

三种合金在短时高温下的热软化研究

刘宗德 丰树平^a 张宁^a 韩铭宝^b 孙承纬^a

(华北电力大学 北京 102206)

(a. 中国工程物理研究院流体物理所 成都 610003)

(b. 北京大学 北京 100871)

摘要 利用冲击大电流电阻加热法,研究了三种合金在不同温升率下的弹塑性热软化性能。发现了这三种合金的屈服强度随温升率提高而明显提高的现象;分析了温升率高低对金属再结晶过程的影响;并提出了弹性热软化的估算公式及屈服温度上下限的概念。

关键词 温升率 热软化 再结晶 屈服温度

中图法分类号 O343.6

1 引言

本世纪以来,随着工业和国防科技的不断发展,金属材料在高温下的力学性能的研究日益受到重视。其中,材料在稳态高温下的力学性质得到了最为广泛的研究。常规的高温实验主要有两种,一种是类似于常温下的静态拉伸实验方法(或冲击加载),另一则是恒载下的高温蠕变实验。为了使试件温度均匀,需将试件在恒温炉中保温一定时间后再进行加载实验。大量的实验表明^[1,2],在一定的温度范围内,材料的机械性能显著地受保温时间、加载速度、应变率的影响。例如,对于2024-T4铝合金,当保温时间在2~5400 s之间变化时,所得到材料的抗拉强度在100.8~238 MPa之间变化,屈服强度在77~222 MPa之间变化。对于0.14% C 低碳钢,在450℃的温度下,当应变率在 $0.175\sim 2.8\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 之间变化时,抗拉强度可在250~330 MPa之间变化。

一定预载结构在短时热冲击下的破坏研究,自七十年代以来在国内外一直倍受关注。例如,陈裕泽等人^[3]曾用连续波强激光辐照一定预载下的板条或圆柱壳,可使结构局部区域的材料达几百C/s的温升率。实验发现,温升率的高低能明显影响材料的宏观屈服强度。一般而言,材料的屈服强度随温升率的提高而提高。在实验方法上,用常规的恒温条件下的拉伸实验方法来模拟这种短时热冲击情况是不合适的。而当利用强激光以及其它辐射加热法时,一般只能对试样进行局部加热,通过热传导使温度场达到热平衡。由于热传导过程比较复杂,非均匀温度场所引起的热应力、局部热软化的影响往往也需考虑,这给研究材料的热软化带来了较大的困难。我们的实验对试件采用了冲击大电流加热方法^[4],可以对整个试样趋于均匀地加热,从而消除非均匀温度场所带来的附加影响。实验时可将温升率控制在50~4500 C/s范围内调节。实验共研究了三种一定预载下的合金材

料在不同温升率下的非弹性热软化过程。

2 实验描述

实验时对试件施加一定预载,然后利用 RL 冲击大电流加热装置对试件快速加热^[4]。载荷架由机架,测力传感器,加热电流连接器,充气系统和加载砝码等部分组成。试件断面尺寸大小由变压器容量以及所需的温升率而定。由于实验条件及加工条件的限制,试件厚度均为 0.2 mm,试件的宽度有 6 mm 和 8 mm 两种。

在升温过程中试件中有大电流通过,如用接触式测量法将会遇到一些问题。如为了保证试件与片基的绝缘良好,需性能良好的高温胶和好的贴片质量。当试件截面尺寸较小时,高温胶和片基对试件的增强作用可能会严重影响测试精度。我们的实验采用了非接触式测量法,从而可以避免上述问题。利用 EKTAPRO 动态分析系统测量试件两点位移,该系统摄像速度为 12000 幅/s,通过图像分析处理系统得到试件的位移-时间曲线(实验时同时利用热像仪测量试件的温度场)。

3 实验结果及分析

实验时,同时测量试件在标距长度内的温度场和伸长量。当试件产生非弹性变形时,其总应变可表示为热膨胀所引起的应变、弹性应变、塑性应变、蠕变应变之和。

在不同的预载和温升率下,当不计蠕变的影响时,材料在一定的温度范围内仅产生热膨胀和弹性变形,当温度上升至屈服温度时材料才屈服而产生塑性变形。在一定的预载和温升率下,我们定义使试件产生 0.2% 塑性变形所对应的温度为屈服温度。

