

提高航空发动机 零件与組合件质量的 工艺方法

[苏联] М. И. 叶夫斯季格涅耶夫主編



国防工业出版社

提高航空发动机 零件与組合件质量的工艺方法

[苏联] M. И. 叶夫斯季格涅耶夫主編

錢 国 恩 譯

国防工业出版社

1964

內 容 簡 介

本文集綜合介紹了关于工艺因素对产品质量影响的实验研究成果，闡述了航空发动机零部件及耐热材料振动的实验方法，說明了齒輪制造中的某些工艺問題。文集中对各种精加工和最后加工方法产生的残余应力和耐热合金持久强度的实验研究资料作了許多闡述。

本文集是以科研工作者，机械制造工艺人員为对象的，同时可以供高等学校工艺专业的教师和学生参考。

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ
КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ
АВИАДВИГАТЕЛЕЙ
〔苏联〕М. И. Евстигнеев
ОБОРОНГИЗ 1961

提高航空发动机零件与組合件质量的工艺方法

錢 國 恩 譯

國防工業出版社 出版

北京市書刊出版業營業許可證出字第 074 号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店經售
国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 $1/32$ 印張 4 $11/16$ 117 千字

1964 年12月第一版 1964 年12月第一次印刷 印数：0,001—2,400 册

統一書号：15034·808 定价：（科八-1）1.00 元

目 录

序言	5
用透热后迅速冷却的方法来控制零件的残余应力	7
关于控制钛合金表面层残余应力问题	19
研究被磨削金属的温度场时热源有效功率的确定	32
为试验发动机零件和材料试件的持久强度在自振式机器上测 定动载荷的方法	40
在高频载荷下工艺因素对耐热合金持久强度影响的研究	73
用齿条型刀具切制外圆柱齿轮时齿根的沉切齿轮最小齿数的 确定	110
关于消除航空发动机的振动问题	127

序 言

本文集汇编了有关改善零件物理-机械性能、提高零件的使用质量、高速轉子的动平衡以及改善齿輪嚙合状况（这对于现代渦輪螺旋桨减速器是尤为重要的）等問題的几篇文章。

本文集中研究了零件表面在最后磨削加工过程中的热现象。对热现象的分析研究能揭示出由加工引起的残余应力的形成机理，分析这些应力的构成和解决如何控制这些残余应力的問題。残余应力的控制問題对于受力零件（例如燃气渦輪叶片）是非常重要的。本文集討論了控制方法之一——透热后快速冷却法。对这种方法的分析研究可以使我們根据初始应力状态来制定出确定控制规范的工程計算方法。

在现代航空发动机制造中，日益广泛地采用鈦及其合金。但是，只有在表面沒有不良的残余应力分布、表面裂紋和其他缺陷时，才可能充分利用这种金属材料性能。因此，必須研究机械加工对鈦及其合金性能的影响。文集中引述了这方面的某些研究成果。

文集中还叙述了有关耐热合金零件表面层物理-机械状态对持久强度极限影响的某些研究成果。此項研究的实验部分是利用专门的高频装置在近似于实际情况的条件下进行的。

齿輪嚙合质量，在高速航空发动机生产中仍是很大的問題。首先，嚙合质量取决于齿的加工方法。插齿有时会发生齿根的沉割现象。对这种现象的分析研究，使我們能了解其产生的原因和預防方法。

轉子的平衡度对整台发动机的质量有巨大的影响。已有的动平衡方法不是总能够按要求的精度来实现这道工序。文集中叙述了莫斯科航空学院制定的在工作运转中利用輔助平面校正的动平衡方法，并引述了某些实验的结果。

本文集是以在航空发动机制造部門工作的专家、工作人員为对象的，同时也可作为設計工作者、科研工作者以及大专学校学生的参考讀物。

用透热后迅速冷却的方法 来控制零件的残余应力

A. B. 波德澤伊, Г. З. 謝列勃連尼科夫

文献中已有报导, 为了控制磨削所产生的应力可使用零件透热后快速冷却的方法, 列特涅尔 (Летнер) 和薩維闊特 (Савегот) 的著作[1]可作为例子, 在他们的著作中介绍了控制工具鋼制成的零件应力的經驗。

