

研究簡報

关于某些蠕变理論的實驗驗證*

柯受全 卢錫年 李桃蓀
(力学研究所)

提 要

本文是利用45号钢在500°C, 不同的应力下所得到的蠕变曲线验证了几种比较典型的蠕变理論, 即硬化理論—— $\tau(\sigma, \dot{\epsilon}_p, \epsilon_p) = 0$; 时效理論—— $f(\sigma, \dot{\epsilon}_p, t) = 0$; 塑性滞后理論——

$\sigma(t) = \sigma(t) + \int_0^t K(t - \tau)\sigma(\tau)d\tau$. 并对結果作了一些分析.

本文并敘述了验证这些理論的簡單方法.

一、引 言

到目前为止, 世界各国在高温蠕变方面已做了不少工作, 对于描述高温蠕变过程的各种蠕变理論和經驗公式也是不胜枚举, 但迄今还没有一个为大家一致公认的理论公式. 为此, 用大量的实验数据来对现有的理论进行验证, 确定它们的使用范围和误差是具有一定意义的.

从现有的理论中, 归纳起来比较典型的有三种, 即硬化理论, 时效理论, 塑性滞后理论, 这里还没有提到从微观角度出发, 利用扩散或位错等假设推演得到的若干蠕变理论.

I. 硬化理论 最早在1938年由Davenport^[1]提出, 其一般形式可写为

$$f(\epsilon_p, \dot{\epsilon}_p, \sigma) = 0,$$

其中 ϵ_p ——蠕变量(塑性变形); $\dot{\epsilon}_p$ ——蠕变速度; σ ——应力.

目前常见的两种解析式可表示为

$$\dot{\epsilon}_p \epsilon_p^a = K e^{\sigma/b},$$

$$\dot{\epsilon}_p \epsilon_p^a = B \sigma^n.$$

这两种形式是 Пагоггон^[2,3]等在1953, 1955年提出的. 1943年 Davis^[4]也提出过类似的形式.

II. 时效理论 1936年 Soderberg^[5]最早提出, 其一般形式为

$$f(\sigma, \dot{\epsilon}_p, t) = 0;$$

也有写成另一种形式为

* 1959年9月1日收到.

$$f(\varepsilon_p, \sigma, t) = 0.$$

Soderberg 当时提出的形式是

$$\varepsilon_p = s(\sigma)T(t),$$

其中

$$s(\sigma) = a(e^{\sigma/n} - 1), \quad T(t) = t^m.$$

以后 Качанов^[6]提出下列形式:

$$\dot{\varepsilon}_p = \sigma^n B(t);$$

Беляев 提出

$$\varepsilon_p = \varphi \sigma,$$

其中 $\varphi = \int_0^t \sigma^{n-1} B(t) dt^{1)}$.

Работнов^[7]做了很多試驗,根据曲綫的相似性,认为

$$\sigma = \varphi(\varepsilon)\tau(t).$$

他推薦

$$\tau(t) = \frac{1}{1 + at^\beta}.$$

III. 塑性滞后理論 1948年由 Работнов^[8]提出

$$\varphi(\varepsilon) = \sigma(t) + \int_0^t K(t - \tau)\sigma(\tau)d\tau.$$

这比前两个理論进步之处在于考虑了另件的加载历史的影响. 它能用来描述加载、卸载等过程. 而用前二者理論描述会得出和实际不相符合的结果.

本文积累的实驗数据太少,这些理論的驗證仅仅給实用上提供一个参考.

二、試 驗 条 件

試驗在 DST 5000 的蠕变机上进行. 每次試驗历时 50 小时, 試驗是恆应力的单軸拉伸.

材料为 45 号鋼,其化学成份如下:

$$\text{Si:0.29, Mn:0.6, P:0.008, S:0.005, C:0.45}$$

試件的原棒料以 300℃/时的速度升温至 850℃常化, 保温 40 分钟, 在空气中冷却. 然后又以 200℃/时的速度升温至 550℃回火, 保温 60 分钟, 随炉冷却.

