

# 第 30 篇 弹簧、飞轮

(试 用 本)

机械工程手册  
电机工程手册 编辑委员会



机械工业出版社

|    |
|----|
| 62 |
| 0  |

# 机械工程手册

## 第30篇 弹 簧、飞 轮

(试 用 本)

机械工程手册

电机工程手册

编辑委员会



机械工业出版社

本篇主要介绍机械工程中常用的弹簧和飞轮的设计，内容包括设计基本概念、常用计算方法、主要的技术参数及其选取原则、典型结构和计算实例以及材料的选择等。弹簧中以圆柱螺旋弹簧为重点，对目前有所发展的空气弹簧和橡胶弹簧也作了必要的介绍。

## 机 械 工 程 手 册

### 第30篇 弹簧、飞轮

(试 用 本)

北京钢铁学院 主编

\*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

\*

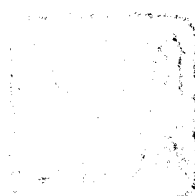
开本  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$  · 印张 6 · 字数 163 千字

1980年3月北京第一版·1980年3月北京第一次印刷

印数 00,001—35,600 · 定价 0.48 元

\*

统一书号: 15033 · 4648



## 编辑说明

(一) 我国自建国以来, 机械工业在毛主席的革命路线指引下, 贯彻“独立自主、自力更生”和“洋为中用”的方针, 取得了巨大的成就。为了总结广大群众在生产和科学研究方面的经验, 同时采用国外先进技术, 加强机械工业科学技术的基础建设, 适应实现“四个现代化”的需要, 我们组织编写了《机械工程手册》和《电机工程手册》。

(二) 这两部手册主要供广大机电工人、工程技术人员和干部在设计、制造和技术革新中查阅使用, 也可供教学及其他有关人员参考。

(三) 这两部手册是综合性技术工具书, 着重介绍各专业的理论基础, 常用计算公式, 数据、资料, 关键问题以及发展趋向。在编写中, 力求做到立足全局, 勾划概貌, 反映共性, 突出重点。在内容和表达方式上, 力求做到深入浅出, 简明扼要, 直观易懂, 归类便查。读者在综合研究和处理技术问题时, 《手册》可起备查、提示和启发的作用。它与各类专业技术手册相辅相成, 构成一套比较完整的技术工具书。《机械工程手册》包括基础理论、机械工程材料、机械设计、机械制造工艺、机械制造过程的机械化与自动化、机械产品六个部分, 共七十九篇; 《电机工程手册》包括基础理论、电工材料、电力系统与电源、电机、输变电设备、工业电气设备、仪器仪表与自动化七个部分, 共五十篇。

(四) 参加这两部手册编写工作的, 有全国许多地区和部门的工厂、科研单位、大专院校等五百多个单位、两千多人。提供资料和参加审定稿件的单位和人员, 更为广泛。许多地区

的科技交流部门,为审定稿件做了大量的工作。各篇在编写、协调、审查、定稿各个环节中,广泛征求意见,发挥了广大群众的智慧和力量。

(五)为了使手册早日与读者见面,广泛征求意见,先分篇出版试用本。由于我们缺乏编辑出版综合性技术工具书的经验,试用本在内容和形式方面,一定会存在不少遗漏、缺点和错误。我们热忱希望读者在试用中进一步审查、验证,提出批评和建议,以便今后出版合订本时加以修订。

(六)本篇是《机械工程手册》第30篇,由北京钢铁学院主编,参加编写的有天津大学、北京红冶钢厂、中国弹簧厂、四方机车车辆研究所。第一机械工业部标准化研究所、天津弹簧厂、上海压缩机厂、杭州弹簧厂、北京航空学院、北京工业学院等许多单位对编审工作给予大力支持和帮助,在此一并致谢。

机械工程手册 编辑委员会编辑组  
电机工程手册

## 弹簧常用符号和单位

|                                                                                          |                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| $A$ ——弹簧材料截面面积 $\text{mm}^2$                                                             | $P'$ ——弹簧的刚度 $\text{kgf/mm}$                                                                  |
| $b$ ——高径比                                                                                | $P'_r$ ——弹簧的径向刚度 $\text{kgf/mm}$                                                              |
| $C$ ——旋绕比; 系数                                                                            | $p'$ ——弹簧每圈的刚度, 单片碟形弹簧的刚度 $\text{kgf/mm}$                                                     |
| $D$ ——弹簧外径 $\text{mm}$                                                                   | $Q$ ——板弹簧的作用载荷 $\text{kgf}$                                                                   |
| $D_1$ ——弹簧内径 $\text{mm}$                                                                 | $R$ ——弹簧簧圈中半径 $\text{mm}$                                                                     |
| $D_2$ ——弹簧中径 $\text{mm}$                                                                 | $S$ ——安全系数                                                                                    |
| $d$ ——圆形截面弹簧材料直径 $\text{mm}$                                                             | $T$ ——扭矩 $\text{kgf}\cdot\text{mm}$                                                           |
| $d_0$ ——多股弹簧材料的细钢丝直径 $\text{mm}$                                                         | $T'$ ——扭转刚度 $\text{kgf}\cdot\text{mm/deg}$                                                    |
| $E$ ——弹性模量 $\text{kgf/mm}^2$                                                             | $t$ ——弹簧的节距 $\text{mm}$                                                                       |
| $F$ ——弹簧的变形成量 $\text{mm}$                                                                | $U$ ——变形能 $\text{kgf}\cdot\text{mm}$ ; $\text{kgf}\cdot\text{mm}\cdot\text{rad}$              |
| $F_0$ ——圆柱拉伸弹簧对应于初拉力的假想变形成量 $\text{mm}$                                                  | $V$ ——弹簧的体积 $\text{mm}^3$                                                                     |
| $F_r$ ——弹簧的径向变形成量 $\text{mm}$                                                            | $v$ ——冲击体的速度 $\text{mm/s}$                                                                    |
| $F_s$ ——弹簧的线性静变形成量 $\text{mm}$                                                           | $W$ ——冲击体的重量 $\text{kgf}$                                                                     |
| $f$ ——弹簧的单圈变形成量 $\text{mm}$ ; 弹簧自振频率 $\text{Hz}$                                         | $W_s$ ——弹簧自身重量 $\text{kgf}$                                                                   |
| $f_r$ ——变载荷振动频率 $\text{Hz}$                                                              | $Z_t$ ——抗扭截面系数 $\text{mm}^3$                                                                  |
| $G$ ——切变模量 $\text{kgf/mm}^2$                                                             | $Z_m$ ——抗弯截面系数 $\text{mm}^3$                                                                  |
| $g$ ——重力加速度, $g = 9800 \text{ mm/s}^2$                                                   | $\alpha$ ——螺旋角 $\text{deg}$                                                                   |
| $H$ ——弹簧的工作高度(长度) $\text{mm}$                                                            | $\beta$ ——计算矩形材料圆柱螺旋弹簧的切应力系数                                                                  |
| $H_0$ ——弹簧的自由高度(长度) $\text{mm}$                                                          | $\gamma$ ——弹簧材料的重度, 对于钢材 $\gamma = 7.85 \times 10^{-6} \text{ kgf/mm}^3$ ; 计算矩形材料圆柱螺旋弹簧的变形成系数 |
| $h$ ——碟形弹簧的内截锥高度 $\text{mm}$                                                             | $\zeta$ ——系数                                                                                  |
| $I$ ——惯性矩 $\text{mm}^4$                                                                  | $\xi$ ——系数                                                                                    |
| $I_p$ ——极惯性矩 $\text{mm}^4$                                                               | $\eta$ ——系数                                                                                   |
| $K$ ——曲度系数                                                                               | $\theta$ ——扭杆弹簧单位长度的扭转角 $\text{rad}$                                                          |
| $K_t$ ——温度修正系数                                                                           | $\mu$ ——泊松比, 长度系数                                                                             |
| $k$ ——系数                                                                                 | $\sigma$ ——正应力 $\text{kgf/mm}^2$                                                              |
| $L$ ——弹簧材料的展开长度 $\text{mm}$                                                              | $\sigma_b$ ——抗拉强度极限 $\text{kgf/mm}^2$                                                         |
| $M$ ——弯曲力矩 $\text{kgf}\cdot\text{mm}$ ; 作用于弹簧上物体的质量 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$ | $\sigma_j$ ——工作极限应力 $\text{kgf/mm}^2$                                                         |
| $M_s$ ——弹簧的质量 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}$                                       | $\sigma_s$ ——抗拉屈服极限 $\text{kgf/mm}^2$                                                         |
| $m$ ——比值, $m = b/a$ ; 多股弹簧的钢丝股数                                                          | $\tau$ ——切应力 $\text{kgf/mm}^2$                                                                |
| $N$ ——变载荷循环次数                                                                            | $\tau_0$ ——初应力 $\text{kgf/mm}^2$                                                              |
| $n$ ——弹簧的工作圈数                                                                            | $\tau_b$ ——抗扭强度极限 $\text{kgf/mm}^2$                                                           |
| $n_1$ ——弹簧的总圈数                                                                           | $\tau_j$ ——工作极限切应力 $\text{kgf/mm}^2$                                                          |
| $n_2$ ——弹簧的支承圈数                                                                          | $\tau_s$ ——抗扭屈服极限 $\text{kgf/mm}^2$                                                           |
| $P$ ——弹簧所受载荷 $\text{kgf}$                                                                | $\varphi$ ——扭转变形成角 $\text{deg}$ ; $\text{rad}$                                                |
| $P_0$ ——圆柱拉伸弹簧初拉力                                                                        |                                                                                               |
| $P_r$ ——弹簧所受径向载荷 $\text{kgf}$                                                            |                                                                                               |

