

冲击大电流高加热率实验装置研究

刘宗德^a 丰树平^b 孙承纬^b 韩铭宝^a

(a. 北京大学力学系 北京 100871)

(b. 中国工程物理研究院流体物理研究所 成都 610003)

摘要 研究了两种能对金属快速加热的高加热率实验装置。第一种 RL 装置能对试件产生几十至五千 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 范围内调节的中等加热率。第二种 RLC 加热装置能对试件产生 $10^5\sim 10^7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的超高加热率。两种装置均能在加热过程中使试件产生一个近似均匀的温度场,且均可和常规的力学加载装置配套使用。

关键词 冲击大电流 高加热率 均匀温度场

中图分类号 O 347.51

1 引言

金属材料受短时热冲击问题是国防和民用等领域中亟待研究的重要课题之一。例如:飞行器高速返回大气层时,空气对蒙皮的摩擦加热,使得蒙皮和结构的温度在很短时间内上升至几百摄氏度以上,固体燃料火箭点火后,火箭内部材料在数毫秒内温度可达上千摄氏度;核爆炸时,冲击波和热辐射几乎同时作用于一定有效距离内的结构,使结构表面材料在受到脉冲载荷的同时还吸收大量的辐射能而使温度急剧上升至汽化^[1];飞行器受激光武器的作用和材料的加工、热处理技术等都涉及到材料在快速加热下的宏观力学性能及微结构变化的问题^[2]。由于材料力学性能和微结构的变化特性均与温度历史有关,所以一般不能用普通恒温实验来代替这种短时热冲击实验。

在对试件的模拟快速加热实验中,大致可采用以下几种方法:(1)高温热源辐射加热;(2)冲击大电流电阻加热;(3)高频感应加热;(4)热流体加热。

高温热源辐射加热法的特点是热量从试件表面向内传播。由于利用热传导过程加热整个试件,所以试件表面热率愈高,试件内温度梯度的影响愈显著。许多材料的强度显著地随温度变化,在试件中的温度梯度所引起的结构效应(如热应力、非均匀热软化)不容忽视。而当考虑温度梯度的影响,又难以将需要的力学参量直接分离出来,大大增加了分析的难度^[2]。

感应加热在冶金工业中得到了较为广泛的应用。利用电磁感应原理,将试件置于交变磁场中,使试件也产生交变磁场、激发出感生电动势,由于试件为导体,所以在试件中产生电涡流对试件加热。同时,高频交变电流所引起的磁滞现象也使试件发热。试件中感生电流有两个特点:其一是电流沿试件断面呈旋涡状;其二是高频时有趋肤效应,即电流密度

沿试年断面按指数规律变化。选择合适的频率可以提高热效率,一般总效率在10%~40%范围内。严格地说,感应加热也是一种非均匀加热法,对试件能达到的加热率也比较低,大约是每秒几十摄氏度以下。由于感应加热法需将试件放于感应线圈内,可能会给测量带来不方便,所以感应加热法适合于加热率较低或保温时间较长的实验^[3]。

热流体加热法则是通过热流体来加热试件,加热率可随热流体流速增加而增加。但这种加热法也属于热传导加热,不可能达能很高的加热率,且不利于布置测量设备。

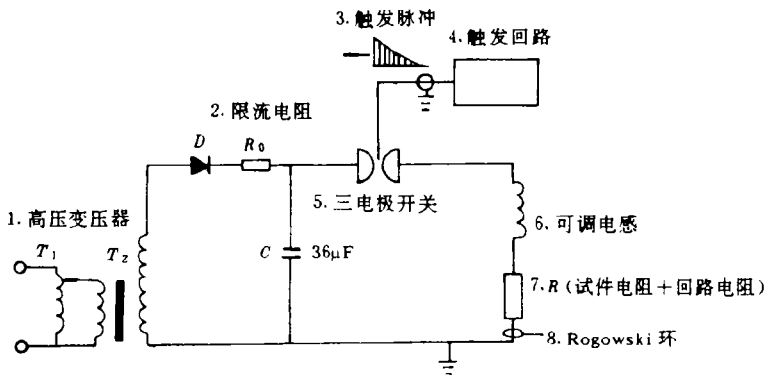
利用冲击大电流可对试件进行电阻加热,当电流的振荡频率不太高且试件截面尺寸较小而使趋肤效应可以忽略时,则可对试件近似均匀加热。由于可以基本消除温度梯度的影响,从而简化了分析。当试件几何尺寸一定时,则加热率与 I^2R 成正比,通过控制电流大小就可控制加热率。总之,这种方法主要优点是能使试件产生较均匀的温度场,且加热率可调。但当冲击大电流达到上万安培时,电磁干扰的影响就比较突出,在测试时需采取措施以消除电磁干扰的影响。

