

## 基于摩擦修正的单真空 300M 超高强度钢本构模型

张海成<sup>1,2</sup>, 吕春艳<sup>3</sup>, 曾德涛<sup>1</sup>, 周 杰<sup>2</sup>

(1. 中国第二重型机械集团德阳万航模锻有限责任公司, 四川 德阳 618000;

2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044; 3. 四川建筑职业技术学院 基础教学部, 四川 德阳 618000)

**摘要:** 为研究单真空 300M 超高强度钢高温流变行为及制定合理的热加工参数, 采用 Gleeble-3800 热模拟实验机在应变速率为  $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 、温度为  $850 \sim 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  下进行热压缩实验, 研究其流变应力与变形温度、应变速率和变形量等参数的关系, 并考虑了在圆柱试样压缩变形过程中摩擦对流变应力的影响, 建立了基于摩擦修正的 Arrhenius 本构模型。采用热压缩实验测量试样流变应力时, 试样上、下端与实验机压头之间的摩擦不可忽视, 经摩擦修正后可获得更加精确的材料高温流变应力; 材料的流变应力与变形温度呈负相关, 与应变速率呈正相关; 材料的峰值应力对变形温度和应变速率均具有较高的敏感性, 但对应变速率的敏感指数更高。

**关键词:** 300M 超高强度钢; 流变行为; 摩擦修正; 本构模型; 压缩变形

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.06.033

**中图分类号:** TG142.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 06-0245-08

## Constitutive model on single vacuum 300M ultra-high strength steel based on friction correction

Zhang Haicheng<sup>1,2</sup>, Chang Chunyan<sup>3</sup>, Zeng Detao<sup>1</sup>, Zhou Jie<sup>2</sup>

(1. China Erzhong Group Deyang Wahang Die Forging Co., Ltd., Deyang 618000, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

3. Basic Teaching Department, Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, China)

**Abstract:** To study the high temperature rheological behavior of single vacuum 300M ultra-high strength steel and formulate reasonable thermal processing parameters, the thermal compression tests were carried out under the conditions of strain rate of  $0.001 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ , and deformation temperature of  $850 \sim 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the relationship between rheological stress and deformation temperature, strain rate and deformation amount was studied. Then, considering the influence of friction on rheological stress during compression deformation process of cylindrical specimen, an Arrhenius constitutive model based on friction correction was established. The research results show that when the rheological stress of sample is measured by the thermal compression test, the friction between the upper and lower end surfaces of the sample and the indenter of the test machine cannot be ignored. After the experimental results are corrected by friction, the more accurate high-temperature rheological stress of materials is obtained. The material rheological stress is negatively correlated with the deformation temperature and positively correlated with the strain rate. In addition, the peak stress of the material has a high sensitivity to both the deformation temperature and the strain rate, but the sensitivity index to the strain rate is higher.

**Key words:** 300M ultra-high strength steel; rheological behavior; friction correction; constitutive model; compression deformation

航空制造业作为国家战略性新兴产业, 是国防安全的基础, 也体现了一个国家的工业发展先进程度, 对国民经济的发展有着巨大的带动作用。随着我国民用航空工业的飞速发展, 中国已经成为世界上最有活力的航空市场, 飞机将成为继高铁之后的重大

装备领域新的“国家名片”。起落架作为飞机重要的安全功能部件, 需承受飞机在起飞和降落瞬间的巨大冲击载荷, 是飞机的关键承力构件<sup>[1-2]</sup>。为满足新一代航空装备对性能的更高要求, 飞机起落架常采用先进的超高强度钢锻件, 其占据飞机结构重量的  $10\% \sim 20\%$ , 起落架关键构件的技术水平和可靠度对于飞机整体性能和飞行安全具有重要影响<sup>[3-4]</sup>。

300M 钢 (国内牌号为 40CrNi2Si2MoVA) 是一

收稿日期: 2023-01-09; 修订日期: 2023-04-02

基金项目: 四川省重大科技专项项目 (2022ZDZX0040)

作者简介: 张海成 (1988-), 男, 硕士, 高级工程师

E-mail: zhanghaicheng@wh.sinomach-ez.cn

种典型的低合金超高强度钢,通常采用 VIM (真空感应熔炼) + VAR (真空自耗重熔) 的双真空冶炼工艺,开坯锻造后的材料经淬火和回火后的抗拉强度可达 1930~2100 MPa,是目前世界上综合力学性能最好、应用最为广泛的飞机起落架用低合金超高强度钢<sup>[5-6]</sup>。由于 300M 超高强度钢具有优异的可锻性,通过热锻成形工艺可制备复杂的几何形状,被广泛应用于起落架的各种重要承力构件的制造,如起落架外筒、活塞杆等<sup>[7-8]</sup>。为降低生产制造成本,满足民用飞机的低成本需求,国外主流航空材料供应商已采用 EAF (电弧炉) + LF (炉外精炼) + VD (真空脱气) + VAR (真空自耗重熔) 的单真空冶炼工艺路线,研制出  $\Phi 550$  mm 以上的超大规格 300 M 超高强度钢棒材,其综合力学性能与双真空冶炼工艺相当,已成功应用在波音和空客等飞机起落架,能够满足民航客机对起落架长寿命和可靠性的需求。