試驗温度为 500℃, 机器性能是 $\pm 1^\circ\text{C}$, 但由于电压不稳, 温度控制机构不太理想, 所以温度波动范围实际比这个大. 試驗曲綫受温度影响, 在繪制时作了适当的处理.

三、試 驗 驗 証

試驗得到的一組蠕变曲綫見图 3, 利用其中的几条来确定各个理論的常数.

I. 硬化理論

第一种形式:

$$\dot{\varepsilon}_p \varepsilon_p^\alpha = K e^{\sigma/A}, \quad (1)$$

1) 此式是經過 Малпани 修正后的形式.

α, K, A ——常数.

蠕变时, $\sigma = \text{常数}$. (1) 式积分, 置 $m = \frac{1}{1+\alpha}$, 得

$$\varepsilon_p = \left(\frac{K}{m}\right)^m e^{\sigma m / A} t^m. \quad (2)$$

(2) 式取对数, 然后在 $\sigma = \text{const}$ 下作 $\log \varepsilon_p - \log t$ 图, 其直线的斜率就是 m 可发现 (见图 1) 在 $t < 10$ 小时时, $\log \varepsilon_p - \log t$ 的直线具有同一斜率 m_1 . $t > 10$ 小时时, 具有另一不同的斜率 m_2 . 相应的也有二组 A 和 K .

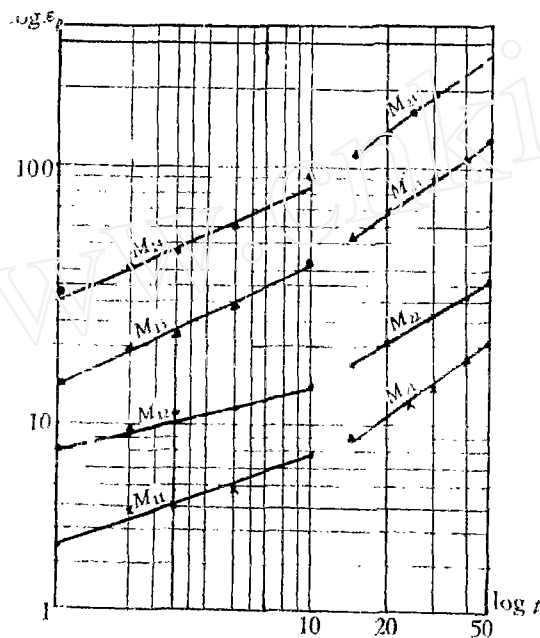


图 1 $\log \varepsilon_p = \log c + m \log t$

(2) 式取对数后, 置 $f(\sigma) = \frac{\log \varepsilon_p}{m} + \log m - \log t$, 作 $f(\sigma) - \sigma$ 曲线图 (见图 2), 根

据直线的斜率和截距可以决定 K 和 A .

在本文中,

$$m_1 = 0.36, \alpha_1 = 1.78, K_1 = 6.31 \times 10^{-11}, A_1 = 1.15;$$

$$m_2 = 0.72, \alpha_2 = 0.30, K_2 = 6.17 \times 10^{-8}, A_2 = 2.01.$$

理论公式为

$$\dot{\varepsilon}_p \varepsilon_p^{1.78} = 6.31 \times 10^{-11} e^{\sigma/1.15} \quad t < 10,$$

$$\dot{\varepsilon}_p \varepsilon_p^{0.39} = 6.17 \times 10^{-8} e^{\sigma/2.01} \quad t > 10.$$

理论曲线和实验曲线的比较见图 3, 可发现它们符合得比较好.

