

摩擦效应和温度效应对 SP700 钛合金热压缩流动应力的影响

邱 仟 王克鲁 李 鑫 王 俊 郭 伟 吴泽华
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 在 Gleeble-3800 型热模拟试验机上进行 SP700 钛合金的等温恒应变速率压缩试验,对变形温度为 700~950 ℃、应变速率为 0.001~1 s⁻¹ 的条件下得到的流动应力曲线进行摩擦修正和温度修正,并分析热压缩试验过程中摩擦效应和温度效应对材料流动应力的影响。结果表明,摩擦修正系数受变形温度及应变速率的影响显著,但其受影响的变化规律不明显。此外,摩擦效应和温度效应对 SP700 钛合金热压缩流动应力都有显著影响,并有明显的规律,且在该热变形参数条件下摩擦效应的影响比温度效应要大。

关键词 SP700 钛合金;流动应力;摩擦效应;温度效应

中图分类号 TG146.2 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.01.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Influences of Friction Effect and Temperature Effect on Flow Stress of SP700 Titanium Alloy during Hot Compression

Qiu Qian, Wang Kelu, Li Xin, Wang Jun, Guo Wei, Wu Zehua
(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The SP700 titanium alloy was subjected to an isothermal constant strain rate compression experiment on the Gleeble-3800 thermal simulation testing machine. Perform friction correction and temperature correction on the flow stress curve were conducted under the process parameters of the deformation temperature of 700~950 ℃ and the strain rate of 0.001~1 s⁻¹, and the influence of friction effect and temperature effect on the flow stress of the material during the thermal compression experiment was analyzed. The results indicate that the friction correction coefficient is significantly affected by the deformation temperature and strain rate, of which the change law is not obvious yet. In addition, friction effect and temperature effect have significant effects on the thermal compression flow stress of SP700 titanium alloy with obvious rules, and the effect of friction is greater than that of temperature under the conditions of thermal deformation parameters.

Key Words: SP700 Titanium Alloy, Flow Stress, Friction Effect, Temperature Effect

收稿日期:2021-04-10;修改稿收到日期:2021-05-09
基金项目:江西省自然科学基金重点资助项目(20202ACBL204001);江西省研究生创新专项基金资助项目(YC2020-S539)
第一作者简介:邱仟,男,1997 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1152517738@qq.com
通信作者:王克鲁,男,1968 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:wangkelu@126.com
引用格式:邱仟,王克鲁,李鑫,等. 摩擦效应和温度效应对 SP700 钛合金热压缩流动应力的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(1):59-63.
QIU Q, WANG K L, LI X, et al. Influences of friction effect and temperature effect on flow stress of SP700 titanium alloy during hot compression[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(1):59-63.

较正的腐蚀电位和较低的腐蚀电流,电荷转移电阻最高,且腐蚀速率最小,耐腐蚀性能最好。

参 考 文 献

[1] 吕昭平,雷智锋,黄海龙,等. 高熵合金的变形行为及强化[J]. 金属学报,2018,54(11):1553-1566.

[2] GALI A,GEORGE E P. Tensile properties of high-and medium-entropy alloys[J]. Intermetallics,2013,39:74-78.

[3] 李工,崔鹏,张丽军,等. 高熵合金研究现状[J]. 燕山大学学报,2018,42(2):95-104.

[4] 刘俊鹏. CoCrFeNi 系面心立方高熵合金的低温变形机制及锯齿流变行为[D]. 北京:北京科技大学,2018.

[5] LAPLANCHE G, KOSTKA A, HORST O M, et al. Microstructure evolution and critical stress for twinning in the CrMnFeCoNi high entropy alloy[J]. Acta Mater., 2016, 118: 152.

[6] 王海燕. N 原子对 FeCoCrNiMn 高熵合金组织结构与性能的影响[D]. 福州:福建工程学院,2016.

[7] XIE Y C, CHENG H, TANG Q H, et al. Effects of N addition on microstructure and mechanical properties of CoCrFeNiMn high entropy alloy produced by mechanical alloying and vacuum hot pressing sintering[J]. Intermetallics, 2018, 93: 228-237.

