

短时高温材料拉伸试验设备*¹⁾

柯受全 盧錫年 李桃萼 蔣灿兴²⁾

(中国科学院力学研究所)

提 要

高速飞机及飞航导弹在飞行过程中受到气动力的快速加热和快速加载。为了最充分地利用结构材料强度进行合理设计,必须研究金属结构材料在快速加载、快速加热下的力学性能。本文叙述了一种短时高温拉伸试验设备;这设备能以小于 85 kg/s 的速率对试件进行恒速加载,以小于 80°C/s 的速率进行快速升温;试件 50 mm 标距内温度梯度小于 5°C ;整个加热控温过程和应力应变测量记录过程均系自动进行。在此设备上可进行高温快速拉伸和短时蠕变等实验,并已进行了低碳钢, Al-T , 12CrA 等材料的短时拉伸、短时蠕变、恒载等加热率的实验。文内列有图表,并对结果进行了初步讨论。

一、引 言

近代高速飞行器在飞行过程中,在几秒钟或几分钟的时间内受到气动力的快速加热和快速加载。实验研究证明,在这种短时快速受热受载条件下,金属材料的抗载能力很高。这个结果对于需要最轻结构的短寿命高速飞行器来说有重大意义。也就是说,如果设计者仍采用一般长时高温材料性能数据,那将是不经济的,也是保守的。

国外关于研究短时高温材料力学性能的试验设备的建立情况可参看文献[1—8]。在这些设备上已做了不少实验研究工作,研究的材料达三、四十种之多。在研究这些材料的短时高温特性中,探讨了应变率、加热率、保温时间、加工硬化等对材料强度的影响。共同的规律是:提高加热率及应变率能使材料强化,不同材料强化效果不同,大部分材料分别提高30—100%以上^[9,11]。但很多文献的结果表明,加热率及应变率的提高有一定限度,过此限度,强化就不明显了。保温时间(半小时以下)的影响,一般说比应变率及加热率要小一些,对较多材料几乎是沒有影响。加工硬化的影响和实验温度有关。

在这方面,除了已经开始进行一些实验研究外,理论研究还是很少的,有一些适合于工程设计的半经验公式可参见文献[4, 6, 11]。

本设备是本着自力更生的精神,经过多种方案性实验,选择,从土到洋,逐步改进而正式定型的。它能以小于 85 kg/s 的速度对试件进行快速加载,以小于 80°C/s ³⁾的加热速度进行快速加热,并能使沿试件标距 50 mm 内的温度梯度小于 5°C 。实验结果以载荷-时间、变形-时间、温度-时间曲线自动记录在纸上。目前在此设备上已进行了低碳钢,不锈