目前,国内外学者对 300M 超高强度钢的高温热变形行为已展开了一系列研究,例如,石旭<sup>[9]</sup>采用 Arrhenius 方程和 BP 神经网络两种方法,建立了 300M 超高强度钢的热变形本构方程,并结合实验结果分析了热变形工艺参数对 300M 超高强度钢流变应力的影响。结果表明:在应变速率不变的情况下,随着加热温度的升高,300M 超高强度钢的流变应力显著减小;在加热温度不变的情况下,随着应变速率的增大,300M 超高强度钢的流变应力也随之增大。章晓婷等<sup>[10]</sup>研究了 300M 超高强度钢试样在变形温度为 900~1150 °C、应变速率为 0.01~10 s<sup>-1</sup> 条件下的热变形行为。结果表明:在实验温度和应变速率范围内,变形温度和应变速率对 300M 超高强度钢流变应力均有显著的影响,随着变形温度的降低和应变速率的增加,300M 超高强度钢的流动应力增加。祁荣胜等<sup>[11]</sup>采用 Gleeble 热模拟实验机,研究了 300M 超高强度钢的热变形行为和组织演变规律,建立了基于应变补偿的 J-C 本构方程和热加工图,确定了 300M 超高强度钢材料的最佳热加工工艺窗口。结果表明:考虑应变补偿的本构方程,在相同实验条件下计算的流动应力与实验结果吻合度较高,变形温度为 900~1200 °C、应变速率为 0.001~0.1 s<sup>-1</sup> 是 300M 超高强度钢的最佳热加工工艺窗口。黄顺喆等<sup>[12]</sup>采用 Gleeble-3500 热模拟实验机,在 1123~1423 K 温度下,以 0.01~10 s<sup>-1</sup> 的应变速率,对 300M 超高强度钢进行了高温轴向压缩实验,研究其高温流变行为,并基于双曲正弦 Ar-

rrhenius 的方程,建立了 300M 钢高温变形本构模型和发生动态再结晶的临界应变与  $Z$  参数之间的线性关系,并对不同变形条件下的金相组织进行了观察分析。结果表明:300M 超高强度钢在高温变形时主要存在动态回复和动态再结晶两种软化机制,在低温和高应变速率的变形条件下,材料的软化机制以动态回复为主;在高温和低应变速率的变形条件下,材料的软化机制以动态再结晶为主。

大型民用飞机起落架构件的尺寸大、形状复杂,锻造成形过程中的变形道次多、流程长,金属材料在成形过程中需承受复杂的变形,这对材料的微观组织及宏观变形均会造成显著的影响<sup>[13-14]</sup>。300M 超高强度钢作为飞机起落架的主干材料,材料的性能对飞机的安全性和可靠性具有显著影响,迫切需要对其热加工的制造工艺开展深入研究。但目前对基于单真空熔炼工艺的 300M 超高强度钢材料的研究较少,因此,迫切需要开展相关研究工作。

本文采用 Gleeble-3800 等温热压缩实验,对单真空 300M 超高强度钢在热压缩过程中的变形温度和应变速率对流动应力的影响进行分析,并考虑了摩擦对本构模型参数的影响,建立了基于摩擦修正的 Arrhenius 模型,结果能够很好地预测 300M 超高强度钢高温下的流动应力,对单真空 300M 超高强度钢的热加工生产工艺具有一定的指导意义。

## 1 材料与实验

### 1.1 实验材料及组织

热压缩实验材料是由宝钢提供的直径为  $\Phi 400$  mm 的单真空 300M 超高强度钢棒材。材料采用 EAF (电弧炉) + LF (炉外精炼) + VD (真空脱气) 联合冶炼并浇注成电极锭,然后通过 VAR (真空自耗重熔) 的冶炼工艺重熔获得自耗锭,最后锻造成直径为  $\Phi 400$  mm 钢棒,其主要成分为 (% , 质量分数): 0.42 C, 0.86 Cr, 0.82 Mn, 1.85 Ni, 1.63 Si, 0.40 Mo, 0.075 V, 0.02 Cu, 0.0012 S, 0.003 P, 余量为 Fe。单真空冶炼工艺熔炼的铸锭经过充分改锻后,能够获得具有均匀和细小组织的大规格棒材,其平均晶粒尺寸约为 35  $\mu\text{m}$ ,如图 1 所示。棒材经制坯和模锻变形后,锻成大型复杂起落架模锻件,锻件经过预备热处理(正火和回火)和最终热处理(淬火和回火)后的室温力学性能如表 1 所示,可以看出,单真空冶炼工艺的 300M 钢材料具有较好的综合力学性能。

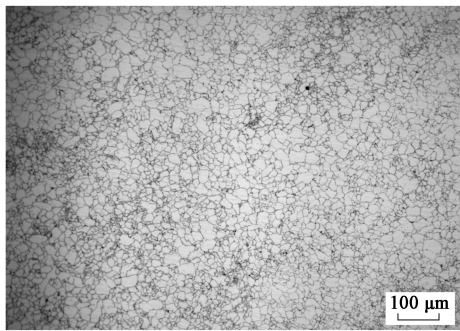


图 1 退火态单真空 300M 超高强度钢的金相组织

Fig.1 Metallographic structure of single vacuum 300M ultra-high strength steel in annealed state

