

置氢 Ti65 钛合金高温流变行为和热加工性能

邵光保¹, 胡 进², 占克勤¹, 席国庆¹, 田 垚², 左 培¹, 邓 磊², 李文彬²

(1. 湖北三环锻造有限公司, 湖北 襄阳 441700; 2. 华中科技大学 材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: Ti65 钛合金具有优良的高温强度、热稳定性与抗蠕变性能, 但其热成形温度高、变形抗力大。热氢处理作为一种钛合金高温增塑工艺, 可以显著降低 Ti65 钛合金高温成形时的变形抗力, 改善其热加工性能。为了研究置氢量对 Ti65 钛合金高温流变行为和热加工性能的影响, 探究 Ti65 钛合金最佳置氢量和成形工艺窗口, 对不同置氢量下的 Ti65 钛合金试样进行热压缩实验。结果表明, 置氢 Ti65 钛合金在 790~940 °C 温度范围内变形时, 最佳置氢量 (质量分数) 为 0.25%, 与未置氢钛合金相比, 峰值应力的降幅约为 66.8%。基于真应力-真应变曲线数据, 建立了 0.25% 置氢量时 Ti65 钛合金的 Arrhenius 本构方程, 以及真应变为 0.2、0.4 和 0.6 条件下的热加工图。研究发现, Ti65 钛合金在 840~880 °C、应变速率大于 0.01 s⁻¹ 区域附近变形时, 出现失稳现象, 随着应变的增大, 失稳区域收缩; 而在 790~840 °C、应变速率为 0.01~1 s⁻¹ 区域内变形时, 具备良好的热加工性能。

关键词: 置氢 Ti65 钛合金; 流变行为; 本构方程; 热加工图; 置氢量

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.08.035

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 08-0253-08

High temperature rheological behavior and hot processing properties on hydrogenated Ti65 titanium alloy

Shao Guangbao¹, Hu Jin², Zhan Kegin¹, Xi Guoqing¹, Tian Zhuang², Zuo Pei¹, Deng Lei², Li Wenbin²

(1. Hubei Tri-Ring Forging Co., Ltd., Xiangyang 441700, China; 2. State Key Laboratory of Material Processing and Die and Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Ti65 titanium alloy has excellent high-temperature strength, hot stability and creep resistance, but its hot forming temperature is high and deformation resistance is large. As a high-temperature plasticizing process of titanium alloy, hot hydrogen treatment can significantly reduce the deformation resistance of Ti65 titanium alloy during high-temperature forming and improve its hot processing properties. Therefore, in order to study the influence of hydrogen content on the high-temperature rheological behavior and hot processing properties of Ti65 titanium alloy and explore the optimal hydrogen content and the forming process windows of Ti65 titanium alloy, hot compression experiments were carried out on Ti65 titanium alloy samples under different hydrogen contents. The results show that when hydrogenated Ti65 titanium alloy is deformed at the temperature range of 790–940 °C, the optimal hydrogen content (mass fraction) is 0.25%, and the peak stress decreases by about 66.8% compared with the non-hydrogenated titanium alloy. Based on the true stress-true strain curve data, the Arrhenius constitutive equation of Ti65 titanium alloy with hydrogen content of 0.25% was established, and the hot processing maps of Ti65 titanium alloy under the conditions of the true strains of 0.2, 0.4 and 0.6 were also established. The research finds that when Ti65 titanium alloy is deformed at the temperature of 840–880 °C and the strain rate of greater than 0.01 s⁻¹, the instability phenomenon occurs, and with increasing of the strain, the unstable region shrinks, while deformed at the temperature of 790–840 °C and the strain rate of 0.01–1 s⁻¹, it has good hot processing properties.

Key words: hydrogenated Ti65 titanium alloy; rheological behavior; constitutive equation; hot processing map; hydrogen content

钛合金因具有高比强度与良好的高温力学性能等, 在航空航天等领域被广泛应用^[1-5]。在航空发动机中, 钛合金所占的比重达到 20%~30%^[6]。为

满足日益提升的航空发动机推重比需求, 钛合金需具备优异的耐高温性能, 目前, 成熟的高温钛合金的推荐使用温度大多为 550~600 °C^[7], Ti65 钛合金是继 Ti55、Ti60 之后研制的新型高温钛合金, 在设计时预期将应用温度提升至 650 °C^[8]。Ti65 钛合金的强度-塑性、蠕变-热稳定性之间匹配良好, 具有较好的综合性能^[9]。然而, 加工性能差一直是限制钛合金应用的重要因素, 高温钛合金热加工时的变

收稿日期: 2023-06-30; 修订日期: 2023-08-15

基金项目: 湖北省重点研发计划 (2020BAB040)

