

# 基于应变补偿的 Fe-Mn-Al-C 低密度钢等温压缩物理本构方程

孙 建<sup>1,2,3,4,5</sup>, 程 锐<sup>2,3,4,5</sup>, 王 梓<sup>2,3,4,5</sup>, 李景辉<sup>1</sup>, 黄贞益<sup>1</sup>

(1. 安徽工业大学 冶金工程学院, 安徽 马鞍山 243002; 2. 铜陵学院 机械工程学院, 安徽 铜陵 244061;

3. 工程液压机器人安徽省普通高校重点实验室, 安徽 铜陵 244061;

4. 安徽省铜基新材料产业共性技术研究中心, 安徽 铜陵 244061; 5. 铜陵市增材制造重点实验室, 安徽 铜陵 244061)

**摘要:** 采用 Gleeble-1500D 热模拟实验机, 对 Fe-27.51Mn-8.69Al-1.12C 低密度钢在变形温度为 900~1100 ℃ 和应变速率为 0.01~5 s<sup>-1</sup> 范围内进行热压缩实验, 通过实验数据分析了该钢的流动应力曲线特征, 建立了考虑应变耦合的物理本构模型, 并进行了验证分析。结果表明: 变形温度和应变速率等热力学条件对低密度钢的流动应力影响较为显著, 高温、低应变速率更有利于低密度钢的再结晶发生; 基于峰值应力的低密度钢等温压缩物理本构方程的预测精度较高, 其线性拟合相关系数为 0.991; 基于应变补偿的低密度钢等温压缩物理本构方程能够较好地描述其在热压缩条件下的流动应力变化规律, 其相关系数  $r$  为 0.980, 预测值与实验值的平均相对误差 AARE 为 6.9%。

**关键词:** 低密度钢; 等温压缩; 应变补偿; 物理本构方程; 流动应力

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.06.029

**中图分类号:** TG142.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 06-0214-09

## Physical constitutive equation of Fe-Mn-Al-C low density steel under isothermal compression based on strain compensation

Sun Jian<sup>1,2,3,4,5</sup>, Cheng Rui<sup>2,3,4,5</sup>, Wang Zi<sup>2,3,4,5</sup>, Li Jinghui<sup>1</sup>, Huang Zhenyi<sup>1</sup>

(1. School of Metallurgical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002, China;

2. School of Mechanical Engineering, Tongling University, Tongling 244061, China;

3. Key Laboratory of Construction Hydraulic Robots of Anhui Province Higher Education Institutes, Tongling 244061, China;

4. New Copper-based Material Industry Generic Technology Research Center of Anhui Province, Tongling 244061, China;

5. Key Laboratory of Additive Manufacturing of Tongling City, Tongling 244061, China)

**Abstract:** The thermal compression experiment of Fe-27.51Mn-8.69Al-1.12C low density steel under the temperature of 900~1100 ℃ and the strain rate of 0.01~5 s<sup>-1</sup> was carried out by thermal simulation experiment machine Gleeble-1500D, and the rheological stress curves characteristics of the steel were analyzed by the experimental data. Then, the physical constitutive model considering strain coupling was established, and the verification analysis was conducted. The results show that the thermodynamic conditions such as deformation temperature and strain rate have significant effects on the rheological stress of low density steel, and the high temperature and low strain rate are more conducive to the recrystallization of low density steel. The prediction accuracy of physical constitutive equation for low density steel under isothermal compression based on peak stress is high, and the linear fitting correlation coefficient is 0.991. The physical constitutive equation of low density steel under isothermal compression based on strain compensation can better describe the change rule of rheological stress for low density steel under hot compression, the correlation coefficient  $r$  is 0.980, and the average relative error AARE between the predicted and experimental values is 6.9%.

