

# 热冲击下 A3 钢力学性能的研究\*

韩铭宝<sup>a</sup> 刘宗德<sup>b</sup> 刘怡光<sup>a</sup>

(<sup>a</sup> 北京大学力学与工程科学系 北京 100871)

(<sup>b</sup> 华北电力大学动力系 北京 100085)

**摘要** 对一定拉伸预载下的 A3 钢试样进行了快速加热实验,研究了温升率对 A3 钢力学性能的影响。结果表明:温升率对自由热膨胀影响不大;温升率越大,产生相同塑性变形需要的温度越高;温升率明显影响 A3 钢内部变化机制;温升率将决定试样热冲击后的晶粒大小。

**关键词** 温升率 晶粒尺寸 A3 钢

**中图法分类号** O 347.51

受热冲击的结构在国防和民用中经常遇到,特别在航空、航天的构件中尤为突出。从作者所查阅到的文献来看,国内外这方面的研究较少<sup>[1-2]</sup>。金属材料在快速加热时,其力学性能不仅与常态下有较大区别,且和常规加热到高温时表现出的力学性能也有较大的区别,因此探索温升率与力学性能的关系,对国防、民用建设都有重要意义。我们对最常用的 A3 钢在不同温升率下的力学性能进行了研究,探索了温升率与塑性应变的关系,并对不同温升率下的内在变化机理进行了分析。

## 1 实验材料和方法

实验所用材料为普通的 A3 钢,其化学成分为 C 0.14~0.22 Si 0.12~0.30 Mn 0.4~0.65 P ≤ 0.045 S ≤ 0.045 材料未进行热处理。实验所用试样均为长 120mm,直径为 8mm 的棒状试样,其中实验段直径为 7mm,连接处用弧过渡如图 1 由较粗的棒材经机械加工制成。实验在 GLEEBLE 热力实验机上进行,加热方式为电流冲击加热,温升率由设备中程序控制。由于温升率很高,在试样表面和内部就存在轴向的温度梯度,但在均匀的试样横截面上,温度非常接近,故将热电偶丝直接焊接于试样 A-A 断面上,以便较精确测量 A-A 断面上的实际温度,并通过温度反馈来控制 A-A 断面上的温升率。在热冲击前加轴向预应力。应变传感器卡在 A-A 面上,测出 A-A 截面的径向应变。实验数据的输出方式为打印输出。打印时,走纸速度代表温度,横向幅度代表径向应变。

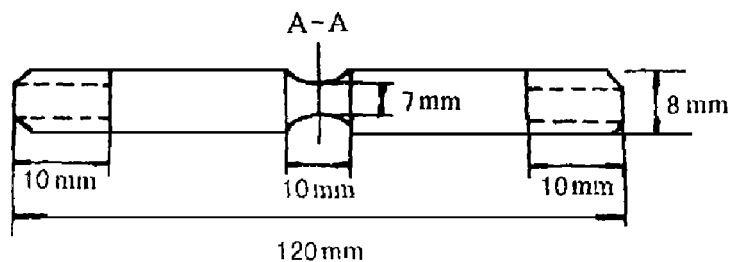


图 1 试样形状及尺寸

Fig. 1 Shape and size of the specimen

\* 国家自然科学基金资助(批准号 19572007)。

韩铭宝:男,1936年1月生,教授。

1997-09-21收到原稿,1998-07-23收到修改稿。

### 2 实验结果及数据处理

试样由同一根材料加工而成, 轴向预应力为  $150\text{MPa}$  在实验机上分制作了温升率为  $T=3, 100, 675^\circ\text{C}/\text{s}$  三组实验, 实验直接得到的不同热冲击速度的温度-径向应变曲线如图 2 在实验过程测出的应变包括弹性应变、塑性应变、热膨胀引起的应变。本材料经实验得出: 泊松比  $\nu$  为  $0.288$  弹性模量  $E$  为  $212\text{GPa}$  热膨胀系数  $\alpha$  为  $1.25 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ 。在  $\sigma = 150\text{MPa}$  时, 径向弹性应变  $\epsilon_e = 2 \times 10^{-4}$ 。在  $T = 100^\circ\text{C}$  时, 热膨胀引起的应变  $\epsilon_T = 12.5 \times 10^{-4}$ 。可见, 温度为  $100^\circ\text{C}$  时, 弹性应变仅是热膨胀引起应变的  $15\%$ , 随温度升高, 这比值还会减小, 故忽略弹性应变。在图 2 中各曲线极值点前 (未进入塑性), 塑性应变为零。因此把实验结果 (图 2) 中的近似直线段看作热膨胀引起应变与温度的线性关系, 其斜率就为热膨胀系数  $\alpha$

