



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 15014—2008

代替 GB/T 15014—1994, GB/T 15015—1994, GB/T 15016—1994, GB/T 15017—1994

---

## 弹性合金、膨胀合金、热双金属、电阻合金 物理量术语及定义

Physical quantity terminologies and definitions of elastic alloy,  
expansion alloy, thermostat metal, resistance alloy

2008-08-05 发布

2009-04-01 实施

---

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会

发布

# 弹性合金、膨胀合金、热双金属、电阻合金 物理量术语及定义

## 1 范围

本标准适用于弹性合金、膨胀合金、热双金属和电阻合金等领域使用的物理量术语及定义,作为标准和一般使用时的共同称谓。

## 2 分类

本标准按功能材料使用性能分为四大类:弹性合金、膨胀合金、热双金属和电阻合金等。

## 3 术语和定义

### 3.1 弹性合金 elastic alloy

#### 3.1.1

**弹性合金 elastic alloy**

分为高弹性合金和恒弹性合金。

#### 3.1.2

**弹性 elasticity**

物体在外力作用下改变其形状和大小,外力卸除后又可恢复原始形状和大小的特性。在弹性范围内,应力和应变呈简单的单值函数关系,即服从胡克定律。

#### 3.1.3

**理想弹性 ideal elasticity**

完全满足胡克定律的弹性行为,在外力作用下,同时呈现四个特征:

- a) 瞬时即出现应力与应变间的对应关系;
- b) 应力值与应变值间是一一对应的;
- c) 当应力为零时,应变也为零;
- d) 应力与应变间是正比例关系。

#### 3.1.4

**非弹性 inelasticity**

在加、卸载过程中,应变响应有不同的行程。应力与应变间既不是一一对应的,也不是成比例的,但仍具有理想弹性的第三个特征。

#### 3.1.5

**粘弹性 viscoelasticity**

物体应变的大小除与应力大小有关外,还与时间或变形速度有关的非弹性现象。

#### 3.1.6

**滞弹性 anelasticity**

弹性不完全性

导致应力与应变间的非线性关系,变形不是完全弹性的现象。滞弹性的表现形式包括弹性后效、弹性滞后、内耗、应力松弛、模量亏损等。

滞弹性体应变  $\epsilon$  的表达方式为:

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2$$

式中:

$\epsilon$ ——应变,无量纲;

$\epsilon_1$ ——瞬时应变,无量纲;

$\epsilon_2$ ——与时间有关的应变,无量纲。

### 3.1.7

**恒弹性 constant elastic**

在一定温度范围内,弹性模量不随温度变化的特性。

### 3.1.8

**高弹性 high elastic**

具有高的弹性极限、强度、硬度、弹性模量,低的滞弹性效应的特性。

### 3.1.9

**内耗 internal friction**

在交变应力的作用下,由于物体的滞弹性现象导致应变落后于应力的变化所引发的不可逆能量消耗。

### 3.1.10

**艾林瓦合金 Elinvar alloy**

一种具有艾林瓦效应的恒弹性合金。

### 3.1.11

**艾林瓦效应 Elinvar effect**

弹性反常

物质的弹性模量在温度升高时,基本不变,甚至增加的现象。

注:一般固态物质的弹性模量随着温度的升高而降低,故艾林瓦效应又称为弹性反常。

### 3.1.12

**$\Delta E$  效应  $\Delta E$  effect**

通过外加应力使磁畴的磁化方向改变,从而在通常的弹性变形以外产生附加的弹性变形,因此使弹性模量  $E$  产生改变  $\Delta E$ 。

### 3.1.13

**刚度 rigidity**

作用在变形弹性体上的力与它所引起的位移之比。

在拉(压)状态下,刚度  $p'$  的表达式为:

$$p' = dp/dL$$

在扭转状态下,刚度  $T'$  的表达式为:

$$T' = dT/df$$

式中:

$p'$ ——拉(压)刚度,单位为牛顿每毫米(N/mm);

$T'$ ——扭转刚度,单位为牛顿·米每弧度(N·m/rad);

$p$ ——拉(压)力,单位为牛顿(N);

$L$ ——长度,单位为米(m);

$T$ ——扭距,单位为牛顿·米(N·m);

$f$ ——扭转角,单位为弧度(rad)。

注1:构件的刚度取决于构件的尺寸、形状和材料的弹性模量。

注2:依受力状态的不同,材料的刚度分别为杨氏模量或切变模量。

## 3.1.14

**杨氏模量 Young's modulus** **$E$** 

弹性变形范围内,正应力与相应正应变之比。

杨氏模量  $E$  的表达式为:

$$E = \sigma_p / \varepsilon_p$$

式中:

$E$ ——杨氏模量,单位为帕(Pa);

$\sigma_p$ ——正应力,单位为帕(Pa);

$\varepsilon_p$ ——正应变,无量纲。

## 3.1.15

**切变模量 shear modulus**

横向弹性模量

刚性模量

 **$G$** 

在弹性变形范围内,切应力与相应的切应变之比。

切变模量  $G$  的表达式为:

$$G = \sigma_{ij} / \varepsilon_{ij}$$

式中:

$G$ ——切变模量,单位为帕(Pa);

$\sigma_{ij}$ ——法向为  $i$  的面上, $j$  方向上的应力( $i, j$  分别代表  $x, y$  或  $z$ ),单位为帕(Pa);

$\varepsilon_{ij}$ ——法向为  $i$  的面上, $j$  方向上的应变( $i, j$  分别代表  $x, y$  或  $z$ ),无量纲。

## 3.1.16

**体积模量 bulk modulus** **$K$** 

弹性变形范围内,体应力与相应的体应变之比的绝对值。

体积模量  $K$  的表达式为:

$$K = |-P / (\Delta V / V)|$$

式中:

$K$ ——体积模量,单位为帕(Pa);

$P$ ——体应力或球状体受到的各向均匀的压强,单位为帕(Pa);

$\Delta V / V$ ——体积的相对变化,无量纲。

## 3.1.17

**压缩率 compressibility** **$\kappa$** 

弹性变形范围内,由单位体应力所导致的体应变。

压缩率的表达式为:

$$\kappa = -(\Delta V / V) / p$$

式中:

$\kappa$ ——压缩率,  $\text{Pa}^{-1}$ ;

$p$ ——体应力或压强,单位为帕(Pa);

$(\Delta V / V)$ ——体积的相对变化,无量纲。

## 3.1.18

**泊松比 Poisson's ratio** $\mu$ 

在均匀分布的轴向应力作用下,物体中相应的横向应变与轴向应变之比的绝对值。

注:由动态杨氏模量和动态切变模量所确定的泊松比称为动态泊松比。对于各向异性的材料,仿此定义的数值称之为等效泊松比。

泊松比  $\mu$  的表达式为:

$$\mu = -\epsilon_{jj} / \epsilon_{ii}$$

式中:

$\mu$ ——泊松比,无量纲;

$\epsilon_{ii}$ ——轴向应变,无量纲;

$\epsilon_{jj}$ ——相应的横向应变,无量纲。

## 3.1.19

**弹性模量温度系数 temperature coefficient of elastic modulus** $\bar{\beta}_E$ 

在确定的温度范围内,与温度变化 1 °C 相应的杨氏模量的平均变化率。

弹性模量温度系数  $\bar{\beta}_E$  的计算公式为:

$$\bar{\beta}_{E(t_1, t_2)} = (E_2 - E_1) / E_0 (t_2 - t_1)$$

式中:

$\bar{\beta}_E$ ——在温度  $t_1$ 、 $t_2$  间的弹性模量温度系数,单位为每摄氏度( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );

$E_0$ ——基准温度  $t_0$  下的杨氏模量,单位为帕(Pa);

$E_1$ ——温度  $t_1$  下的杨氏模量,单位为帕(Pa);

$E_2$ ——温度  $t_2$  下的杨氏模量,单位为帕(Pa);

$t_1$ ——温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_2$ ——温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )。

## 3.1.20

**瞬间弹性模量温度系数 instantaneous temperature coefficient of elastic modulus** $\beta_E$ 

在某一温度下,与温度变化 1 °C 相应的弹性模量的变化率。

瞬间弹性模量温度系数  $\beta_E$  的表达式为:

$$\beta_{E(t)} = dE / (E_0 dt)$$

式中:

$\beta_{E(t)}$ ——在温度  $t$  下的瞬间弹性模量温度系数,单位为每摄氏度( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );

$E_0$ ——基准温度  $t_0$  下的弹性模量,单位为帕(Pa);

$dE/dt$ ——温度  $t$  时  $E(t)$  关系曲线的微商,单位为帕每摄氏度( $\text{Pa} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )。

## 3.1.21

**频率温度系数 temperature coefficient of frequency** $\bar{\beta}_F$ 

在确定的温度范围内,与温度变化 1 °C 相应的物体固有频率的平均变化率。

频率温度系数  $\bar{\beta}_F$  的计算公式:

$$\bar{\beta}_{F(t_1, t_2)} = (\Delta f)_{\max} / [f_0 (t_2 - t_1)]$$

式中:

$\bar{\beta}_{F(t_1, t_2)}$ ——在温度  $t_1$ 、 $t_2$  间的频率温度系数,单位为每摄氏度( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );

- $f_0$ ——基准温度  $t_0$  下的物体固有频率,单位为赫兹(Hz);  
 $(\Delta f)_{\max}$ ——温度  $t_1 \sim t_2$  范围内物体固有频率的最大变化,单位为赫兹(Hz);  
 $t_1$ ——温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $t_2$ ——温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )。

注1:因振动模式不同而异,振动级次不同亦会略有不同。

注2:常指弯曲振动或纵向振动的基频频率温度系数。

### 3.1.22

**瞬时频率温度系数 instantaneous temperature coefficient of frequency**

$\beta_f$

在某一温度下,与温度变化  $1^{\circ}\text{C}$  相应的物体固有频率的变化率。

瞬间频率温度系数的表达式为:

$$\beta_{f(t)} = df / (f_0 dt)$$

式中:

- $\beta_{f(t)}$ ——在温度  $t$  下的瞬间频率温度系数,单位为每摄氏度( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );  
 $f_0$ ——基准温度  $t_0$  下物体的固有频率,单位为赫兹(Hz);  
 $df / (f_0 dt)$ ——温度  $t$  处  $f(t)$  关系曲线的微商,单位为赫兹每摄氏度( $\text{Hz} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ )<sup>1</sup>。

### 3.1.23

**拉伸波波速 velocity of stretch wave**

$C_D$

介质横截面的线度比波长小很多时的纵向弹性振动传播的速度。

注:在机械滤波器制造行业,常称为“纵波波速”。

### 3.1.24

**扭转波波速  $C_V$  velocity of torsional wave**

杆(管)中扭转弹性振动传播的速度。

### 3.1.25

**应力弛豫 stress relaxation**

$R_{\sigma}$

在弹性变形范围内,应变保持恒定时,应力随时间减少的特性。

应力弛豫  $R_{\sigma}$  的表达式为:

$$R_{\sigma} = (\sigma_0 - \sigma) / \sigma_0$$

式中:

- $R_{\sigma}$ ——应力弛豫,无量纲;  
 $\sigma_0$ ——初始时刻( $t=0$ )的应力,单位为帕(Pa);  
 $\sigma$ —— $t$ 时刻的应力,单位为帕(Pa)。

此值无量纲,常以%表示。

### 3.1.26

**应变弛豫 strain relaxation**

正弹性后效 direct elasticafter-effect

$R_{\epsilon}$

在弹性变形范围内,恒定应力作用下,应变随时间的延长而增加的特性。

应变弛豫  $R_{\epsilon}$  的表达式为:

$$R_{\epsilon} = (\epsilon - \epsilon_0) / \epsilon$$

式中:

- $R_{\epsilon}$ ——应变弛豫,无量纲;  
 $\epsilon_0$ ——初始时刻( $t=0$ )的应变,无量纲,常以%表示;