* 1964年10月15日收到。

1) 本文曾在1964年4月北京市力学学会年会上宣读。

2) 本文实验工作由宋和昌、从选一等五位同志共同进行。

3) 对截面积为 $3\times 10\text{ mm}^2$ 的不锈钢而言。

钢(Я1Т), 12Г₂А 等几种金属材料的短时拉伸、短时蠕变、恆载等加热率试验, 得到了定量的结果。

二、試驗設備

试验设备分为三个大部分。整个设备方框图见图 1, 设备外形见图 2。图 2 中间部分是试验机, 左边是温度控制屏, 右边是载荷变形记录系统。

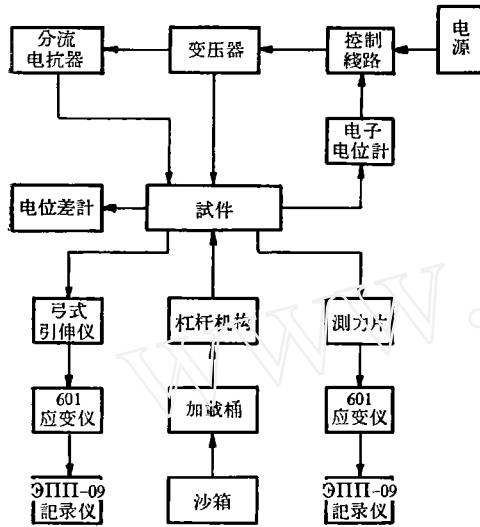


图 1 试验设备方框图

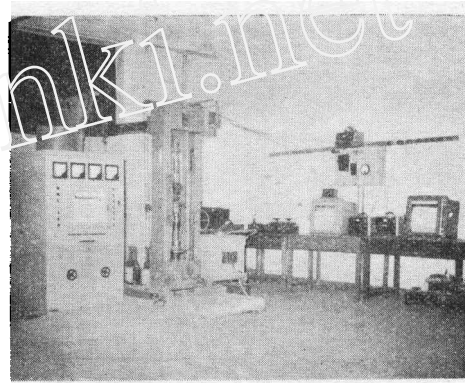


图 2 试验设备外形

(一) 加热、控温、测温系统

1. 加热

利用一个 10kVA 的低电压大电流变压器对试件进行直接加热。加热变压器的初级电压为 380V 或 220V, 次级电压为 0.3—8V, 额定输出电流为 1200A。

从加热变压器输出端到试件用多股自绕软线联结, 接头方法可见图 3。

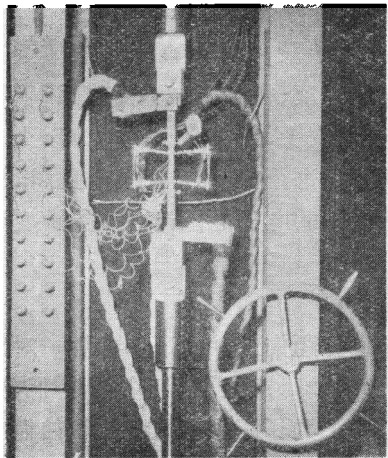


图 3 试件加热、测量装置

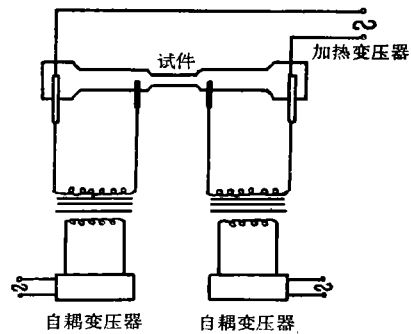
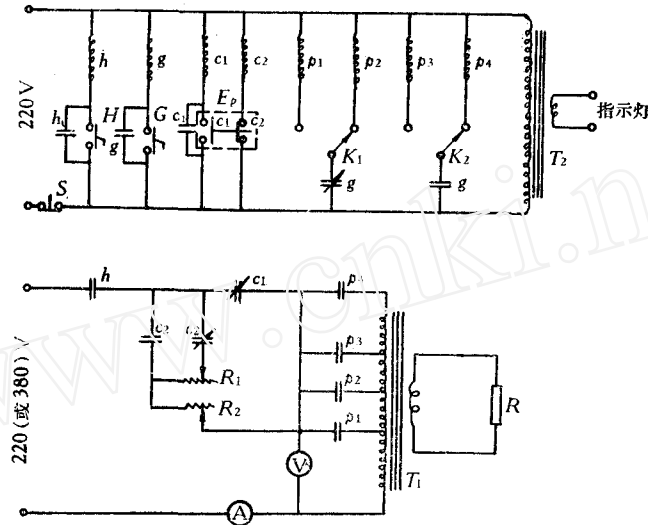


图 4 分流线路

由于试件二端夹有导热能力很强的夹具, 试件标距内会产生明显的温度梯度。国外采用加长试件及分流的方法消除温度梯度。前者效果并不理想, 且费工费料。因此, 本设备采用分流电路的方法, 见图 4; 温度梯度小于 5°C 。

2. 控温

当变压器初级电流不太大时, 采用继电器式控制线路简单可靠, 并已足够灵敏。本设备采用的控制线路见图 5。



T_1 : 加热变压器(380V/0.3—8.0V)

T_2 : 变压器(220V/6.3V)

H, G, S : 按钮开关

K_1, K_2 : 选择开关

E_p : 电子电位计

R_1, R_2 : 可调电阻

R : 负载

$h, g, c_1, c_2, p_1, p_2, p_3, p_4$: 继电器

—: 继电器常开触点

—/—: 继电器常闭触点

图 5 温度控制线路

加热程序可分为三个阶段, 如图 6。第一阶段为快速加热段, 加热率最大; 当接近试验温度时转换为第二阶段, 加热率降低, 使温度不冲过试验温度; 在达到试验温度后, 就转入第三阶段, 使温度控制在试验温度上, 仅有微小波动。以上三个阶段通过电子电位计和控制线路进行自动转换, 保证了试验的可靠性和重复性; 并由于所使用的电子电位计控制灵敏度比较高, 可使温度波动小于 3°C 。