表 1 单真空 300M 超高强度钢的室温力学性能

Table 1 Mechanical properties of single vacuum 300M ultra-high strength steel at room temperature

参数	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %	断面收缩 率/%	AKV 冲击 功/J	断裂韧性/ (MPa · m <sup>1/2</sup> )
数值	2040	1760	11.5	44.5	16	65

1.2 热压缩实验

单真空 300M 超高强度钢的热压缩实验在 Gleeble-3800 热压缩实验机上进行, 试样从  $\Phi 400$  mm 的棒材上切取, 尺寸为  $\Phi 10$  mm $\times$ 15 mm。为保证热压缩实验的试样初始状态一致, 首先将其在 1200  $^{\circ}\text{C}$  下保温 5 min, 然后再降到不同的变形温度 (850、900、950、1000、1050、1100、1150 和 1200  $^{\circ}\text{C}$ ) 保温 5 s, 再以应变速率为 10、1、0.1、0.01 和 0.001  $\text{s}^{-1}$  进行压缩, 变形量为 60%, 压缩变形为厚度 6 mm 的圆饼。具体实验过程如图 2 所示。

2 流动应力-应变曲线的摩擦修正

热压缩实验的目的是通过单向镦粗过程, 获得

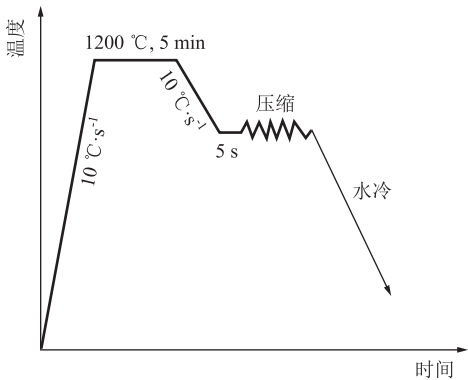


图 2 热压缩实验示意图

Fig.2 Schematic diagram of thermal compression test

材料的单向应力状态, 用以表征材料在特定温度和应变速率条件下的流动应力。但是, 在实际压缩变形过程中, 试样上、下端面与实验机压头接触界面不可避免地存在摩擦, 这会导致试样变形不均匀, 压缩变形后的试样侧面会出现鼓肚, 如图 3b 所示。变形不均匀会导致试样内部的应力状态复杂, 使实验值大于真实值, 因此, 需要对实验值进行摩擦修正。

在图 3 中,  $h_0$  为圆柱试样的初始高度,  $R_0$  为圆柱试样的初始半径,  $h$  为圆柱试样压缩变形后的高度,  $R_T$  为圆柱试样压缩变形后的端面半径,  $R_M$  为圆柱试样压缩变形后的最大鼓肚半径。

目前, 针对如何精确测量金属材料的高温流动应力的难题, 已有国内外学者开展了大量的理论研究工作。文献 [15] ~ 文献 [17] 基于上限法原理, 提出了一种简单的摩擦修正方法, 具体为: 采用圆柱试样压缩实验, 通过测量镦粗后的试样尺寸、鼓肚系数等形状参数, 同时考虑摩擦的影响, 并基于理论推导, 建立了摩擦修正模型, 公式如式 (1) 所示。

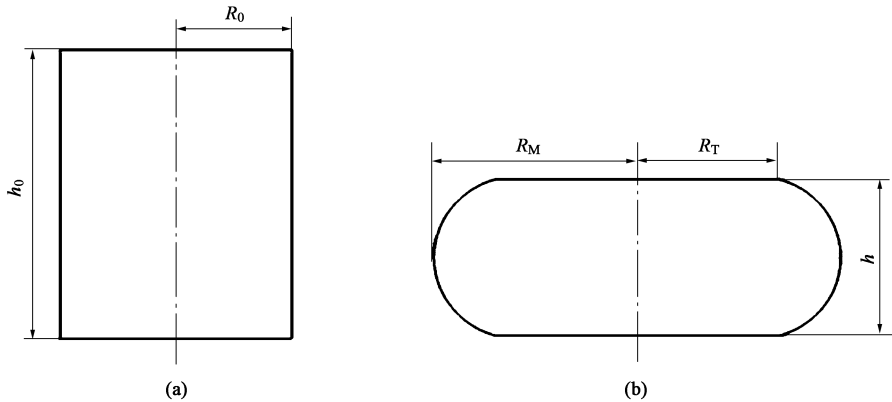


图 3 圆柱试样压缩变形前 (a) 和变形后 (b) 示意图

Fig.3 Schematic diagrams of cylinder samples before (a) and after (b) deformation

$$\frac{\sigma_0}{\sigma} = \frac{8bR_{ave}}{h} \left\{ \left[ \frac{1}{12} + \left( \frac{h}{R_{ave}} \right)^2 \frac{1}{b^2} \right]^{3/2} - \left( \frac{h}{R_{ave}} \right)^3 \frac{1}{b^3} - \frac{me^{-b/2}}{24\sqrt{3}(e^{-b/2} - 1)} \right\} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_0$  为材料压缩变形实验测得的流动应力;  $\sigma$  为经过摩擦修正后的流动应力;  $R_{ave}$  为圆柱试样压缩变形后的平均半径;  $m$  为恒定的摩擦因数, 与圆环试样锻粗前后的形状参数相关;  $b$  为圆柱试样压缩变形后的鼓肚形状参数。