作者简介: 邵光保 (1979-), 男, 工学学士, 高级工程师

E-mail: 13871609838@163.com

形温度高、变形抗力大，导致模具损耗严重，生产成本低昂，因此，提升 Ti65 钛合金热加工性能对于推动其在工程领域的应用具有重要意义。

钛合金热氢处理技术是提高钛合金热加工性能的重要研究方向，向钛合金中添加适量的氢元素，能够降低钛合金高温变形时的流动应力^[10]，降低成形温度，提升应变速率。Zong Y Y 等^[11]向 Ti600 钛合金中加入质量分数约为 0.6% 的氢，使得 Ti600 钛合金的流动应力降低近 70%。Zhang X M 等^[12]研究了氢对 Ti600 合金超塑性的影响，发现氢可以将合金的变形温度降低近 80 ℃，将应变速率提升一个数量级，并以此提高了合金的超塑性。Ma T F 等^[13]研究了氢对 Ti-44Al-6Nb-1Cr-2V 合金热变形行为的影响，发现当氢的质量分数为 0.3% 时，合金的峰值应力降低了 30%。宗影影等^[14]向 Ti-6Al-4V 合金中添加了质量分数为 0.3% 的氢，使得流动应力降低 11.2%，塑性提高 20%。基于热氢处理在提高钛合金热加工性能方面的优势，本文以 Ti65 钛合金为研究对象，通过不同条件下的热压缩实验，研究该合金的最佳置氢量（质量分数，下文同理），构建在最佳置氢量时 Ti65 钛合金的本构方程和热加工图，确定合适的热加工窗口。

1 材料与实验

实验使用的 Ti65 钛合金的化学成分如表 1 所示，采用热膨胀法测得 Ti65 钛合金的相变点为 992.8 ℃。

表 1 Ti65 钛合金的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of Ti65 titanium alloy
（%， mass fraction）

Al	Sn	Zr	Mo	Si	Nb	Ta	W	Fe	C	Ti
5.59	3.90	3.48	0.28	0.38	0.29	0.76	0.68	0.05	<0.20	余量

制备置氢 Ti65 钛合金的热压缩试样时，通过线切割在原始棒材（Φ60 mm）同一圆周位置（Φ42 mm）加工得到尺寸为 Φ8 mm×12 mm 的圆柱试样。在热氢处理炉中完成置氢，试样随炉以 10 ℃·min⁻¹ 的速率升温至 750 ℃，在氢气氛围中保温 2 h，以确保置氢稳定均匀，随后随炉冷却；在置氢实验过程中，通过控制氢气的平衡分压以得到置氢量为 0.13%、0.25%、0.34% 和 0.43% 的 4 种置氢试样。

本研究的高温压缩实验均在 Gleeble-3500 热模

拟实验机上进行，实验过程中试样通过电阻加热以 5 ℃·s⁻¹ 的速率升温至变形温度，保温 5 min 后在不同的应变速率（0.001、0.01、0.1 和 1 s⁻¹）下进行压缩，变形量为 60%，压缩结束后立即水淬。结合相变点测试与微观组织观察，确定不同置氢量 Ti65 钛合金的热压缩温度范围为：未置氢试样为 910~1060 ℃，0.13% 置氢量试样为 850~1000 ℃，0.25% 置氢量试样为 790~940 ℃，0.34% 置氢量试样为 760~910 ℃，0.43% 置氢量试样为 760~910 ℃，变形温度范围覆盖了不同置氢量合金试样的 α+β 两相区和 β 单相区，具有较好的代表性。

2 结果与讨论

2.1 置氢量对 Ti65 钛合金流动应力的影响

图 1 为 Ti65 钛合金在应变速率为 0.01 s⁻¹、不同变形温度下变形时，稳态流动应力随置氢量的变化曲线。从图 1 中可以看出，随着变形温度升高，不同置氢量试样的流动应力均降低；而随着置氢量增加，应力总体呈现先降后升的趋势。图 1 中 970 和 1000 ℃ 这 2 条曲线的应力值随着置氢量增加至 0.25% 而降低；820 和 790 ℃ 两条曲线的应力值随着置氢量由 0.25% 增加至 0.43% 而升高；对于 850、880 和 910 ℃ 这 3 条曲线，应力值随着置氢量增加先下降再上升（图 1 中虚线框示部分），置氢量在 0.25% 附近时，应力值处于最低点，即在 790~940 ℃ 条件下变形时，0.25% 置氢量 Ti65 钛合金的变形抗力最小。

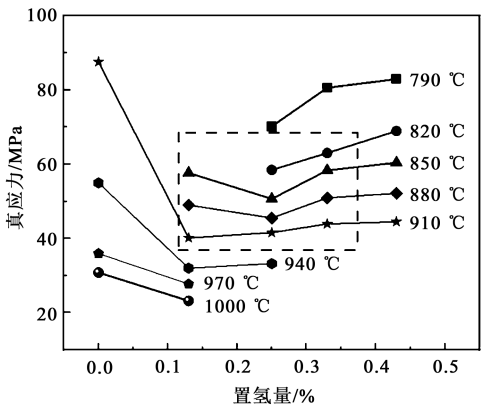


图 1 不同变形温度下 Ti65 钛合金流动应力随置氢量的变化曲线
Fig. 1 Flow stress change curves of Ti65 titanium alloy with hydrogen content under different deformation temperatures

对比未置氢试样与 0.25% 置氢量试样不同变形条件下的峰值应力（图 2），0.25% 置氢量试样在

910 °C、0.1 s⁻¹ (记为 910 °C-0.1 s⁻¹) 变形条件下的峰值应力较相同变形条件下未置氢试样的峰值应力降低了 151 MPa, 降幅近 66.8%, 其应力值大小与 970 °C-0.1 s⁻¹ 以及 910 °C-0.001 s⁻¹ 变形条件下未置氢试样的峰值应力相当。与未置氢试样相比, 0.25% 置氢量 Ti65 钛合金的变形抗力显著降低, 可以在更低的变形温度和更高的应变速率下变形; 相对未置氢合金, 0.25% 的置氢量可以使试样的变形温度降低 60 °C 的同时将应变速率提高两个数量级。