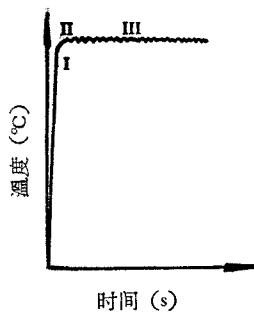


图 6 升温控制程序

3. 测温

用电容储能式点焊机在试件标距内上、中、下部各焊一对热电偶, 作为测温用。温度低于 600°C 时用康铜-镍铬热电偶, 低于 1000°C 时用铬铝-铬镍热电偶。为了避免焊点吸热和热偶丝的导热使焊点附近试件温度局部下降, 我们选用直径为 0.1mm

的热电偶丝。实验表明,这样细的热电偶的焊点不影响试件强度。

总的测温误差为 5°C 。

(二) 加载、拉力卡具部分

1. 恆速加载机构

加载机构利用了原有 TF-5 蠕变试验机的槓杆式机架,其槓杆比为 1:30,最大载荷为 5T。在槓杆的加载端设计了一种简单的恆速加载机构,见图 7。加载介质就通过喇叭口进入加载桶,更换喇叭口可以改变流速的大小。载荷讯号通过测力片传送到记录仪,可得载荷-时间曲线。在喇叭口活门边上装了一个时间同步讯号装置,使载荷和伸长记录同步。

加载介质用金刚砂(可用铅粒加大加载率,但冲击大一些)。

要想进行短时蠕变试验,则只要在槓杆加载端按要求加一定死载就可以了。

2. 拉力夹具

拉力夹具包括上、下连杆,上、下夹头,接头和测力片。由于夹具是由多个部件组成,设计和加工时需要特别注意保证同心。另外,设计时应尽量使测力片远离试件,以避免测力片上的感受元件电阻应变片受温度影响,如试验时间过长或温度特别高,最好采用上卡头通冷却水进行冷却。

加载系统具有一定的弹性,为避免初始加载冲击震荡,应先加 10% 的预载。

槓杆式设备比较简单,又可保证恆载,对短时蠕变等很有利。但受支点刀口角度的限制,槓杆摆幅不能过大,因而试件不能作过大的伸长;标距为 50mm 的试件总变形只能达到 8%;破坏强度只能用不便于测变形的小标距试件测得。

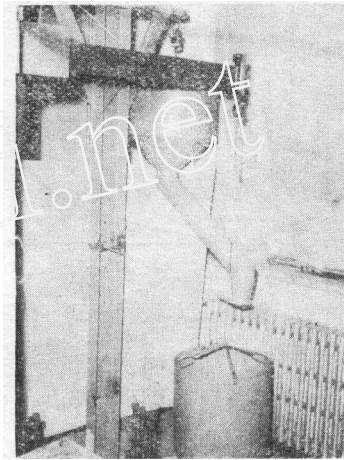


图 7 恆速加载装置

(三) 载荷、伸长的测量和记录

1. 感受元件

载荷测量用贴有应变片的测力片作为感受元件,测力片厚度必须保证在承受最大可能载荷时不发生屈服,而且要使输入讯号与测量记录系统匹配。

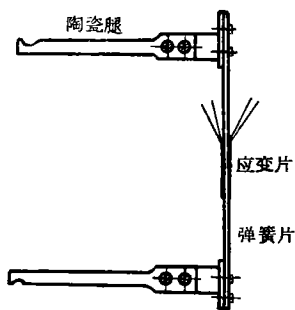


图 8 弓式引伸仪

变形测量用弓式引伸仪,见图 8 和图 3。它由一个两面贴有应变片的薄弹簧片固定在二陶瓷腿上组成,试验时在试件二侧各安装一个,使四个应变片组成全桥输入应变仪。引伸仪与试件之间用几层铝箔隔热,在 800°C 温度下工作 20 分钟未发现明显的温升。

弓式引伸仪实际上是把测量试件的拉伸变形转换为测量弹簧片的弯曲变形。经过标定,看出它们成线性关系,其近似

关系为

$$\varepsilon_{\text{弹簧中部}} = \frac{lh}{2bL} \varepsilon_{\text{试件}}$$

式中 l 是试件标距长, h 是弹簧片厚, b 是陶瓷腿长, L 是弹簧片长. 如果 $l = 50 \text{ mm}$, 可选片厚为 0.8 mm , 腿长约 50 mm , 片工作段长约 60 mm .