其中,  $m$  和  $b$  可以通过式 (2)、式 (3) 计算:

$$m = \frac{(R_{ave}/h)b}{4/\sqrt{3} - (2b/3\sqrt{3})} \quad (2)$$

$$b = 4 \frac{(R_M - R_T)}{R_{ave}} \cdot \frac{h}{h_0 - h} \quad (3)$$

其中,  $R_{ave}$  和  $R_T$  可以通过式 (4)、式 (5) 计算:

$$R_{ave} = R_0 \sqrt{\frac{h_0}{h}} \quad (4)$$

$$R_T = \sqrt{3 \frac{h_0}{h} R_0^2 - 2R_M^2} \quad (5)$$

因此, 通过测量圆柱试样压缩变形前的初始高度  $h_0$ 、初始半径  $R_0$ 、压缩变形后高度  $h$  和最大鼓肚半径  $R_M$ , 将其代入式 (1)~式 (5) 即可计算得到经过摩擦修正后的流动应力  $\sigma$ 。

在压缩变形过程中, 试样上、下端面与实验机压头接触界面不可避免地存在摩擦, 会导致试样变形不均匀, 导致测得的材料流动应力值大于材料真实应力, 因此, 经摩擦修正后的应力水平应当低于实验测得的数值。从图 4 可知, 经过摩擦修正后的

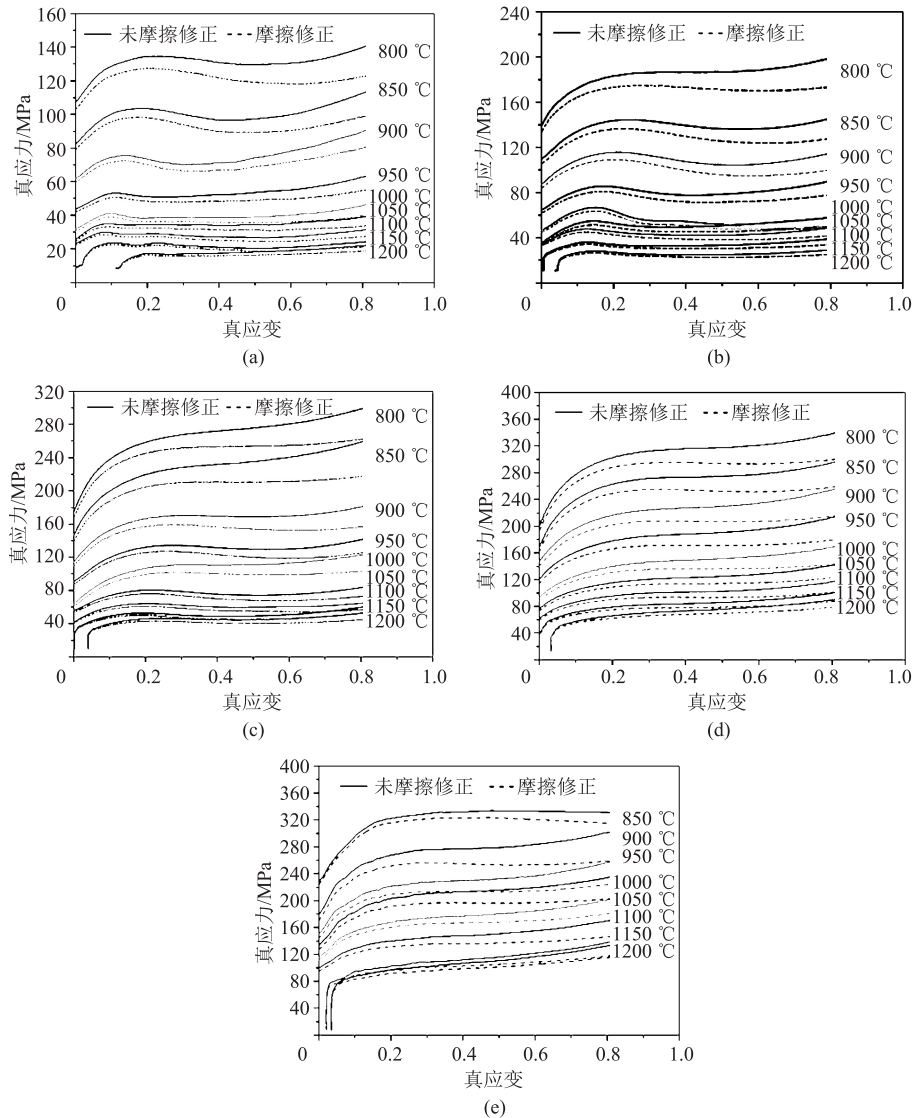


图 4 摩擦修正前后的单真空 300M 超高强度钢在不同应变速率下的真应力-真应变曲线对比图

(a)  $0.001 \text{ s}^{-1}$  (b)  $0.01 \text{ s}^{-1}$  (c)  $0.1 \text{ s}^{-1}$  (d)  $1 \text{ s}^{-1}$  (e)  $10 \text{ s}^{-1}$