A-A 截面的轴向总应变  $\epsilon_x$  轴向塑性应变  $\epsilon_{xp}$  与径向总应变  $\epsilon_r$  径向塑性应变  $\epsilon_{rp}$  热应变  $\epsilon_T$  泊松比  $\nu$  (塑性变形时取  $0.5$ ) 有以下关系

$$\epsilon_{xp} = -\epsilon_{rp} \nu \tag{1}$$

$$\epsilon_{rp} = \epsilon_r - \epsilon_T \tag{2}$$

$$\epsilon_x = \epsilon_{xp} + \epsilon_r \tag{3}$$

由 (1)~ (3) 式得到

$$\epsilon_{xp} = 2\epsilon_r - 2\epsilon_T \tag{4}$$

$$\epsilon_x = 3\epsilon_r - 2\epsilon_T \tag{5}$$

热膨胀引起的应变  $\epsilon_T$  由图 2 中近似直线段延长得到, 图 2 经关系式 (4)、(5) 处理后得到温度-轴向总应变、塑性应变图 (图 3)

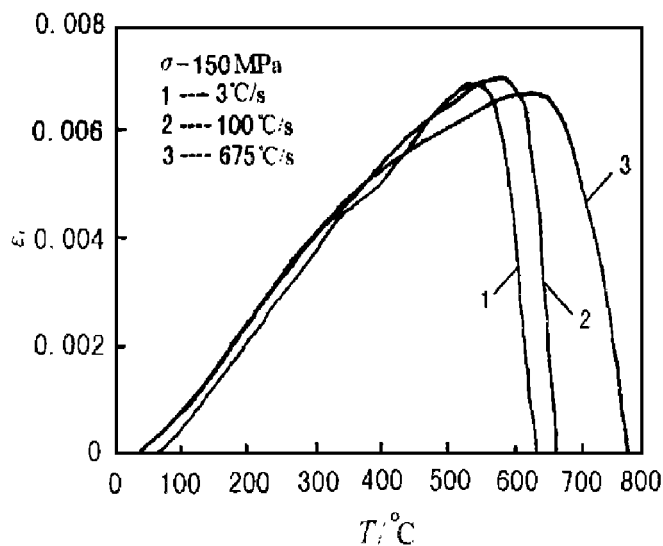


图 2 不同  $T$  下, A-A 截面的温度-径向应变图

Fig. 2 Temperature versus radial strains of A-A section under different heating rates

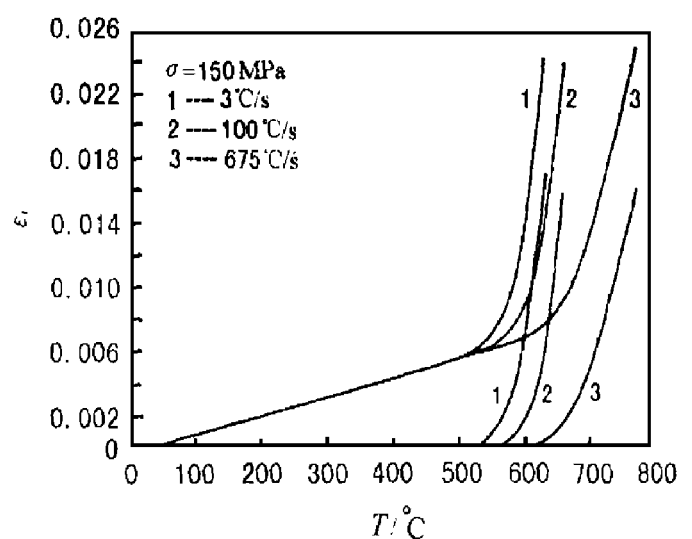


图 3 不同  $T$  下, A-A 截面的温度-轴向总应变、轴向塑性应变图

Fig. 3 Temperature versus axial total strains and plastic strains of A-A section under different heating rates