$\epsilon$ —— $t$ 时刻的应变,无量纲。

3.1.27

**弹性滞后 elastic hysteresis**

$H_t$

在弹性变形范围内,加(卸)载过程中,应变落后于应力的特性。

弹性滞后  $H_t$  的表达式为:

$$H_t = |\epsilon_t - \epsilon_0|$$

式中:

$H_t$ ——弹性滞后,无量纲,常以%表示;

$\epsilon_0$ ——加(卸)载过程中的瞬时应变,无量纲;

$\epsilon_t$ ——经时间  $t$  后的应变,无量纲。

3.1.28

**弹性后效 elastic after-effect**

**反弹性后效 opposite elastic after-effect**

$A_t$

弹性体在弹性极限内,应变落后于应力,物体的形状需经过一段时间的延迟才能趋于稳定的特性。

弹性后效  $A_t$  的表达式为:

$$A_t = |\epsilon_t - \epsilon_0| / \epsilon_0$$

式中:

$A_t$ ——弹性后效,无量纲,常以%表示;

$\epsilon_0$ ——初始时刻( $t=0$ )的应变,无量纲;

$\epsilon_t$ —— $t$ 时刻的应变,无量纲。

3.1.29

**蠕变回复 creep recovery**

$C_t$

在弹性变形范围内,卸除载荷后应变随时间的延长而逐渐回复的特性。

蠕变回复  $C_t$  的表达式为:

$$C_t = \epsilon_t / \epsilon_0$$

式中:

$C_t$ ——蠕变回复,无量纲,常以%表示;

$\epsilon_0$ ——卸载初始时刻( $t=0$ )的应变,无量纲;

$\epsilon_t$ —— $t$ 时刻的应变,无量纲。

3.1.30

**机械品质因数 mechanical quality factor**

$Q$

机械振动系统中,储存在力抗上的能量与一个振动周期内耗散在力阻上的能量之比。

机械品质因数  $Q$  的表达式为:

$$Q = f_r / (\Delta f)_{-3dB}$$

式中:

$Q$ ——机械品质因数,无量纲;

$f_r$ ——机械振动体的谐振频率,单位为赫兹(Hz);

$(\Delta f)_{-3dB}$ ——谐振曲线半功率点处频带宽度,单位为赫兹(Hz)。

## 3.1.31

**对数衰减率 logarithmic decrement** **$\delta$** 

一个自由振动体相继两次振动中,振幅比的自然对数值。

对数衰减率  $\delta$  的表达式为:

$$\delta = \ln(A_n/A_{n+1})$$

式中:

$\delta$ ——对数衰减率,无量纲;

$A_n$ ——自由振动体第  $n$  次振动振幅,单位为毫米(mm);

$A_{n+1}$ ——自由振动体第  $n+1$  次振动振幅,单位为毫米(mm)。

## 3.1.32

**阻尼能力率 specific damping capacity** **$P$** 

自由振动体内,振动一周耗散的能量与该次振动初始储存能量之比。

注:常以此量表示内耗的大小。

## 3.1.33

**阻尼系数 coefficient of damping** **$\beta$** 

一个自由振动体,振幅衰减至原始值  $1/e$  所需时间的倒数。

阻尼系数  $\beta$  的表达式为:

$$\beta = 1/t \cdot \ln(A_0/A_t)$$

式中:

$\beta$ ——阻尼系数,单位为奈培每秒(Np/s);

$t$ ——时间,单位为秒(s);

$A_0$ ——初始( $t=0$ )振幅,单位为毫米(mm);

$A_t$ —— $t$ 时刻的振幅,单位为毫米(mm)。

## 3.1.34

**衰减系数 attenuation coefficient****声衰减系数 sound-attenuation coefficient** **$a$** 

振动传播过程中,单位距离上的振幅自然对数衰减率。

衰减系数  $a$  的表达式为:

$$a = 1/(x_2 - x_1) \cdot \ln(A_{x1}/A_{x2})$$

式中:

$a$ ——衰减系数,单位为奈培每米(Np/m);

$x_1$ ——与起始点距离,单位为米(m);

$x_2$ ——与起始点距离,单位为米(m);

$A_{x1}$ ——振动沿  $x$  方向传播时,位置  $x_1$  处的振幅,单位为毫米(mm);

$A_{x2}$ ——振动沿  $x$  方向传播时,位置  $x_2$  处的振幅,单位为毫米(mm)。

## 3.1.35

**分贝衰减率 decibel decrement** **$\nu$** 

振动传播过程中,单位时间内振幅的常用对数衰减率。



分贝衰减率的表达式为：

$$v=20/t \cdot \log_{10}(A_0/A_t)$$

式中：

$v$ ——分贝衰减率,单位为分贝每秒(dB/s)；

$t$ ——时间,单位为秒(s)；

$A_0$ ——初始时刻( $t=0$ )的振幅,单位为毫米(mm)；

$A_t$ —— $t$ 时刻的振幅,单位为毫米(mm)。

### 3.2 膨胀合金 expansion alloy

#### 3.2.1

##### 膨胀合金 expansion alloy

按膨胀系数的大小分为：

3.2.1.1 低膨胀合金:亦称因瓦合金,一般在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内具有很小的膨胀系数,其平均膨胀系数低于 $3\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

3.2.1.2 定膨胀合金:亦称封接合金,一般在 $-70\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内具有与被封接材料相匹配的膨胀系数,其平均膨胀系数为 $(4\sim 10)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

3.2.1.3 高膨胀合金:一般在室温 $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内具有很高的膨胀系数,其平均膨胀系数高于 $15\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

#### 3.2.2

##### 线热膨胀 linear thermal expansion

$\Delta L$

物体因温度变化而产生长度变化。

#### 3.2.3

##### 线热膨胀率 linear thermal expansion ratio

$\Delta L/L$

物体因温度变化而产生的单位长度的变化。

线热膨胀率为无量纲。

#### 3.2.4

##### 平均线热膨胀系数 mean coefficient of linear thermal expansion

$\bar{\alpha}$

物体在确定的温度 $t_1$ 至 $t_2$ 时,温度平均每变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相应的线热膨胀率。