# 目 录

## 弹簧常用符号和单位

### 第 1 章 弹簧概述

- 1 弹簧的类型及其特性 ..... 30-1
- 2 弹簧设计的基本概念 ..... 30-3
  - 2.1 弹簧的特性线和刚度 ..... 30-3
  - 2.2 载荷与最大应力和变形的关系 ..... 30-3
  - 2.3 弹簧的变形能 ..... 30-3
  - 2.4 弹簧的共振 ..... 30-4
- 3 弹簧材料和许用应力的选择 ..... 30-4
  - 3.1 弹簧材料的分类、性能和应用 ..... 30-4
  - 3.2 弹簧材料的选择 ..... 30-7
  - 3.3 弹簧的许用应力 ..... 30-9

### 第 2 章 螺旋弹簧

- 1 圆柱压缩螺旋弹簧的设计 ..... 30-10
  - 1.1 结构设计 ..... 30-10
  - 1.2 设计计算公式 ..... 30-13
  - 1.3 强度校核 ..... 30-13
  - 1.4 稳定性验算 ..... 30-15
  - 1.5 设计计算方法 ..... 30-17
  - 1.6 大螺旋角弹簧的设计计算 ..... 30-20
  - 1.7 弹簧承受冲击载荷时的计算 ..... 30-21
  - 1.8 弹簧承受振动载荷时的计算 ..... 30-21
  - 1.9 强压(拉)处理螺旋弹簧的设计  
计算 ..... 30-24
  - 1.10 径向特性计算 ..... 30-24
  - 1.11 组合螺旋弹簧的计算 ..... 30-25
  - 1.12 压缩变节距螺旋弹簧的计算 ..... 30-27
- 2 圆柱拉伸螺旋弹簧的设计 ..... 30-28
  - 2.1 结构设计 ..... 30-28
  - 2.2 设计计算 ..... 30-31
- 3 圆柱扭转螺旋弹簧的设计 ..... 30-32
  - 3.1 结构设计 ..... 30-32
  - 3.2 设计计算 ..... 30-33
- 4 圆柱螺旋弹簧的许用应力 ..... 30-35
- 5 圆锥螺旋弹簧的设计 ..... 30-37

- 5.1 弹簧的特性 ..... 30-37
- 5.2 弹簧的变形和强度计算 ..... 30-37
- 6 蜗卷螺旋弹簧的设计 ..... 30-39

### 第 3 章 板弹簧

- 1 板弹簧的类型和用途 ..... 30-41
- 2 板弹簧的结构 ..... 30-42
  - 2.1 弹簧钢板的截面形状 ..... 30-42
  - 2.2 主板端部结构 ..... 30-42
  - 2.3 副板端部结构 ..... 30-42
  - 2.4 板弹簧的固定结构 ..... 30-42
- 3 单板弹簧的计算 ..... 30-43
- 4 多板弹簧的计算 ..... 30-44
  - 4.1 主要尺寸和参数的计算 ..... 30-44
  - 4.2 各板片工作应力和在自由状态下曲率  
半径的计算 ..... 30-49
- 5 板弹簧的材料、强化技术和  
试验 ..... 30-53
  - 5.1 板弹簧的材料与强化技术 ..... 30-53
  - 5.2 板弹簧的试验 ..... 30-53

### 第 4 章 其他形状的金属弹簧

- 1 扭杆弹簧 ..... 30-53
  - 1.1 扭杆弹簧的计算载荷 ..... 30-54
  - 1.2 扭杆的设计计算 ..... 30-56
  - 1.3 扭杆的端部形状和有效工作  
长度 ..... 30-56
  - 1.4 扭杆弹簧的材料和许用  
应力 ..... 30-57
  - 1.5 扭杆弹簧的技术要求 ..... 30-57
- 2 碟形弹簧 ..... 30-58
  - 2.1 结构、特点和用途 ..... 30-58
  - 2.2 设计计算 ..... 30-60
  - 2.3 参数选择和设计要点 ..... 30-62
  - 2.4 材料、许用应力和技术要求 ..... 30-63
- 3 环形弹簧 ..... 30-64