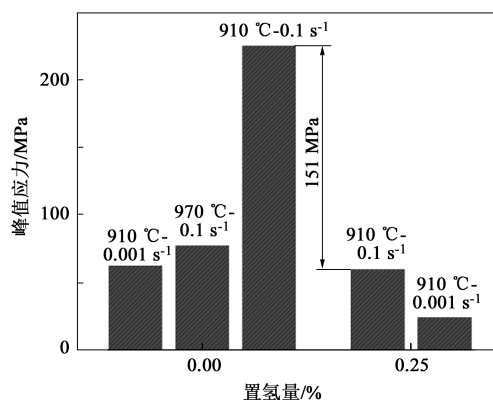


图2 0.25%置氢量试样与未置氢试样的峰值应力对比

Fig. 2 Comparison of peak stresses between 0.25% hydrogen content samples and non-hydrogenated samples

2.2 0.25%置氢量 Ti65 钛合金的高温流变行为

0.25%置氢量 Ti65 钛合金试样的真应力-真应变曲线如图3所示, 当真应变大于 0.8 后, 流动应力会由于试样两端的润滑状态变差而突然增大, 因此, 本文选取真应变在 0.0~0.8 范围内的实验数据用于后续研究。可以看出, 材料的应力值随着变形温度的降低而增大, 随着应变速率的增加而增大。0.25%置氢量试样的相变点位于 850~880 °C 之间, 真应力-真应变曲线在相变点上、下展现出不同的变化趋势。在相变点以上的 β 单相区 (图 3d~图 3f), 当应力到达峰值后, 随着应变的增大, 应力值逐渐趋于稳定; 而在相变点以下的 $\alpha+\beta$ 两相区 (图 3a~图 3c), 当应力达峰值后, 随着应变的增大, 应力呈现下降的趋势, 表现出软化现象。

0.25%置氢量 Ti65 钛合金在两相区变形时, α 相与 β 相发生动态回复, 同时 α 相发生动态再结晶^[15-16], 晶粒得到细化, 随着变形过程进行, 应变促进动态再结晶进程, 表现为软化现象占据主导, 应力值随着应变的增大而下降; 在相变点以上变形时, α 相完全转变为 β 相, 仅有 β 相参与变形, 由于 β 相的层错能较高, 发生动态再结晶难度较大,

软化作用主要为 β 相的动态回复^[11,17], 表现为软化效应与加工硬化相当, 应力值趋于平稳。

2.3 0.25%置氢量 Ti65 钛合金的 Arrhenius 本构方程

国内外学者针对钛合金高温本构方程已有较多研究, 其中, 应用最为广泛的为 Arrhenius 本构方程, 其基本形式为^[18-19]:

$$\dot{\epsilon} = A F(\sigma) \exp[-Q/(RT)] \quad (1)$$

式中: A 为材料系数; Q 为热变形激活能, ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$), Q 值的大小通常反应了材料变形的难易程度; σ 为流动应力, MPa; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s⁻¹; T 为热力学温度, K; R 为标准气体常数, 值为 $8.314 \text{ J} \cdot (\text{K} \cdot \text{mol})^{-1}$ 。 $F(\sigma)$ 为流动应力表达式。不同应力水平下, $F(\sigma)$ 的具体形式如下:

$$F(\sigma) = A_1 \sigma^{n_1}, \alpha\sigma < 0.8 \quad (2)$$

$$F(\sigma) = A_2 \exp(\beta\sigma), \alpha\sigma > 1.2 \quad (3)$$

$$F(\sigma) = A_3 [\sinh(\alpha\sigma)]^n, \text{所有 } \sigma \quad (4)$$

式中: n_1 、 n 、 A_1 、 A_2 、 A_3 、 α 、 β 为与材料相关的常数, $\alpha = \beta/n_1$ 。

Ti65 钛合金在 $\alpha+\beta$ 相区与 β 相区表现出不同的流变行为 (图 3), 因此, 对于 0.25%置氢量 Ti65 钛合金, 应在 $\alpha+\beta$ 两相区与 β 单相区分别建立其本构方程。

对式 (2) ~ 式 (4) 等式两边取对数, 得到:

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - (Q/RT) \quad (5)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma - (Q/RT) \quad (6)$$

$$\ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln [\sinh \alpha \sigma] - (Q/RT) \quad (7)$$

取真应变为 0.7 时对应的应力值建立 0.25%置氢量 Ti65 钛合金的本构方程。首先, 绘制 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma$ 和 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma$ 散点图并进行线性拟合, 如图 4 和图 5 所示, 所得到的直线斜率分别为 n_1 和 β 。再绘制 $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh \alpha \sigma]$ 和 $\ln [\sinh \alpha \sigma] - 1/T$ 散点图并进行线性拟合, 如图 6 和图 7 所示, 根据斜率的值计算热变形激活能 Q 。

引入 Z 参数^[20], 得到式 (8):

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A \ln [\sinh \alpha \sigma]^n \quad (8)$$

将求得的 Q 值代入式 (8) 中即可求得各变形条件下的 Z 值, 对式 (8) 等号两边取对数可得:

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (9)$$

绘制出 $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 散点图并进行线性拟合, 如图 8 所示, 得到的直线截距为 $\ln A$ 的值。