平均线热膨胀系数 $\bar{\alpha}$ 的表达式为：

$$\bar{\alpha}=(L_2-L_1)/[L_0(t_2-t_1)]$$

注：在实际测量中,如果 $L_0$ 被 $L_1$ 代替所引起的计算误差小于测量误差时,则可用 $L_1$ 代替 $L_0$ 。

式中：

$\bar{\alpha}$ ——平均线热膨胀系数,单位为每摄氏度( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )；

$t_1$ ——热膨胀物体的初始温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )；

$t_2$ ——热膨胀物体的终了温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )；

$L_0$ ——基准温度 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时物体的长度,单位为米(m)；

$L_1$ —— $t_1$ 温度时物体的长度,单位为米(m)；

$L_2$ —— $t_2$ 温度时物体的长度,单位为米(m)。

#### 3.2.5

##### 平均体热膨胀系数 mean coefficient of volumetric thermal expansion

$\bar{\alpha}_v$

物体在确定的温度 $t_1$ 至 $t_2$ 时,与温度变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相应的单位体积的变化。

平均体热膨胀系数 $\bar{\alpha}_V$ 的表达式为:

$$\bar{\alpha}_V = (V_2 - V_1) / [V_0(t_2 - t_1)]$$

注: 在实际测量中, 如果  $V_0$  被  $V_1$  代替所引起的计算误差小于测量误差时, 则可用  $V_1$  代替  $V_0$ 。

式中:

$\bar{\alpha}_V$ ——平均体热膨胀系数, 单位为每摄氏度( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );

$t_1$ ——热膨胀物体的初始温度, 单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_2$ ——热膨胀物体的终了温度, 单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );

$V_0$ ——基准温度  $20^{\circ}\text{C}$  时物体的体积, 单位为立方米( $\text{m}^3$ );

$V_1$ —— $t_1$  温度时物体的体积, 单位为立方米( $\text{m}^3$ );

$V_2$ —— $t_2$  温度时物体的体积, 单位为立方米( $\text{m}^3$ )。

### 3.2.6

平均面热膨胀系数 mean coefficient of areal thermal expansion

$\bar{\alpha}_S$

物体在确定的温度  $t_1$  至  $t_2$  时, 与温度变化  $1^{\circ}\text{C}$  相应的单位面积的变化。

平均面热膨胀系数 $\bar{\alpha}_S$ 的表达式为:

$$\bar{\alpha}_S = (S_2 - S_1) / [S_0(t_2 - t_1)]$$

注: 在实际测量中, 如果  $S_0$  被  $S_1$  代替所引起的计算误差小于测量误差时, 则可用  $S_1$  代替  $S_0$ 。

式中:

$\bar{\alpha}_S$ ——平均面热膨胀系数, 单位为每摄氏度( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );

$t_1$ ——热膨胀物体的初始温度, 单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_2$ ——热膨胀物体的终了温度, 单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );

$S_0$ ——基准温度  $20^{\circ}\text{C}$  时物体的面积, 单位为平方米( $\text{m}^2$ );

$S_1$ —— $t_1$  温度时物体的面积, 单位为平方米( $\text{m}^2$ );

$S_2$ —— $t_2$  温度时物体的面积, 单位为平方米( $\text{m}^2$ )。

### 3.2.7

平均周热膨胀系数 mean coefficient of circumferential thermal expansion

$\bar{\alpha}_\phi$

物体在确定的温度  $t_1$  至  $t_2$  时, 与温度变化  $1^{\circ}\text{C}$  相应的单位周边长度的变化。

平均周热膨胀系数 $\bar{\alpha}_\phi$ 的表达式为:

$$\bar{\alpha}_\phi = (\phi_2 - \phi_1) / [\phi_0(t_2 - t_1)]$$

注: 在实际测量中, 如果  $\phi_0$  被  $\phi_1$  代替所引起的计算误差小于测量误差时, 则可用  $\phi_1$  代替  $\phi_0$ 。

式中:

$\bar{\alpha}_\phi$ ——平均周热膨胀系数, 单位为每摄氏度( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );

$t_1$ ——热膨胀物体的初始温度, 单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_2$ ——热膨胀物体的终了温度, 单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ );

$\phi_0$ ——基准温度  $20^{\circ}\text{C}$  时物体的周边长度, 单位为米(m);

$\phi_1$ —— $t_1$  温度时物体的周边长度, 单位为米(m);

$\phi_2$ —— $t_2$  温度时物体的周边长度, 单位为米(m)。

### 3.2.8

瞬间线热膨胀系数 instantaneous coefficient of linear thermal expansion

$\alpha_t$

在某一温度的物体, 当温度变化趋于零时的平均线热膨胀系数为该温度时的瞬间线热膨胀系数。

瞬间线热膨胀系数 $\alpha_t$ 的表达式为:

$$\alpha_t = \lim_{t_1 \rightarrow t_2} \{(L_2 - L_1) / [L_0(t_2 - t_1)]\}$$

注：在实际测量中，如果  $L_0$  被  $L_1$  代替所引起的计算误差小于测量误差时，则可用  $L_1$  代替  $L_0$ 。

式中：

$\alpha_t$ ——瞬间线热膨胀系数，单位为每摄氏度( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )；