在 Я. Б. 弗里德曼 (Фридман) 的著作[2]中和其他的著作中也指示了快速冷却的方法会使金屬零件的应力重新分布。但是, 在研究关于分析快速冷却方法的著作时, 使人感到这种方法的使用完全基于实践經驗, 目前还没有以研究为基础的任何論文和报导。

虽然如此, 这种方法仍值得給以很大的注意, 因为, 它比其他方法具有一系列优点。第一, 快速冷却不会导致許多結構鋼所易于产生的回火脆性; 第二, 在金屬的表面层不会出現氧化、再結晶和冷作硬化等現象; 第三, 如用此法处理耐热合金, 非高溫加热不致降低其耐热性。例如, 合金 ЭИ4929 在 1050°C 时通过时效来消除残余应力, 而耐热强度并未降低。

实际上, 使用这种方法就是将零件充分加热到金屬还未失去原有机械性能的温度, 然后迅速冷却, 以引起塑性变形。此时, 在表面上将出現的残余压应力以代替原来的拉应力, 且零件具有更高的使用质量。

困难在于操作规范的选择。为此, 应该具备在研究热应力时所获得的数据。許多研究者 (Л. А. 葛利克曼, Г. В. 庫尔求莫

夫, M. B. 庫特里亞采夫, A. A. 米那薩揚及其他等) 所采用的基本方法, 是通过实验来研究热残余应力。这些研究的结果说明了残余应力的分布取决于很多因素: 材料的物理机械性能, 零件的尺寸和形状, 控制过程的起始和终止温度, 热交换条件, 预先的塑性变形, 初始应力等。这种情况使我们难于将所取得的数据运用到实验条件所限定的狭窄的范围以外去。

近来, 由于小弹性 塑性变形理论的发展, 研究出了热残余应力的分析计算方法[3]—[6]。用分析方法所确定的轴的瞬时应力和残余应力可根据应力和计算应变由以下公式进行计算:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{2}{3} \int_1^{\rho} \sigma_i \frac{\epsilon_{\varphi l} - \epsilon_{r l}}{\epsilon_{i l}} \frac{d\rho}{\rho}, \\ \sigma_{\varphi} &= \sigma_r + \frac{2}{3} \sigma_i \frac{\epsilon_{\varphi l} - \epsilon_{r l}}{\epsilon_{i l}}, \\ \sigma_{oc} &= \sigma_r + \frac{2}{3} \sigma_i \frac{\epsilon_{oc l} - \epsilon_{r l}}{\epsilon_{i l}}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 σ_{φ} , σ_{oc} , σ_r ——切向, 轴向和径向应力;

$\epsilon_{\varphi l}$, $\epsilon_{oc l}$, $\epsilon_{r l}$ ——切向, 轴向和径向——主计算应变, 它们等于该瞬总变形与以前加载阶段时所产生的塑性变形分量之差;

l ——载荷研究阶段的序号 ($l = I, II$ 等);

$\epsilon_{i l}$ ——计算的应变;

σ_i ——应力;

ρ ——无量纲半径, 即 $\frac{r}{R}$ 之比;

r ——点的半径;

R ——轴的半径。

应力 σ_i 按下列条件确定:

a) 在有效变形时, 是按照在相应的变形速度和预先的塑性变形量的条件下所得出的 $\sigma_i = \Phi(\epsilon_i \cdot T)$ 形式的综合应力图来确定;

6) 在卸載荷直至該載荷开始时, 按下式确定:

$$\sigma_i = \frac{3E}{2(1+\mu)} \varepsilon_{il}, \quad (2)$$

式中 E ——彈性系数;

μ ——波松系数。

借助上述方程式进行計算得出的数据可滿意地与本文作者和 Л. А. 葛利克曼 (Л. А. Гликман) 和 А. Н. 巴巴耶夫 (А. Н. Бабаев) [7] 等人的实验研究結果相吻合。

基于上述的热应力研究[3]—[6], 在透热后快速冷却时可以制訂出磨削时所产生的应力的热控制方法。首先, 对实心軸建立类似的方法是适宜的, 因为, 在該形状的試件上研究控制残余应力对持久强度极限、耐热性等的影响简单得多, 此外, 发动机很多零件都具有实心軸的形状。