由图 2 可看出, 在 A-A 截面进入塑性 (直径开始缩小) 之前, 各种温升率下 A-A 截面处的温度-径向应变关系非常接近, 说明  $T$  对自由热膨胀影响不大。从图 3 可见,  $T$  越大, 试样发生塑

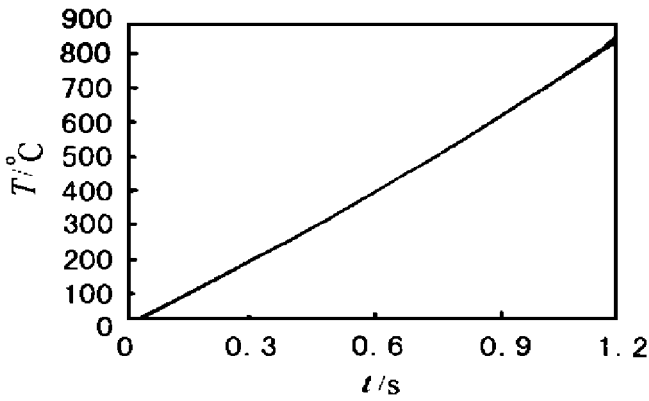


图 4  $T=675^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, A-A 断面上温度随时间的变化

Fig. 4 Temperature of A-A section versus time at heating rates of  $675^{\circ}\text{C}/\text{s}$

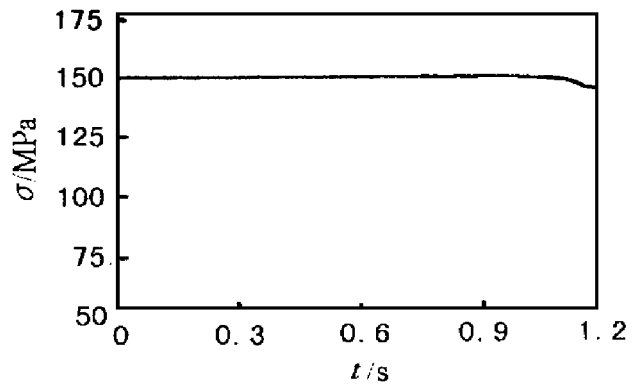


图 5  $T=675^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, A-A 断面上应力随时间的变化

Fig. 5 Axial stress of A-A section versus time at heating rates of  $675^{\circ}\text{C}/\text{s}$

性变形的温度越高,但温度都在通常的相变温度 ( $728^{\circ}\text{C}$ ) 以下: 发生塑性变形后, 相同的温度下,  $T$  越大, 试样的塑性应变越小; 产生相同塑性变形需要的温度随温升率  $T$  提高而增大。从图 4 可见, 在  $675^{\circ}\text{C}/\text{s}$  温升率下, A-A 断面上的温度基本能按线性规律上升。由图 5 可知, 在  $675^{\circ}\text{C}/\text{s}$  的较高温升率下, A-A 截面的应力变化很小, 仅当材料发生较大塑性变形时, 应力略有下降, 最大幅值约 3%。图 6 为在  $675^{\circ}\text{C}/\text{s}$  温升率下, A-A 截面的轴向应变随时间变化曲线, 从该图可发现当加热时间约大于 0.9 时, 材料发生塑性变形, 应变随时间迅速增加。

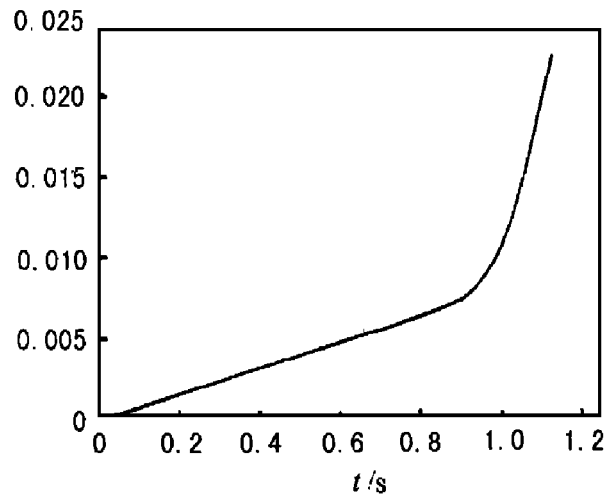


图 6  $T=675^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, A-A 断面上应变随时间的变化