根据上述拟合结果得到 0.25%置氢量 Ti65 钛合金的本构方程为:

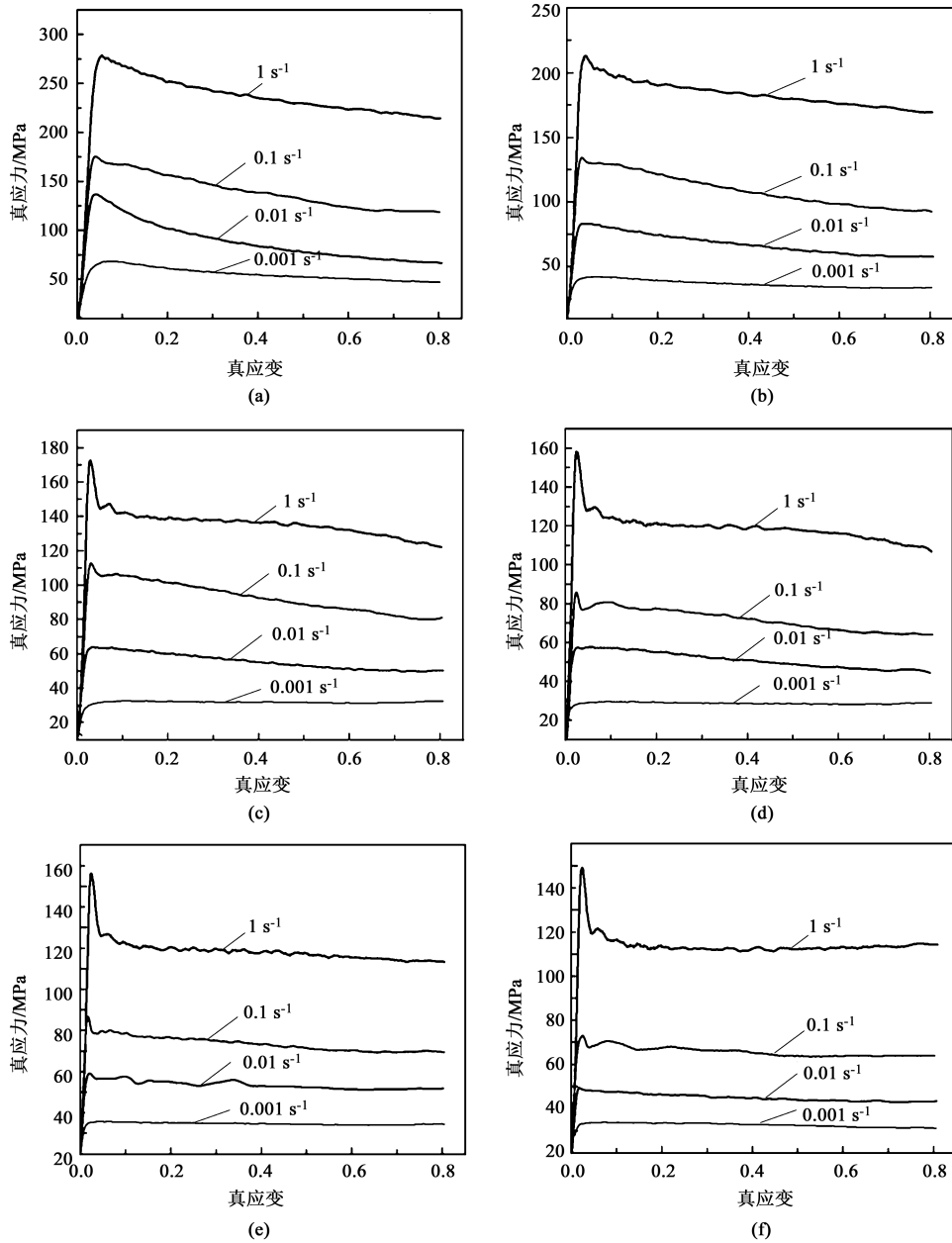


图 3 不同变形条件下 0.25% 置氢量试样的真应力-真应变曲线

(a) 790 °C (b) 820 °C (c) 850 °C (d) 880 °C (e) 910 °C (f) 940 °C

Fig. 3 True stress-true strain curves of 0.25% hydrogen content samples under different deformation conditions

$$\dot{\varepsilon} = e^{29.5708} [\sinh(0.0113\sigma)]^{3.0557} \times \exp(302574.6/RT), \alpha + \beta \text{ 两相区} \quad (10)$$

$$\dot{\varepsilon} = e^{15.0685} [\sinh(0.0168\sigma)]^{3.5733} \times \exp(182558.2/RT), \beta \text{ 单相区} \quad (11)$$

2.4 0.25% 置氢量 Ti65 钛合金的热加工图

热加工图可以反映材料加工时工艺参数对材料微观组织的影响,其基于动态材料模型理论建立,认为试样在热变形过程中消耗的总能量 P 由耗散量 G 和耗散协量 J 两个部分组成,他们的关系如式 (12) 所示。其中,耗散量表示塑性变形所消耗的