## 30-VI 目 录

- 3.1 结构、特性和用途.....30-64
- 3.2 设计计算.....30-64
- 3.3 材料、许用应力和技术要求.....30-66

### 第5章 空气弹簧和橡胶弹簧

- 1 空气弹簧 .....30-67
  - 1.1 空气弹簧的结构.....30-67
  - 1.2 空气弹簧的刚度计算.....30-68
  - 1.3 空气弹簧的减振阻尼.....30-72
  - 1.4 空气弹簧的高度控制.....30-73
- 2 橡胶弹簧 .....30-73
  - 2.1 橡胶弹簧的变形计算.....30-74
  - 2.2 橡胶弹簧的静刚度计算.....30-74
  - 2.3 橡胶弹簧的动态力学性能.....30-78
  - 2.4 橡胶弹簧的疲劳强度.....30-79

### 第6章 飞 轮

- 1 飞轮的计算 .....30-79
  - 1.1 等效力矩和等效转动惯量.....30-79
  - 1.2 最大盈亏功的计算.....30-80
  - 1.3 飞轮转动惯量的计算.....30-81
- 2 飞轮的结构设计 .....30-82
  - 2.1 飞轮的基本结构型式.....30-82
  - 2.2 飞轮主要尺寸的确定.....30-82
  - 2.3 飞轮轮缘线速度的校核.....30-82
  - 2.4 飞轮转动惯量的校核.....30-83
  - 2.5 飞轮的强度校核.....30-84
  - 2.6 飞轮的振摆与静平衡.....30-84
  - 2.7 飞轮的过载保护装置.....30-85
  - 2.8 飞轮的新材料与新型结构.....30-85
- 参考文献.....30-86

# 第1章 弹簧概述

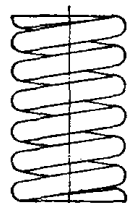
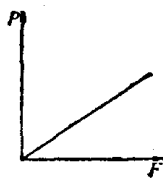
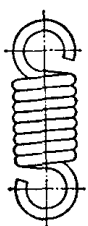
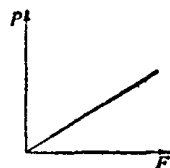
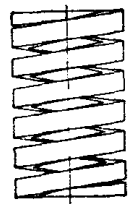
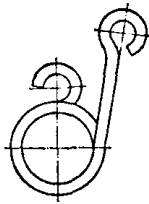
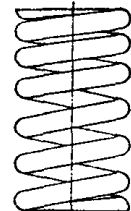
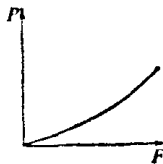
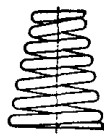
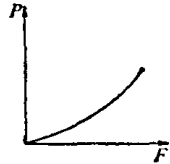
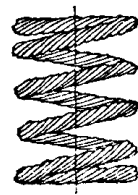
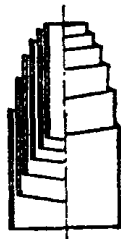
弹簧的作用是利用材料的弹性和弹簧结构的特点,在产生或恢复变形时,把机械功或动能转变为变形能,或把变形能转变为动能或完成机械功。由于这种特性,弹簧可用于缓冲或减振、控制运动、测力,并可用作机构的动力等。各种不同用途的弹

性元件也属于弹簧的范围。

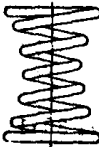
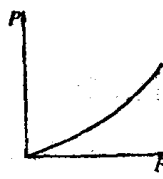
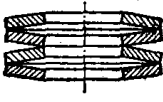
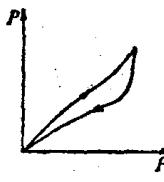
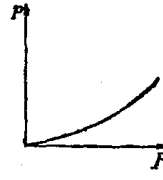
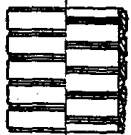
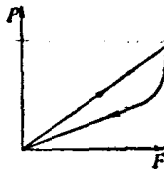
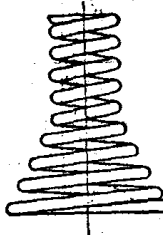
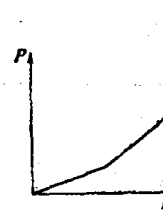
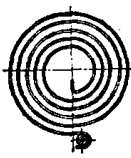
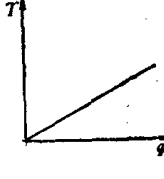
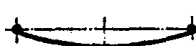
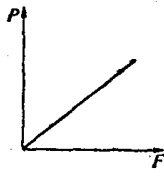
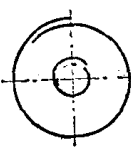
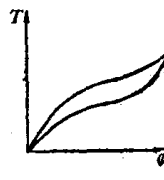
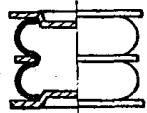
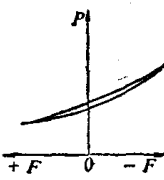
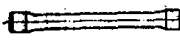
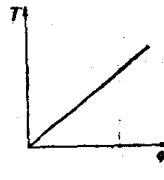
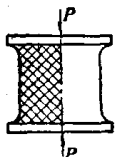
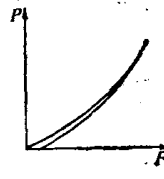
## 1 弹簧的类型及其特性

常用弹簧的类型及其特性见表 30·1-1。

表30·1-1 弹簧的类型及其特性

| 名称                         | 简 图                                                                                               | 特 性 线                                                                               | 说 明                                                            | 名称                                                                                           | 简 图                                                                                            | 特 性 线                                                                                 | 说 明                                                                   |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 圆<br>柱<br>螺<br>旋<br>弹<br>簧 | 圆截面材料压缩弹簧<br>   |   | 特性线呈线性,刚度稳定。结构简单,制造方便。应用最广                                     | 圆<br>柱<br>螺<br>旋<br>弹<br>簧                                                                   | 拉伸弹簧<br>    |   |                                                                       |
|                            | 矩形截面材料压缩弹簧<br> |                                                                                     | 在所占空间相同时,矩形截面材料比圆截面材料能吸收的能量多。刚度更接近于常数                          | 扭转弹簧<br> | 主要用于各种装置中的压紧和储能                                                                                |                                                                                       |                                                                       |
|                            | 变节距压缩弹簧<br>    |  | 当弹簧压缩到有簧圈开始接触后,特性线变为非线性,刚度及自振频率均为变值,利于消除共振或缓和共振的影响。可用于支承高速变载机构 | 变<br>径<br>螺<br>旋<br>弹<br>簧                                                                   | 圆锥螺旋弹簧<br> |  | 当弹簧压缩到有簧圈开始接触后,特性线变为非线性,自振频率为变值,防共振能力较变节距压缩弹簧强。稳定性好,结构紧凑,多用于承受较大载荷和减振 |
|                            | 多股压缩弹簧<br>     |                                                                                     | 当载荷大到一定程度后,特性线出现折点。比相同截面材料的普通螺旋弹簧强度高,减振作用大。在武器和航空发动机中常有使用      | 旋<br>转<br>弹<br>簧                                                                             | 蜗卷螺旋弹簧<br> |                                                                                       | 与圆锥弹簧作用相似,但能吸收的能量更大。制造困难。除空间受限制的情况下采用外,一般不采用                          |