Fig. 4 Comparison diagrams of true stress-true strain curves of single vacuum 300M ultra-high strength steel after friction correction under different strain rates



材料应力水平明显低于未修正的实验测得的数值。在不同的工艺参数条件下，摩擦对材料的应力有着不同的影响规律。随着变形温度的增加，在应变速率为  $0.001 \sim 10 \text{ s}^{-1}$  内，摩擦修正前后两者之间的应力差值不断减小。随着应变速率的增加，在温度  $850 \sim 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  内，摩擦修正前后两者之间的应力差值不断增加。在同一变形温度和应变速率条件下，随着变形量的增加，摩擦修正前后两者之间的应力差值不断增加。

3 热变形行为

由图 4 可知，单真空 300M 超高强钢的流动应力对应变速率和变形温度敏感，随应变速率降低和变形温度的升高，材料的流动应力降低较明显。表 2 为经过摩擦修正后得到的单真空 300M 超高强度钢在不同变形条件下的峰值应力  $\sigma_p$ ，可以看出：在相同的变形温度条件下，当应变速率从  $0.001 \text{ s}^{-1}$  增加

表 2 单真空 300M 超高强度钢在不同变形条件下的峰值应力 (MPa)  
Table 2 Peak stresses of 300M ultra-high strength steel under different deformation conditions (MPa)

应变速率/ $\text{s}^{-1}$	变形温度/ $^{\circ}\text{C}$								
	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200
0.001	127.44	102.62	85.44	57.41	42.83	35.89	29.06	23.00	18.75
0.01	174.91	136.56	109.14	81.24	63.59	51.51	44.96	35.66	26.50
0.1	264.51	219.94	159.65	130.53	104.48	76.08	60.76	55.43	47.66
1.0	303.40	262.49	221.54	182.82	146.09	126.57	103.58	91.16	81.01
10	—	323.60	258.73	224.30	205.26	184.42	149.35	120.32	119.91

至  $10 \text{ s}^{-1}$  时，材料的峰值应力增大约  $100 \sim 200 \text{ MPa}$ ；在相同的应变速率条件下，当变形温度从  $800 \text{ }^{\circ}\text{C}$  增加至  $1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ，材料的峰值应力降低约  $100 \sim 200 \text{ MPa}$ 。

金属材料的热变形行为主要与高温变形的加工硬化、动态回复和动态再结晶等行为有关，材料的应力-应变曲线一般有动态回复和动态再结晶两种类型。从图 4a 可以看出，在应变速率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$  的条件下，当温度为  $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时，在压缩变形的初始阶段（真应变约 0.1），由于加工硬化的存在，材料的变形抗力增加至峰值  $42.83 \text{ MPa}$ ，之后由于动态再结晶导致材料内部大量位错消失，而此时由于应变速率较小，虽然随着应变的增加，位错不断增殖，但动态回复作用大于加工硬化作用，导致材料的流动应力下降，当软化和硬化效果达到动态平衡时，曲线表现为动态再结晶型。从图 4e 可以看出，当应变速率为  $10 \text{ s}^{-1}$  时，在任一变形温度条件下，材料的流变曲线峰值不明显，在此条件下的主要软化机制为动态回复。这是由于高的应变速率下金属材料内部的位错密度增加显著，导致流动应力显著增加，此时随着应变的增加，位错增殖带来的加工硬化作用大于动态回复和部分动态再结晶，曲线表现为动态回复型。

4 热变形本构模型的建立

金属构件在高温条件下塑性变形的抗力与温度、应变速率和变形量等工艺参数密切相关，该参数也显著影响着锻件的成形载荷、金属流动和产品质量。国内外学者对金属的高温流变行为展开了大量理论研究，尝试找到一种描述金属高温流变行为的数学模型，用以预测金属材料在塑性变形过程中的变形载荷和金属流动规律。目前，常采用 Sellars C M 与 Mctegart W J<sup>[18]</sup> 提出的双曲正弦 Arrhenius 方程，其表达式为：

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \tag{6}$$

式中： $\dot{\epsilon}$  为应变速率， $\text{s}^{-1}$ ； $\sigma$  为流变应力，MPa，通常取材料流动曲线上的峰值应力； $A$ 、 $\alpha$ 、 $n$  均为与温度无关的材料常数； $T$  为变形温度，K； $Q$  为材料的热激活能， $(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$ ； $R$  为气体常数，一般取  $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ 。

当低应力水平时 ( $\alpha\sigma < 0.8$ )，可以将式 (6) 转换为式 (7)；当高应力水平时 ( $\alpha\sigma > 1.2$ )，可以将式 (6) 转换为式 (8)。

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp(-Q/RT) \quad (7)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta \sigma) \exp(-Q/RT) \quad (8)$$