能量,耗散协量表示塑性变形时微观组织发生变化造成的能量消耗。

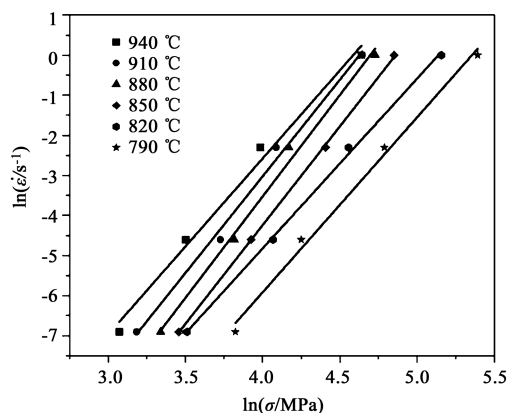
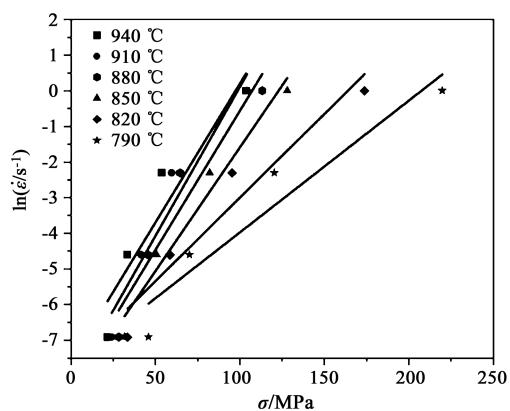
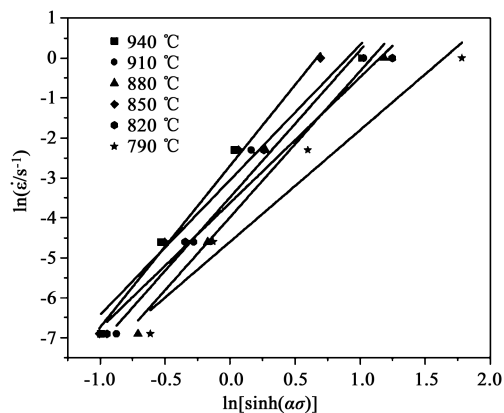
$$P = \sigma \dot{\varepsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\varepsilon}} \sigma d\dot{\varepsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\varepsilon} d\sigma \quad (12)$$

应变速率敏感系数 m 可由一定温度与应变速率下耗散量 G 与耗散协量 J 的比例来表示,其关系式为:

$$m = \frac{\partial J}{\partial G} = \frac{\dot{\varepsilon} \partial \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} = \left(\frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} \right)_{\varepsilon, T} \quad (13)$$

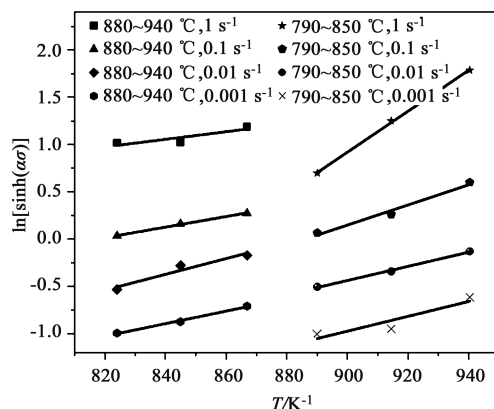
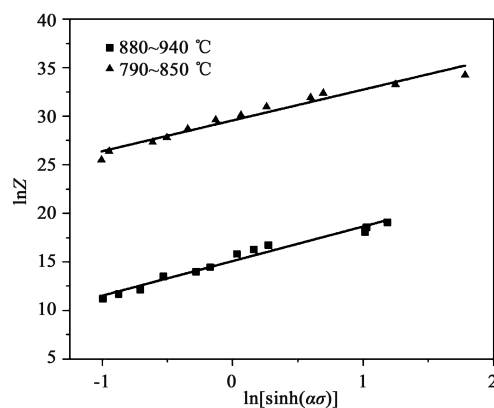
式中: ε 为真应变。

当材料处于稳态流变时, m 的取值范围为 0~1,

图 4 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ 的关系曲线Fig. 4 Relationship curves of $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$ 图 5 $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ 的关系曲线Fig. 5 Relationship curves of $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ 图 6 $\ln \dot{\varepsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系曲线Fig. 6 Relationship curves of $\ln \dot{\varepsilon} - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

$m=0$ 表示材料的变形不发生能量的耗散。 $m=1$ 表示材料处于粘性流体状态, 此时, 耗散协量 J 达到最大值 J_{\max} , 当变形温度和应变量一定时, 材料的应力值受应变速率的影响:

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}^m \quad (14)$$

图 7 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 的关系曲线Fig. 7 Relationship curves of $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 图 8 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系曲线Fig. 8 Relationship curves of $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

式中: K 为材料的强度系数。

由式 (13) 可推得:

$$J = \frac{m}{m+1} \sigma \dot{\varepsilon} \quad (15)$$

当 $m=1$ 时, J 的最大值 J_{\max} 为:

$$J_{\max} = \frac{\sigma \dot{\varepsilon}}{2} \quad (16)$$

功率耗散因子 η 是材料在塑性变形过程中实际耗散协量与最大耗散协量的比, 其值为:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (17)$$

当应变量一定时, 可在 $\dot{\varepsilon}$ 和 T 的二维图上绘制功率耗散图, 其在一定程度上可以反映材料的加工性能, η 值大的区域一般认为加工性能好。为了表示材料在热变形时的失稳情况, 本文选用 Prasad 失稳准则, Prasad 失稳准则是根据最大熵产生原理提出的, 在钛合金的塑性加工中得到广泛的应用, Prasad 准则的表达式为:

$$\xi(\dot{\varepsilon}) = \frac{\partial \ln\left(\frac{m}{m+1}\right)}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m \quad (18)$$