应力热控制的工程方法

将磨削后具有残余应力的分布为已知(通过实验或計算求得)的軸, 放在炉內, 并慢慢地加热到溫度 T_n 。

可以认为, 在开始冷却的瞬間应力的松弛还来不及进行, 因为溫度 T_n 并不高, 且透热時間又很短。軸經加热后, 浸入水中或其他介质中, 使之迅速地由表面开始冷却到溫度 T_c 。

我們的任务是在考虑了初始应力(磨削后)和材料性能的条件下确定热控制规范。

估計到磨削后的应力图具有以下特点:

1. 徑向应力很小, 以致实际上可以略去不計;
2. 軸向应力几乎等于切向应力。

同样也采取如下的假設:

1. 綫性膨脹系数 α_p 在加热和冷却过程中始終是常数;
2. 沿軸截面、軸向彈性-塑性变形分量的平均积分值 等于 零

[3], [6];

3. 假設材料滿足彈性不可压缩条件。

这些假设，特别是弹性不可压缩条件，在计算中将产生一定的误差，因为，在加热时的变形并不是远远超过材料屈服极限时相应的变形。但是，允许误差对残余应力图质的方面并没有影响，同时，采取这样的假设可使计算大为简化。这对工艺人员来说是很重要的。

上面已列出了计算轴的残余热应力的方程式。在著作[6]给出了确定从加载到卸载开始瞬间新产生的应变差的公式。在体积不可弹性压缩条件下这些公式具有如下形式：

$$\frac{\varepsilon_p - \varepsilon_r}{\alpha_p(T_H - T_C)} = \frac{6}{\rho^2} \int_0^{\rho} \theta \rho d\rho - 3\theta; \quad (3)$$

$$\frac{\varepsilon_p - \varepsilon_{oc}}{\alpha_p(T_H - T_C)} = \frac{3}{\rho^2} \int_0^{\rho} \theta \rho d\rho - 3 \int_0^1 \theta \rho d\rho. \quad (4)$$

同一著作中还介绍了实心轴上各点温度场相对变化的简化公式：

$$\theta = \frac{T - T_H}{T_C - T_H} = a\rho^4 + b\rho^2 + \theta_H, \quad (5)$$

式中 a 和 b 是温度场参数，按下式计算：

$$\left. \begin{aligned} a &= \theta_H - \theta_{HOB}(1 + 0.5Bi) + 0.5Bi, \\ b &= \theta_{HOB}(2 + 0.5Bi) - 2\theta_H - 0.5Bi; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