本文中所述的两种高加热率装置,是根据所需加热率的高低而研制的,均是采用大电流电阻加热法。

2 RLC 超高加热率装置

2.1 加热装置原理

利用高压电容器在微秒量级内释放能量的原理,我们研制了对试件冲击加热的RLC装置。该装置电路原理如图1所示。将试件串联于回路中,当三电极开关导通时高压电容器放电,在回路中可产生高达几万安培的冲击大电流对试件均匀加热。



1. Transformer; 2. Resistance; 3. Ignition pulse; 4. Ignition system; 5. Switch;
6. Inductance; 7. R Total resistance; 8. Rogowski coil

图1 RLC 装置电路图

Fig. 1 Schematic illustration of the RLC apparatus

由图1,设电感器初始电流为 $I(0)$,电容器初始电压为 $V(0)$,回路总电阻为 R ,对电路列网孔方程得

$$LI_{,n} + RI_{,t} + I/C = 0 \quad (1)$$

$$LCV_{,n} + RCV_{,t} + V = 0 \quad (2)$$

令 $\alpha=R/(2L)$, $\omega_0=1/\sqrt{LC}$, 在欠阻尼的情况下(即 $\alpha^2-\omega_0^2<0$)。

设初始条件为 $V(0)=V_0, I(0)=0$, 解(2)式得

$$\begin{aligned} V(t) &= V_0 \sqrt{1 + (\alpha/\omega_0^2)} \cos(\omega_0 t - \theta) \exp(-\alpha t) \\ I(t) &= CV_0 \omega_0 [1 + (\alpha/\omega_0^2)] \exp(-\alpha t) \sin(\omega_0 t) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\theta=\arctg(\alpha/\omega_0)$; α 为电流幅值衰减系数, ω_0 为电路振荡角频率。

从(3)式可以发现, 对试件的有效加热时间由 α 决定。

2.2 试件升温的能量计算

设试件电阻为 R_s , 回路附加电阻为 R_r , 当电容器初始电压为 V_0 时所储存的总能量为

$$Q = 0.5CV_0^2, \quad (4)$$

式中: C 的单位为 F, V_0 的单位为 V。

设试件质量为 m , 当吸收 Q_s 几千焦耳热量时其温升为

$$\Delta T = Q_s / (c_0 m) \quad (5)$$

式中 c_0 为材料比热。

设电路热效率

$$\eta = R_s / (R_s + R_r) \quad (6)$$

则由(4)、(5)式得试件达到温升峰值为 ΔT 时所需电容器充电电压为

$$V_0 = \sqrt{2\Delta T c_0 m / (k_0 C \eta)} \quad (7)$$

上式中 $k_0=10^{-3}J$ 。由(5)式可估算出使试件达到任一峰值温度时所需电容器的充电电压。由于加热率很高, 上式忽略了热传导、热辐射所引起的热量损耗。

2.3 升温实验结果

实验选用 L2 软铝为实验材料, 试件厚度均为 0.2 mm, 截面面积在 2~2.5 mm² 之间变化。实验采用 TBS60 型温度片对试件测温(贴温度片时需保证试件与片基绝缘良好)。为了防止当温度片与试件绝缘破坏时大电流窜入 Tek2430 示波器测试通道接口, 在测试回路中接入了钳位二极管。当过电压产生时, 二极管导通使测试回路短接。在电路中接入 Rogowski 环以测试回路电流变化过程。

在电容器放电过程中, 试件动态电阻及三电平开关电阻值均不直接测出, 故只能按所测静态电阻值对(6)式进行估算。图 2 是试件温度上升峰值与电容器充电电压关系曲线(计算与实验对照)。从图中可以发现, 实验的热效率在 3%~8% 范围。图 3 是实测电流衰减波形, 从图中看出, 电流幅值几乎按线性规律下降。从电流衰减波形便能估算出实际加热时间。图 4 是对 3" 试件实测的升温曲线。由