硬化理论的另一种形式

$$\dot{\varepsilon}_p \varepsilon_p^a = B \sigma^n, \quad (3)$$

$\sigma = \text{const}$, 积分得

$$\varepsilon_p = B' \sigma^{n'} t^m, \quad (4)$$

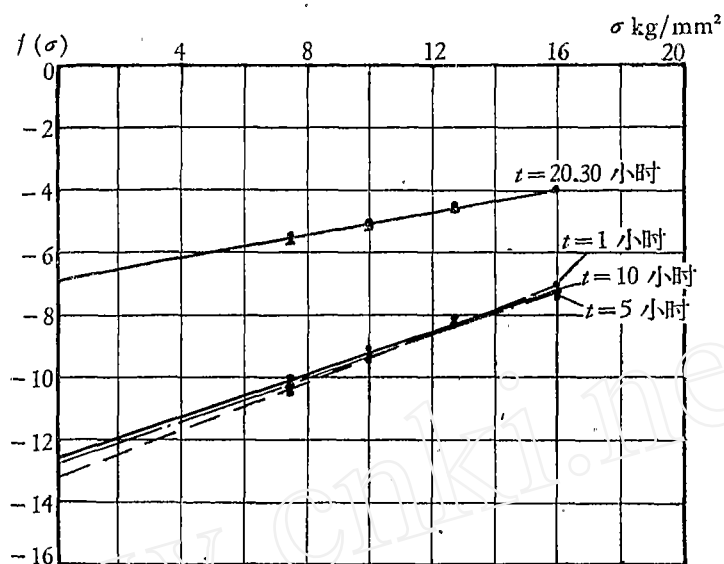


图 2

其中

$$m = \frac{1}{1 + \alpha}, \quad B' = \left(\frac{B}{m}\right)^m, \quad n' = nm.$$

(4) 式取对数, 作 $\log \epsilon_p - \log t$ 图, 其直线的斜率即为 m . 在 $t = \text{const}$ 时, 作 $\log \epsilon_p - \log \sigma$ 图, 可决定 B 和 n' . 同样也发现 $t < 10$ 和 $t > 10$ 应该有二组不同的数据, 本文中 $m_1 = 0.325, m_2 = 0.695$. 这种形式没有进行验证.

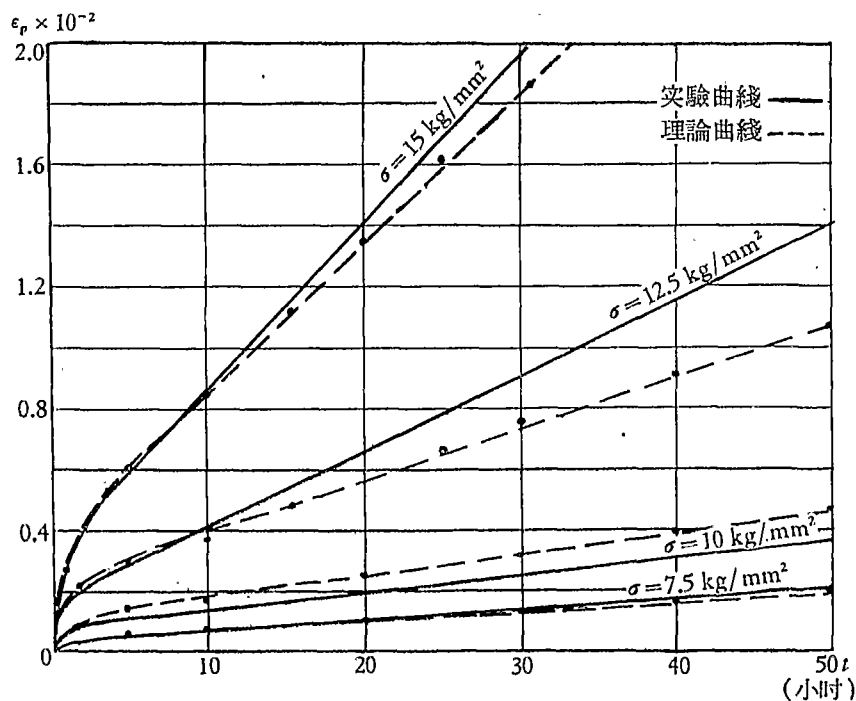


图 3 硬化论的理论曲线和实验曲线比较

II. 时效理论

$$f_1(\dot{\epsilon}_p, \sigma, t) = 0, \quad (5)$$

$$f_2(\epsilon_p, \sigma, t) = 0. \quad (6)$$

曾經提出的形式有(見引言)