式中： $\xi(\dot{\varepsilon})$ 为失稳因子。

根据 Prasad 失稳准则在应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 和变形温度的二维图上绘制失稳因子 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 图，其值小于 0 的

区域即为塑性失稳区。

在真应变为 0.2、0.4 和 0.6 的条件下绘制 0.25% 置氢量试样的热加工图，将拟合得出的 η 值和 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 值在应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 和变形温度的二维图上绘制等值线图，并将两图叠加，将 $\xi(\dot{\varepsilon}) < 0$ 的区域高亮显示，得到不同置氢量 Ti65 钛合金的热加工图，如图 9 所示。

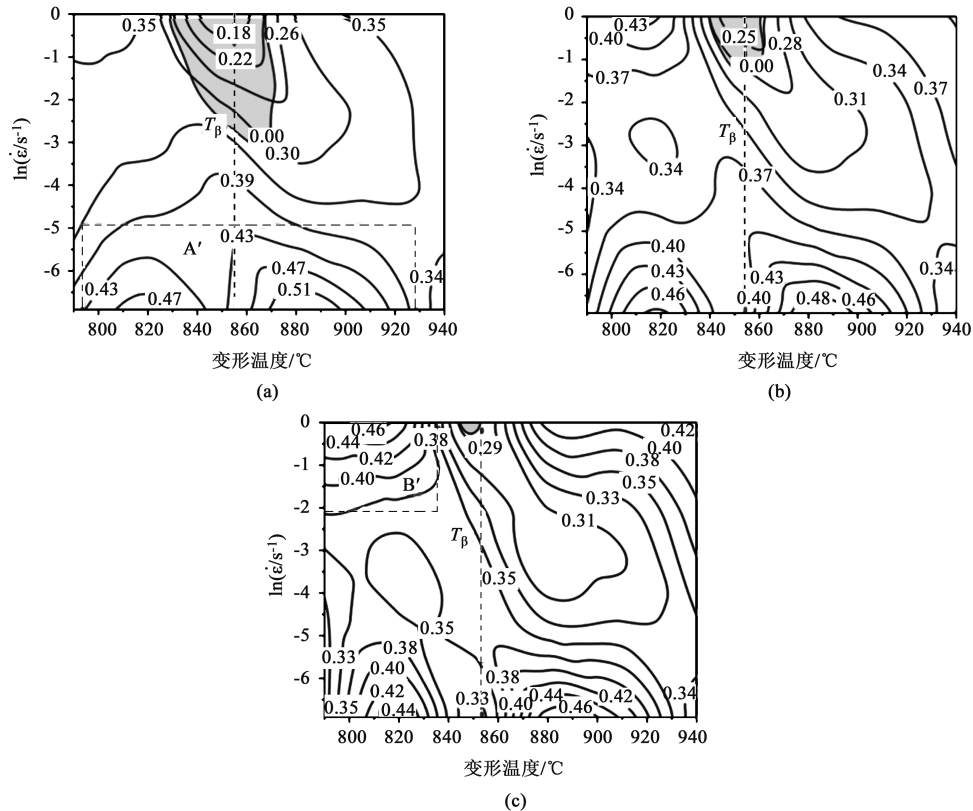


图 9 不同真应变下 0.25% 置氢量 Ti65 钛合金的热加工图

(a) $\varepsilon=0.2$ (b) $\varepsilon=0.4$ (c) $\varepsilon=0.6$

Fig. 9 Hot processing maps of Ti65 titanium alloy with 0.25% hydrogen content under different true strains

从图 9 可以看出，在低应变速率下，功率耗散因子以相变点温度 T_β 为界，相变点附近的功率耗散因子较小，在真应变为 0.2 条件下，加工失稳区主要分布在应变速率大于 0.1 s^{-1} 、温度为 $840 \sim 880 \text{ }^\circ\text{C}$ (T_β 附近) 的区域内；在低应变速率区域 (0.01 s^{-1} 以下)、 $790 \sim 920 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度区间内出现较高的 η 值 (图 9a, 区域 A')；对比图 9 a、图 9b 和图 9c 的失稳区域，可以看到，随着应变增大，失稳区域逐渐收缩，在真应变为 0.6 条件下，失稳区域出现在温度为 $840 \sim 860 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率为 1 s^{-1} 附近的小范围区域内；而在图 9c 中，应变速率为 $0.01 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度为 $790 \sim 840 \text{ }^\circ\text{C}$ 区域内也表现出较高的 η 值 (图 9c, 区域 B')，可以在该条件下稳定变形。

图 10 为不同变形条件 (变形温度-应变速率-变形量) 下的微观组织形貌，从图 10 中可以看出，材料在相变点附近变形时，残余 α 相会在应变的驱动下转变为 β 相，但不同的应变速率下该转变效果并非相同，高应变速率下， α 相到 β 相的转变不充分，残余的 α 相较多，导致变形时产生失稳现象，如图 10a 所示的金属局部流动，而材料在较低应变速率下变形时，由于变形时间充裕，微观组织演变较为充分，使得更多的 α 相可以转变为 β 相，材料变形较为稳定。当变形量较大时，热变形时伴随着大量的 α 相动态再结晶，如图 10b~图 10d 所示， α 相再结晶使得晶粒尺寸得到细化，加工性能得以提升。