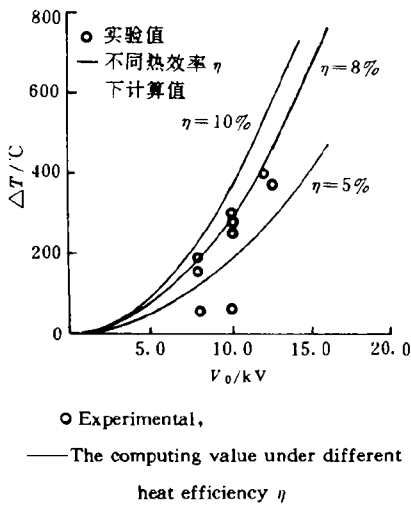


图 2 电容器充电电压与试件峰值温度关系曲线
Fig. 2 Charged voltage of the capacitor versus peak temperature of the sample

由

于升温时间很短,所得到的是一近似阶跃温升曲线。由理论和实验结果的对比,发现温度片滞后时间约为 $1\sim 3\text{ms}$ 。

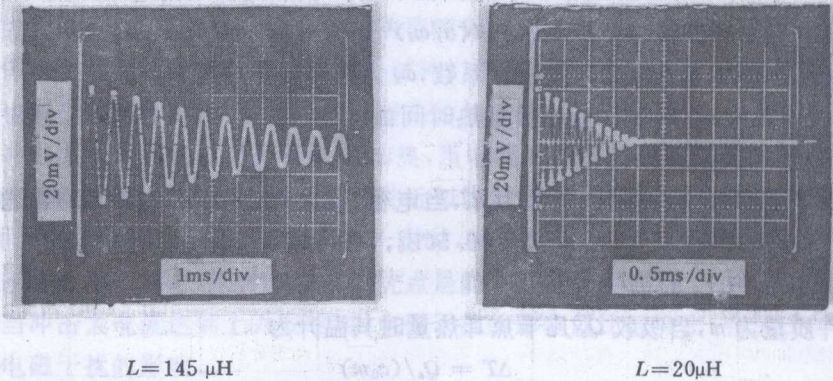


图3 电流衰减波形

Fig. 3 The measured sample current

2.4 讨论

实验表明,利用电容器冲击释放能量,能使试件达到 $10^5\sim 10^7\text{ }^\circ\text{C/s}$ 的超高加热率。这种方法的优点在于能对试件较均匀地加热,使试件内外同时升温。而用其它的高温热源辐射加热法则很难做到对试件均匀加热。

由于试件中有高频冲击大电流通过,需考虑趋肤效应问题。当试件横向尺度小于磁扩散深度而使趋肤效应可忽略时,则可对试件近似均匀地加热。为了尽可能地消除趋肤效应,试件应加工为厚度较小的平板或薄壁圆筒,使其厚度小于磁扩散透入深度特征值 d (d 为电流密度或磁通密度降到导体表面值的 $1/e$ 处的深度)。

实验时,通过调节电感的大小使得电流的频率大致在 $0.3\sim 6\text{kHz}$ 之间变化。由于试件厚度仅 0.2mm ,经计算,趋肤效应的影响可忽略。

在加热过程中,当三电极开关闭合以及回路中有冲击大电流时,会产生较强烈的电磁干扰信号。电测时需加一补偿片置于电噪声环境中,通过Wheatstone电桥平衡掉干扰信号。如采用非接触式的测量法便能避免电磁干扰问题。此外,需选择合理的电路空间布置方案来减小电磁力对试件的作用。

3 RL中等加热率装置

3.1 加热系统实验原理

如前所述,电加热方法有两种,其一是 I^2R 电阻式均匀加热法,另一种是高频感应加热法。但感应加热法不便于布置测试设备,又难以达到较高的加热率,它仅适用于慢加热

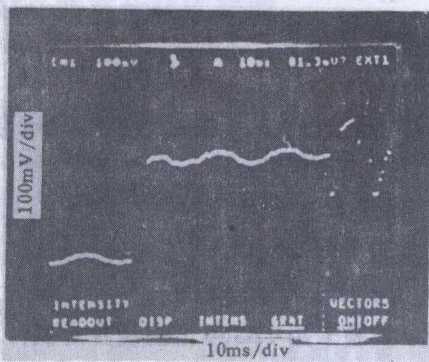
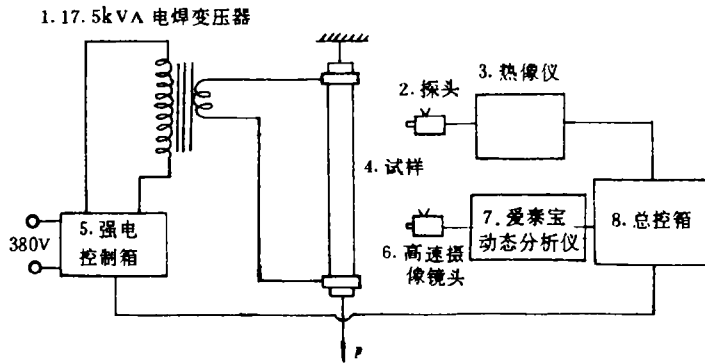