[8] 张长亮,卢一平. 氮元素对 Ti₂ZrHfV_{0.5}Mo_{0.2} 高熵合金组织及力学性能的影响[J]. 材料导报,2019,33(81):329-331.

[9] 赵路路,林乃明,邹娟娟,等. 高熵合金的耐蚀性与耐磨性研究进展[J]. 热加工工艺,2020,41(6):1-7.

[10] NAEEM M, HE H Y, ZHANG F, et al. Cooperative deformation in high-entropy alloys at ultralow temperatures[J]. Science Advances, 2020(6): 4002-4010.

[11] 张鹏. 含 Al 低碳高强钢的冷轧和退火工艺研究[D]. 辽宁鞍山:辽宁科技大学,2012.

[12] 叶庆丰. 激光熔覆 CrMnFeCoNi 体系高熵合金的耐腐蚀性能和力学性能[D]. 上海:上海交通大学,2017.

(编辑:刘晨辉)

流动应力是材料能够合理进行数值模拟、制订成形工艺及选择变形设备的理论依据^[1,2],其中得到的流动应力变化曲线可以反映出材料在热变形过程中其内部位错发生的大致变化^[3]。然而,在实际的等温恒应变速率压缩热模拟试验过程中,热模拟试验机上的模具会与试样接触面产生摩擦,导致试样发生不均匀变形,出现“鼓肚”现象。此外,试样还会产生变形热效应,使得试样局部升温,导致热电偶不能准确记录到试样真实的变形温度。

摩擦效应和温度效应对材料流动应力的有影响,可以通过摩擦修正和温度修正得到材料更为真实的流动应力。马斌等^[4]对 HNi55-7-4-2 镍黄铜合金进行等温热压缩试验并分析热压缩过程中摩擦和温度效应对其流动应力的影响,同时对流动应力曲线进行了修正。王天祥等^[5]发现摩擦效应对 Ti60 合金流动应力具有显著影响,导致流动应力的实测值高于真实值,经过摩擦模型修正的流动应力曲线能够较好接近实际的流动应力曲线。JI G L 等^[6]研究了热压缩过程中摩擦效应和绝热升温效应对轧制 M50NiL 钢流动应力的影响,得到摩擦效应使得试样发生非均匀变形,可显著提高材料的流动应力值,绝热升温效应通过升高试样的变形温度导致材料发生软化。QIAN L Y 等^[7]对 API X100 管线钢热加工的流动应力进行温度修正,修正后的数据非常接近材料在不同变形条件下的真实热变形行为。

本课题研究了摩擦效应和温度效应对不同变形工艺参数下 SP700 钛合金流动应力的影响,并对流动应力进行摩擦修正和温度修正,以得到 SP700 钛合金热压缩真实的流动应力,为其基础研究、热加工工艺参数的优化及有限元数值模拟提供参考。

1 试验材料及方案

试验材料为 SP700 钛合金,其相变温度为 900 ℃。热压缩试样尺寸为 $\phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 。将试样端面粘上厚度均匀的石墨片后在 Gleeble-3800 型热模拟试验机上进行等温恒应变速率压缩试验,试验按照 10 ℃/s 升温至设定的变形温度(700、750、800、850、900 和 950 ℃)后保温 3 min,并以不同的应变速率(0.001、0.01、0.1 和 1 s⁻¹)将试样进行压缩,高度压下率为 60%,最后得到试验过程中 SP700 钛合金的流动应力曲线。

2 试验结果与分析

2.1 摩擦修正

在热压缩试验中,考虑到模具与试样会产生摩擦,试验前在模具与试样的接触面涂上润滑剂,且试样的端

面会粘厚度均匀的石墨片,但这不能完全消除摩擦效应的影响,试样仍会发生不均匀变形导致“鼓肚”现象出现^[8]。图 1 为热压缩试验前后试样形状示意图。其中, h_0 和 r_0 分别为试样的初始高度和半径; h 为试样的高度, r_M 和 r_T 分别为试样的最大半径和顶部半径; ΔH 和 ΔR 分别为热压缩试验前后试样的高度差和试验后试样的顶端半径与最大半径的差值。