T ——某点的该瞬温度；

$Bi = \frac{\alpha_T R}{\lambda}$ ——比奥（Бю）数；

α_T ——散热系数；

λ ——导热系数；

R ——轴外圆半径；

r ——变动半径；

θ_H, θ_{HOB} ——轴心和轴表面上温度的相对变化，当 Bi 为常数时其变化取决于傅利叶准则

$$Fo = \frac{\alpha_T \tau}{R^2},$$

式中 t ——从冷却开始后所经过的时间；

a_r ——材料的导温系数。

为了便于说明，在图1上繪出了当 $Bi = 5$ 时，参数 a ， b 和 θ_a 的变化曲线。

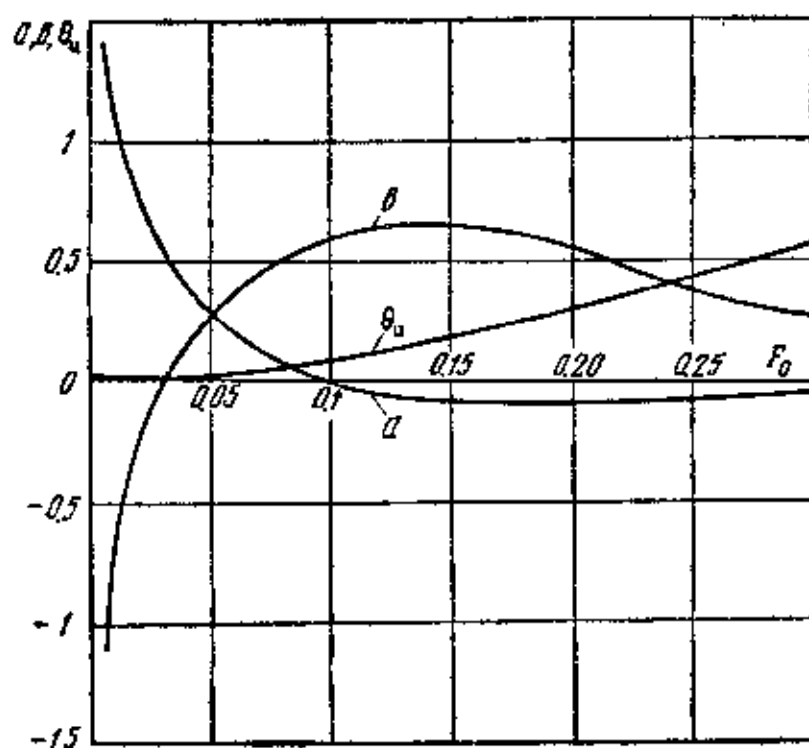


图1 当 $Bi = 5$ 时，圆柱体的温度场参数 a ， b 和 θ_a 随 Fo 变化的关系曲线 ($Bi = 5$)。

不同的 Bi 和 Fo 时的 θ_a 和 θ_{max} 值，可以从表格或曲线图中查出。这些表格和图线均可从热传导方面的著作中获得。

将方程式 (5) 代入 (3) 和 (4)，我们可得到近似计算新产生的应变之差的简易公式：

$$\frac{\varepsilon_{\varphi} - \varepsilon_r}{\alpha_p(T_H - T_c)} = 2a\rho^4 + 1.5b\rho^2; \quad (7)$$

$$\frac{\varepsilon_{\varphi} - \varepsilon_{oc}}{\alpha_p(T_H - T_c)} = 0.5a + 0.75b - 0.5a\rho^4 - 0.75b\rho^2. \quad (8)$$

应该指出，在轴的表面亦即当 $\rho = 1$ 时，从方程式 (1) 和 (8) 可得出切向应力与轴向应力相等即

$$\varepsilon_{\varphi} - \varepsilon_{oc} = 0. \quad (9)$$

在物体各点上根据应变之差，可以确定新产生的应变：

$$\frac{\epsilon_i}{\alpha_p(T_H - T_c)} = \frac{2}{3} \sqrt{\left[\frac{\epsilon_\varphi - \epsilon_r}{\alpha_p(T_H - T_c)} \right]^2 + \left[\frac{\epsilon_\varphi - \epsilon_{oc}}{\alpha_p(T_H - T_c)} \right]^2} - \left[\frac{\epsilon_\varphi - \epsilon_r}{\alpha_p(T_H - T_c)} \right] \left[\frac{\epsilon_\varphi - \epsilon_{oc}}{\alpha_p(T_H - T_c)} \right] \quad (10)$$

結果，人們最感興趣的計算表面上（ $\rho = 1$ ）新產生的應變公式變得很簡單。

從公式（7），（8），（9）和（10）可得：

$$\frac{\epsilon_i}{\alpha_p(T_H - T_c)} = \frac{1}{3} a + b \quad (11)$$

將溫度場的參數值 a 和 b 代入公式（11）中則得：

$$\frac{\epsilon_i}{\alpha_p(T_H - T_c)} = \frac{1}{6} [(4 - Bi)\theta_{\text{нон}} - 4\theta_n + Bi] \quad (12)$$