式中:  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $n_1$ 、 $\beta$  均为与温度无关的材料常数, 其中  $A_1 = A\alpha^{n_1}$ ;  $A_2 = A/2^n$ ;  $\alpha = \beta/n_1$ 。

可采用数学推导方式, 结合经摩擦修正后的峰值应力数据 (表 2), 求解上述未知参数。分别对式 (7) 和式 (8) 的公式两侧取对数, 得到式 (9) 和式 (10):

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - Q/RT \quad (9)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma - Q/RT \quad (10)$$

将表 2 中的峰值应力数值  $\sigma_p$  带入式 (9) 和式 (10) 并进行线性拟合, 分别线性拟合出  $\ln \sigma_p - \ln \dot{\varepsilon}$  和  $\sigma_p - \ln \dot{\varepsilon}$  之间的关系, 如图 5 所示。计算出图 5a 中各条拟合关系的斜率均值, 可以求得材料常数  $n_1 = 6.14029$ , 计算出图 5b 中各条拟合关系的斜率均值, 可以求得材料常数  $\beta = 0.05654 \text{ MPa}^{-1}$ 。因  $\alpha = \beta/n_1$ , 将求解的材料常数  $n_1$  和  $\beta$  代入, 可得到  $\alpha = 0.00921 \text{ MPa}^{-1}$ 。

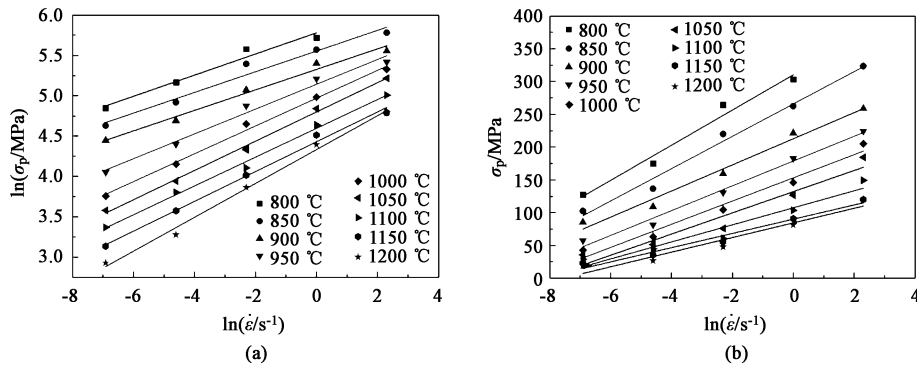


图 5 不同温度下  $\ln \sigma_p - \ln \dot{\varepsilon}$  的关系曲线 (a) 和  $\sigma_p - \ln \dot{\varepsilon}$  的关系曲线 (b)

Fig. 5 Relationship curves of  $\ln \sigma_p - \ln \dot{\varepsilon}$  (a) and  $\sigma_p - \ln \dot{\varepsilon}$  (b) at different temperatures

为求解单真空 300M 超高强度钢的变形激活能  $Q$ , 需对式 (6) 两侧同时取对数, 得到式 (11):

$$\ln \dot{\varepsilon} = n \ln [\sinh(\alpha \sigma)] + \ln A - Q/RT \quad (11)$$

将表 2 中的峰值应力数值带入式 (11), 线性拟合  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \ln \dot{\varepsilon}$  和  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - 1/T$  之间

的关系, 如图 6 所示。计算出图 6a 中各拟合关系的斜率均值, 可以求得材料常数  $n = 4.43564$ , 计算图 6b 中各拟合关系的斜率均值, 可以求得斜率  $k = 9237.44126$ 。因  $Q = nRk$ , 将求解的材料常数  $n$ 、斜率  $k$  和气体常数  $R$  代入, 则单真空 300M 超高强度钢的热变形激活能  $Q = 340.658 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

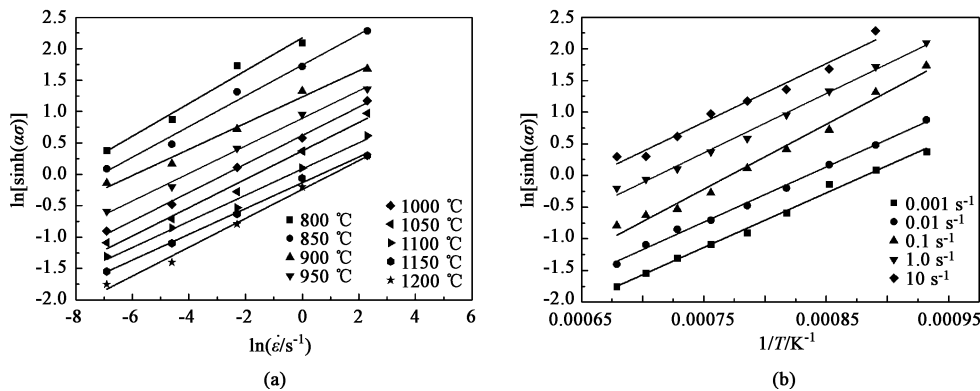


图 6 不同温度下  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \ln \dot{\varepsilon}$  的关系曲线 (a) 和不同应变速率下  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - 1/T$  关系曲线 (b)