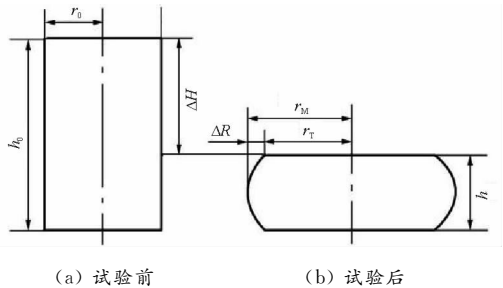


图 1 热压缩试验前后试样形状示意图

Fig.1 Schematic diagram of the specimen before and after the thermal compression experiment

ROEBUCK B 等^[9]提出膨胀系数(B)作为表征摩擦效应对流动应力影响的物理量,当 $1 < B < 1.1$ 时,摩擦效应对流动应力影响较小,可以忽略,无需对流动应力试验值进行摩擦修正;而当 $B \geq 1.1$ 时,可认为摩擦效应对流动应力影响较大,应进行必要的摩擦修正。 B 的表达式如下:

$$B = \frac{hr_M^2}{h_0r_0^2} \quad (1)$$

通过式(1)求得热压缩试验中 SP700 钛合金在不同变形工艺参数条件下的 B ,见表 1。可以看出,SP700 钛合金在不同变形工艺参数条件下的 B 均大于 1.1,这表明试验过程中摩擦效应对 SP700 钛合金的流动应力影响显著,需要对所得到的流动应力进行摩擦修正。

表 1 SP700 钛合金在不同变形条件下的 B 值

Tab.1 Expansion coefficient B of SP700 titanium alloy under different deformation conditions

应变速率/ s ⁻¹	温度/℃					
	700	750	800	850	900	950
0.001	1.198	1.150	1.168	1.194	1.162	1.115
0.01	1.184	1.168	1.180	1.157	1.168	1.152
0.1	1.177	1.163	1.157	1.198	1.152	1.180
1	1.173	1.151	1.182	1.181	1.198	1.198

目前,对于摩擦修正模型最常见的是基于上限理论和圆柱体试样热压缩试验的理论进行分析^[10],并采用有限元法推导出来的摩擦修正系数(k)与试样尺寸之间定量关系来对试验流动应力进行修正的数学模型:

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + \left(\frac{2}{3\sqrt{3}}\right)k\left(\frac{r_0}{h_0}\right)\exp\left(\frac{3\varepsilon}{2}\right)} \quad (2)$$

式中, σ 为经摩擦修正后的流动应力; ε 为应变量; σ_0 为

试验测量的流动应力值。

由式(2)可知,摩擦修正模型中最关键的参数为摩擦修正系数 k ,一般来说 k 值的变化范围为 $0\sim 1$ 。

$$k = \frac{\left(\frac{r}{h}\right) \cdot b}{\left(\frac{4}{\sqrt{3}}\right) - \left(\frac{2b}{3\sqrt{3}}\right)} \quad (3)$$

式中, b 为试样试验后的圆柱度; r 为压缩后试样试验后的平均半径:

$$b = 4 \frac{\Delta R}{r} \cdot \frac{h}{\Delta H} \quad (4)$$

$$r = r_0 \sqrt{\frac{h_0}{h}} \quad (5)$$

式(4)中 $\Delta R = r_M - r_T$,但 r_T 的值较难准确测量得出,因此,将试样“鼓肚”部分轮廓看成圆弧形进行处理, r_T 计算如下^[11]:

$$r_T = \sqrt{3 \frac{h_0}{h} r_0^2 - 2r_M^2} \quad (6)$$

由式(3)~式(6)可得到在不同热压缩试验参数下的 k 。图 2 为 SP700 钛合金在不同应变速率下的 k 与变形温度之间的关系曲线。可以看出, k 值受到应变速率和变形温度改变的影响显著,但其规律变化不明显^[12]。