(续)

| 名称     | 简图                                                                                            | 特性线                                                                                 | 说明                                        | 名称                                                                                                | 简图                                                                                    | 特性线                                               | 说明 |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----|
| 变径螺旋弹簧 | 中凹形螺旋弹簧<br>  |    | 特性与圆锥弹簧相似。主要用于座垫和床垫等                      | 碟形弹簧<br>         |    | 缓冲和减振能力强。采用不同的组合可以得到不同的特性线。多用于重型机械的缓冲和减振装置        |    |
|        | 中凸形螺旋弹簧<br>  |    | 特性与圆锥弹簧相似。无特殊要求时，一般不采用                    | 环形弹簧<br>         |    | 有很高的减振能力。用于重型设备的缓冲装置                              |    |
|        | 组合螺旋弹簧<br> |  | 在需要得到特定的特性线情况下使用                          | 非接触形平面蜗卷弹簧<br> |   | 圈数多，变形角大，能储存的能量大。多用作压紧弹簧和仪器、钟表中的储能弹簧              |    |
| 板簧     | 单板弹簧<br>   |  | 缓冲和减振性能好，尤其多板弹簧减振能力强。主要用于汽车、拖拉机和铁道车辆的悬挂装置 | 接触形平面蜗卷弹簧<br>  |  |                                                   |    |
|        | 多板弹簧<br>   |  |                                           | 空气弹簧<br>       |  | 可按需要设计特性线和调节高度。多用于车辆悬挂装置                          |    |
| 扭杆弹簧   |            |  | 单位体积变形能大。主要用于各种车辆的悬挂装置                    | 橡胶弹簧<br>       |  | 弹性模量小，容易得到所需要的非线性特性。形状不受限制，各方向刚度可自由选择。可承受来自多方面的载荷 |    |

## 2 弹簧设计的基本概念

### 2.1 弹簧的特性线和刚度

载荷  $P$  ( $T$ ) 与变形  $F$  ( $\varphi$ ) 之间的关系曲线称为弹簧的特性线。弹簧特性线大致有三种类型, 即直线型、渐增型、渐减型, 如图 30·1-1 所示; 或者是以上类型的组合, 如图 30·1-2 所示, 为两个直线型组成的组合特性线。

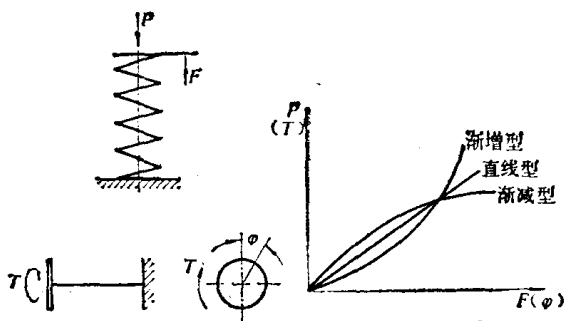


图 30·1-1 特性线的类型

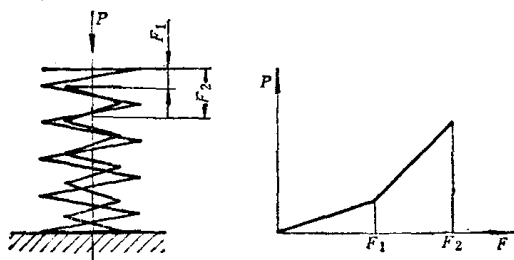


图 30·1-2 组合弹簧的特性线

产生单位变形所需的载荷称为弹簧的刚度。对于受拉伸和压缩载荷的弹簧, 其刚度为

$$P' = \frac{dP}{dF} = \tan \beta \quad \text{kgf/mm} \quad (30\cdot1-1 a)$$

对于受扭转载荷的弹簧, 其刚度为

$$T' = \frac{dT}{d\varphi} = \tan \beta \quad \text{kgf}\cdot\text{mm/deg} \quad (30\cdot1-1 b)$$

弹簧的特性线对于弹簧的设计和选择具有重要的作用。具有直线型特性线的弹簧, 刚度稳定。这类弹簧由于制造简单, 应用最广。具有渐增型特性线的弹簧, 当载荷达到一定程度后, 刚度急剧增加, 从而起到保护弹簧的作用。板弹簧、环形和碟形弹簧等, 由于摩擦损失, 加载与卸载的特性线不重合, 因此, 这类弹簧特别适用于减振和缓冲。

由于尺寸误差和材料因素的影响, 计算的特性线与实测有一定的差异。对保持尺寸准确度较困难

的非直线型特性线的弹簧, 差异更大。因此, 对特性线有较严格要求的弹簧, 应经过试验, 反复修改有关尺寸参数后, 方可成批生产。

### 2.2 载荷与最大应力和变形的关系

弹簧受载后, 在材料同一截面上各点的应力不同, 有时沿材料长度也是变化的。弹簧材料的截面尺寸主要根据受载后的最大应力确定。弹簧的高度或长度根据受载后所要求的变形确定。

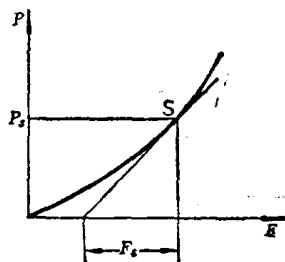


图 30·1-3 静变形示意图

在设计非线性特性线的弹簧时, 有时考虑静变形。如图 30·1-3 所示, 静变形系指过特性线任意点  $S$  作切线与横坐标轴的交点与过切点所做垂线之间的变形量  $F_s$ , 称为该切点  $S$  对应载荷  $P_s$  的静变形。

### 2.3 弹簧的变形能

弹簧受载后所储存的能称为弹簧的变形能  $U$ 。

对于拉伸和压缩弹簧,  $U = \int P dF$ ; 对于扭转弹簧,

$U = \int T d\varphi$ 。如取  $V$  为弹簧材料的体积,  $\tau$  和  $\sigma$  为弹簧受载后的应力, 则变形能的计算式为

$$\left. \begin{aligned} \text{当弹簧材料受切应力时} \\ U &= k \frac{V}{G} \tau^2 \\ \text{当弹簧材料受正应力时} \\ U &= k \frac{V}{E} \sigma^2 \end{aligned} \right\} \quad (30\cdot1-2)$$

式中  $k$  ——材料利用系数, 与弹簧类型有关, 见表 30·1-2

从式 (30·1-2) 可见, 变形能只与弹簧材料的应力、体积和模量以及弹簧的类型有关, 而与弹簧的其他几何尺寸 (如材料的截面尺寸和弹簧的直径、圈数、节距等) 无关; 模量低时, 弹簧的变形量和变形能大, 但刚度小; 提高应力能迅速增大弹簧的变形能。