$t_1$ ——热膨胀物体的初始温度，单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )；

$t_2$ ——热膨胀物体的终了温度，单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )；

$L_0$ ——基准温度  $20^{\circ}\text{C}$  时物体的长度，单位为米(m)；

$L_1$ —— $t_1$  温度时物体的长度，单位为米(m)；

$L_2$ —— $t_2$  温度时物体的长度，单位为米(m)。

### 3.2.9

**线热膨胀力 linear thermal expansive force**

$F_a$

物体在温度变化时，因其沿长度方向变化受到约束时对约束物体施加的力。

### 3.2.10

**热膨胀应力 thermal expansive stress**

$\sigma_a$

物体在温度变化时，因其膨胀而受到约束时对约束物体产生的应力。

### 3.2.11

**漏气率 permeability rate**

$q$

密封真空系统在单位时间内气体密度变化值。

漏气率的单位名称为帕立方米每秒，单位符号为  $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。

### 3.2.12

**气密性 impermeability**

表征材料在确定的温度、气压、封接等条件下阻碍气体通过的能力，通常用漏气率表示。

### 3.2.13

**弯曲点 bend point**

$T_C(T_N)$

在一般无相变的情况下，热膨胀曲线上明显的转折点所对应的温度，此点相应于材料的居里点( $T_C$ )或奈耳点( $T_N$ )温度。

### 3.2.14

**因瓦效应 invar effect**

材料在一定温度范围内由于自身铁磁性变化导致膨胀系数降低的现象。

## 3.3 热双金属 thermostat metal

### 3.3.1

**热双金属 thermostat metal**

由两层或两层以上具有不同热膨胀系数的金属或合金沿整个接触面牢固结合的用于热敏元件的复合材料。

热双金属分为复合热双金属和横拼热双金属两类。复合热双金属包括高电阻率型热双金属、中电阻率型热双金属、低电阻率型热双金属、高温型热双金属、中温型热双金属、低温型热双金属、高敏感型热双金属、耐蚀型热双金属等。

### 3.3.2

**组元层 componet laminations**

组成热双金属的各材料层的统称，根据材料层的特性和功能，分为主动层、被动层、中间层等。

## 3.3.3

**组元层的厚度比 thickness ratio of components**

热双金属中各组元层的厚度与热双金属总厚度之比。

此值无量纲。

## 3.3.4

**热双金属被动层 passive component of thermobimetal**

热双金属中热膨胀系数值比较小的组元层。

注：热双金属受热发生弯曲变形时，被动层总处于凹面一侧。对被动层材料的基本要求是在一定温度范围内热膨胀系数值要小且材料组织要稳定。

## 3.3.5

**热双金属主动层 active component of thermobimetal**

热双金属中具有较大的线膨胀系数值的组元层。

注：热双金属受热发生弯曲变形时，被动层总处于凸面一侧。对主动层材料的基本要求是线膨胀系数大，组织稳定，与其他组元层材料结合时可焊性好，弹性模量值与被动层接近等。

## 3.3.6

**横拼双金属 laterally welded thermobimetal**

两种具有不同热膨胀系数的金属或合金，高膨胀合金与低膨胀合金的两侧边纵向拼接，沿其拼缝处采用真空双电子束焊机连续焊接而形成的双金属。

## 3.3.7

**比弯曲 specific thermal deflection**

**K**

单位厚度的平直热双金属片，温度变化 1 °C 时，沿纵向中心线所产生的曲率变化之半。

比弯曲 *K* 的表达式为：

$$K = 1/2 \cdot \delta / (t_2 - t_1) \cdot 1/R$$

式中：

*K*——比弯曲，单位为每摄氏度(°C<sup>-1</sup>)；

$\delta$ ——热双金属片厚度，单位为毫米(mm)；

*t*<sub>1</sub>——热双金属片平直时温度，单位为摄氏度(°C)；

*t*<sub>2</sub>——热双金属片弯曲时温度，单位为摄氏度(°C)；

*R*——热双金属片弯曲时曲率半径，单位为毫米(mm)。

## 3.3.8

**弯曲系数 coefficient of deflection**

**K'**

一端固定的热双金属片，其单位厚度和单位长度在温度变化 1 °C 时，自由端挠度的变量。

弯曲系数 *K'* 的表达式为：

$$K' = (f_2 - f_1) \cdot \delta / L^2 (t_2 - t_1)$$

式中：

*K'*——弯曲系数，单位为每摄氏度(°C<sup>-1</sup>)；

$\delta$ ——热双金属片厚度，单位为毫米(mm)；

*L*——热双金属片测量长度，单位为毫米(mm)；

*f*<sub>1</sub>——热双金属片在初始测量温度 *t*<sub>1</sub> 时的相应挠度，单位为毫米(mm)；

*f*<sub>2</sub>——热双金属片在终了测量温度 *t*<sub>2</sub> 时的相应挠度，单位为毫米(mm)；

*t*<sub>1</sub>——热双金属片的初始测量温度，单位为摄氏度(°C)；

$t_2$ ——热双金属片的终了测量温度,单位为摄氏度(°C)。

### 3.3.9

#### 温曲率 flexivity

$F$

单位厚度的热双金属片,每变化单位温度时的纵向中心线的曲率变化。

温曲率  $F$  的表达式为:

$$F = \delta \cdot (1/R_2 - 1/R_1) / (t_2 - t_1)$$

式中:

$F$ ——温曲率,单位为每摄氏度(°C<sup>-1</sup>);

$\delta$ ——热双金属片厚度,单位为毫米(mm);

$t_1$ ——热双金属片的初始测量温度,单位为摄氏度(°C);

$t_2$ ——热双金属片的终了测量温度,单位为摄氏度(°C);

$R_1$ ——热双金属片在初始测量温度时试样纵向中心线的曲率半径,单位为毫米(mm);

$R_2$ ——热双金属片在终了测量温度时试样纵向中心线的曲率半径,单位为毫米(mm)。

### 3.3.10

#### 敏感系数 coefficient of sensitivity

$M$

热双金属片的主动层与被动层的热膨胀系数条件差值。在特定试验装置上,测量螺旋形热双金属片的偏转角度。

敏感系数  $M$  为:

$$M = 0.0116 \times [f \cdot \delta / L(t_2 - t_1)] \text{ 或 } M = f \cdot \pi \cdot \delta / 270 \times L(t_2 - t_1)$$

式中:

$M$ ——敏感系数,单位为每摄氏度(°C<sup>-1</sup>);

$f$ ——旋线端的偏转(松开角度),单位为弧度每摄氏度(rad/°C)或度每摄氏度((°)/°C);

$\delta$ ——旋形热双金属片的厚度,单位为毫米(mm);

$L$ ——旋形热双金属片的计算长度,单位为毫米(mm);

$t_1$ ——螺旋形热双金属片的初始测量温度,单位为摄氏度(°C);

$t_2$ ——螺旋形热双金属片的终了测量温度,单位为摄氏度(°C)。

### 3.3.11

#### 比弯曲标称值 nominal value of specific thermal deflection

指室温至 130 °C~150 °C 范围内的比弯曲值。因从组元的热膨胀系数随温变化的关系看出,比弯曲不是一个常数,随着温度的升高,热双金属片比曲率不是线性地变化,是沿着曲线增大,故必须标明比弯曲所适用的温度范围。