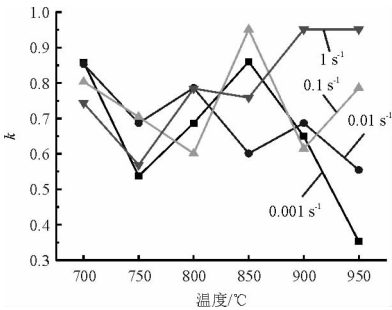


图 2 SP700 钛合金在不同应变速率下摩擦修正系数与变形温度之间的关系

Fig.2 The relationship curves between friction correction coefficient and deformation temperature of SP700 titanium alloy at different strain rates

由式(2)~式(6)计算可得到经过摩擦修正后的各

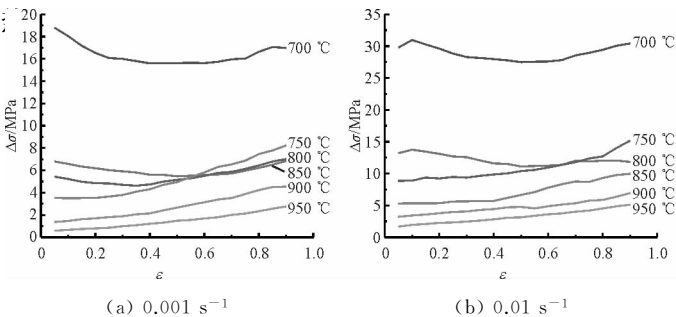


图 4 不同应变速率下 SP700 钛合金摩擦修正前后流动应力的差值

Fig.4 Difference of flow stress of SP700 Ti alloy before and after friction correction at different strain rates

压缩试验参数下的 SP700 钛合金的流动应力。图 3 为 SP700 钛合金在不同变形温度下摩擦修正前后的流动应力曲线对比。可以看出,在所有的变形工艺参数条件下,摩擦修正后的流动应力都要比热压缩试验中得到的流动应力值要低,这是由于在试验过程中的摩擦效应使材料发生不均匀变形,从而使得试验得到的流动应力值要大。此外,经摩擦修正后的流动应力曲线呈现出来的材料加工硬化显著降低。图 4 为不同应变速率下摩擦修正前后流动应力的差值。可以看到,经摩擦修正前后

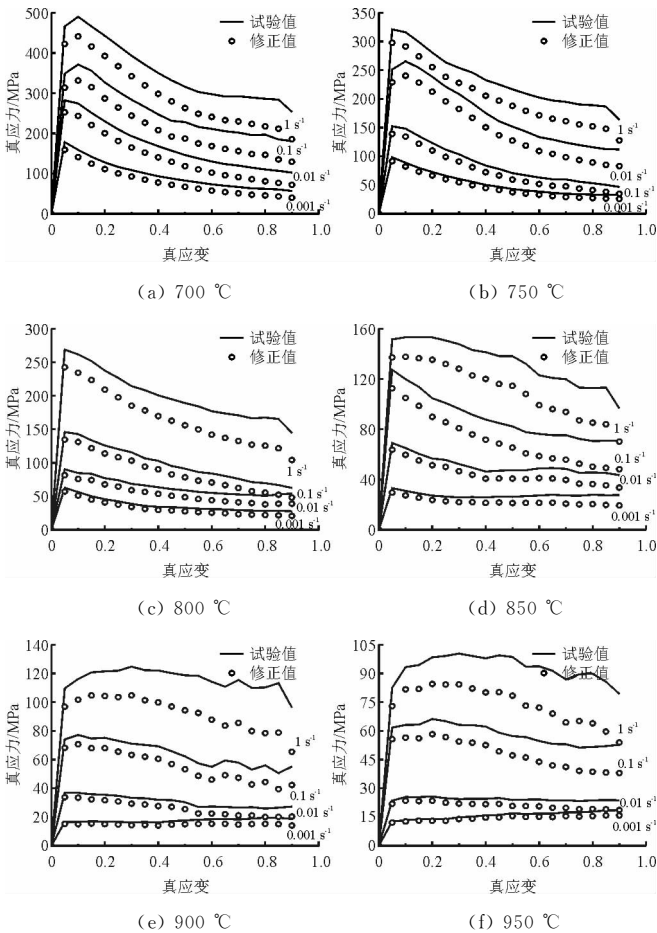
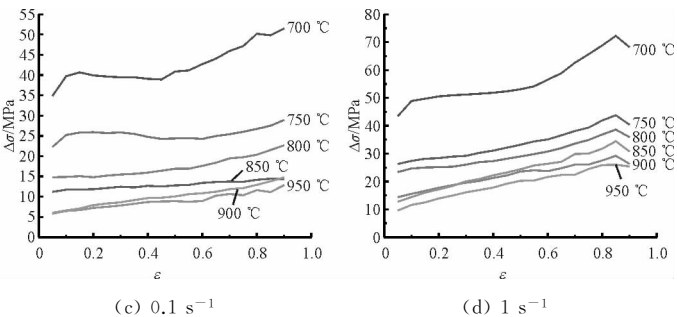