对所述的实验,即便材料的弹性模量下降 50%,所引起弹性应变增加也在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 量级内,因而在定义屈服温度时,不考虑弹性热软化的影响,所引起的误差很小。

对于 LY12 铝合金,实验共研究了三种温升率下的情况。图 1a 反映了温升率大小对 LY12 铝合金屈服温度的影响。从图 1a 可以发现,温升率高低对屈服温度的影响十分明

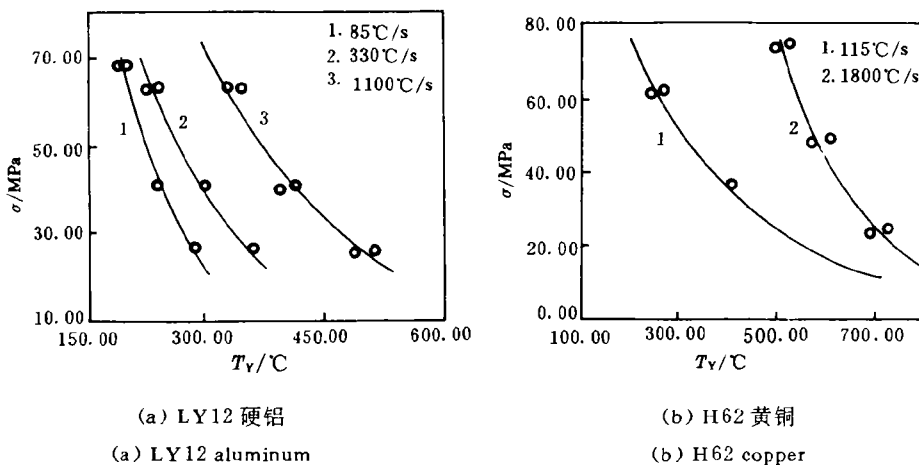
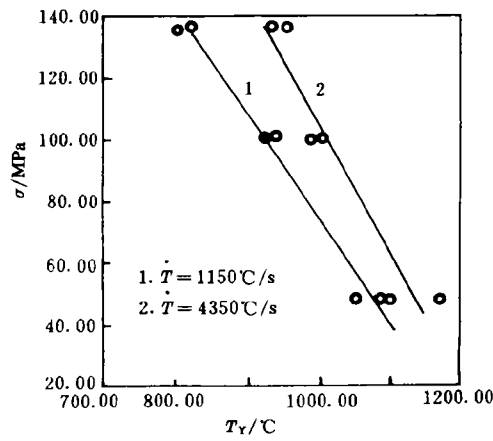


图 1 温升率对屈服温度的影响

Fig. 1 The effects of heating rates on the yield temperature

显,材料的屈服温度随着温升率的增加而增加。LY12 铝合金在高温下的应变强化现象不太明显。

对于 H62 黄铜及 1Cr18Ni9Ti 不锈钢,实验分别研究了两种温升率的情况。实验表明这两种材料的屈服温度也随温升率的提高而明显提高(见图 1b、图 1c)。其中 H62 黄铜在 110~150 C/s 的低温升率下具有十分好的韧性,应变超过 10%时试件仍未缩颈或断裂。而在 1800~2100 C/s 的高温升率下,H62 黄铜的延伸率与低加热速率情况相比大大降低。与 LY12 铝合金所不同的是,预载愈高,H62 黄铜的屈服温度对温升率的大小更敏感,即温度率效应随预载的增加而愈明显。



(c) 1Cr18Ni9Ti 不锈钢

(c) 1Cr18Ni9Ti stainless steel

续图 1 温升率对屈服温度的影响

Fig. 1(continued) The effects of heating rates on the yield temperature

4 金属热软化的理论分析

4.1 弹性热软化分析

材料弹性模量和温度的关系,自本世纪初就有人开始研究,50 年代已取得了较系统的结果^[5]。不同测量方法所得数据有其适用的范围。对于弹性模量的测量,如用静力法则难以避免蠕变的影响,实验测量的弹性模量值都偏低。Koster 用杆或弦的弯曲振动法^[6]测量了 32 种纯金属样品的弹性模量同温度的关系,这种方法测量的是绝热弹性模量,略高于等温弹性模量。他发现铝、锌、银等熔点较低的金属在温度接近熔点时,E 趋近于一个大于零的有限值。