2. 记录设备

短时高温的应力应变必须自动记录. 在没有 $x-y$ 记录仪的情况下, 可分别记录下载荷-时间和变形-时间曲线, 使时间同步, 就可以得到应力-应变曲线, 见图 9 和图 10.

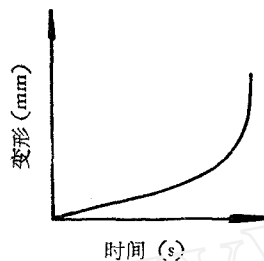


图 9 恒加载率下变形-时间曲线

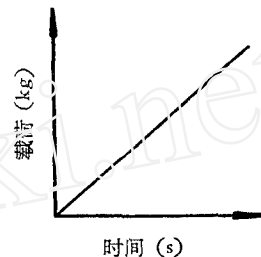


图 10 载荷-时间曲线

测力片和引伸仪的讯号输入到 601 应变仪, 再由应变仪输入到 ЭПП-09 记录仪. 由于测力片和引伸仪输出讯号都超过了应变仪的动态线性输出范围, 我们加大了应变仪第一级放大的栅偏压电阻, 使输出的线性范围从 500 微应变增大到 4000 微应变; 又因为应变仪输出电压大于记录仪的满刻度值, 因此在输入记录仪之前通过一个衰减器使讯号衰减至适当大小. 记录仪的转纸速度太低, 通过改换齿轮, 使纸速提高到 8.5 mm/s .

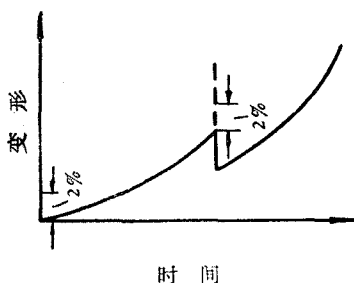


图 11 变形-时间曲线

变形记录分成二段, 每段用不同的标度, 见图 11. 第一段讯号衰减较少, 可以明显地反映出弹性数量级的变形. 当变形增加至一定值时(如相应试件变形 0.3%), 通过滑动触点将衰减比增大, 这样就可以记录下全部变形. 用这种方法可以准确地测出应变较小的部分, 测得屈服应力、弹性模量和热膨胀系数.

总的应力测量误差为 2.5% , 应变测量误差, 弹性段为 6% , 塑性段为 4% .

三、实 验

(一) 试 件

试件材料有低碳钢, 不锈钢 (Я1Т), $12\Gamma_2A$ 三种, 化学成分见下表:

| 材 料 | 炭 | 锰 | 硅 | 磷 | 镍 | 钛 |
|---------------|------|------|----|------|------|------|
| 低碳钢 | 0.18 | 0.39 | 少量 | | | |
| Я1Т | 0.11 | 1.33 | | 18.3 | 10.4 | 0.03 |
| $12\Gamma_2A$ | | | | | | |

试件形状见图 12。试件头部有两个孔是为了使加力孔和连接加热导板孔分开, 加力销钉不用夹紧, 便于试件实现自动对心。(c) 试件是不用分流的; (d) 试件是只作拉断不求变形的。