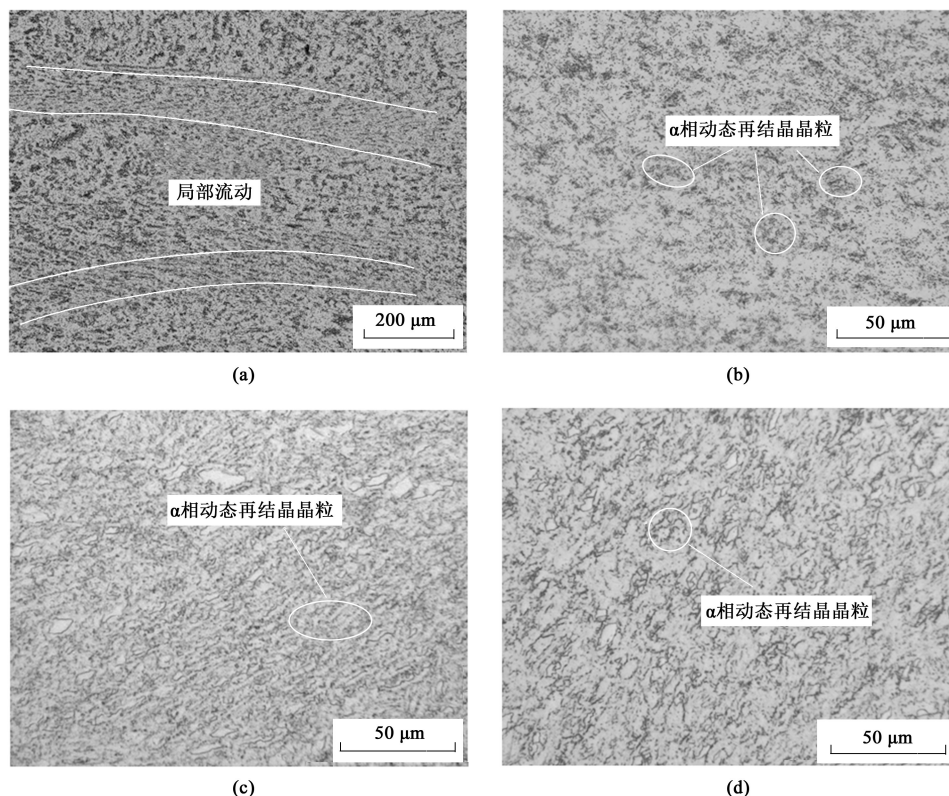


图 10 0.25%置氢量 Ti65 钛合金在不同变形条件下的微观组织

(a) 850 °C - 1 s⁻¹ - 20% (b) 820 °C - 0.001 s⁻¹ - 60% (c) 790 °C - 0.01 s⁻¹ - 60% (d) 820 °C - 0.01 s⁻¹ - 60%

Fig. 10 Microstructures of Ti65 titanium alloy with 0.25% hydrogen content under different deformation conditions

3 结论

(1) 置氢显著降低了 Ti65 钛合金热变形时的流动应力, 随着置氢量的提高, 流动应力呈现先下降后上升的趋势。当在 790~940 °C 条件下变形时, 0.25%置氢量的 Ti65 钛合金具有最低应力值, 相对未置氢合金, 0.25%置氢量 Ti65 钛合金在变形温度降低约 60 °C 的同时应变速率提高近两个数量级。

(2) 0.25%置氢量 Ti65 钛合金在两相区变形时, 由于两相动态回复与 α 相动态再结晶的存在, 软化效应占据主导; 在单相区变形时, α 相完全转变为 β 相, β 相难以发生动态再结晶, 动态回复软化和加工硬化维持平衡状态, 应力几乎不随应变而变化。

(3) 0.25%置氢量 Ti65 钛合金的本构方程为: $\dot{\varepsilon} = e^{29.5708} [\sinh(0.0113\sigma)]^{3.0557} \exp(302574.6/RT)$ (α+β 两相区), $\dot{\varepsilon} = e^{15.0685} [\sinh(0.0168\sigma)]^{3.5733} \times \exp(182558.2/RT)$ (β 单相区)。

(4) 通过对 0.25%置氢量 Ti65 钛合金的热加工图分析得到, 在 840~880 °C、应变速率大于 0.1 s⁻¹

范围内出现失稳现象, 随着应变增大, 失稳区域逐渐收缩; 在真应变为 0.6、温度为 790~840 °C、应变速率为 0.01~1 s⁻¹ 下变形时, 材料也表现出较好的热加工性能。

参考文献:

- [1] 刘世锋, 宋玺, 薛彤, 等. 钛合金及钛基复合材料在航空航天中的应用和发展 [J]. 航空材料学报, 2020, 40 (3): 77-94.
Liu S F, Song X, Xue T, et al. Application and development of titanium alloy and titanium matrix composites in aerospace field [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40 (3): 77-94.
- [2] 洪小英, 李亮亮, 王乐. 高温钛合金航空发动机叶盘锻造变形均匀性研究 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (9): 88-94.
Hong X Y, Li L L, Wang L. Study on forging deformation uniformity of high-temperature titanium alloy aero-engine blade disc [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (9): 88-94.
- [3] 徐全斌, 刘诗园. 国外航空航天领域钛及钛合金牌号及应用 [J]. 世界有色金属, 2022, (16): 96-99.
Xu Q B, Liu S Y. Grades of titanium and titanium alloys developed in western countries and their applications in the aerospace industry [J]. World Nonferrous Metals, 2022, (16): 96-99.
- [4] Zhao Q Y, Sun Q Y, Xin S W, et al. High-strength titanium alloys for aerospace engineering applications: A review on melting-forging process [J]. Materials Science and Engineering: A,