Fig. 6 Axial strains of A-A section versus time at heating rates of  $675^{\circ}\text{C}/\text{s}$

根据三种热冲击速率实验后的试样, 分别作了相应试样 A-A 截面处的径向和轴向显微照片 (图 7(a)~ 图 7(f), 其放大倍数皆为 200



The original metallograph

$T=3^{\circ}\text{C}/\text{s}$

$T=100^{\circ}\text{C}/\text{s}$  axial

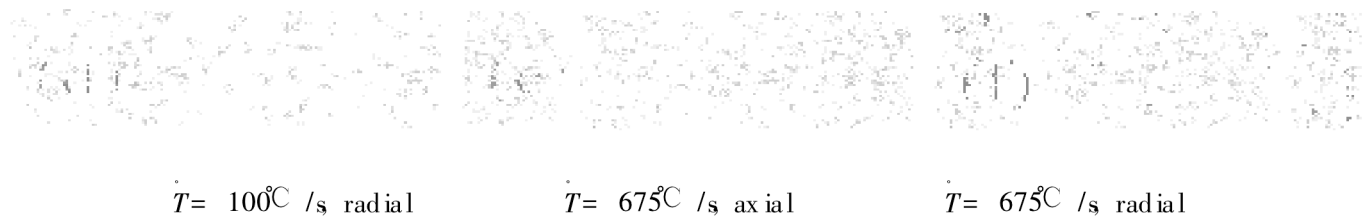


图 7 不同温升率下 A 3 钢的金相图

Fig 7 The metallographic picture of A 3 steel under different heating rates

图 7(a)~ 图 7(f)为 A 3 钢在不同温升率下的金相图。从图 7(a)~ 图 7(f)可见,  $\dot{T}$  为  $3^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, 热冲击后的金相与原始组织接近;  $\dot{T}$  为  $100^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, A-A 截面附近的晶粒在轴向明显地被拉长(图 7(c)), 径向被缩小(图 7(d));  $\dot{T}$  为  $675^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, 晶粒比原始组织要细小得多, 这说明试样材料发生了再结晶。可见,  $\dot{T}$  不同, 会引起晶粒的改变。当预应力  $\sigma = 150\text{M Pa}$  时, 在  $675^{\circ}\text{C}/\text{s}$  的温升率下, 试样达到的最高温度已超过 A 3 钢的相变温度 ( $728^{\circ}\text{C}$ ), 所以图 7(e) 图 7(f) 的细晶粒组织结构特点还应与试样材料的冷却速度有关, 需用扫描电镜对其组织进行观测才能作出进一步的结论。

### 3 讨 论

试样主要是由铁素体和少量的珠光体组成, 通电加热在试样中属于均匀加热, 铁素体和珠光体的热膨胀系数虽不同, 但由于两者在空间呈均匀分布, 试样内部各处的热膨胀接近, 热膨胀过程也就基本上不受阻力, 所以热膨胀量会较快地达到相应温度的平衡态, 基本上不受温升率的影响。试样内部通常存在很多缺陷, 这些缺陷阻止晶界运动、晶粒变形, 是金属抵抗变形的基础; 由位错理论知, 试样中位错的运动受到碳原子的钉扎作用, 这种作用的大小由位错周围的碳原子浓度决定; 温度会影响试样内部的回复过程; 晶粒长大也与温度密切相关。在发生塑性变形前, 试样基本上是热膨胀, 主要是晶粒长大过程。但在发生塑性变形后, 不同的温升率将带来不同缺陷密度、位错钉扎力、回复程度、晶粒长大的耦合, 所以使其 A 3 钢在经受热冲击时的变形过程、试样断裂时的瞬时温度、晶粒也不同。

#### 3.1 温升率对金属内部微结构变化的影响

对 A 3 钢试样, 其晶粒尺寸随温度的增加而增大。如果温升率较小, 则整个加热期间有充裕时间使晶粒达到相应温度的平衡尺寸, 反之, 只有较少时间使小晶体长大, 而不能达到相应温度下晶粒的平衡尺寸。因此, 不同的温升率将带来不同的晶粒长大量。