图 3 不同变形温度下 SP700 钛合金摩擦修正前后的流动应力曲线对比

Fig.3 Comparison of flow stress curves of SP700 Ti alloy before and after friction correction at different deformation temperatures



的流动应力差值大多会随着应变的增加而增加。这是由于在试验过程中,随着应变增加,模具与试样之间的接触面积增大,使得摩擦效应对流动应力的影响更加显著。此外,摩擦效应对 SP700 钛合金流动应力的影响也随着变形温度的增加而减小,随应变速率的增加而增加,这与熊运森等^[13]得到的研究结果一致。

2.2 温度修正

在进行热压缩试验时,SP700 钛合金试样的变形温度应保持恒定不变,但在试验中,试样由于不断压缩,试样内部的温度不能向外扩散,导致试样局部温度升高,影响对流动应力的测定,即试验中温度效应会对试样流动应力产生影响。因此,需要对试验所得的流动应力进行温度修正,采用变形热效应产生的温升表达式^[14]:

$$\Delta T = \frac{\eta \beta \int_0^\varepsilon \sigma_0 d\varepsilon}{\rho c} \quad (7)$$

式中, η 为热转化效率,一般取 0.95; β 为绝热因子,取值范围见下式^[15]; ρ 为材料密度,试验中取 4.44 g/cm³; c 为比热容,取 0.537 J/(g·K)。

$$\beta = \begin{cases} 0 & (\dot{\varepsilon} \leq 0.001 \text{ s}^{-1}) \\ 0.316 \lg \dot{\varepsilon} + 0.95 & (0.001 \text{ s}^{-1} < \dot{\varepsilon} < 1 \text{ s}^{-1}) \\ 0.95 & (\dot{\varepsilon} \geq 1 \text{ s}^{-1}) \end{cases} \quad (8)$$

由温度效应引起的流动应力值 $\Delta\sigma$ 为^[16]:

$$\Delta\sigma = \left(\frac{\partial \sigma_0}{\partial T_n^{-1}} \right)_{\varepsilon, \dot{\varepsilon}} \cdot \left(\frac{1}{T_n + \Delta T} - \frac{1}{T_n} \right) \quad (9)$$

式中, T_n 为试验设定的变形温度,K。

根据式(7)~式(9)得到 SP700 钛合金经过温度修正后的流动应力。图 5 为 SP700 钛合金在不同变形温度下温度修正前后的流动应力曲线对比。图 6 为 SP700 钛合金不同应变速率下温度修正前后流动应力的差值。结合图 5 和图 6 可知,通过温度修正后的流动应力都要比热压缩试验中得到的流动应力值要低或者相等,且在低应变速率条件下,温度效应对流动应力的影响较小。这是由于温度效应的存在,使得试样内部的

温度要比试验测到的试样外部温度高,而 SP700 钛合金的流动应力随着变形温度的升高而减小,所以经过温度修正的流动应力比试验得到的流动应力值要偏小。而在低应变速率下,材料内部温度能够正常散发,温度效应不容易出现。此外,随着变形温度降低,温度效应对流动应力的影响增大。这可能是由于材料在低温下易发生绝热剪切、塑性流动失稳等现象,导致材料产生较大的变形热效应。这与王天祥等^[17]在对 Ti60 合金