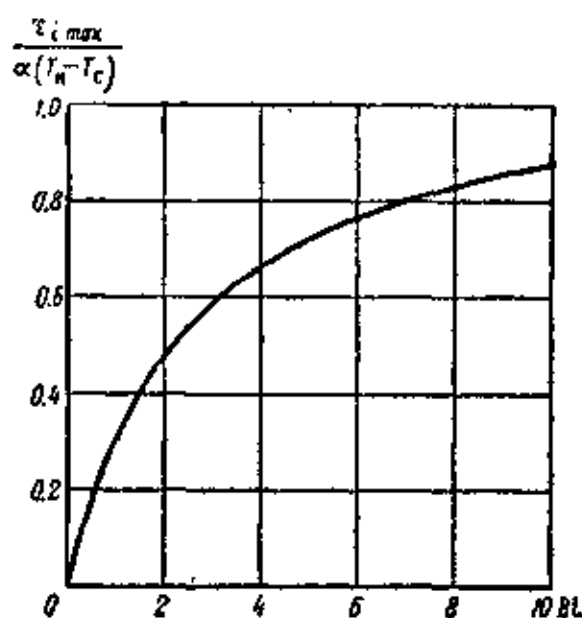


圖 2 確定實心軸表面上 $\epsilon_{i, \max}$ 的曲綫圖。

借此公式繪制曲綫圖，可用來確定軸表面上 ϵ_i 的最大值（圖 2）。

下面考慮磨削後產生的初始應力的影響。根據上述的這些應力圖的特點，今假設表面上的切向初始應力與軸向初始應力相等（即 $\sigma_{\varphi n} = \sigma_{oc, n}$ ），同時可以認為徑向應力 $\sigma_{rn} = 0$ 。利用廣義的虎克定律，將得確定初始應變的彈性分量之差的公式：

$$\epsilon_{\varphi n} - \epsilon_{rn} = \frac{\sigma_{\varphi n}(1 + \mu)}{E} \quad (13)$$

在加載期間計算應變將等於新產生的應變和由磨削產生的初始應變的彈性分量的總和，這可直接從小彈性-塑性變形理論[4]的基本關係式中求得的。

$$\epsilon_{\varphi l} = \epsilon_\varphi + \epsilon_{\varphi n}; \quad \epsilon_{rl} = \epsilon_r + \epsilon_{rn}; \quad \epsilon_{oc l} = \epsilon_{oc} + \epsilon_{oc, n} \quad (14)$$

考慮到這一點並利用方程（7），（8）和（13）等式可以寫

出确定在加载时计算应变差的公式:

$$\frac{\varepsilon_{\varphi I} - \varepsilon_{r I}}{\alpha_p(T_H - T_0)} = 2ap^4 + 1.5bp^2 + \frac{(1+\mu)\sigma_{\varphi H}}{E\alpha_p(T_H - T_0)}; \quad (15)$$

$$\frac{\varepsilon_{\varphi I} - \varepsilon_{oc I}}{\alpha_p(T_H - T_0)} = 0.5a + 0.75b - 0.5ap^4 - 0.75bp^2. \quad (16)$$

计算应变可按下式确定:

$$\varepsilon_{iI} = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_{\varphi I} - \varepsilon_{r I})^2 + (\varepsilon_{\varphi I} - \varepsilon_{oc I})^2 - (\varepsilon_{\varphi I} - \varepsilon_{r I})(\varepsilon_{\varphi I} - \varepsilon_{oc I})}, \quad (17)$$

它是由下面众所熟知的公式经过换算而得到的。

$$\varepsilon_{iI} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_{\varphi I} - \varepsilon_{r I})^2 + (\varepsilon_{r I} - \varepsilon_{oc I})^2 + (\varepsilon_{oc I} - \varepsilon_{\varphi I})^2}.$$

对于表面上的点, 即当 $\rho = 1$ 时, 差值 $\varepsilon_{\varphi I} - \varepsilon_{oc I}$ 按照公式 (16) 化为零。此时, 确定计算应变的公式取如下形式:

$$\frac{\varepsilon_{iI}}{\alpha_p(T_H - T_0)} = \frac{2}{3} \frac{\varepsilon_{\varphi I} - \varepsilon_{r I}}{\alpha_p(T_H - T_0)}. \quad (18)$$

将公式 (6) 和 (15) 代入此方程式中, 对 $\rho = 1$ 时将得到:

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_{iI}}{\alpha_p(T_H - T_0)} &= \frac{1}{6} [(4 - Bi)\theta_{\text{пов}} - 4\theta_n + Bi] \\ &+ \frac{2}{3} \frac{(1+\mu)\sigma_{\varphi H}}{E\alpha_p(T_H - T_0)}. \end{aligned} \quad (19)$$

在加载时计算应变的塑性分量可按著名的塑性理论公式求得:

$$\varepsilon_{iI}^p = \varepsilon_{iI} - \frac{2}{3} \frac{(1+\mu)}{E} \sigma_{i0}$$

当 $\mu = 0.5$ 时此式将为:

$$\varepsilon_{iI}^p = \varepsilon_{iI} - \frac{\sigma_i}{E}, \quad (20)$$

式中 σ_i ——应力, 它可根据 ε_{iI} 借助 $\sigma_i = \Phi(\varepsilon_{iI} \cdot T)$ 形式的综合应变图求出。