以下由金属物理理论推导弹性模量与温度的关系。材料在外力作用下,其晶格原子间的间距发生改变而产生弹性变形。两个原子间相互作用势能可写为:

$$U = -Ar^{-m} + Br^{-n} \quad (1)$$

式中:右侧第一项表示原子间的吸引力,第二项表示原子间的排斥力,r 为空间原子平均间距,A、B、m、n 均为常数。则原子间的平衡力

$$P = dU/dr = Amr^{-(m+1)} - Bnr^{-(n+1)} \quad (2)$$

若以 r₀ 表示相应于吸引力和排斥力相等(即势能最低)时的原子间距,则

$$P(r_0) = 0 \quad (3)$$

设在外力作用下,原子间距变化为

$$r = r_0 + \Delta r \quad (4)$$

由于弹性变形时 Δr 不大于 0.1r₀,故可将原子间平衡力 P 展开为泰勒级数

$$P = P(r_0) + P'(r_0)\Delta r + \dots + (1/n!)P^{(n)}(r_0)(\Delta r)^n + \dots \quad (5)$$

考虑到绝对弹性变形 Δr 甚微,仅取(5)中第一项,则有

$$P/r_0^2 = [(dP(r_0)/dr)/r_0](\Delta r/r_0) \quad (6)$$

P/r_0^2 和应力因次相同, $\Delta r/r_0$ 为相对变形, 由上式, 令

$$\sigma = P/r_0^2, \varepsilon = \Delta r/r_0 \quad (7)$$

$$E = [dP(r_0)/dr]/r_0 \quad (8)$$

则(6)式可记为

$$\sigma = \varepsilon E \quad (9)$$

式中: E 即为弹性模量。由 $P(r_0)=0$, 得

$$Amr_0^{-(n+1)} = Bnr_0^{-(n+1)} \quad (10)$$

$$\text{则} \quad E = Bn(n-m)r_0^{-(n+3)} \quad (11)$$

令 $Bn(n-m)=C, n+3=\beta$, 因而可近似认为材料的弹性模量与其宏观平均晶格常数有下式的关系:

$$E = Cr_0^{-\beta} \quad (12)$$

上式中, 仅 r_0 与温度有关, 以温度 T 为自变量, 对上式微分得

$$(dE/dT) + \beta Er_0^{-1}(dr_0/dT) = 0 \quad (13)$$

各项除以 E , 则得

$$(E^{-1}dE/dT) + (r_0^{-1}dr_0/dT)\beta = 0 \quad (14)$$

$$\text{令} \quad \alpha(T) = (r_0^{-1}dr_0/dT) \quad (15)$$

α 等效于材料的温度膨胀系数, 则(14)式可变为

$$(E^{-1}dE/dT) = -\alpha(T)\beta \quad (16)$$

利用上式, 便可估算金属的弹性模量随温度的变化。假使材料的温度由 T_0 上升至 T , 则对(16)式两边积分得:

$$E(T) = E(T_0)\exp\left[-\beta \int_{r_0}^T \alpha dt\right] \quad (17)$$

上式表明, 材料的弹性模量 E 与其温度膨胀系数 α 存在确定的函数关系。当 α 已知时, 仅需由实验确定一个材料常数 β 便可得出弹性模量与温度的关系。实验表明, 绝大多数金属的热膨胀系数 α 随温度的增加而有所增加。将玻尔兹曼能量均分定理应用于固体热膨胀理论^[7], 在绝对温度 $T=0$ 时原子动能为零, 热膨胀系数 α 也为零。因而我们假设热膨胀系数 α 与绝对温度有如下关系