$$\dot{\epsilon}_p = \sigma^n B(t),$$

$$\epsilon_p = \sigma^n \Omega(t),$$

$$\epsilon_p = \psi \sigma, \quad \psi = \int_0^t \sigma^{n-1} B(t) dt.$$

这些形式当 $\sigma = \text{const}$ 时得到完全相同的结果:

$$\epsilon_p = \sigma^n \Omega(t). \quad (7)$$

根据(7)式取对数, 在 $t = \text{const}$ 时, 画 $\log \epsilon_p - \log \sigma$ 图(见图4). 从图上求得各直线的斜率, 取其算术平均值即为 n . 本文中 $n = 3.49$.

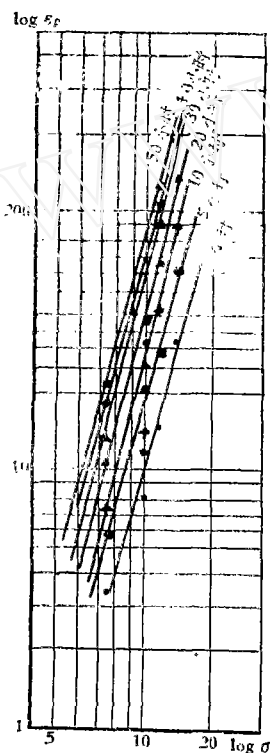


图 4

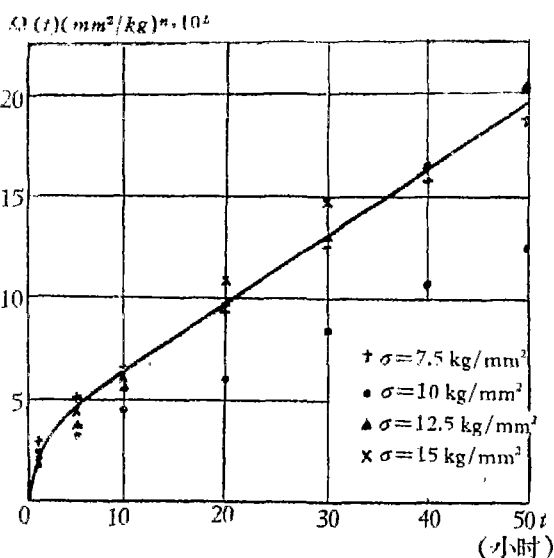


图 5

根据每一条实验曲线可以作 $\Omega(t)-t$ 图(见图5). 从图上可以看到: 除 10 公斤的点子离得较远外, 其他点子都比较靠拢. $\Omega(t)-t$ 点子的分散也说明了利用时效理论来描述 45 号钢的蠕变不够理想, 误差较大.

理论经验公式为

$$\epsilon_p = \sigma^{3.49} \Omega(t). \quad (8)$$

利用 $\Omega(t)-t$ 的关系, 可以验证实验曲线. 从验证结果(图6)来看: 对于 10 公斤以外的曲线, 理论公式都能近似地满足要求.