综合应变图可以根据试件在做拉伸、扭曲等实验所得到的图形绘出。

下面我们将利用拉伸曲线图, 因为, 这种图在工厂条件下最易于获得。对于最常用的材料来说这种曲线图在有关的文献中都有。

課題还可以进一步簡化，因为，我們可以采用体积彈性不可压缩的假設。根据在拉伸时的 ($\sigma_2 = \sigma_3 = 0$) 小彈性-塑性变形理論的基本方程式：

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \sigma_1; \quad (21)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}; \quad (22)$$

式中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——主应力；

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ ——主应变。

利用熟知的比例关系：

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E}; \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\mu \frac{\sigma_1}{E},$$

代入得：

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \frac{\sigma_1 \sqrt{2} (1 + \mu)}{E} = \frac{2}{3} (1 + \mu) \varepsilon_1 = \varepsilon_1. \quad (23)$$

这样，在体积彈性不可压缩的条件下，得出的綜合应变图与拉伸图相符。

卸载时計算应变等于加载过程中按公式确定的計算应变和在加载时产生的最大塑性变形之差。殘余应力的合力可根据加载过程末尾的計算应变来求得。

根据以上的討論，可以获得在軸的磨削表面上用透热后快速冷却的方法控制殘余应力时的如下計算方式。

1. 給定冷却条件，根据手册查出散热系数 $\alpha_{\tau 0}$ 。
2. 計算比奧 (Био) 数的值 $Bi = \frac{\alpha_{\tau} R}{\lambda}$ 。
3. 对于已知的 Bi 值按 2 曲綫求出 $\varepsilon_{i \max 0}$ 。
4. 按下式計算表面最大計算应变。

$$\varepsilon_{i1 \max} = \varepsilon_{i \max} + \frac{\sigma_{\tau H}}{E},$$

式中 $\sigma_{\tau H}$ ——磨削时在表面上产生的初始应力值。

5. 在 $\varepsilon_{i1 \max} > \sigma_{0.2}/E$ 点上，确定加载时的計算应变的最大塑性分量。

$$\varepsilon_{II\max}^p = \varepsilon_{II\max} - \frac{\sigma_{0.2}}{E},$$

式中 $\sigma_{0.2}$ ——在常溫試驗时的金屬屈服极限。

6. 按下式計算殘余应力之合力:

$$\sigma_{\text{P OCT}} = \sigma_{\text{PH}} - E\varepsilon_{II}^p, \text{ 若 } |\sigma_{\text{P OCT}}| \leq \sigma_{0.2},$$

$$\text{或 } \sigma_{\text{P OCT}} = -\sigma_{0.2}, \text{ 若 } |\sigma_{\text{PH}} - E\varepsilon_{II\max}^p| \geq \sigma_{0.2}.$$

不同的 α_r , 可以得到不同的 $\sigma_{\text{P OCT}}$ 的值。为了便于选 擇出 在表面冷却时获得希望的 $\sigma_{\text{P OCT}}$ 的 α_r 值, 应该利用按照图 3 所示的形式繪出的曲綫。