### 3.3.12

#### 热双金属弹性模量 elastic modulus of thermobimetal

$E$

在热双金属弹性极限内,应力与相应的应变之比。

热双金属弹性模量  $E$  的计算公式为:

$$E = 4PL^3 / \Delta f \cdot b \cdot \delta^3$$

式中:

$E$ ——热双金属弹性模量,单位为帕(Pa);

$P$ ——负荷,单位为牛顿(N);

$L$ ——试样测试长度,单位为毫米(mm);

$\Delta f$ ——挠度变量平均值,单位为毫米(mm);

$b$ ——试样宽度,单位为毫米(mm);

$\delta$ ——试样厚度,单位为毫米(mm)。

### 3.3.13

**允许弯曲应力 allowable stress of deflection**

热双金属指尚未引起残余变形时的机械应力。

### 3.3.14

**线性温度范围 linearity temperature range**

热双金属的实际挠度与用比弯曲标称值算出的挠度相比,偏离不超过±5%的温度范围。

### 3.3.15

**允许使用温度范围 allowable temperature range for service**

热双金属不发生残余变形的温度范围。

### 3.3.16

**热偏转率 thermal deflection rate**

$D$

转动角度与温度变化的比率。用来衡量热双金属螺旋形元件的热敏感性。

热偏转率  $D$  的表达式为:

$$D = (f_2 - f_1) / (t_2 - t_1)$$

式中:

$D$ ——热偏转率,单位为弧度每摄氏度(rad/°C)或度每摄氏度(°/°C)。

$t_1$ ——热双金属片的初始测量温度,单位为每摄氏度(°C);

$t_2$ ——热双金属片的终了测量温度,单位为每摄氏度(°C);

$f_1$ ——对应测量温度  $t_1$  时的角度,单位为弧度(rad)或度(°);

$f_2$ ——对应测量温度  $t_2$  时的角度,单位为弧度(rad)或度(°)。

### 3.3.17

**机械转矩率 mechanical torque rate**

转矩对偏转角度的比率。用来衡量螺旋形元件的刚性。

### 3.3.18

**横向弯曲 cross curvature**

热双金属片在整个宽度范围内对平直面的偏离,用弦高衡量。

## 3.4 电阻合金 resistance alloy

### 3.4.1

**电阻合金 resistance alloy**

以电阻特性为主要技术特征的合金,主要包括:精密电阻合金、应变电阻合金、热敏电阻合金和电热合金等。

#### 3.4.1.1

**精密电阻合金 precision electrical resistance alloy**

在工作温度、环境状态、时间发生变化的条件下,仍能保持其电阻值不变或变化很小,且对铜热电势绝对值较小的电阻合金。

#### 3.4.1.2

**应变电阻合金 strain electrical resistance alloy**

电阻应变灵敏系数大,电阻温度系数绝对值小的电阻合金。

注:该合金的电阻-应变关系,在较大应变量范围内,线性好和斜率大;在一定应变量范围内(包括负应变),加、卸载

频率加大之后,能长时间保留这一斜率不变;在多次加、卸载时重复性好,在某一应变下保持一定时间后,电阻值不变;这些特性在不同温度,包括在极限工作温度下,电阻值的变化很小。

## 3.4.1.3

**电热合金 electrical thermal alloy**

将电能转换为热能,且能在一定高温下长期工作的电阻合金,一般具有电阻率大、耐热疲劳、抗腐蚀和高温形状稳定性好等特点。

## 3.4.1.4

**热敏电阻合金 thermistor alloy**

电阻温度系数大且为定值的电阻合金。

注:该合金电阻-温度关系,线性好和斜率大,多次加热、冷却后,重复性好,能在较宽的温度范围内保持这一线性关系,经在不同温度长时间保温后,这一关系保持不变或变化很小。

## 3.4.2

**电阻率 electrical resistivity** $\rho$ 

单位长度、单位横截面积物体的电阻。

电阻率  $\rho$  的计算表达式为:

$$\rho = R \cdot A / L$$

式中:

$\rho$ ——电阻率,单位为欧姆平方毫米每米( $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ );

$R$ ——物体电阻,单位为欧姆( $\Omega$ );

$A$ ——横截面积,单位为平方毫米( $\text{mm}^2$ );

$L$ ——长度,单位为米(m)。

## 3.4.3

**电导率 electrical conductivity** $\gamma$ 

对物质传导电流能力的一种量度。为电阻率的倒数。

电导率的表达式为:

$$\gamma = 1 / \rho$$

式中:

$\gamma$ ——电导率,单位为米每欧姆平方毫米( $\text{m} / \Omega \cdot \text{mm}^2$ );

$\rho$ ——电阻率,单位为欧姆米( $\Omega \cdot \text{m}$ )。

## 3.4.4

**每米电阻 electrical resistance meter**

每米长度的电阻合金的电阻值。

## 3.4.5

**瞬时电阻温度系数 instant temperature coefficient of resistance** $a_t$ 

在某一温度下的物体,当温度变化趋于零时的平均电阻温度系数为该温度的瞬时电阻温度系数。

瞬时电阻温度系数  $a_t$  的表达式为:

$$a_t = \lim_{t \rightarrow t_1} \{ (R - R_1) / R_0 (t - t_1) \}$$

式中:

$a_t$ ——瞬时电阻温度系数,单位为每摄氏度( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );

$R$ —— $t$  温度下的电阻值,单位为欧姆( $\Omega$ );

$R_1$ —— $t_1$  温度下的电阻值,单位为欧姆( $\Omega$ );

$R_0$ ——基准温度 20 °C 下的电阻值,单位为欧姆( $\Omega$ )。

### 3.4.6

**平均电阻温度系数 mean temperature coefficient of resistance**

$\bar{\alpha}$

在确定的两个温度( $t_1$ 、 $t_2$ )下,电阻与温度变化 1 °C 相应的单位基准温度电阻的变化。

平均电阻温度系数 $\bar{\alpha}$ 的计算公式为:

$$\bar{\alpha} = (R_2 - R_1) / R_0 (t_2 - t_1)$$

式中:

$\bar{\alpha}$ ——平均电阻温度系数,单位为每摄氏度( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );

$R_1$ —— $t_1$  温度下的电阻值,单位为欧姆( $\Omega$ );

$R_2$ —— $t_2$  温度下的电阻值,单位为欧姆( $\Omega$ );

$R_0$ ——基准温度(一般为 20 °C)下的电阻值,单位为欧姆( $\Omega$ )。

### 3.4.7

**电阻温度常数  $\alpha_{t_0}$  和  $\beta$  temperature constant of resistance  $\alpha_{t_0}$  and  $\beta$**

金属或合金的电阻与温度关系接近抛物线的情况,温度  $t$  时的电阻  $R_t$  用下面的二次方程式表示:

$$R_t = R_{t_0} [1 + \alpha_{t_0} (t - t_0) + \beta (t - t_0)^2]$$

式中:

$\alpha_{t_0}$ ——基准温度  $t_0$  下一次电阻温度常数,单位为每摄氏度( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ );

$\beta$ ——基准温度  $t_0$  下二次电阻温度常数,单位为每摄氏度平方( $^{\circ}\text{C}^{-2}$ );

$R_{t_1}$ —— $t_1$  温度下的电阻值,单位为欧姆( $\Omega$ );

$R_{t_0}$ ——基准温度时的电阻值,单位为欧姆( $\Omega$ );

$R_{t_3}$ —— $t_3$  温度下的电阻值,单位为欧姆( $\Omega$ );

$t_1$ 、 $t_0$ ——温度,单位为摄氏度( $^{\circ}\text{C}$ )。

### 3.4.8

**电阻温度因数 temperature factor of resistance**

$C_t$

在确定温度下的电阻值和基准温度下的电阻值之比。

电阻温度因数  $C_t$  的计算公式为:

$$C_t = R_t / R_0$$

式中:

$C_t$ ——电阻温度因数,无量纲;

$R_t$ ——确定温度  $t$  时的电阻值,单位为欧姆( $\Omega$ );

$R_0$ ——基准温度(一般为 20 °C)时的电阻值,单位为欧姆( $\Omega$ )。

### 3.4.9

**电阻均匀性 homogeneity of electrical resistance**

一支电阻合金丝(带)任意两段单位长度的电阻差与电阻平均值之比。

### 3.4.10

**平均对铜热电势 mean thermal electromotive force versus copper**

$E_{\text{cu}}$

合金与标准铜组成的热电偶两结点温度( $t_1$ 、 $t_2$ )确定时,电动势与两结点温度差之比值。

平均对铜热电势  $E_{\text{cu}}$  的计算公式为:

$$E_{\text{cu}} = \varepsilon / (t_2 - t_1)$$



式中：

$E_{\text{cu}}$ ——平均对铜热电动势,单位为伏特每摄氏度(V/°C)；

$t_2$ ——高温结点的温度,单位为摄氏度(°C)；

$t_1$ ——低温结点的温度,单位为摄氏度(°C)；

$\epsilon$ ——电动势,当合金中电流从高温结点流向低温结点时, $\epsilon$ 为正,反之为负,单位为伏特(V)。

### 3.4.11

**电阻应变灵敏系数 sensitivity of electrical resistance versus strain**

**K**

在外力作用下,在弹性变形范围内,合金沿变形方向电阻相对变量与其长度相对变量之比。

电阻应变灵敏系数  $K$  的计算公式为：

$$K = (\Delta R/R) / (\Delta L/L)$$

式中：

$K$ ——电阻应变灵敏系数,无量纲；

$\Delta R$ ——电阻增量,单位为欧姆( $\Omega$ )；

$R$ ——原始电阻,单位为欧姆( $\Omega$ )；

$\Delta L$ ——长度增量,单位为毫米(mm)；

$L$ ——原始长度,单位为毫米(mm)。

### 3.4.12

**快速寿命 accelerated test lifetime**

**寿命值 lifetime**

在规定条件下,标准电热丝试样经过 2 min 周期性通电、断电,承受急热急冷循环,直至烧断的时间。

## 3.5 力学性能 mechanical property

### 3.5.1

**力学性能 mechanical property**

表征金属材料在受外力的作用下所造成的弹性变形、塑性变形、断裂以及金属抵抗形变和断裂能力的性能。

### 3.5.2

**弹性极限 elastic limit**

$\sigma_e$

去除外力后,不引致残余变形的最大应力。

注 1: 依变形方式的不同而有拉伸、弯曲、扭转弹性极限。

注 2: 在实际测量中常以规定非比例伸长应力  $R_{P0.05}$  代替  $\sigma_e$ 。

### 3.5.3

**规定非比例延伸强度 proof strength non-proportional extension**

$R_p$

非比例延伸率等于规定的引伸计标距百分率时的应力。

注:使用的符号应附以下脚注说明所规定的百分率,例如  $R_{P0.2}$ ,表示规定非比例延伸率为 0.2% 时的应力。

### 3.5.4

**屈服强度 yield strength**

当金属材料呈现屈服现象时,在试验期间发生塑性变形而力不增加时的应力。应区分上屈服强度和下屈服强度。

## 3.5.5

上屈服强度 upper yield strength

$R_{eH}$

试样发生屈服而力首次下降前的最高应力值。

## 3.5.6

下屈服强度 lower yield strength

$R_{eL}$

在屈服期间,不计初始瞬时效应时的最低应力值。

## 3.5.7

抗拉强度 tensile strength

$R_m$

与最大力  $F_m$  相对应的应力。

注:通过拉伸试验到断裂过程中的最大试验力和试样原始横截面积之间的比值来计算。

## 3.5.8

最大力 maximum force

$F_m$

试样在屈服阶段之后所能抵抗的最大力。

## 3.5.9

塑性 plasticity

在应力作用下,材料断裂前所经受最大的永久变形的能力。

塑性体的应力-应变行为,完全不具有理想弹性体的四个特征。

## 中文索引

- |  |  |
|--|--|
| <b>A</b>                                   | <b>K</b>                                 |
| 艾林瓦合金 ..... 3.1.10                         | 抗拉强度 $R_m$ ..... 3.5.7                   |
| 艾林瓦效应 ..... 3.1.11                         | 快速寿命(寿命值) ..... 3.4.12                   |
| <b>B</b>                                   | <b>L</b>                                 |
| 比弯曲 $K$ ..... 3.3.7                        | 拉伸波波速 $C_D$ ..... 3.1.23                 |
| 比弯曲标称值 ..... 3.3.11                        | 理想弹性 ..... 3.1.3                         |
| 泊松比 $\mu$ ..... 3.1.18                     | 力学性能 ..... 3.5.1                         |
| <b>D</b>                                   | 漏气率 $q$ ..... 3.2.11                     |
| $\Delta E$ 效应 ..... 3.1.12                 | <b>M</b>                                 |
| 电导率 $\gamma$ ..... 3.4.3                   | 每米电阻 ..... 3.4.4                         |
| 电热合金 ..... 3.4.1.3                         | 敏感系数 $M$ ..... 3.3.10                    |
| 电阻合金 ..... 3.4.1                           | <b>N</b>                                 |
| 电阻均匀性 ..... 3.4.9                          | 粘弹性 ..... 3.1.5                          |
| 电阻率 $\rho$ ..... 3.4.2                     | 内耗 ..... 3.1.9                           |
| 电阻温度常数 $\alpha_{t0}$ 和 $\beta$ ..... 3.4.7 | 扭转波波速 $C_V$ ..... 3.1.24                 |
| 电阻温度因数 $C_t$ ..... 3.4.8                   | <b>P</b>                                 |
| 电阻应变灵敏系数 $K$ ..... 3.4.11                  | 膨胀合金 ..... 3.2.1                         |
| 对数衰减率 $\delta$ ..... 3.1.31                | 频率温度系数 $\beta_f$ ..... 3.1.21            |
| <b>F</b>                                   | 平均电阻温度系数 $\bar{\alpha}$ ..... 3.4.6      |
| 非弹性 ..... 3.1.4                            | 平均对铜热电势 $\bar{E}_{Cu}$ ..... 3.4.10      |
| 分贝衰减率 $\nu$ ..... 3.1.35                   | 平均面热膨胀系数 $\bar{\alpha}_S$ ..... 3.2.6    |
| <b>G</b>                                   | 平均体热膨胀系数 $\bar{\alpha}_V$ ..... 3.2.5    |
| 刚度 ..... 3.1.13                            | 平均线热膨胀系数 $\bar{\alpha}$ ..... 3.2.4      |
| 高弹性 ..... 3.1.8                            | 平均周热膨胀系数 $\bar{\alpha}_\phi$ ..... 3.2.7 |
| 规定非比例延伸强度 $R_p$ ..... 3.5.2                | <b>Q</b>                                 |
| <b>H</b>                                   | 气密性 ..... 3.2.12                         |
| 恒弹性 ..... 3.1.7                            | 切变模量 $G$ ..... 3.1.15                    |
| 横拼双金属 ..... 3.3.6                          | 屈服强度 ..... 3.5.4                         |
| 横向弯曲 ..... 3.3.18                          | <b>R</b>                                 |
| <b>J</b>                                   | 热敏电阻合金 ..... 3.4.1.4                     |
| 机械品质因数 $Q$ ..... 3.1.30                    | 热膨胀应力 $\sigma_a$ ..... 3.2.10            |
| 机械转矩率 ..... 3.3.17                         | 热偏转率 $D$ ..... 3.3.16                    |
| 精密电阻合金 ..... 3.4.1.1                       |  |

热双金属····· 3.3.1  
 热双金属被动层····· 3.3.4  
 热双金属弹性模量  $E$  ····· 3.3.12  
 热双金属主动层····· 3.3.5  
 蠕变回复  $C_t$  ····· 3.1.29

## S

上屈服强度  $R_{eH}$  ····· 3.5.5  
 衰减系数(声衰系数) $\alpha$  ····· 3.1.34  
 瞬间弹性模量温度系数  $\beta_E$  ····· 3.1.20  
 瞬间线热膨胀系数  $a_t$  ····· 3.2.8  
 瞬时电阻温度系数  $a_t$  ····· 3.4.5  
 瞬时频率温度系数  $\beta_f$  ····· 3.1.22  
 塑性····· 3.5.9

## T

弹性····· 3.1.2  
 弹性合金····· 3.1.1  
 弹性后效(反弹性后效) $A_t$  ····· 3.1.28  
 弹性极限  $\sigma_e$  ····· 3.5.2  
 弹性模量温度系数  $\beta_E$  ····· 3.1.19  
 弹性滞后  $H_t$  ····· 3.1.27  
 体积模量  $K$  ····· 3.1.16

## W

弯曲点 ····· 3.2.13  
 弯曲系数  $K'$  ····· 3.3.8

温曲率  $F$  ····· 3.3.9

## X

下屈服强度  $R_{eL}$  ····· 3.5.6  
 线热膨胀  $\Delta L$  ····· 3.2.2  
 线热膨胀力  $F_a$  ····· 3.2.9  
 线热膨胀率  $\Delta L/L$  ····· 3.2.3  
 线性温度范围 ····· 3.3.14

## Y

压缩率  $\kappa$  ····· 3.1.17  
 杨氏模量  $E$  ····· 3.1.14  
 因瓦效应 ····· 3.2.14  
 应变弛豫(正弹性后效) $R_t$  ····· 3.1.26  
 应变电阻合金····· 3.4.1.2  
 应力弛豫  $R_\sigma$  ····· 3.1.25  
 允许使用温度范围 ····· 3.3.15  
 允许弯曲应力 ····· 3.3.13

## Z

正弹性后效 ····· 3.1.26  
 滞弹性····· 3.1.6  
 阻尼能力率  $P$  ····· 3.1.32  
 阻尼系数  $\beta$  ····· 3.1.33  
 组元层····· 3.3.2  
 组元层的厚度比····· 3.3.3  
 最大力  $F_m$  ····· 3.5.8