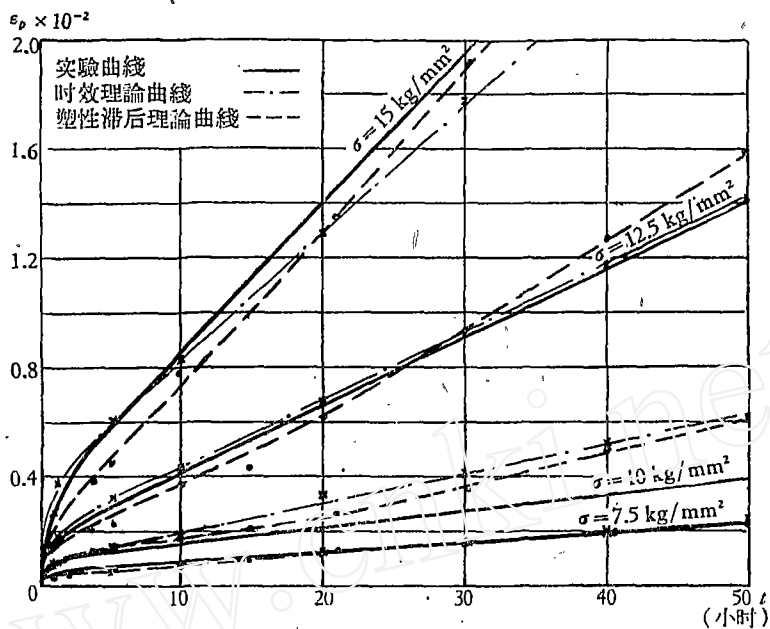


图 6

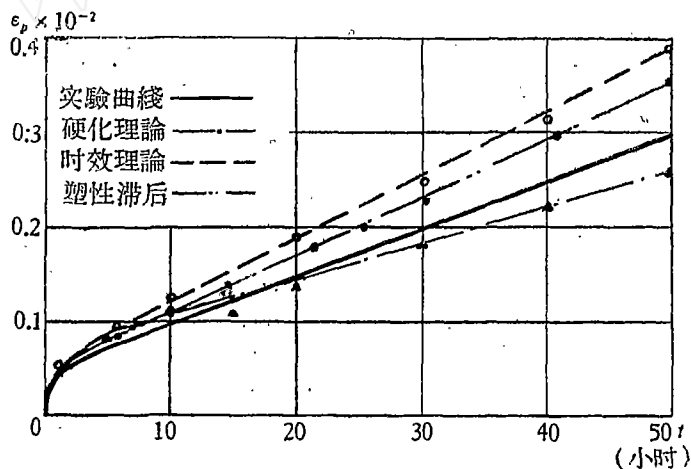


图 7

硬化論, 时效論还单独地驗證了 8.7 公斤的蠕变曲綫(沒有用它来定常数)(見图7), 一般都能近似地符合, 但硬化論比时效論要更近似一些。

III. 塑性滞后理論

$$\varphi(\varepsilon) = \sigma(t) + \int_0^t K(t-\tau)\sigma(\tau)d\tau, \quad (9)$$

$\sigma = \text{const}$ 时, (1)式变为

$$\varphi(\varepsilon) = \sigma[1 + G(t)], \quad (10)$$

其中

$$G(t) = \int_0^t K(t-\tau)d\tau.$$

可以看到, 当 $t = 0$ 时, $\varphi(\varepsilon) = \sigma(t_0)$, 如果我們在 $t = 0$ 作 $T = \text{const}$ 的 σ - ε 曲綫,

即作短时拉伸的应力应变关系,这就是 $\varphi(\varepsilon)-\varepsilon$ 的图,利用这个图我们可以作出在不同 σ 和 ε 下的 $G(t)-t$ 的图,用它们可以进行实验验证。

本文因为条件限制没有这样做,我们取了一个函数

$$G(t) = at^b,$$

于是(10)式变成

$$\varphi(\varepsilon) = \sigma[1 + at^b]. \quad (11)$$

根据实验曲线确定 $a = 0.14, b = 0.55$, 理论经验公式为

$$\varphi(\varepsilon) = \sigma[1 + 0.14t^{0.55}]. \quad (12)$$

由(12)式以不同的 σ, t 可以作出 $\varphi(\varepsilon)-\varepsilon$ 图(图8)。可以看到, $\varphi(\varepsilon)-\varepsilon$ 图上的点还是相