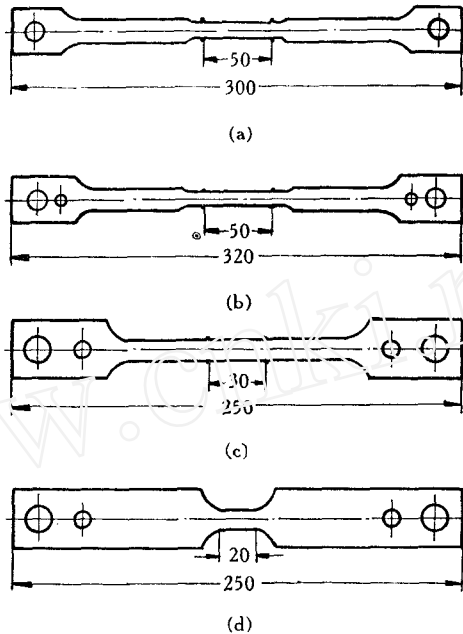


图 12 试件 (均厚 3 mm)

(二) 短时拉伸

1. 试验参数

低碳钢实验温度为室温, 245℃, 315℃, 415℃, 525℃; 升温率 20—30℃/s; 升温保温时间共 90 s; 加载率约为 45 kg/s。全部试验在 120s 内完成。

不锈钢实验温度为室温, 200℃, 370℃, 520℃, 610℃, 690℃, 800℃; 升温率为 20—60℃/s (高温时使用快加热率); 升温保温时间共 150 s; 加载率约为 85 kg/s。整个实验在 180s 内完成。

2. 试验过程

试验前测力片、引伸仪、热电偶均经过标定, 使用一段时间后重新标定。试件安装完后用两个销杆引伸仪左右测量试件偏心率, 通过调整夹头部位消除偏心。

准备工作完成后合上加热开关, 试件迅速按预定程序升到指定温度。在保温时间内 (约一分钟) 调节分流电路使试件标距内温度梯度小于 5℃, 然后开动记录仪器, 打开加载活门加载, 记录仪器即自动记下实验曲线。应力-应变曲线见图 13 和图 14。

(三) 短时蠕变

1. 试验参数

低碳钢: 温度 500℃, 应力分别为 11.6, 13.4, 15.4, 16.8 kg/mm²。

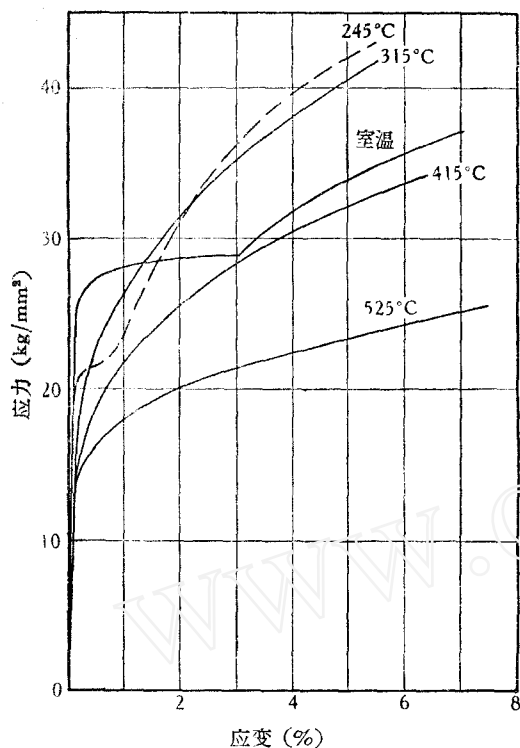


图 13 低碳钢高温短时拉伸曲线(加热 20—30°C/s, 升温、保温 90 s, 加载 45 kg/s)

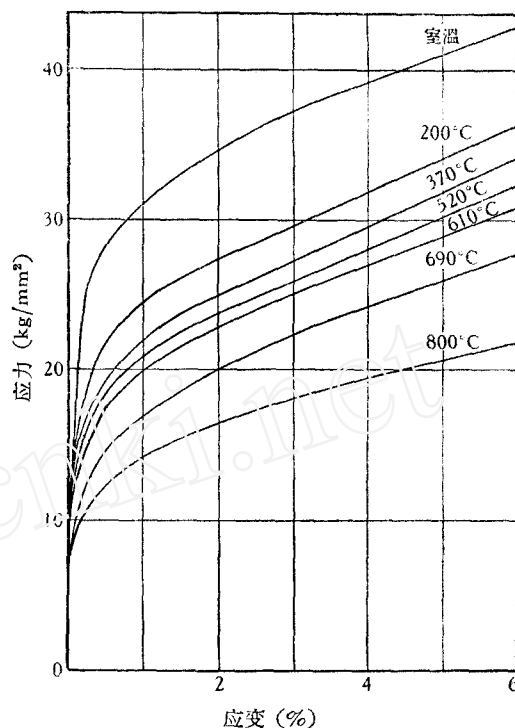


图 14 91T 高温短时拉伸曲线(加热 20—50°C/s, 升温、保温 150 s, 加载 85 kg/s)

不锈钢: 温度 800°C, 应力分别为 14, 16, 18 kg/mm².