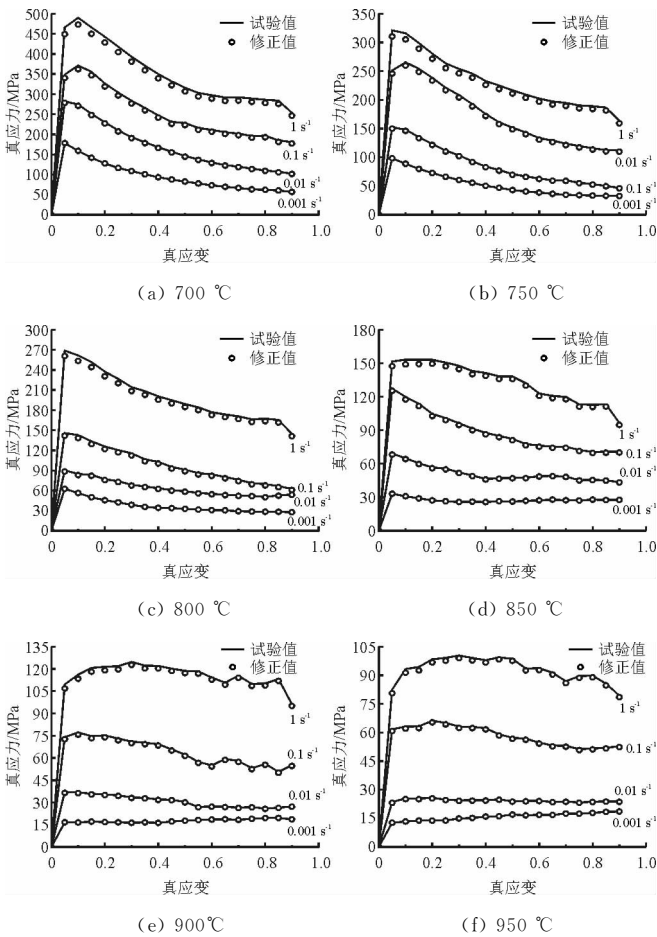


图 5 不同变形温度下温度修正前后 SP700 钛合金的流动应力曲线对比

Fig.5 Comparison of flow stress curves of SP700 Ti alloy before and after temperature correction at different deformation temperatures

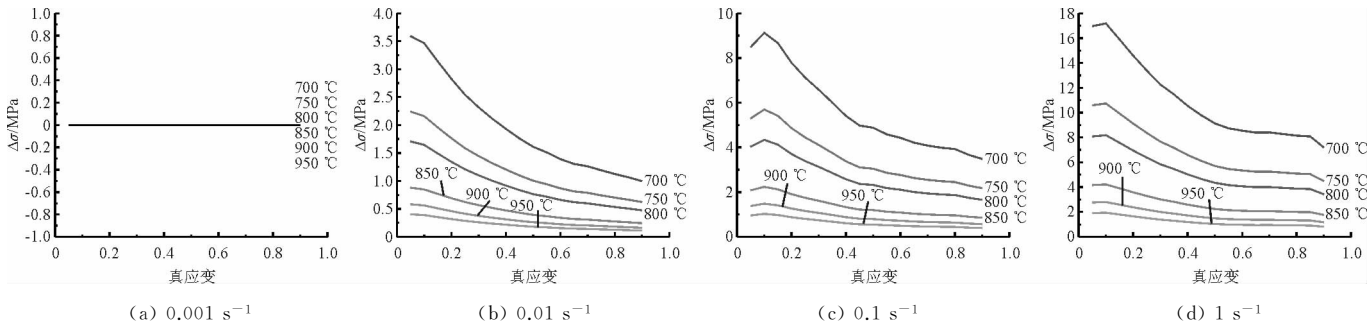


图 6 不同应变速率下温度修正前后 SP700 钛合金的流动应力的差值

Fig.6 Difference of flow stress of SP700 Ti alloy before and after temperature correction at different strain rates

流动应力曲线进行温升效应的研究得到的结论类似。但是,随着应变增大,温度效应对流动应力的影响增大,因为应变逐渐增大,实测流动应力逐渐减小并趋于平稳,而同时试样局部升温,导致测得的流动应力也更小,但应变增加,经温度修正后得到的流动应力差值越小。此外,从图 3~图 6 可知,经过摩擦修正和温度修正后的流动曲线能更准确地反映 SP700 钛合金热压缩变形过程中的流动应力变化,且在试验中摩擦效应对 SP700 钛合金流动应力的影响比温度效应的影响要大。