图4 3#试样升温曲线

Fig. 4 Temperature history for 3# sample

率实验或保温实验。我们所述的加热装置,则利用了一台 17.5 kVA 的交流电焊变压器,其副边电流可在 75~240 A 的范围内调节。该高加热率装置电路接线原理及测试系统原理如图 5 所示。利用总控箱触发信号使加热回路电开关、热像仪及高速摄影同时动作。在强电控制箱中,利用时间继电器控制加热时间。



1. Transformer; 2. Photo detector; 3. Thermal image system; 4. Sample;
5. Control box; 6. Highspeed camera; 7. Dynamic analyzer; 8. Main control box

图 5 RL 加热装置原理图

Fig. 5 Schematic of arrangement for the RL apparatus

设试件电阻为 R_s 、质量为 m ,副边电流为

$$I(t) = I_m \sin(100\pi t) \tag{8}$$

则瞬时加热率由下式计算

$$\dot{T} = [I_m]^2 R_s \sin^2(100\pi t) / (c_0 m) \tag{9}$$

对一个周期电流波形求得平均加热率为

$$\dot{T}_m = 0.5 [I_m]^2 R_s / (c_0 m) \tag{10}$$

设试件密度为 ρ 、电阻率为 λ 、横截面积为 A ,则可将(8)、(9)式记为

$$\dot{T} = [I_m]^2 \lambda \sin^2(100\pi t) / (c_0 \rho A^2) \tag{11}$$

$$\dot{T}_m = 0.5 [I_m]^2 \lambda / (c_0 \rho A^2) \tag{12}$$

从(11)、(12)式可见,当电流一定时,试件的截面面积大小决定了加热率的高低,而当试件截面面积一定时,改变副边电流大小则可以控制加热率高低。电阻率 λ 与温度的关系可按式下计算

$$\lambda(t) = \lambda_0 [1 + k(T - T_0)] \tag{13}$$

上式中 λ_0 、 T_0 分别表示参考温度下(常温)电阻率和参考温度。对铝合金 k 取 0.0039~0.008。

3.2 温度测量

对于试件温度的测量,常规的方法是在试件上焊接热电偶或粘贴热敏电阻温度片。在本文的实验中,由于试件通有大电流,用接触式的测量法首先要考虑绝缘问题。此外,上述接触式测量法的缺点是只能反映试件局部点的温度情况。为了避免上述问题,实验中采用

了红外热像仪测量温度,热像仪型号为 HWRX-3,它由摄像头、显示器及图像处理系统等部分组成,其速度为 25 场/秒。利用热像仪,便可较精确地测出整个试件的温度场,这为研究试件的温度场是否均匀提供了可靠的数据。

3.3 升温实验结果

为了研究不同加热率的情况,实验时选用了几种不同截面的试件,且通过调节副边电流大小来控制加热率。图 6 是对 LY12 铝合金试件所得温度-时间曲线。对 LY12 铝合金的实验结果表明,可将加热率在 35~1400 C/s 范围内调节。图 7 是对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢所得升温曲线,其加热率最高可达 4500 C/s。对二种材料的测温结果表明,绝大部分试件的温度场在空间分布较为均匀,在试件缩颈破坏前所测高温点和低温点相对温差小于 5%。少数几个试件由于存在划痕或内部局部缺陷,这些缺陷使得局部电阻加大,使得在加热过程中出现局部热点现象(这种现象常常在温度上升至接近材料屈服温度时最为明显)。