2. 试验过程

先加相当于总载荷 30% 的预载, 快速升温到指定温度, 保温 150 s, 同时调节分流, 然后开动记录仪, 加载达到预定值, 记录仪记下弹塑性变形和蠕变曲线, 待试验时间到达 600 s 或总变形达到 5% 即停止试验。蠕变曲线见图 15 和图 16。

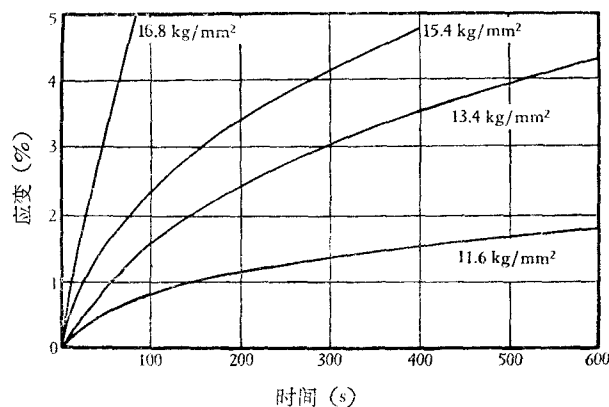


图 15 低碳钢短时蠕变曲线(在 500°C)

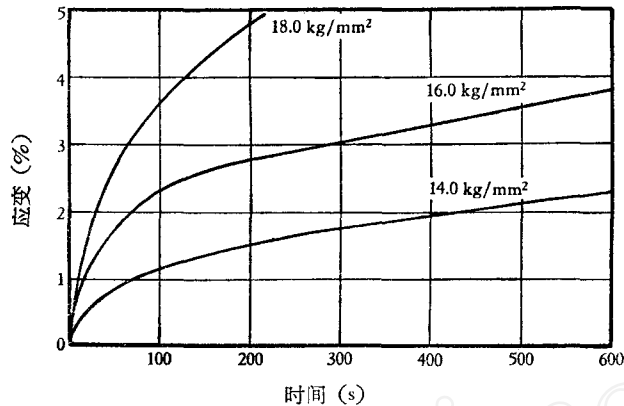


图 16 91T 短时蠕变曲线(在 800°C)

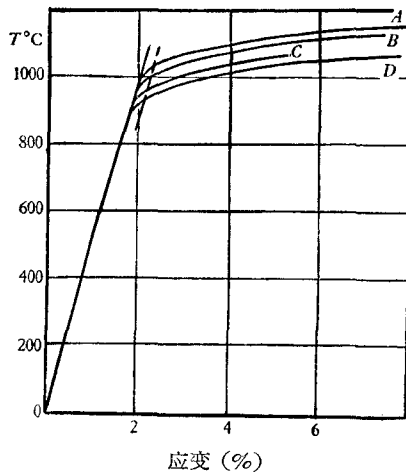
(四) 恒载等加热率实验

1. 试验参数

对 91T 和 12Г₂A 选定应力为 4, 5, 7 kg/mm², 加热率为 30, 40, 60°C/s, 得出恒载等加热率下材料的屈服温度和断裂温度。

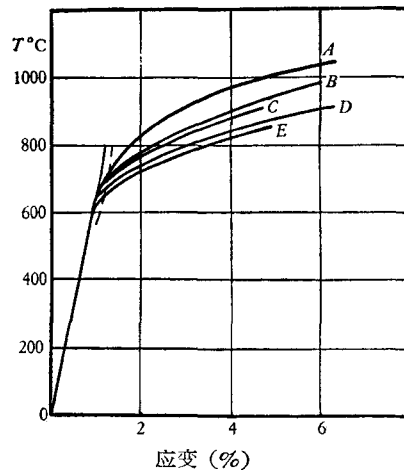
2. 试验过程

先在横杆加载端加上要求的载荷, 然后通电按预定加热率加热, 记录伸长-时间和温度-时间曲线, 直到横杆搁住或试件拉断。在温度超过 700°C 后升温率有些下降, 须及时调节控制线路电阻以保持恒加热率。温度-应变曲线及屈服温度见图 17 和图 18。求断裂温度时只记录升温曲线, 断裂温度见表 1。