Fig. 6 Relationship curves of  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - \ln \dot{\varepsilon}$  under different temperatures (a) and  $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - 1/T$  under different strain rates (b)

在上述公式推导中, 分别建立了应力-应变速率和应力-变形温度之间的关系, 但是材料在高温

塑性变形下的流动应力是受到变形温度和应变速率等工艺参数综合作用的影响, 为了提高模型的准确

度, 需建立应力-应变速率-变形温度三者之间的数学关系。Zener C 和 Hollomon J H<sup>[19]</sup> 在研究材料热变形过程中, 提出了 Zener-Hollomon 函数模型, 其数学表达形式如式 (12) 所示:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/RT) \quad (12)$$

$Z$  参数综合考虑了材料在高温变形过程中变形温度对应变速率的影响,  $Z$  参数的物理意义为温度补偿后的应变速率因子<sup>[20-21]</sup>。将式 (6) 和式 (12) 相结合可得到式 (13):

$$Z = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (13)$$

对式 (13) 两边同时取对数, 可得到式 (14):

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (14)$$

将表 2 中的峰值应力数值带入式 (14), 拟合  $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  之间的线性关系 (图 7), 线性相关系数达到 0.991, 具有较好的拟合度。计算图 6 拟合关系的截距值, 可以求得  $\ln A = 29.23$ , 因此, 可求得材料常数  $A = 4.94798 \times 10^{12}$ 。

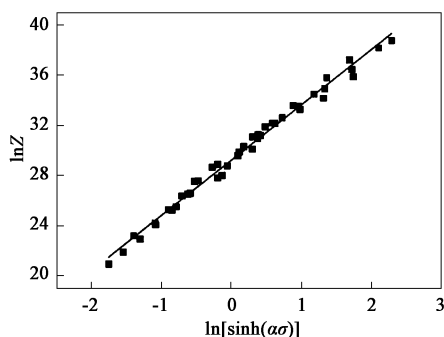


图 7  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  与  $\ln Z$  关系曲线

Fig. 7 Relationship curve of  $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  and  $\ln Z$

单真空 300M 超高强度钢基于摩擦修正后的  $Q$ 、 $\alpha$ 、 $n$ 、 $A$  参数如表 3 所示:

表 3 摩擦修正后的单真空 300M 超高强度钢的本构模型参数

Table 2 Constitutive model parameters of single vacuum 300M ultra-high strength steel after friction correction

参数	$\alpha/\text{MPa}^{-1}$	$n$	$A$	$Q/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$
数值	0.00921	4.43564	$4.94798 \times 10^{12}$	340.658

将所求的  $\alpha$ 、 $n$ 、 $A$ 、 $Q$  等参数, 代入式 (6) 可得到单真空 300M 超高强度钢基于摩擦修正后的 Arrhenius 本构模型:

$$\dot{\varepsilon} = 4.94798 \times 10^{12} \sinh(0.00921\sigma)^{4.43564} \times \exp(-340658/RT) \quad (15)$$

根据式 (12), 可得到 300M 超高强度钢热变形过程中关于  $Z$  参数的公式式 (16):

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/RT) = A \sinh(\alpha\sigma)^n = 4.94798 \times 10^{12} \sinh(0.00921\sigma)^{4.43564} \quad (16)$$

根据式 (13) 和双曲正弦函数的定义, 可用  $Z$  参数表达材料的流变应力, 方程如下:

$$\sigma = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{1}{n}} + \left[ \left( \frac{Z}{A} \right)^{\frac{2}{n}} + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (17)$$

因此, 用  $Z$  参数表达的单真空 300M 超高强度钢基于摩擦修正后的流变应力本构模型如式 (18) 所示:

$$\sigma = 108.58 \ln \left\{ (Z/4.94798 \times 10^{12})^{1/4.43564} + [(Z/4.94798 \times 10^{12})^{2/4.43564} + 1]^{1/2} \right\} \quad (18)$$

## 5 结论

(1) 采用热压缩实验方法测量金属材料的流动应力时, 试样上、下端面与实验机压头之间的摩擦不可忽视, 实验测量结果经过摩擦修正后, 能够获得更加精确的材料高温流变应力, 随着应变速率的减小和变形温度的升高, 摩擦对材料高温流变应力的影响也随之减弱; 在应变速率为  $0.01 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度为  $850 \sim 1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$  的范围内, 300M 钢材料的流变应力的大小与温度呈负相关性, 与应变速率呈正相关性; 材料的峰值应力对变形温度和应变速率均具有较高的敏感性, 但对应变速率的敏感指数更高。

(2) 单真空 300M 超高强度钢材料的 Arrhenius 本构模型为:  $\dot{\varepsilon} = 4.94798 \times 10^{12} \sinh(0.00921\sigma)^{4.43564} \cdot \exp(-340658/RT)$ 。 $Z$  参数表达的单真空 300M 超高强度钢的本构模型为:  $\sigma = 108.58 \ln \left\{ (Z/4.94798 \times 10^{12})^{1/4.43564} + [(Z/4.94798 \times 10^{12})^{2/4.43564} + 1]^{1/2} \right\}$ 。