**Key words:** low density steel; isothermal compression; strain compensation; physical constitutive equation; rheological stress

随着国家提出在 2030 年前实现碳达峰、2060

年前实现碳中和的目标, 减少温室气体排放、优化资源配置、解决气候变化问题日益紧迫。在工业制造领域, 钢铁材料应用范围最为广泛, 主要涉及汽车、建筑、桥梁、交通运输、船舶、航空航天和国防建设等方面。Fe-Mn-Al-C 低密度钢正是在这一时代背景下应运而生, 其密度较普通钢铁通常低 10% 以上, 但强度和韧性可与钛合金相媲美, 其制造成本仅与普通的不锈钢相当, 可以实现减重、降耗的目的。以家用 5 座小汽车为例, 车重若减少 170~270 kg, 在汽车整个使用生命周期内可减少约 3000~4500 kg 的温室气体排放量,

**收稿日期:** 2022-10-03; **修订日期:** 2023-01-07

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目 (51674004, 51805002); 安徽省高等学校自然科学研究重点项目 (2022AH051760); 铜陵学院自然科学研究项目 (2017tlxy23); 国家级本科生创新训练项目 (202210383086); 铜陵学院大学生科研基金项目 (2021tlxydxs099); 工程液压机器人安徽省普通高校重点实验室开放课题资助 (TLXY-CHR-O-21YB03); 铜陵学院横向科研项目 (2023tlxyxd077)

**作者简介:** 孙 建 (1988-), 男, 博士研究生, 讲师

**E-mail:** sjxa0913@163.com

**通信作者:** 黄贞益 (1966-), 男, 博士, 教授

**E-mail:** huangzhenyi@ahut.edu.cn

有利于节能减排。Fe-Mn-Al-C 低密度钢根据组成的不同可以分为 3 类: 铁素体低密度钢、铁素体奥氏体双相低密度钢和奥氏体低密度钢<sup>[1-7]</sup>。其中, 奥氏体低密度钢被认为是最具有发展潜力的一类低密度钢, 其拉伸性能与高锰 TWIP 钢相似, 在固溶处理条件下的冲击韧性略低于 Cr-Ni 不锈钢, 但高于常规高强度钢, 高应变率下的能量吸收功与高锰 TWIP 钢相似, 但高于常规深冲钢<sup>[8-9]</sup>。

Fe-Mn-Al-C 奥氏体低密度钢的合金成分范围为: Mn 含量为 15~30%, Al 含量为 5~12%, C 含量为 0.5~2%。为了优化合金性能, 会添加 Si、Ni、Cr、Cu、Mo、Nb、V 和 Ti 等合金元素, 其抗拉强度范围为 800~1600 MPa, 伸长率范围为 30%~80%, 具有优异的强塑性积<sup>[10-18]</sup>。为进一步优化低密度钢的热加工工艺, 目前, 针对 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢的热变形行为开展了一系列的相关研究, Li Y P 等<sup>[19]</sup>研究了 Fe-27Mn-11.5Al-0.95C 奥氏体低密度钢的热变形行为, 并建立了 Arrhenius 型本构方程。Liu D G 等<sup>[20]</sup>分析了 Fe-11Mn-10Al-0.9C 双相低密度钢热压缩时的流动应力变化特征, 构建了热加工图。Kalantari A R 等<sup>[21]</sup>研究了 Fe-11.15Mn-5.6Al-0.07C 复相 (奥氏体+铁素体+马氏体) 低密度钢的热变形行为, 建立了 Arrhenius 型本构方程并进行了修正, 取得了较好的预测精度。Sun J 等<sup>[22]</sup>探究了 Fe-30Mn-10Al-1C 系低密度钢的热变形行为及低密度钢的再结晶情况, 以 Arrhenius 型本构方程为基础, 对低密度钢变形抗力进行了预测, 预测精度较好。本构方程在材料有限元数值模拟的预测和热加工工艺优化方面具有重要作用, 而传统的热加工变形行为的研究通常不考虑材料内部的微观结构变化, 因此, 计算所得材料常数为表观值而非实际值。近年来, 也有一些学者提出了新的物理本构方程, 并得到了一些应用研究<sup>[23-24]</sup>, 可以较为准确地描述材料的流变行为。目前, 对 Fe-Mn-Al-C 低密度钢热变形本构方程的研究大多集中在 Arrhenius 型双曲正弦本构方程, 而基于应变补偿的物理本构模型研究较少。