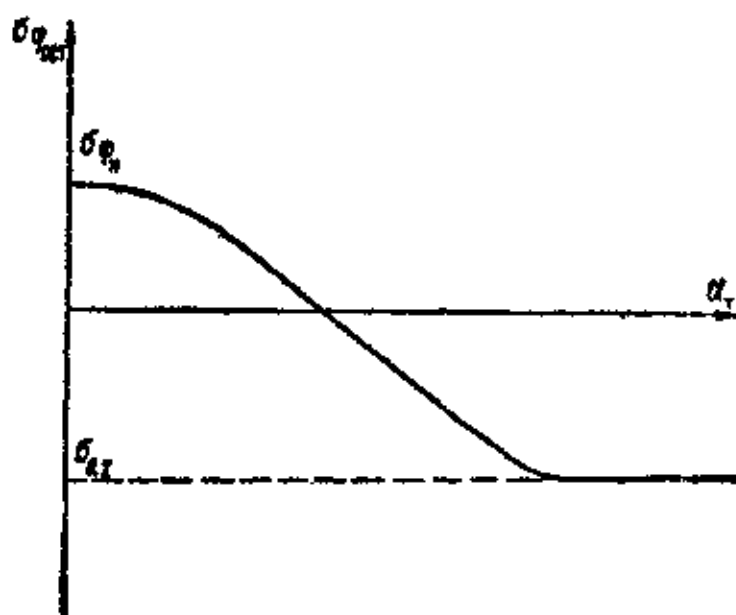


图 3 冷却速度增加时残余应力的变化曲綫。

計算方法的实验验证

确定残余应力的主要試驗是通过八个試件进行的, 試件的形状和在腐蝕时变形的測量方法如图 4 所示。切除层的深度是用秤量腐蝕前后的試件重量的方法来确定。当腐蝕层的深度为 h 时, 殘余应力可根据試件撓度 f 的变化按下式計算:

$$\sigma_{\text{P OCT}} = \sigma_{\text{oc, OCT}} = \frac{\pi E d^2}{32 l_1 (0.5 l_1 + l_2)} \frac{df}{dh}.$$

上述的推导并不复杂, 与单向应力状态时确定平板殘余应力的众所周知的方程式推导有許多共同之处。因此, 不去作此項推

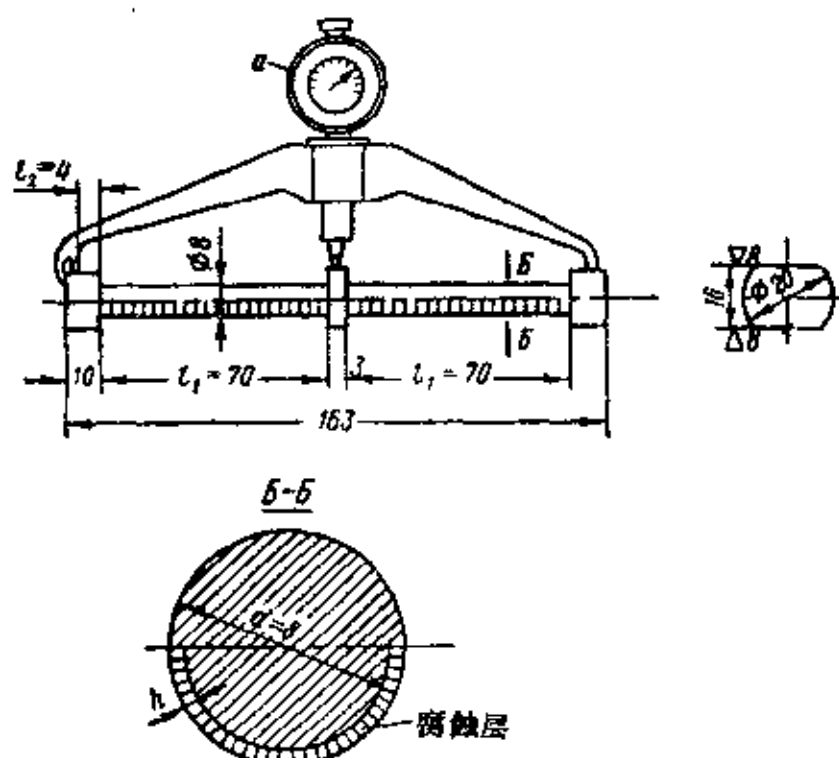


图4 确定残余应力的试件的腐蚀和挠度测量示意图；

a—测量挠度用的千分表（准确度为0.002毫米）。

导。全部试件要预先进行热处理以消除制造时产生的应力。热处理的规范是ЭИ437A合金所用的一般热处理规范，即采用淬火温度 1050°C ，保持8小时和在空气中冷却；时效温度 700°C ，保持16小时，也在空气中冷却。

八个试件的使用情况如下：两个试件用于确定由于磨削而造成的残余应力；两个试件用于确定磨削后随之进行透热至 700°C ，并在10%食盐溶液中快速冷却时的残余应力；两个试件用于确定磨削后快速进行冷却时的残余应力；最后的两个试件用于确定处于原始状态的残余应力。

热控制规范是根据上述方法由假设确定的，即假设磨削后表面的拉应力达到材料的屈服极限。

这样一来，用上述实验不仅验证计算方法而且也验证了磨削前控制应力的可能性。

将直径为8毫米的所有的试件按下表用量进行磨削时表面应