用  $Q$  表示激活能,  $R$  表示气体常数,  $C_0$  表示一常数。在一定温度  $T$  时, 静态回复程度  $B$  与时间  $t$  的关系<sup>[31]</sup>为:  $B = C_0 t e^{-Q/RT}$

在温升率为  $\dot{T}$ , 发生动态回复时, 在每一温度停留的时间为  $1/\dot{T}$ , 完成的回复程度为  $B =$

$C_0 e^{-Q/RT}$ 。从常温 ( $25^\circ\text{C}$ ) 热冲击到温度  $T$  时, 总的回复度为

$$B_T = \int_{25}^T [C_0 e^{-Q/RT}] dT$$

令  $f(T) = \int C_0 e^{-Q/RT} dT$ , 其中  $f(T)$  是增函数。则

$$B_T = [f(T) - f(25)] / T \quad (5)$$

试样中碳原子半径与基体原子 (铁原子) 半径不同, 碳原子与位错间存在相互作用能, 位错运动时, 将受到碳原子的钉扎力。当从常温热冲击到某一温度  $T$  时, 如果温升率  $\dot{T}$  大, 则升温时间小于碳原子扩散的典型时间 (位错周围碳原子浓度要靠扩散来改变), 导致位错周围的碳原子浓度变化不多, 大于热平衡分布时的浓度, 位错的运动就会受到比热平衡时更大的阻力。用  $F_N$  表示钉扎力, 则有

$$F_N = F_N(T) \quad (6)$$

$F_N(T)$  为增函数。用  $K$ 、 $D_0$  表示两常数,  $Q_D$  表示扩散激活能, 在某一温度  $T$  时, 原子扩散距离  $X$  与时间  $t$  的关系<sup>[4]</sup>为

$$X^2 = D_0 t \exp(-Q_D/KT) \quad (7)$$

和 (6) 类似地推出, 从常温 ( $25^\circ\text{C}$ ) 热冲击到温度  $T$  时, 原子扩散距离  $X$  与  $T$  有以下关系

$$X^2 = [X(T) - X(25)] / T \quad (8)$$

其中:  $X(T) = \int D_0 \exp(-Q_D/KT) dT$  为一增函数,  $T$  对缺陷密度的影响分析, 需结合实验进行。

### 3.2 实验中三种温升率下的内部机制分析

当  $\dot{T} = 3^\circ\text{C}/\text{s}$  时, 其金相 (图 7(b)) 和原始组织类似, 金相是等轴化和均匀化的, 晶粒形状径向和纵向相同。此温升率是实验中最小的, 实验时间也最长。在低的温升率下, 会发生以下过程: 由于温升率小, 实验时间长, 钢是良好的热导体, 轴向的热梯度小, A-A 截面附近较长的实验部分都参与变形, 导致 A-A 截面的变形并不剧烈; 随温度缓慢升高, 各截面较均匀地变形, 各处不断地产生、累积缺陷; 由 (8) 式知, 三组实验中, 此种温升率下原子扩散距离最大, 因而缺陷的消失速度也最快; 由 (7) 式知, 此种温升率对应的钉扎力最小, 位错最易移动; 由 (6) 知, 三种温升率中, 此条件下的回复程度最大。因此, 在低的温升率和较高的外载 (约为屈服强度  $\sigma_s$  的 50%) 下, 试样的流动性增强, 在温度和缺陷密度未升到相应状态下的再结晶条件时, 试样的径向变形已达到 25% (由于设备原因, 要事先设定试样停止加热形变量), 停止加热。图 5 在晶粒大小、晶粒形状、成分分布等方面都与原始组织接近, 这说明在材料热冲击过程中几乎没有发生再结晶。

当  $\dot{T} = 100^\circ\text{C}/\text{s}$  时, A-A 截面附近的晶粒在轴向明显地被拉长 (图 6), 径向晶粒直径显著比原始组织小 (图 7(a))。由于温升率  $\dot{T}$  较大, 由 (6) 知, 回复程度较小, 位错消失不快; 由 (7)、(8) 知, 钉扎力较大, 原子扩散距离较短, 因而材料的变形较小 (图 3), 产生新的缺陷较少。并且  $\dot{T}$  增大将使得再结晶临界温度变高。在  $\dot{T} = 100^\circ\text{C}/\text{s}$  时, A-A 截面附近的热梯度已经较大 (热传导时间短, 将引起 A-A 截面的变形相对加快, 而这又会使 A-A 截面同相邻截面的变形梯度增大), 变形主要集中在温度较高的 A-A 较近处, 轴向拉长, 出现缩颈, 在某一缺陷浓度较高处,