- 2022, 845: 143260.
- [5] Gloria A, Montanari R, Richetta M, et al. Alloys for aeronautic applications: State of the art and perspectives [J]. Metals, 2019, 9 (6): 662.
- [6] 杨冬雨, 付艳艳, 惠松晓, 等. 高强高韧钛合金研究与应用进展 [J]. 稀有金属, 2011, 35 (4): 575-580.
- Yang D Y, Fu Y Y, Hui S X, et al. Research and application of high strength and high toughness titanium alloys [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2011, 35 (4): 575-580.
- [7] Khorev A I, Khorev M A. Titanium alloys: Application and perspectives of development [J]. Titan, 2005, (1): 40-53.
- [8] Zhao Z B, Wang Q J, Liu J R, et al. Effect of heat treatment on the crystallographic orientation evolution in a near- α titanium alloy Ti60 [J]. Acta Materialia, 2017, 131: 305-314.
- [9] 王清江, 刘建荣, 杨锐. 高温钛合金的现状与前景 [J]. 航空材料学报, 2014, 34 (4): 1-26.
- Wang Q J, Liu J R, Yang R. High temperature titanium alloy: Status and perspective [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2014, 34 (4): 1-26.
- [10] Li X F, Jiang J, Wang S, et al. Effect of hydrogen on the microstructure and superplasticity of Ti-55 alloy [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42 (9): 6338-6349.
- [11] Zong Y Y, Huang S S, Feng Y J, et al. Hydrogen induced softening mechanism in near alpha titanium alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012, 541: 60-64.
- [12] Zhang X M, Zhao Y Q, Zeng W D. Effect of hydrogen on the superplasticity of Ti600 alloy [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35 (9): 4354-4360.
- [13] Ma T F, Chen R R, Zheng D S, et al. Hydrogen-induced softening of Ti-44Al-6Nb-1Cr-2V alloy during hot deformation [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42 (12): 8329-8337.
- [14] Zong Y Y, Shan D B, Lyu Y, et al. Effect of 0.3wt%H addition on the high temperature deformation behaviors of Ti-6Al-4V alloy [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32 (16): 3936-3940.
- [15] Han Y F, Zeng W D, Qi Y L, et al. Optimization of forging process parameters of Ti600 alloy by using processing map [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 529: 393-400.
- [16] Ghasemi E, Zarei-Hanzaki A, Farabi E, et al. Flow softening and dynamic recrystallization behavior of BT9 titanium alloy: A study using process map development [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695: 1706-1718.
- [17] Jia W J, Zeng W D, Zhou Y G, et al. High-temperature deformation behavior of Ti60 titanium alloy [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528 (12): 4068-4074.
- [18] Sellars C M, McTegart W J. On the mechanism of hot deformation [J]. Acta Metallurgica, 1966, 14 (9): 1136-1138.
- [19] Sellars C M, Tegart W J M G. Hot workability [J]. International Materials Reviews, 1972, 17 (1): 1-24.
- [20] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel [J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15 (1): 22-32.

欢迎订阅《塑性工程学报》杂志

《塑性工程学报》(Journal of Plasticity Engineering)创刊于1994年,是由中国科学技术协会主管、中国机械工程学学会主办的学术刊物。《塑性工程学报》为全国中文核心期刊,被众多知名数据库收录:中文核心期刊要目总览(北大)、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊(核心库)、中国科技期刊引证报告统计源核心期刊、中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊)、中国学术期刊文摘数据库(核心版,CSAD-C)、中国学术期刊综合评价数据库、美国化学文摘CA、美国剑桥科学文摘材料信息(CSA:MI)、Scopus数据库、日本科学技术振兴机构中国文献数据库等。本刊主要报道与塑性成形领域及其交叉学科相关的前沿性、创新性的基础理论研究及工程技术应用等优秀科研成果。

本刊宗旨:

活跃本专业学术思想,提高本专业学术理论,强化本专业学术交流,为不断提高我国塑性工程基础水平,确立我国塑性工程界在世界科技阵容中的地位而服务。

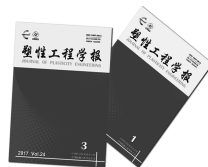
读者对象:

本刊适用于从事与材料塑性成形理论研究、科研、生产、设计等相关的高校师生、科研人员及专业技术人员阅读。

本刊订阅方式

1. 全国各地邮局均可直接订阅
本刊为月刊,大16开本,每月末出版
邮发代号: 80-353
国际标准刊号: ISSN 1007-2012
国内统一刊号: CN 11-3449/TG
国内定价: 40.00元/册
2. 逾期未定上者,可与编辑部联系订阅
汇款地址: 北京市海淀区学清路18号
收款人: 《塑性工程学报》编辑部
联系人: 薛老师
联系电话/传真: 010-62912592
电子邮箱: sxgxcb@263.net

欢迎投稿, 网址: <http://sxgc.cbpt.cnki.net/>



欢迎关注微信公众号