3 结 论

(1)摩擦修正系数受到应变速率和变形温度改变的影响显著,但其变化规律不明显。

(2)通过摩擦修正后的 SP700 钛合金流动应力比热压缩试验中得到的流动应力值要低,且摩擦效应对 SP700 钛合金流动应力的影响也多随着应变和应变速率的增大而增大,随变形温度的增大而减小。通过温度修正后的 SP700 钛合金流动应力比热压缩试验中得到的流动应力值要低或者相等,且温度效应对 SP700 钛合金流动应力的影响随应变速率的减小而减小,随变形温度的减小而增大,随应变的增大而增大。

(3)摩擦效应对 SP700 钛合金流动应力的影响比温度效应的影响要大。

参 考 文 献

- [1] 丁宗业,贾淑果,宁向梅,等. Cu-Cr-Zr 合金的高温热变形行为[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(8): 1 811-1 817.
- [2] 刘少飞,屈银虎,王崇楼,等. 金属和合金高温变形过程本构模型的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(13): 2 241-2 251, 2 277.
- [3] 肖伯律,黄治治,马凯,等. 非连续增强铝基复合材料的热变形行为研究进展[J]. 金属学报, 2019, 55(1): 59-72.
- [4] 马斌,李平,梁强,等. 同步器齿环用 HNi55-7-4-2 合金高温本构模型构建及应用[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(12): 146-155.
- [5] 王天祥,鲁世强,王克鲁,等. 考虑摩擦效应的 Ti60 合金流变曲线修正[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(7): 780-783.
- [6] JI G L, LI L, QIN F L, et al. Comparative study of phenomenological constitutive equations for an as-rolled M50NiL steel during hot deformation[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695 (10): 2 389-2 399.
- [7] QIAN L Y, FANG G, ZENG P, et al. Correction of flow stress and determination of constitutive constants for hot working of API-X100 pipeline steel[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2015, 132/133(9): 43-51.
- [8] 段园培,黄仲佳,余小鲁,等. 基于摩擦修正的 TB6 合金流变应力行为研究及本构模型建立[J]. 稀有金属, 2014, 38(2): 202-209.
- [9] ROEBUCK B, LORD J D, BROOKS M, et al. Measurement of flow stress in hot axisymmetric compression tests[J]. Materials at High Temperatures, 2006, 23(2): 59-83.
- [10] EBRAHIMI R, NAJAFIZADEH A. A new method for evaluation

of friction in bulk metal forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 152(2): 136-143.

- [11] ZHU R H, LIU Q, LI J F, et al. Flow curve correction and processing map of 2050Al-Li alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(3): 404-414.
- [12] 王志鹏,王涛,李钊,等. 绝热升温与摩擦效应对合金热压缩变形流动应力的影响[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(8): 166-171.
- [13] 熊运森,王茜茜,向伟,等. 航空用 TA15 钛合金热变形行为研究[J]. 塑性工程学报, 2017, 24(3): 184-190.
- [14] LAASRAOUI A, JONAS J J. Prediction of steel flow stresses at high temperatures and strain rates[J]. Metallurgical Transactions, 1991, A22(7): 1 545-1 558.
- [15] MATAYA M C, SACKSCHEWSKY V E. Effect of internal heating during hot compression on the stress-strain behavior of alloy 304L[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 1994, A25 (12): 2 737-2 752.
- [16] 任书杰,罗飞,田野,等. A100 超高强度钢的流变应力曲线修正与唯象本构关系[J]. 材料工程, 2019, 47(6): 144-151.
- [17] 王天祥,鲁世强,王克鲁,等. 考虑摩擦和温升效应的 Ti60 合金流变曲线修正[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(2): 537-543.

(编辑:刘晨辉)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志,是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16 开,邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元,全年 240 元,如须快递,费用另计。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

《特种铸造及有色合金》杂志社



地址:武汉市江岸区江大路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