本文通过等温压缩实验得到了低密度钢的流动应力曲线, 并利用新的物理本构方程对其热变形行为进行研究, 分析了利用物理本构方程预测流动应力曲线的精准性, 为今后精确预测该系钢的流变行为提供了一定的参考。

## 1 实验材料与方法

以奥氏体低密度钢为研究对象, 其化学成分 (% , 质量分数) 为: Mn 27.51, Al 8.69, C 1.12, 余量为 Fe。采用真空感应电炉熔炼钢锭, 其质量为 25 kg, 切取热压缩试样尺寸为  $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ , 在 Gleeble-1500D 热模拟实验机上进行实验。热压缩温度范围为 900~1100  $^{\circ}\text{C}$ , 应变速率为 0.01~5  $\text{s}^{-1}$ 。所有压缩试样以 20  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$  的升温速率加热至 1150  $^{\circ}\text{C}$ , 保温 120 s 后以 10  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$  的速度冷却至变形温度, 保温 30 s 后进行压缩变形, 工程应变为 0.6, 真应变量为 0.9, 具体工艺如图 1 所示。

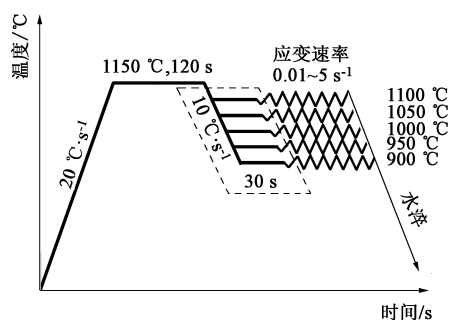


图 1 低密度钢等温热压缩实验工艺图

Fig. 1 Isothermal thermal compression process diagram of low density steel

## 2 结果与分析

### 2.1 真应力-真应变曲线特征

图 2 为低密度钢在不同变形条件下的真应力-真应变曲线。由图 2 可知, 应变速率和变形温度对流动应力变化的影响较为显著: 随着变形温度的升高, 低密度钢的流动应力逐渐降低; 随着应变速率的升高, 低密度钢的流动应力呈增大趋势。由真应力-真应变曲线分析可知, 低密度钢整个变形过程大致可以分为 3 个阶段。阶段 1: 流动应力达到峰值前阶段, 在变形初期, 低密度钢的流动应力随着变形量的增大而迅速增大。在此阶段, 流动应力的变化主要受到加工硬化 (Work Hardening, WH) 影响, 随着变形的进行, 动态回复 (Dynamic Recovery, DRV) 和动态再结晶 (Dynamic Recrystallization, DRX) 效应逐渐增强, 流动应力增加趋势变得缓慢, 但变形量在到达峰值应变之前, WH 仍然占据主导作用, 所以流动应力持续增加。阶段 2: 随着变形量的进一步增大, 流动应力达到最大值, 随后开始降

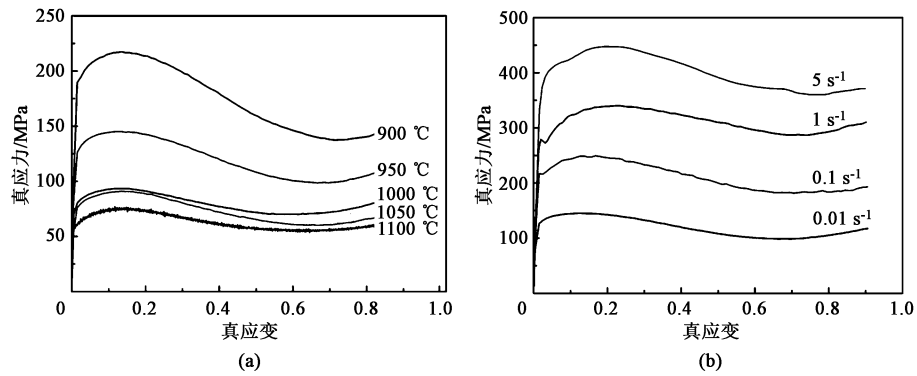


图 2 低密度钢在不同变形条件下的真应力-真应变曲线  
(a)  $0.01 \text{ s}^{-1}$  (b)  $950 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 2 True stress-true strain curves of low density steel under different deformation conditions