当设计缓冲弹簧时, 弹簧的变形能应等于或大于被缓冲物体的动能,  $U \geq \frac{1}{2} M v^2$ 。如弹簧的类

表30-1-2 各种弹簧变形能的计算和比值

| 弹 簧 类 型          | 变形能<br>$U$ 的计<br>算公式    | 系数<br>$k$      | 变形能的<br>比值%① |
|------------------|-------------------------|----------------|--------------|
| 杆的拉伸或压缩          | $k \frac{V\sigma^2}{E}$ | $\frac{1}{2}$  | 100          |
| 悬臂板弹簧            |                         | $\frac{1}{18}$ | 11           |
| 弓形板弹簧            |                         | $\frac{1}{6}$  | 33           |
| 圆截面材料螺旋扭转弹簧      |                         | $\frac{1}{8}$  | 25           |
| 矩形截面材料螺旋扭转弹簧     |                         | $\frac{1}{6}$  | 33           |
| 平面蜗卷弹簧           |                         | $\frac{1}{6}$  | 33           |
| 圆截面材料螺旋拉伸或压缩弹簧   | $k \frac{V\tau^2}{G}$   | $\frac{1}{4}$  | 43           |
| 方形截面材料螺旋拉伸或压缩弹簧② |                         | $\frac{1}{6}$  | 29           |
| 圆截面扭杆弹簧          |                         | $\frac{1}{4}$  | 43           |

① 按  $G \approx \frac{E}{2.6}$ ,  $\tau = \frac{\sigma}{\sqrt{3}}$  换算;

② 长方形截面材料亦可按此近似计算。

型、材料和使用应力已选定, 则可从式(30-1-2)算出所需弹簧材料的体积, 即

$$V = \frac{UG}{k\tau^2} \quad \text{或} \quad V = \frac{UE}{k\sigma^2}$$

#### 2.4 弹簧的共振

承受周期性载荷的弹簧, 当其自振频率与载荷频率接近或重合时, 会产生共振, 使应力增大, 严重时弹簧可能断裂。设计这类弹簧时, 应注意使其一阶自振频率(有时也要注意其二、三阶频率)避开载荷的频率。

当弹簧有较大的内摩擦时, 如多股螺旋弹簧、碟形和环形弹簧、多板弹簧等, 它们的加载和卸载特性线不重合(见表 30-1-1)。特性线所包围的面积即为摩擦所消耗的能量  $U_0$ 。 $U_0$  值越大, 则弹簧

的吸振能力越大, 消除或缓和共振的能力也越强。 $U_0$  与  $U$  之比 ( $U_0/U$ ) 称为阻尼系数  $\psi$ 。当内摩擦不够大时, 也可以采取措施增加外摩擦, 以提高阻尼系数。

变节距和变径螺旋弹簧在压缩到有簧圈开始接触后, 具有非线性特性, 其刚度为变值, 有利于消除或缓和共振。其中, 变径弹簧由于各圈的自振频率不同, 对消除或缓和共振尤其颇振, 更为有效。

在设计受高速冲击载荷的弹簧时, 必须考虑颤振对弹簧强度的影响。弹簧的颤振频率与弹簧的自振频率相同。

### 3 弹簧材料和许用应力的选择

#### 3.1 弹簧材料的分类、性能和应用

常用的弹簧材料有热轧和冷拉(轧)碳素弹簧钢, 合金弹簧钢, 不锈钢弹簧钢, 弹簧用铜合金、镍合金以及橡胶, 塑料和纤维增强塑料等, 其中以碳素弹簧钢应用最广。

热轧弹簧钢主要以圆钢、扁钢和方钢等形状供应, 其直径或厚度一般为 5~50mm, 多用于制造大型弹簧, 如汽车、拖拉机、铁道车辆上的悬挂弹簧或缓冲器等。这类钢材在制造弹簧时一般采用加热成型, 然后经淬火回火处理以达到所需要的性能。

冷拉(轧)弹簧钢主要以钢丝和钢带等形状供应。钢丝有索氏体等温淬火(铅浴等温淬火)冷拉钢丝, 油淬火回火冷拉钢丝和退火状态供应的冷拉钢丝等。前两种多为碳素弹簧钢, 后一种多为硅锰、铬钒、硅铬等合金弹簧钢。这类钢丝多用于制造小型弹簧, 冷卷成型。对于索氏体等温淬火、油淬火回火冷拉钢丝, 在冷卷成型后, 只需进行去应力退火处理。退火状态供应的冷拉钢丝, 在冷卷成型后, 需经淬火回火处理, 应尽量避免采用。