A: 5 kg/mm², 50°C/s
 B: 5 kg/mm², 30°C/s
 C: 7 kg/mm², 60°C/s
 D: 7 kg/mm², 26°C/s

图 17 91T 在不同恒载、等加热率下的温度-应变曲线(图中虚线与曲线的交点即屈服温度)



A: 4 kg/mm², 40°C/s
 B: 5 kg/mm², 60°C/s
 C: 6 kg/mm², 40°C/s
 D: 7 kg/mm², 60°C/s
 E: 7 kg/mm², 40°C/s

图 18 12Г₂A 在不同恒载、等加热率下的温度-应变曲线(图中虚线与曲线的交点即屈服温度)

表 1 不同恆載和加熱率下斷裂溫度

| 材 料 | 试 件 号 | 应 力 kg/mm ² | 升 温 率 °C/s | 断 裂 温 度* (一) °C | 断 裂 温 度* (二) °C | 平 均 断 裂 温 度 °C |
|--------------------|-------|---------------------------|---------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| Я1Т | 31 | 5 | 40 | 1313 | 1302 | 1316 |
| | 33 | 5 | 40 | 1327 | 1325 | |
| | 34 | 7 | 40 | 1174 | | 1179 |
| | 35 | 7 | 40 | 1184 | | |
| | 40 | 7 | 30 | 1147 | | 1147 |
| | 36 | 7 | 50 | 1187 | 1190 | 1208 |
| | 37 | 7 | 60 | 1228 | | |
| | 38 | 5 | 52 | 1317 | | 1323 |
| | 39 | 5 | 54 | 1332 | 1321 | |
| 12Г ₂ А | 42 | 5 | 33 | 1216 | 1191 | 1204 |
| | 43 | 7 | 32 | 1090 | | 1110 |
| | 44 | 7 | 35 | 1131 | | |
| | 68 | 7 | 68 | 1156 | | 1146 |
| | 62 | 7 | 62 | 1146 | 1136 | |
| | 41 | 5 | 50 | 1238 | | 1227 |
| | 48 | 5 | 53 | 1219 | | |
| | 49 | 5 | 55 | 1224 | | |
| | 50 | 4 | 42 | 1191 | | |

* 断裂温度(一)、(二)为试件两面各焊一对热偶同时记录所得数据。

本实验未采用分流,试件标距内(30 mm)温度梯度在20°C以下,再加上其他因素带来的误差,屈服温度总误差为15°C;又因XA热电偶在高温下误差加大,特别是缩颈后引起温度剧烈变化,所以断裂温度总误差为30°C。

(五) 实验结果的讨论

从实验曲线图13—18可得:

1. 短时拉伸实验曲线的分散度一般在工程误差范围之内(5%),个别偏离较大。
2. 短时高温拉伸下材料性质随温度变化趋势与一般高温拉伸所得结果近似。如低碳钢在200°C附近应力-应变曲线高于室温的同类曲线,在300°C以上强度急剧下降,245°C附近曲线出现多次集中塑性流动现象(曲线只能用虚线表示)。这些现象在一般高温拉伸中也见到。
3. 短时蠕变曲线与长时蠕变曲线相似,首先出现蠕变率降低的第一阶段,然后出现接近恆速的第二阶段(由于实验时间和总变形量的限制,未出现加速的第三阶段)。

4. 对低碳钢和 316 不锈钢短时蠕变(600 s 内)只有在较高温度和应力下才能明显地表现出来。如 316 在 700°C 即使加载到出现大量塑性变形, 仍然没有明显的蠕变现象, 只有加热到 800°C (此时材料强度只有室温的 2/5), 并加载到超过屈服点, 才有明显的蠕变现象。低碳钢也有类似情形。