$$\alpha(T) = C'T^n \quad (18)$$

式中: T 为绝对温度, C', n 均为常数, 且 $0 < n < 1$ 。将(18)式代入(17)式得

$$E(T) = E(T_0)\exp\left[-C'\beta(T^{n+1} - T_0^{n+1})/(n+1)\right] \quad (19)$$

由(17)式知, α 愈小, 弹性模量下降愈不明显。将文献^[8]所得金属在不同温度下的热膨胀系数值代入(18)式, 便可得到 n 值。对于 LY12 铝合金, 有 $n \approx 0.3$; 而对于 1Cr18Ni9Ti 不锈钢, 有 $n \approx 0.2$ 。图 2 是公式计算与实验结果的比较, 从图中发现, 公式的计算值与实验结果得出的趋势较为接近。

4.2 变温下再结晶动力学分析

由再结晶动力学理论, 再结晶的过程是通过形核和长大来进行。Johnson-Mehl 在相变动力学的基础上得出适合于描述等温下金属再结晶的公式, 它服从四个约束条件, 即任

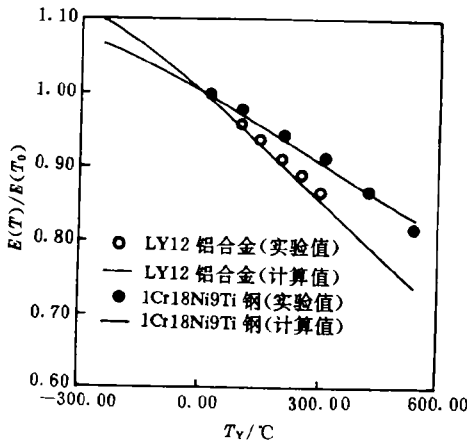


图 2 弹性模量与温度的关系

Fig. 2 Young's modulus at elevated temperatures

- LY12 Aluminum (Test);
- LY12 Aluminum (Calculation);
- 1Cr18Ni9Ti steel (Test);
- 1Cr18Ni9Ti steel (Calculation)

意形核、形核率 N 为常数、晶核长大线速率 G 为常数、形核孕育时间 τ 与再结晶时间相比很小而可忽略等。我们讨论变温的情况,假设温度变化,且形核激活能和长大激活能与预载大小有关(其余假设均与 J-M 公式相同^[9])。设对试件的温升率为常数 k ,且加热前的温度为 T_0 ,则温度与时间的关系为

$$T = T_0(1 + kt) \quad (20)$$

形核率与晶核半径长大线速率在变温下的表达式为

$$N = N_0 \exp[-Q_n/RT_0(1 + kt)] \quad (21)$$

$$G = G_0 \exp[-Q_g/RT_0(1 + kt)] \quad (22)$$

式中: N_0, G_0 为常数, Q_n, Q_g 分别为形核激活能和长大激活能。基于实验结果^[10],假设 Q_n, Q_g 不仅与非弹性变形的程度有关,而且与预载大小有关。设晶核在任意时刻均为球形,且新晶核长大过程中在彼此接触以前的长大线速率是恒定的,任一晶核在 τ 时刻产

生,则当时间增加到 t 时刻时该晶核半径为

$$r = \int_{\tau}^t G_0 \exp[-Q_g/RT_0(1 + kt)] dt \quad (23)$$

经若干数学推导^[10],最后可得

$$X = 1 - \exp[-(S/k^4)I_2] \quad (24)$$

式中: $S = (4/3)\pi(Q_g/RT_0)^4 G_0^3 N_0$; $I_2 = \int_0^t I_1^3 \exp[-1/(\xi + \xi_0)] d\xi$; $\xi = RT_0/Q_g kt = \xi_0 kt$;

$$I_1 = \int_0^{\xi} \exp[-1/(\xi + \xi_0)] d\xi$$

当以不同温升率 k 使温度达到某一值时(即使 $kt = \text{常数}$),积分上限 $\xi_t = \xi_0 kt$ 也为常数。由(24)式,令 $kt = \text{常数}$,则 X 随 k 值增大而单调减小。即温升率愈高,再结晶转变体积百分数愈低。