表 30-1-3 为常用弹簧材料及其性能和用途。表 30-1-4 和表 30-1-5 为碳素弹簧钢丝和油淬火回火钢丝的抗拉强度。

不锈钢弹簧钢按其使用状态的组织可分为奥氏体不锈钢、马氏体不锈钢和沉淀硬化不锈钢三类, 其中常用钢的机械性能见表 30-1-6。

表30-1-3 常用弹簧材料及其性能和用途

| 材 料     |              | 切变模量      | 弹性模量                                        | 推 荐                                           | 推 荐         | 特 性 和 用 途      |                                                                                                                           |
|---------|--------------|-----------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 类别      | 牌 号          | 标准号       | $G$<br>kgf/mm <sup>2</sup>                  | $E$<br>kgf/mm <sup>2</sup>                    | 硬度范围<br>HRC |                | 使用温度<br>℃                                                                                                                 |
| 碳素弹簧钢丝  | 65, 70       | YB248-64  | $0.5 \leq d \leq 4$<br>8300~8000<br>$d > 4$ | $0.5 \leq d \leq 4$<br>20750~20500<br>$d > 4$ | —           | -40~120        | 强度高, 加工性能好, 但淬透性差, 适用于做小尺寸弹簧, 或要求不高的大弹簧                                                                                   |
|         | 65Mn, 70Mn   | YB550-65  | 8000                                        | 20000                                         |             |                |                                                                                                                           |
| 合金弹簧钢丝  | 60Si2Mn      | YB249-64  | 8000                                        | 20000                                         | 45~50       | -40~250        | 弹性极限、屈强比、淬透性和抗回火稳定性均较高, 过热敏感性小, 但脱碳倾向大。用作汽缸安全阀弹簧, 电力机车升弓钩弹簧                                                               |
|         | 60Si2MnA     |           |                                             |                                               |             |                |                                                                                                                           |
|         | 60Si2CrA     |           |                                             |                                               | 47~52       | -40~300        | 与硅锰钢相比, 当塑性相近时, 具有较高的抗拉强度和屈服强度。用作汽轮机汽封弹簧, 调节阀簧                                                                            |
|         | 65Si2MnWA    |           |                                             |                                               | 47~52       | -40~350        | 较60Si2CrA有更高的淬透性、硬度和强度, 耐高温                                                                                               |
|         | 60Si2CrVA    | 45~50     |                                             |                                               | -40~400     | 同60Si2CrA, 耐高温 |                                                                                                                           |
|         | 50CrVA       | YB218-64  |                                             |                                               | 45~50       | -40~400        | 有良好的工艺性能、机械性能、淬透性和回火稳定性, 耐高温。用作汽门弹簧, 油嘴弹簧和安全阀弹簧                                                                           |
|         | 30W4Cr2VA    | YB249-64  |                                             |                                               | 43~47       | -40~500        | 高温时有较高的强度, 淬透性好。用作锅炉安全阀弹簧、碟形阀弹簧                                                                                           |
| 不锈钢弹簧钢丝 | 1Cr18Ni9     | YB252-64  | 7300                                        | 19700                                         | —           | -250~290       | 耐腐蚀、耐高低温、有良好的工艺性能, 但不能用淬火方法硬化, 只能在固溶处理后, 通过加工硬化来提高强度, 当材料尺寸大于10mm时, 不可能得到大的压缩量和所需要的强度及弹性极限。因此只能用作制造小截面材料弹簧, 如仪表中心垫圈、挡圈和胀圈 |
|         | 1Cr18Ni9Ti   |           |                                             |                                               |             |                |                                                                                                                           |
|         | 3Cr13        | —         | 7700                                        | 21900                                         | 48~53       | -40~400        | 机械强度高, 在大气、蒸气、淡水和稀酸中具有较好的耐腐蚀性, 但不宜用于强腐蚀介质中; 耐高温; 适用于做较大尺寸的弹簧, 成型后进行淬火回火强化                                                 |
|         | 4Cr13        |           |                                             |                                               |             |                |                                                                                                                           |
|         | 0Cr17Ni7Al   | GB1220-75 | 7500                                        | 18700                                         | 47~50       | 350            | 耐腐蚀性与奥氏体不锈钢相近, 时效过程中产生沉淀硬化作用, 因而有很高的强度和硬度; 耐高温, 加工性能好。适用于制造形状复杂、表面状态要求高的弹簧                                                |
|         | 0Cr15Ni7MoAl |           |                                             |                                               |             | 425            |                                                                                                                           |
| 镍合金丝    | Ni36CrTiAl   | YB138-73  | 7700                                        | 20000                                         | —           | -40~250        | 弹性模量、强度、耐腐蚀性和抗磁性均高。应用于航空仪表, 精密仪表的弹性元件                                                                                     |
|         | Ni42CrTi     |           | 6700                                        | 19000                                         | —           | -60~100        | 恒弹性, 加工性能好, 耐腐蚀。用作灵敏弹性元件, 如计时仪表和手表的游丝                                                                                     |
|         | Co40CrN Mo   | YB140-73  | 7800                                        | 20000                                         | —           | -40~400        | 强度高, 低弹性后效, 高弹性, 耐腐蚀, 和无磁。用作钟表发条                                                                                          |

(续)

| 类别    | 材 料                  |           | 切变模量<br>$G$<br>kgf/mm <sup>2</sup> | 弹性模量<br>$E$<br>kgf/mm <sup>2</sup> | 推 荐<br>硬度范围<br>HRC | 推 荐<br>使用温度<br>℃ | 特 性 和 用 途                                                       |
|-------|----------------------|-----------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------|
|       | 牌 号                  | 标准号       |                                    |                                    |                    |                  |                                                                 |
| 铜合金丝  | QSi3-1               | YB453-64  | 4100                               | 9500                               | HB<br>90~100       | ~120             | 强度弹性和耐磨性均高, 低温时不降低塑性, 耐腐蚀、防磁                                    |
|       | QSn4-3<br>QSn6.5-0.1 | YB454-64  | 4000                               |                                    |                    | -250~120         | 强度、弹性和耐磨性均高, 冷热加工性能好, 耐腐蚀, 防磁, 可用作电表游丝                          |
|       | QBe2                 | YB565-65  | 4300                               | 13200                              | 37~40              | -200~120         | 强度、硬度、疲劳强度、弹性和耐磨性均高, 耐腐蚀, 防磁, 导电性好, 撞击时无火花, 用作电表游丝              |
| 热轧弹簧钢 | 65Mn                 | GB1222-75 | 8000                               | 20000                              | 45~50              | -40~120          | 经热处理后的综合机械性能略优于碳钢; 有过热敏感性和回火脆性                                  |
|       | 60Si2Mn              |           |                                    |                                    |                    | -40~250          | 弹性极限、屈服比、淬透性和抗回火稳定性均较高, 过热敏感性较小, 但脱碳倾向较大。用于汽车、拖拉机、铁道车辆上的板簧和螺旋弹簧 |
|       | 60Si2MnA             |           |                                    |                                    |                    |                  |                                                                 |
|       | 60Si2CrA             |           |                                    |                                    | 47~52              | -40~300          | 有较高的抗拉强度和屈服比。用作破碎机弹簧                                            |
|       | 70Si3MnA             |           |                                    |                                    |                    | -40~350          | 同60Si2Mn, 用于承受较高振动的弹簧                                           |
|       | 65Si2MnWA            |           |                                    |                                    |                    |                  | 较60Si2Mn有更高的淬透性、硬度和强度, 耐高温。用作取弹弓弹簧                              |
|       | 60Si2CrVA            |           |                                    |                                    | 45~50              | -40~400          | 同60Si2CrA                                                       |
|       | 50CrVA               |           |                                    |                                    |                    |                  | 有良好的工艺性能、机械性能、淬透性和稳定性                                           |
|       | 30W4Cr2VA            |           |                                    |                                    | 43~47              | -40~500          | 高温时具有较高的强度, 淬透性好。可用于锅炉碟形弹簧                                      |

表30-1-4 碳素弹簧钢丝的抗拉强度①(YB248-64)

| 钢丝直径<br>$d$<br>mm | 抗拉强度极限 $\sigma_b$ ②<br>kgf/mm <sup>2</sup> |      |     | 钢丝直径<br>$d$<br>mm | 抗拉强度极限 $\sigma_b$ ②<br>kgf/mm <sup>2</sup> |      |     |
|-------------------|--------------------------------------------|------|-----|-------------------|--------------------------------------------|------|-----|
|                   | Ⅱ                                          | Ⅰ、Ⅰa | Ⅰ   |                   | Ⅱ                                          | Ⅰ、Ⅰa | Ⅰ   |
| <0.30             | 175                                        | 225  | 270 | 2.5               | 130                                        | 165  | 180 |
| 0.35~0.60         | 170                                        | 220  | 265 | 3.0               | 130                                        | 165  | 170 |
| 0.8               | 170                                        | 215  | 260 | 3.5               | 120                                        | 155  | 165 |
| 1.0               | 165                                        | 205  | 250 | 4                 | 115                                        | 150  | 160 |
| 1.2               | 155                                        | 195  | 240 | 5                 | 110                                        | 140  | 150 |
| 1.6               | 145                                        | 185  | 220 | 6                 | 105                                        | 130  | 145 |
| 2.0               | 140                                        | 180  | 200 | 8                 | 100                                        | 125  | —   |

① 表中钢丝采用GB699-65优质碳素钢和GB1298-77素工具钢制造。Ⅰ、Ⅱ、Ⅰa组钢丝用钢的含硫量不得超过0.020%, 含磷量不得超过0.030%, 含铜量不得超过0.20%。