## 参考文献:

- [1] 张慧萍, 王崇勋, 杜煦. 飞机起落架用 300M 超高强钢发展及研究现状 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2011, 16 (6): 73-76.  
Zhang H P, Wang C X, Du X. Development and research status of 300M ultra-high strength steel for aircraft landing gear [J]. Journal of Harbin University of Technology, 2011, 16 (6): 73-76.
- [2] 李铭. 大型飞机起落架制造技术 [J]. 航空制造技术,

- 2008, 318 (21): 68-71.
- Li M. Large aircraft landing gear manufacturing technology [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2008, 318 (21): 68-71.
- [3] 宋春艳. 300M 飞机起落架外筒锻件生产过程中关键技术研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.
- Song C Y. Study of the Key Technology of Producing for 300M Aircraft Landing Gear Outer Cylinder Forging [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2014.
- [4] 冯军. 大型民机起落架的发展趋势与关键技术 [J]. 航空制造技术, 2009, 324 (2): 52-54, 56.
- Feng J. Development trend and key technologies of large civil aircraft landing gear [J]. Aviation Manufacturing Technology, 2009, 324 (2): 52-54, 56.
- [5] 王瑞. 超高强度钢制备工艺的关键技术研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- Wang R. Research on Key Technologies of Ultra-High Strength Steel Preparation Process [D]. Shenyang: Northeast University, 2017.
- [6] Luo J, Li M Q, Liu Y G, et al. The deformation behavior in isothermal compression of 300M ultrahigh-strength steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2012, 534 (2): 314-322.
- [7] 赵振业, 李志, 刘天琦, 等. 探索新强韧化机制开拓超高强度钢新领域 [J]. 中国工程科学, 2003, (9): 39-42, 54.
- Zhao Z Y, Li Z, Liu T Q, et al. Exploring a new strengthening and toughening mechanism and opening up a new field of ultra-high strength steel [J]. China Engineering Science, 2003, (9): 39-42, 54.
- [8] 李杰, 李志, 颜鸣皋. 高合金超高强度钢的发展 [J]. 材料工程, 2007, 287 (4): 61-65.
- Li J, Li Z, Yan M G. Development of high alloy ultra-high strength steel [J]. Materials Engineering, 2007, 287 (4): 61-65.
- [9] 石旭. 300M 超高强钢高温本构模型的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- Shi X. Research on Constitutive Model of 300M Ultra-High Strength Steel at High Temperature [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2015.
- [10] 章晓婷, 黄亮, 李建军, 等. 300M 高强钢高温流变行为及本构方程 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2017, 48 (6): 1439-1447.
- Zhang X T, Huang L, Li J J, et al. High temperature rheological behavior and constitutive equation of 300M high strength steel [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2017, 48 (6): 1439-1447.
- [11] 祁荣胜, 景阳端, 刘鑫刚, 等. 300M 高强钢热变形行为及其热加工图 [J]. 塑性工程学报, 2016, 23 (2): 130-135.
- Qi R S, Jing Y D, Liu X G, et al. Hot deformation behavior and hot working diagram of 300M high strength steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2016, 23 (2): 130-135.
- [12] 黄顺喆, 厉勇, 王春旭, 等. 300M 钢的热变形行为研究 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (20): 25-28.
- Huang S Z, Li Y, Wang C X, et al. Study on the hot deformation behavior of 300M steel [J]. Hot Working Technology, 2010, 39 (20): 25-28.
- [13] 赵明杰, 邓磊, 孙朝远, 等. 300M 高强钢大型构件全流程锻造变形机理及工艺研究进展 [J]. 科学通报, 2022, 67 (11): 1036-1053.
- Zhao M J, Deng L, Sun C Y, et al. Research progress on deformation mechanism and process of full process forging of large 300M high-strength steel components [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67 (11): 1036-1053.
- [14] 赵明杰, 黄亮, 李昌民, 等. 300M 钢的热变形行为及热锻成形工艺研究现状 [J]. 精密成形工程, 2020, 12 (6): 16-27.
- Zhao M J, Huang L, Li C M, et al. Research status of the hot deformation behaviors and hot forging process of 300M steel [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12 (6): 16-27.
- [15] 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.
- [16] Wanjara P, Jahazi M, Monajati H, et al. Hot working behavior of near- $\alpha$  alloy IMI834 [J]. Material Science Engineering A, 2005, 396 (1-2): 50-60.
- [17] 段国培, 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.
- Duan Y P, Huang Z J, Yu X L, et al. Research on flow stress behavior of TB6 alloy based on friction correction and establishment of constitutive model [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38 (2): 202-209.
- [18] Sellars C M, Mcgertag W J. On the mechanism of hot deformation [J]. Acta Metallurgica, 1966, 14 (9): 1136-1138.
- [19] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel [J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15 (1): 22-32.
- [20] 薛小伟. 300M 钢大型锻坯热成形工艺研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- Xue X W. Research on Hot Forming Process of 300M Steel Large Forging Blank [D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [21] Xia Y F, Long S, Wang T Y, et al. A study at the workability of ultra-high strength steel sheet by processing maps on the basis of DMM [J]. High Temperature Materials and Processes, 2017, 36 (7): 657-667.