由金属物理理论和实验结果可知,金属的屈服强度在再结晶温度区间才明显降低,所以需研究温升率对金属再结晶温度区间的影响。由(24)式知,再结晶转化体积比随温升率提高而下降,快速加热时在不同的温度下停留较短,来不及诱发再结晶的形核和长大,故需延迟到更高温度才有可能使再结晶得以完成。

由于对试件所加的预载不同,所以在不同温升率(温度历时)下可能出现以下几种情况:

(1)在金属屈服以前再结晶已基本完成,材料强度降低主要是由再结晶的发生而引起。当温升率足够低而使金属有充裕的时间完成再结晶或预载较低而使屈服温度较高时均可能会出现此种情况。可以预见此种情况下所得屈服温度值和缓慢加热下所得值相差

较小。

(2) 整个加热期间几乎没有再结晶的现象(对应于温升率很高的情况)。此种情况仅使材料在一定温度下产生回复,因而强度下降不明显,所得一定预载下屈服温度值应明显高于缓慢加热条件下所得值。且金相显微组织与加热前相比,其变化主要由塑性变形所引起。

(3) 再结晶在金属屈服以后才发生。由于形核率与变形程度有关,即随非弹性变形的增加而提高。假设金属在屈服以前由于形核率趋于零而无再结晶发生,但当金属在一定温度下屈服后,由于非弹性变形的不断增加而使得形核率也增加,从而导致再结晶速率增加十分显著。当材料未经冷加工处理或已作退火处理时可能会出现此种情况。如果再结晶速率随非弹性应变的增加而加大,则有可能会出现应变软化现象。

综上所述,影响材料显微组织改变及力学性能的因素主要有三个:一是加热速率的高低,二是预载的大小,三是整个温度历时。由于再结晶以一定速率进行,当不同温升率使材料达到某一相同的温度时,其再结晶转变体积 X 以及晶粒大小均与温升率有关,而材料的屈服温度随 X 的增加而降低。

4.3 屈服温度上下限估计

当一定预载下的材料在某一较高温度下产生非弹性变形时,其应变由下式表示

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^c + \varepsilon^T \quad (25)$$

式中: ε^e 代表弹性应变, ε^p 代表塑性应变, ε^c 代表蠕变应变, ε^T 代表热膨胀所引起的应变。从金属塑性加工理论可知,加工硬化可提高材料的屈服强度。形变后的金属可能存在大量点、线、面以及体缺陷,当材料受到短时热冲击时,由于这些缺陷在各个温度下都有自己不同的运动规律,所以材料内部组织的改变可能是十分复杂的。再结晶过程能消除大量畸变的晶格,而使材料的屈服强度急剧降低。假设以不同的温升率使材料达到某一温度值,则温升率愈高,再结晶体积比愈小,所以材料的屈服强度随温升率的提高而提高,但提高值不可能随温升率无限制地增加,而应有一个极限值。或者说,材料的屈服应力对温升率大小应有一个敏感的区域。所以,在相同的加载条件下,可以找到材料在不同温升率下所得屈服温度的上限值和下限值。

我们认为材料屈服强度随温度上升而下降的原因主要有两个:其一是温度升高使材料内能增加(与温度历时无关),而引起材料临界切应力的降低(亦即宏观屈服强度的降低);其二是材料内部显微组织的改变(如回复、再结晶、相变以及材料内部损伤的发展)使得材料屈服强度降低,它与温度历时有关。在一定的预载下,假设以极高的温升率使材料温度升高到一定值而使材料屈服,则可认为温度瞬变前后材料组织结构并未改变而仅内能增加,此时所得材料的屈服温度应为所有加热速率下达到相同温度时的极大值。假设再结晶是引起材料屈服强度降低的另一主要原因(不考虑晶粒大小和相变等的影响),则较慢速加热而使再结晶体积转变百分比趋于 1 时所得的屈服温度为下限值。