② 表中 $\sigma_b$ 为下限值。

表30-1-5 油淬火回火碳素及铬钒弹簧钢丝机械性能

| 钢丝直径<br>$d$<br>mm | 抗拉强度极限 $\sigma_b$ , kgf/mm <sup>2</sup> |         | 收缩率<br>$\psi$ %<br>不小于 | 钢丝直径<br>$d$<br>mm | 抗拉强度极限 $\sigma_b$ , kgf/mm <sup>2</sup> |         | 收缩率<br>$\psi$ %<br>不小于 |         |    |
|-------------------|-----------------------------------------|---------|------------------------|-------------------|-----------------------------------------|---------|------------------------|---------|----|
|                   | 碳素弹簧钢丝①                                 |         |                        |                   | 铬钒弹簧<br>钢 丝②                            |         |                        |         |    |
|                   | I 组                                     | II 组    |                        |                   |                                         |         |                        |         |    |
| 0.8               | 175~200                                 | 160~185 | 165~185                | 1                 | 3.2                                     | 165~185 | 150~170                | 155~170 | 45 |
| 1.0               |                                         |         |                        |                   | 3.5                                     |         |                        |         |    |
| 1.2               |                                         |         |                        |                   | 3.8                                     |         |                        |         |    |
| 1.4               |                                         |         |                        |                   | 4.0                                     | 160~180 | 145~160                | 150~165 |    |
| 1.6               |                                         |         |                        |                   | 4.2                                     |         |                        |         |    |
| 1.8               | 4.5                                     |         |                        |                   |                                         |         |                        |         |    |
| 2.0               | 175~190                                 | 155~175 | 160~175                | 45                | 5.0                                     | 155~175 | 140~160                | 145~160 |    |
| 2.2               |                                         |         |                        |                   | 5.5                                     |         |                        |         |    |
| 2.5               |                                         |         |                        |                   | 6.0                                     |         |                        |         |    |
| 2.8               |                                         |         |                        |                   | 7.0                                     | 150~170 | 135~155                |         |    |
| 3.0               |                                         |         |                        |                   | 8.0                                     |         |                        |         |    |

① 碳素弹簧钢丝应用65、70、65Mn或70Mn制造。

② 铬钒弹簧钢丝应用50CrVA钢制造。

表30-1-6 不锈钢弹簧机械性能

| 类 别  | 钢 号          | 热 处 理                                            | 抗拉强度极限<br>$\sigma_b$<br>kgf/mm <sup>2</sup> | 抗拉屈服极限<br>$\sigma_s$<br>kgf/mm <sup>2</sup> |
|------|--------------|--------------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 奥氏体  | 1Cr18Ni9     | 0.87mm带材, 变形量50%                                 | 133                                         | 103                                         |
|      | 1Cr18Ni9Ti   | 冷拔钢丝 $\phi$ 1mm                                  | 180~200                                     |                                             |
| 马氏体  | 3Cr13        | 1050℃油淬, 450℃回火                                  | 175                                         | 143( $\sigma_{0.2}$ )                       |
|      | 4Cr13        | 1050℃空冷, 530℃2小时回火                               | 182                                         | 154                                         |
| 沉淀硬化 | 0Cr17Ni7Al   | I: 1050℃空冷→950℃10分+4分/mm<br>空冷→-73℃8小时→510℃1小时空冷 | I: 158<br>II: 186                           | 147<br>182                                  |
|      | 0Cr15Ni7MoAl | II: 1050℃空冷→60%以上冷加工→480℃<br>1小时空冷               | I: 164<br>II: 186                           | 152<br>182                                  |

## 3.2 弹簧材料的选择

弹簧多在变载荷下工作, 应力不允许超过屈服极限, 因此对材料要求具有高的抗拉强度和屈强比, 高的疲劳强度和一定的冲击韧性。对热成型的大尺寸弹簧要求材料要有良好的淬透性, 低的过热敏感性和不易脱碳等; 对于制造小尺寸弹簧的冷拉(轧)材料要求有均匀的硬度和一定的弯曲塑性。

弹簧的性能和使用寿命在很大程度上取决于材

料的表面质量。因此弹簧材料表面不应有裂纹、折迭、结疤、气泡、夹渣、压痕和凹陷等缺陷。

对材料表面进行各种强化处理有很好效果, 应予考虑和采用。选择弹簧材料时, 应根据对弹簧的具体要求考虑以下几个方面。

a. 材料的淬透性能 在选择材料时, 应结合材料直径或厚度考虑材料的淬透性能。表30-1-7为部分常用弹簧钢在油中能淬透的尺寸。

在选用圆截面材料时, 其直径应符合表30-1-8

表30-1-7 常用弹簧钢在油中能淬透的尺寸

| 钢 号              | 65, 70 | 65Mn | 60Si2Mn | 50CrMn | 60Si2CrA<br>50CrVA | 65Si2MnWA<br>60Si2CrVA |
|------------------|--------|------|---------|--------|--------------------|------------------------|
| 在油中能淬透的<br>尺寸 mm | 7      | 15   | 25      | 30     | 45                 | 50                     |

表30-1-8 圆截面弹簧材料直径系列 mm

|      |     |      |     |       |      |      |     |      |     |     |      |    |
|------|-----|------|-----|-------|------|------|-----|------|-----|-----|------|----|
| 第一系列 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.25  | 0.3  | 0.35 | 0.4 | 0.45 | 0.5 | 0.6 | 0.8  | 1  |
|      | 1.2 | 1.6  | 2   | 2.5   | 3    | 3.5  | 4   | 4.5  | 5   | 6   | 8    | 10 |
|      | 12  | 16   | 20  | 25    | 30   | 35   | 40  | 45   | 50  | 60  | 70   | 80 |
| 第二系列 | 0.7 | 0.9  | 1.4 | (1.5) | 1.8  | 2.2  | 2.8 | 3.2  | 3.8 | 4.2 | 5.5  | 7  |
|      | 9   | 14   | 18  | 22    | (27) | 28   | 32  | (36) | 38  | 42  | (55) | 65 |

注：1. 应优先采用第一系列。

2. 括号内直径只限于目前不能更换的产品使用。

的系列值。

b. 工作特点和载荷性质 在不同工作条件下使用的弹簧，对材料有不同的要求。

1) 对承受静载荷及有限作用次数的变载荷的弹簧，可选用65、70、65Mn、60Si2MnA、65Si2MnWA和50CrVA等弹簧钢。

2) 对承受动载荷（变载荷及冲击载荷）的弹簧和重要且不易维修的弹簧，可选用50CrVA和QBe2等材料。

3) 对要求耐腐蚀性能及防磁性能高、导电性能好的弹簧，可选用QSi3-1、QSn4-3、QSn6.5-0.1、QBe2、1Cr18Ni9Ti和4Cr13等材料。

c. 工作温度 在高或低温条件下使用的弹簧，应根据其工作温度选择弹簧材料。

1) 对于在高温下工作的弹簧，如电站设备的安全阀、指挥阀用弹簧、调速弹簧、气封弹簧片、转子发动机的刮片弹簧及压缩机的阀弹簧等，都提出了不同程度的耐热要求。目前常用的要求不高的耐热弹簧钢有60Si2CrA、50CrVA、60Si2CrVA、30W4Cr2VA等。某些不锈钢弹簧钢在300~400℃温度下也具有一定的耐热性。它们的最高使用温度参见表30-1-3。有些热作工具钢由于其红硬性、耐热性能好，有时也可用作耐热弹簧材料。当要求使用温度在500℃以上时，则需选用高温弹性合金，见表30-1-9。