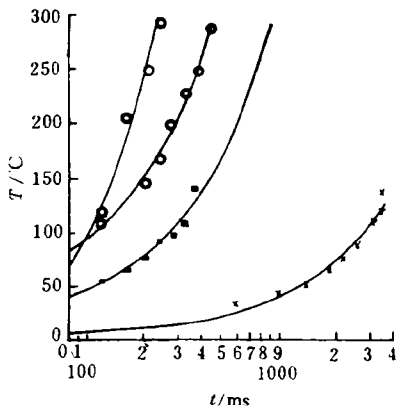


图 6 LY12 铝合金升温曲线

Fig. 6 Temperature history
for LY12 aluminum

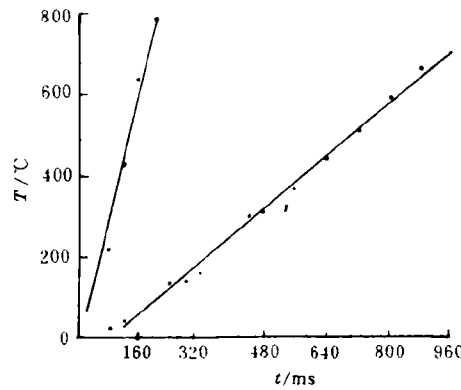


图 7 1Cr18Ni9Ti 不锈钢升温曲线

Fig. 7 Temperature history for
1Cr18Ni9Ti stainless steel

4 结 语

高加热率实验技术对于研究材料在短时热效应下的力学性能具有十分重量的意义,其实验原理和方法不同于常规的静态高温实验。实验结果表明,冲击大电流加热方法具有如下特点:

(1)两种装置均能对试件进行快速近似均匀地加热,而用其它辐射加热法则难以做到这一点。实验时还可在一定范围内任意调节加热率的高低。试件的电阻率愈高,愈容易提高加热率。

(2)RL 装置能对试件产生中等加热率。该装置利用了变压器副边短路原理而产生大电流,通过调节输入电压的方式控制加热率。实验表明,对试件的加热率可在几十~五千 C/s 范围内调节。由于加热率可以方便地调节,因而可用来研究较宽范围内加热率大小对材料力学参量的影响。

(3)RLC 电路加热装置能对试件产生 $10^5 \sim 10^7$ C/s 的超高加热率,加热装置可以和

Hopkinson (SHPB)冲击加载装置配套使用。根据作者对文献的检索,尚未见到国内外采用过这种装置用于研究金属在快速加热下力学性能的报道。只要合理选择试件的截面尺寸,使该装置在放电时间内磁扩散深度大于试件横向尺度,就能使整个试件内部产生一个较均匀的温度场,而文献[1]中的方法只能对试件进行能量在表面区沉积的局部加热,此外,RLC电路原理和装置简单,不需要文献[1]中所述的真空箱等较复杂的附加装置。由于在回路中有一个可调电感来调节电容器放电时间,因而可以在一定范围内调节加热率,且任何导体均可作为试验材料。

(4)电加热法对材料的均匀性有较高的要求,当试件断面尺寸过小时,表面的局部缺陷(例如划痕或试件厚度不均匀)和材料的内部缺陷(如微裂纹)均会使试件局部温度升高。合理地加大试件尺寸便能避免上述问题。

本实验得到了108室领导和陈裕泽研究员的大力支持。张宁、张光军、翁华等承担了本项实验的测温工作,高顺受、戴英敏、张秀华、王敏华、安东等同志为本实验提供了有益的帮助。

参 考 文 献

- 1 Joel L. Dynamic Yield- Strength Determination at Elevated Temperature after Nanosecond Pulse Heating. In: Third SESA International Congress on Experiment Mechanics, 1980. 391~397
- 2 孙承纬. 强激光引起材料和结构破坏机理分析. 见: 1992年激光的热和力学效应学术会议论文集, 上海市嘉定县, 1992. 1~15
- 3 Alan V L 著; 丁光屈译. 短时高温实验. 北京: 国防工业出版社, 1966.

STUDIES ON HIGH HEATING RATES APPARATUS

Liu Zongde^a, Feng Shuping^b, Sun Chenwei^b, Han Mingbao^a

(a. *Department of Mechanics, Peking University, Beijing, 100871, China*)

(b. *Southwest Institute of Fluid Physics, Chengdu, 610003, China*)

ABSTRACT An experimental method to heat a sample of metal rapidly is described in this paper. The RLC apparatus can heat the sample with the heating rates varying from 10^5 to 10^7 °C/sec, and the RL apparatus can produce the heating rates varying from 10^1 to 10^4 °C/sec. The technique of electrical resistance heating is distinct from the conventional techniques of laser heating, induction heating, and hot fluid heating in that it can produce both an uniform temperature distribution and adjustable heating rates on samples.

KEY WORDS large electrical currents, high heating rates, uniform temperature distribution