基于实验结果,假设弹性模量仅与温度有关,且仅考虑温度和再结晶体积比对材料非弹性热软化的影响(忽略了诸如材料相变、晶粒尺寸大小等因素的影响),因而假设

$$E = E(T) \quad (26)$$

$$\sigma_s = \sigma_s(T, X) \quad (27)$$

对于本文的实验, 预载为已知, 需要求出某一温升率下的屈服温度值。我们假设屈服温度 T_s 仅为再结晶转化体积比 X 以及载荷 σ 的函数, 则令:

$$T_s = F(\sigma, X) \quad (28)$$

假设温升率 k 为常数, 则 T_s 满足:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} T_s = F(\sigma, 0), \quad \lim_{k \rightarrow 0} T_s = F(\sigma, 1) \quad (29)$$

上式表明, 当 $X=0$ 或 $k \rightarrow \infty$ 时 (阶跃温升), 我们得到屈服温度的最大值 $F(\sigma, 0)$, 而当 $X=1$ 或 $k \rightarrow 0$ 时, 我们得到屈服温度的最小值 $F(\sigma, 1)$ 。 $F(\sigma, 0)$ 及 $F(\sigma, 1)$ 不难由实验确定, 从而在任意的温升率下有:

$$F(\sigma, 1) \leq T_s \leq F(\sigma, 0)$$

由以上分析, 仅需有限个实验点, 我们便可得到一定预载下屈服温度与温升率的关系曲线。

5 结 语

通过实验, 我们发现了三种合金的屈服强度随温升率的提高而提高的现象。我们提出估算弹性热软化的公式还需进一步和更多材料的实验结果相比较, 以验证其合理性。对于一定预载下的金属材料, 在高温升率的条件下, 存在一个产生非弹性热软化的温度区间。屈服温度的概念可以用作高温升率下材料屈服强度的标准, 由变温下的再结晶动力学理论, 可以解释金属的屈服温度随温升率的提高而提高的现象, 并可由实验求出其在不同温升率下屈服温度的上下限。

中国工程物理研究院结构力学研究所陈裕泽研究员, 流体物理研究所 108 室领导及戴英敏、安东、王敏华等同志为本研究提供了不少有益的帮助, 深表感谢。

参 考 文 献

- 1 Alan V L 著; 丁光屈译. 短时高温实验. 北京: 国防工业出版社, 1996
- 2 平修二. 金属材料的高温强度. 北京: 科学出版社, 1983
- 3 陈裕泽. 激光辐射结构的热动力失效. 见: 1993 年激光的热和力学效应学术会议论文集, 1993, 127~137
- 4 刘宗德, 等. 冲击大电流高加热率实验装置研究. 爆炸与冲击, 1995, 15(4): 315~321
- 5 Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials. Macmillan Company, 1967
- 6 Garofalo F. The Influence of Temperature on the Elastic Constants of Some Commercial Steel. The 55th Annual Meeting of the Amer Soc for Testing Materials, 1952
- 7 B M 亚沃尔斯基著. 现代物理学手册. 北京: 科学技术出版社, 1992, 533~541
- 8 工程材料手册编委会. 工程材料实用手册. 北京: 中国标准出版社, 1989
- 9 Petel Hassen. Physical Metallurgy. London: Cambridge Univ Press, 1978

STUDIES ON THERMO-SOFTENING OF THREE ALLOY UNDER SHORT TIME ELEVATED TEMPERATURE

Liu Zongde, Feng Shuping^a, Zhang Ning^b,
Han Mingbao^b, Sun Chengwei^a

(North China Electric Power University, Beijing, 102206)

(a. Southwest Institute of Fluid Physics, P. O. Box 523, 610003)

(b. Department of Mechanics, Peking University, Beijing, 100871)

ABSTRACT This paper describes the experiments and theoretical analysis for elastic-plastic thermo-softening of three alloy specimens subjected to rapid resistance heating while being hold to constant uniaxial tensile load. It is found that the yield temperature of the three alloy increases markedly as heating rate increases. The relation between heating rates and recrystallization is discussed. An elastic thermo-softening equation is derived to estimate the Young's modulus of metals under high temperature. A concept of upper and lower bounds of yield temperature is proposed for any metal under various heating rates.

KEY WORDS heating rates, thermo-softening, recrystallization, yield temperature