随着温度的升高，材料的弹性模量、强度、硬度和疲劳极限都会有不同程度的降低。对于不同温度下的切变模量 $G_t$ 值可按式计算：

表30-1-9 热作工具钢和高温弹性合金的最高使用温度

| 材料类别  | 合 金 牌 号          | 最高使用温度<br>℃ |
|-------|------------------|-------------|
| 热作工具钢 | W18Cr4V          | 350         |
|       | 65WMo            | 500         |
| 铁基合金  | Cr14Ni25Mo(A286) | 500~550     |
|       | 808              | 500         |
| 镍基合金  | Incoloy 901      | 500         |
|       | Inconel 718      | 600         |
|       | Inconel X-750    | 600         |
| 钴基合金  | L605             | 600         |
| 铌基合金  | 55NbTiAl         | 600         |

注：1. W18Cr4V、Cr14Ni25Mo、Inconel 718 成分见本手册第12篇。

2. 65WMo主要成分：W8.0~9.0%，Mo0.8~0.9%，Cr3.5~4.0%，V0.6~0.9%；  
808主要成分：Cr14~16%，Ni33~36%，W1.7~2.2%，Mo1.7~2.2%，其余Fe；  
Incoloy 901 主要成分：Cr12.5%，Mo6%，Ti2.7%，Fe34%，其余Ni；  
Inconel X-750 主要成分：Cr15%，Fe7%，Nb0.9%，Ti2.5%，Al0.8%，其余Ni；  
L605 主要成分：Cr20%，Ni10%，W15%，Fe3%，其余Co；  
55NbTiAl主要成分：Nb53~56%，Ti31~40%，Al5~6%。

$$G_t = K_t G$$

式中  $G$ ——常温下的切变模量

$K_t$ ——温度修正系数，其值按表30-1-10选取

表30·1-10 切变模量  $G$  的温度修正系数  $K_t$ 

| 材料牌号       | 工 作 温 度 $^{\circ}\text{C}$ |      |      |      |
|------------|----------------------------|------|------|------|
|            | $\leq 60$                  | 150  | 200  | 250  |
|            | $K_t$                      |      |      |      |
| 50CrVA     | 1                          | 0.96 | 0.95 | 0.94 |
| 60Si2Mn    | 1                          | 0.99 | 0.98 | 0.98 |
| 1Cr18Ni9Ti | 1                          | 0.98 | 0.94 | 0.9  |
| QBe2       | 1                          | 0.95 | 0.94 | 0.92 |

注：表内各温度之间的  $K_t$  值，可用插入法求出（对于压缩弹簧）。

表30·1-11 弹簧用镍合金低温性能

| 材 料                          | 状 态        | 温 度<br>$^{\circ}\text{C}$ | $\sigma_{0.2}$<br>kgf/mm <sup>2</sup> | $\sigma_b$<br>kgf/mm <sup>2</sup> |
|------------------------------|------------|---------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Ni66Cu31Fe<br>(Monel 400)    | 冷拉         | 室温                        | 65.6                                  | 72.7                              |
|                              | 冷拉         | -79                       | 70.7                                  | 82.0                              |
| Ni66Cu29Al3<br>(Monel k500)  | 冷拉<br>时效硬化 | 室温                        | 84.0                                  | 111.8                             |
|                              | 冷拉<br>时效硬化 | -110                      | 94.2                                  | 120.3                             |
|                              | 冷拉<br>时效硬化 | -330                      | 112.2                                 | 141.5                             |
| Ni76Cr16Fe8<br>(Inconel 600) | 冷拉         | 室温                        | 103.5                                 | 106.6                             |
|                              | 冷拉         | -79                       | 108.5                                 | 114.8                             |
|                              | 冷拉         | -190                      | —                                     | —                                 |
| Inconel 718                  | 固溶处理<br>时效 | 室温                        | $\sigma_s$<br>106                     | 135.5                             |
|                              | 固溶处理<br>时效 | -98                       | $\sigma_s$<br>122.5                   | 149.6                             |
|                              | 固溶处理<br>时效 | -196                      | $\sigma_s$<br>142.6                   | 174.2                             |
|                              | 固溶处理<br>时效 | -253                      | $\sigma_s$<br>164                     | 187.0                             |
| Ni                           | 冷拉         | 室温                        | —                                     | 72.2                              |
|                              | 冷拉         | -80                       | —                                     | 78.5                              |

2) 在低温条件下，碳素弹簧钢、一般合金弹簧钢、3Cr13、4Cr13 不锈钢以及弹簧用镍合金等可用到  $-40^{\circ}\text{C}$ 。在更低温度 ( $-200^{\circ}\text{C}$ ) 下则需用 1Cr18Ni9、1Cr18Ni9Ti、QSn4-3、QSn6.5-0.1、QBe2、以及 Monel k500、Inconel 718 等，它们在一定低温范围下的机械性能比在常温下都有所提高。它们的最低使用温度可参见表30·1-3。表30·1-11为镍合金的低温性能。

### 3.3 弹簧的许用应力

由于应力对弹簧性能有特别大的影响 ( $U \propto \tau^2$  或  $\sigma^2$ )，所以必须采用安全的、但不是保守的数值，具体见以后各章。下列为几点考虑原则：

1) 对更换困难，以及因弹簧的损坏会引起整个机械损坏或其他重大事故的弹簧，许用应力应适当降低；

2) 对使用过程中有磨损或有腐蚀的弹簧，许用应力应适当降低；

3) 在相同使用条件下，所选材料的机械性能优越，热处理工艺成熟，材料性能稳定，许用应力可取较大值；

4) 经机械强化（强压或喷丸）处理的弹簧，许用应力可适当提高；

5) 在高温下使用的弹簧，材料的抗拉强度极限  $\sigma_b$  随温度的升高而下降。因此，许用应力应按使用温度时材料的强度极限选取；

6) 对于受静载荷和受变载荷而作用次数少或变化幅度小的弹簧可选用较高的许用应力；

7) 对允许有少许塑性变形的弹簧可选用较高的许用应力；

8) 对强压处理的弹簧，其屈服极限  $\sigma_s$  和  $\tau_s$  可取下列近似值：碳素弹簧钢  $\sigma_s = 0.7\sigma_b$ ， $\tau_s = 0.5\sigma_b$ ；硅锰弹簧钢  $\sigma_s = 0.75\sigma_b$ ， $\tau_s = 0.6\sigma_b$ ；铬钒弹簧钢  $\sigma_s = 0.9\sigma_b$ ， $\tau_s = 0.7\sigma_b$ 。