产生应力集中, 出现裂纹, 在温度还没有冲过再结晶临界温度时, 试样被拉断, 停止加热。随后出现的快冷 ( $331^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ) 过程保留了拉长后的晶粒形状。故由  $T=100^{\circ}\text{C}/\text{s}$  热冲击后, A-A 截面的金相组织呈图 6 图 7(a) 样。

当  $T=675^{\circ}\text{C}/\text{s}$  时, 快速的温度上升使得 A-A 截面的轴向变形最小 (图 3), 在相应的温度区段内, 缺陷密度的上升量在三种温升率中最小, 但不断产生塑性变形时, 将持续产生新的缺陷; 由 (6)、(7)、(8) 式知, 此种温升率下, 回复程度最小, 原子扩散距离最短, 位错运动的钉扎力最大, 这将使得位错消失最慢; 较大的温升率使得再结晶温度向高温方向移动得较多, 缺陷累积时间相对加长, 缺陷密度相对提高也更多。当温度上升到由缺陷密度和温度耦合控制的再结晶临界温度时, 试样内部积存了很多变形能, 由高缺陷密度带来的大量再结晶核心就会在高变形能的驱动下, 发生强烈快速的动态再结晶。产生均匀分布且细小的晶粒组织, 如图 7(e)、图 7(f)。再结晶后, 缺陷密度大大降低, 钉扎力大大减小, 金属易于流动, 塑性很好, 故 A-A 截面的断口面积在这三组实验中最小。当然再结晶后, 晶粒也有长大过程, 只是由于热冲击速度大, 试样很快被拉断, 晶粒长大不明显。当试样达到的最高温度超过其相变温度时, 其冷却后的组织结构特点还与试样材料的冷却速度有关, 这有待于进一步的理论和实验探讨。

总之, 不同的温升率对受力试样的自由热膨胀影响不大, 不同的温升率就会导致不同的内部组织变化机理, 其相应的塑性变形也不相同。

## 4 结 论

(1) 自由热膨胀基本不受温升率的影响。

(2) 相同外载下, 随温升率提高, A 3 钢发生塑性变形的温度将提高, 相同温度下的变形将减小。

(3) 温升率将强烈影响 A 3 钢试样受热时的各种内部变化机制。外载  $\sigma$  一定时, 温升率较小, 试样断裂时的瞬时温度没有冲过相应的再结晶温度, 就不会发生再结晶, 变形主要表现为晶粒形状的改变; 同样外载  $\sigma$  下, 温升率增大到某一值, 试样断裂时的瞬时温度冲过相应的再结晶温度后, 将会发生强烈动态再结晶, 晶粒变小。

## 参 考 文 献

- 1 Lindholm U S, Chan K S, Bodner S R, et al Constitutive Modeling for Isotropic Materials (Host). Second Annual Status Report, NASA CR-17498Q 1985
- 2 刘宗德. 结构非弹性动力屈曲和材料在快速加热下的力学性能研究: [博士学位论文] 北京大学, 1994
- 3 胡赓祥, 钱苗根. 金属学. 上海: 上海科学技术出版社, 1990
- 4 毛卫民, 赵新兵. 金属的再结晶与晶粒长大. 北京: 冶金工业出版社, 1995

# AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE MECHANICAL BEHAVIOR OF A3 STEEL UNDER RAPID HEATING

H an M ingbao<sup>a</sup>, L iu Zongde<sup>b</sup>, L iu Y iguang<sup>a</sup>

( a *Beijing University, Beijing, 100871*)

( b *the North Electric Power University of China, Beijing, 100085*)

**ABSTRACT** This paper studies the strength function of A 3 steel affected by different heating rates when it was preloaded on the same value. The results show that the heating rates have little effect on free thermal expansion; the bigger the heating rates, the higher the temperatures which lead to the same plastic strain; the heating rates obviously affects A 3 steel's internal function; the heating rates will decide the crystal-size after the sample was rapidly heated.

**KEY WORDS** heating rates, crystal-size, A 3 steel