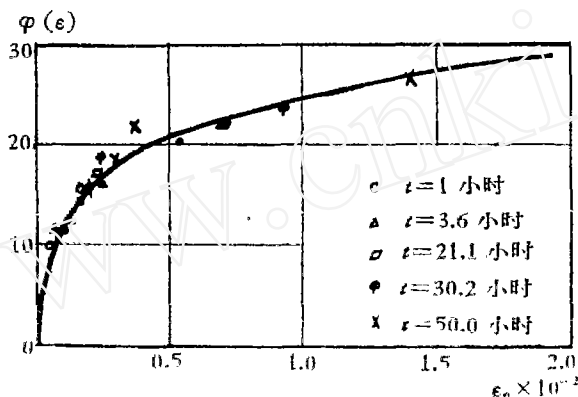


图 8

当集中,这说明了 $G(t)$ 的函数取得还比较恰当。验证结果,这种理论也能近似地和实验曲线符合,不过它不比硬化理论好多少,理由是我们所取的 $G(t)$ 函数还不够理想。

四、结 论

1. 硬化理论公式的常数应该有二组。可以认为这是由于蠕变第一阶段和第二阶段不同之故。不能用单一的公式来描述整个蠕变过程,这是一个缺点。

2. 三个理论都能近似地和实验曲线符合。它能满足实用精度。其中硬化论比时效论为佳。

3. 塑性滞后论在计算上比较复杂,但是合适地选择积分方程的核之后,能很满意地和实验一致。

本文的实验工作是和力学所王保灿,赵晓玲,李端义等同志共同进行的。

参 考 文 献

- [1] Davenport, C. C., Correlation of Creep and Relaxation Properties of Copper, *JAME*, No. 2, A-55, 1938.
- [2] Жуков, А. М., Работнов, Ю. Н., Чуриков, Д. С., Экспериментальная проверка некоторых теорий Ползучести, *Изв. сб. 17*, 163—170, 1953.
- [3] Работнов, Ю. Н. 等, Ползучесть и Релаксация Стали зохмд, *Изв. АН СССР (ОТН)* № 5, 102—108, 1955.
- [4] Davis, E., Creep and Relaxation of Oxygen-free Copper, *JAM* 10, A 101—105, 1943.

- [5] Soderberg, R., The Interpretation of Creep Tests for Machine Design, *Trans. of ASME* 58, No. 3, 1936.
- [6] Качанов, Л. М., Некоторые вопросы теории ползучести, ОГИЗ ГИТТЛ, 1949.
- [7] Работнов, Ю. Н., Расчет деталей машин на ползучесть, *Изв. АН СССР (ОТН)*, № 6, 289—800, 1948.
- [8] Работнов, Ю. Н., Некоторые вопросы теории ползучести, *Вестн. Моск. Госуд. Унив.* № 10, 81—91, 1948.
- [9] Малинин, Н. Н. 等, Основы современных методов расчета на прочность в машиностроении, Машгиз, глава xv, 1952.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF SEVERAL CREEP THEORIES BY CREEP TESTS ON No. 45 STEEL

KO SHOU-CHUAN LU SI-NIEN LEE TAO-NGO

ABSTRACT

Utilizing creep curves, obtained for No. 45 steel under 500°C and different stresses, we proceed to verify several typical creep theories, i.e., strain hardening theory— $f(\sigma, \dot{\epsilon}_p, \epsilon_p) = 0$, time hardening theory— $f(\sigma, \dot{\epsilon}_p, t) = 0$ and plastic hereditary theory— $\varphi(\epsilon) = \sigma(t) + \int_0^t K(t - \tau)\sigma(\tau)d\tau$. Results are analyzed and simple methods for checking these theories are stated.