5. 从恒载等加热率实验结果可得: 在以上实验参数下加热率对屈服温度影响较少, 加热率差一倍时屈服温度只差 15°C, 断裂温度也只差 30°C 以内; 载荷影响则较明显, 以 5 kg/mm² 和 7 kg/mm² 相比, 两种材料的断裂温度均改变 100°C 以上, 316 的屈服温度也相差 50°C 以上。

四、结 论

(一) 本设备可进行金属板材高温短时拉伸和短时蠕变实验, 能得到定量的实验结果。

(二) 设备达到的性能指标:

- | | |
|-----------------|---------|
| 1. 最大加热率 | 80°C/s |
| 2. 最大加载率 | 85 kg/s |
| 3. 最大加载能力 | 5 T |
| 4. 可达最大变形 | 8% |
| 5. 温度控制精度 | ±3°C |
| 6. 温度梯度(50 mm内) | 小于 5°C |

(三) 实验证明, 试验材料只有在温度和应力相当高的情况下才能察觉短时蠕变现象。升温率对屈服温度断裂温度的影响小于载荷对屈服、断裂温度的影响。

参 考 文 献

- [1] Presten, J. B., Ree, W. P. and Kattus, J. R., Determination of the mechanical properties of aircraft structural materials at very high temperatures after rapid heating, *WADC TR 57-649*, Pt. 1, 2, 1958, 1960.
- [2] Heimerl, G. J. and Inge, J. E., Tensile properties of 7075-6 and 2024-3 aluminium-alloy sheet heated at uniform temperature rates under constant load, *NACA TN 3462*, 1955.
- [3] Heimerl, G. J., Kang, J. M. and Inge, J. E., Tensile properties of inconel-X and RS-120 titanium-alloy sheet under rapid-heating and constant-temperature condition, *NACA TN 3731*, 1956.
- [4] Gibbo, T. W., Tensile properties of HK 31XA-H24 magnesium-alloy sheet under rapid-heating conditions and constant elevated temperature, *NACA TN 3742*, 1956.
- [5] Kurg, I. M., Tensile properties of AZ31A-O magnesium-alloy sheet under rapid-heating and constant temperature conditions, *NACA TN 3752*, 1956.
- [6] Vanecho, J. A., Short-time creep of structural sheet metals, Symposium "Short-time high-temperature testing", pp. 58—91, Pub. ASM.
- [7] Manning, C. R. and Price, H. L., Tensile properties of 17-7 PH and 12 MoV stainless-steel under rapid-heating and constant-temperature condition, *NASA TN D-823*, 1961.
- [8] Morton, C. and Smith, D. M., Testing machine for short-time creep and stress-rupture testing at 2000 to 2500°C, *Rev. of Scient. Instrum.*, 28, 7, 1957.
- [9] Smith, W. K. and Robinson, A. T., Strength of metals under rapid-heating, Symposium "Short-time high-temperature testing", pp. 5—35, Pub. ASM.
- [10] Kattus, J. R., Effect of holding time and strain rate on the tensile properties of structural metals. Symposium "Short-time high-temperature testing", pp. 92—113, Pub. ASM.

[11] Stowell, E. Z., The properties of metals under rapid heating condition, *JAS*, **24**, 1957.

A SHORT-TIME HIGH-TEMPERATURE TENSILE TESTING MACHINE

KE SHOU-QUAN LU XI-NIAN LI TAO-E JIANG CAN-XING

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Supersonic speed aircraft and guided aircraft missiles are subjected to rapid aerodynamic heating and rapid loading during their flight. For taking full advantage of the strength of structural materials in design, it is necessary to study the mechanical characteristics of metallic structural materials under rapid loading and heating. This paper describes a short-time high-temperature tensile testing machine, which is capable of constant-rate loading up to 85 kg/sec and heating at a rate up to 80°C/sec, the temperature gradient within the gage length for a distance of 50 mm being less than 5°C. All the heating, temperature-controlling and stress-strain measuring processes are done automatically. Experiments such as rapid tension under high temperature, rapid heating under constant loading and short-time creep can be carried out on this tester. Specimens of low carbon steel, A1T and $12\Gamma_2\text{A}$ have been tested on it. Diagrams and tables have been included here and results from these tests have been preliminarily discussed.