),残余压应力的静载松弛量越大,以这种静载松弛作为TP工艺进行处理的弹簧,其残余压应力将具有更高的稳定性。③外施拉-拉交变应力中的 $\sigma_{\max}$ (或 $\tau_{\max}$) 低于弹簧的疲劳极限 σ_w ($N > 10^7$ 周) 时,绝大部分残余压应力的松弛 (>99%) 发生于静载松弛阶段。以这种静载松弛作为TP工艺处理的弹簧,其残余压应力在服役中将具有更高的松弛稳定性。

正是由于弹簧的残余应力在它承受的特定拉-拉交变应力场中具有以上的松弛特性,所以在弹簧加工的最后一道工艺中,采用强压(拉、扭、弯等)工艺处理(1~3次),预先强迫弹簧的残余应力发生静载松弛,以此来提高它在服役中的应力松弛稳定性,与此同时又能提高其几何形状与尺寸的稳定性。

5.2 残余应力在温度场中的松弛规律

引入弹簧的残余压应力在温度场中将逐渐发

生松弛,其松弛量 $\Delta\sigma_r$ 是温度 (T) 和保温时间 (t) 的函数。

一些低合金高强度钢与热强合金的应力松弛试验结果指出^[9],喷丸表面残余压应力在温度场中的松弛表现出以下规律:

(1) 加热温度越高,残余压应力松弛的越快,松弛后达到稳态(或亚稳态)的残余压应力值越低。

(2) 在 200~400 °C 温度下残余应力发生松弛速率最快的时间处于 0~8 h 之内,然后趋于减缓。

残余压应力在外施拉-拉交变应力场中,经过 1~3 次循环加载处理发生静载松弛之后,残余应力即可很快达到稳态(或亚稳态)。在温度场中(200~400 °C),残余应力虽然起初具有最高的松弛速率,但要达到稳态则要经过较长的时间 ($t \geq 8$ h)。如果应力场和温度场同时作用于弹簧,残余压应力就会在更短的时间达到其稳定(或亚稳定)状态。

根据对上述规律的认识便可制定出具有实际工程意义的提高弹簧应力松弛抗力的各种预应力处理制度和规范,如目前已广泛在制造厂使用的热强压(拉、扭、弯)等预应力处理工艺。

6 结 论

引入冷卷弹簧中的残余应力状态是唯一贯穿于整个制造工艺过程的物理量。从一定意义上讲,控制弹簧在每道工艺处理后的残余应力状态,就是控制弹簧的疲劳抗力与应力松弛抗力以及永久变形抗力。

一套具有严格控制的且工序间协调合理的冷卷弹簧制造工艺系统,每道工序之后留在簧内适宜的残余应力剖面形貌应如图 14 所示。

(1) 冷卷工艺:引入内圆表层残余拉应力剖面量值的高低,取决于:①钢丝的处理状态;②钢丝的抗拉强度;③弹簧的旋绕比 C 等。

(2) 回火工艺:冷卷引入的残余拉应力在高温回火中获得部分或全部的消除。此外,在全部的制造工艺过程中,只有借助于这道唯一的高温处理,使弹簧在塑性变形过程中形成的非稳态亚结构组织转变为稳态(或亚稳态)的精细亚结构组织。

(3) 表面渗氮工艺:利用氮间隙原子向表层回火马氏体内的渗入而引入残余压应力。由这种机制形成的残余压应力比非均匀塑性形变形成的残余压应力具有更高的应力松弛抗力。

(5) 预应力处理工艺: 对处于室温或中低温的弹簧施加应力, 使引入簧中的残余压应力获得快速的静载松弛, 由此达到弹簧应力松弛抗力的提高。

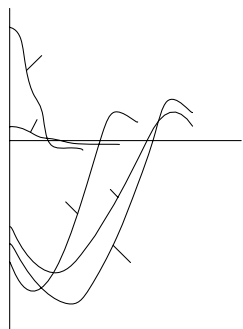


Fig.14 Schematic residual stress profile of the cold circular coil spring treated by different working technique:1-cold forming technique ; 2-annealing ; 3-nitriding; 4-shot peening; 5-TP technology.

[6] Margerel O'Molley BSc. Stress relaxation of springs
[J]. Wire Industry, 1988,12:808.

- [7] 苏德达. 弹簧的低温热处理与稳定化处理 [J]. 弹簧工程, 2002.3:4-10.
- [8] 王仁智, 姚枚. 等. 疲劳裂纹萌生的微细观过程理论与内部疲劳极限理论 [J]. 金属热处理学报, 1995, 16(4):26.
- [9] 刘锁 (王仁智). 金属材料的疲劳性能与喷丸强化工艺 [M]. 国防工业出版社, 1977: 179.
- [10] Xu Jiazhi, et al. The Fatigue Strength and Fracture Morphology of Leaf Spring Steel After Prestressed Shot Peening [C]. Proceedings of 1st International Conference on Shot Peening, Pairs, France, 1981.
- [11] R. L. Mattson, J. G. Roberts. Internal Stress and Fatigue of Materials [M]. 1959.
- [12] 王仁智. 板弹簧喷丸形变处理及其应力强化机制 [M]. 第十届全国弹簧学术会, 第八届全国弹簧失效分析讨论会暨第三届海峡两岸弹簧专业研讨会论文集, 2004, 桂林, 80-84.
- [13] ショットピーニング技術協会. ショットピーニングの方法と効果 [M]. 日刊工业新闻社, 日本, 1997:106.
- [14] 朱炎. 对机械设计手册中某些弹簧内容的疑义 [C]. 第十届全国弹簧学术会, 第八届全国弹簧失效分析讨论会暨第三届海峡两岸弹簧专业研讨会论文集, 桂林, 2004:158-161.
- [15] 苏德达. 弹簧 (材料) 应力松弛及预防 [M]. 天津大学出版社, 2002.
- [16] 邱琼, 王仁智. 关于残余应力的静载松弛与最佳喷丸残余应力场的研究 [J]. 金属科学与工艺, 1988, 7(1):1-7.
- [17] 邱琼. 关于超高强度钢喷丸应变层特性与疲劳性能关系的研究 [D]. 硕士论文, ^Z北京航空材料研究所, 1984:72.

《材料表面工程》是《中国材料工程大典》中的第16卷、第17卷，由徐滨士院士、刘世参教授

任主编，并邀请国内外 20 位专家撰稿，书中内容以作者们的近期研究成果为主，同时汇集了国内外表面工程技术新进展，全书着力为现代企业正确选材，合理用材，启迪技术创新服务。现已出版，读者对象是具有大专以上文化水平，从事制造、再制造及维修的工程技术人员，也可供研究人员、理工院校有关的师生参考。每卷 130 元，订购联系电话和联系人：(010) 66719325，陈素珍。