低直至趋于平稳,此时 WH 仍然发挥作用,但是由于 DRV 和 DRX 开始占据主导作用,即动态软化效果开始大于加工硬化效果,所以,低密度钢的流动应力呈现降低特征。阶段 3:流动应力相对平稳阶段,此阶段 WH 与 DRV、DRX 达到动态平衡。

图 3 为低密度钢在不同热压缩条件下的光学显微组织。由图 3 可知,当提高变形温度和降低应变速率时,DRX 晶粒增多且呈长大趋势,有利于低密度钢 DRX 的发生。分析认为,DRX 过程实际上为

晶粒的形核与长大,位错运动是再结晶晶粒形核与长大的重要诱因。在高温变形下,低密度钢的内部原子热振动更加剧烈,螺旋位错的交滑移以及刃型位错的攀移也更容易发生;另一方面,高温变形下低密度钢自身的热激活能也随之增高,使得其内部的空位浓度降低,从而降低了空位对位错迁移的阻碍作用<sup>[25-27]</sup>。但是,在低的应变速率条件下,原子的扩散以及位错的滑移和攀移会更加充分。因此,在高温低应变速率下,更有利于动态再结晶。

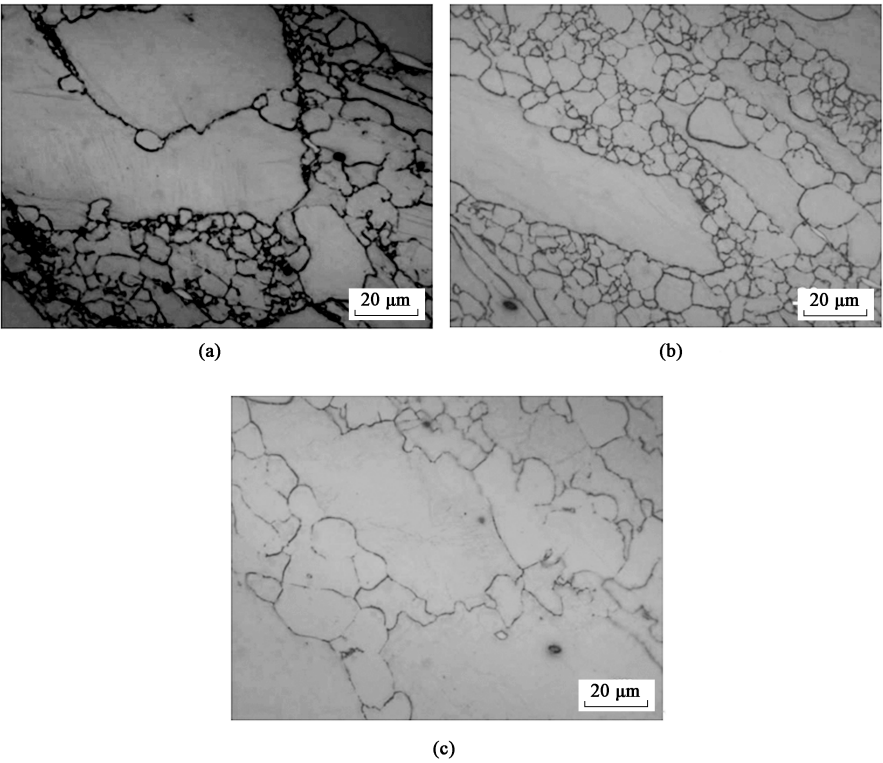


图 3 低密度钢在不同变形条件下的金相组织  
(a)  $950 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $5 \text{ s}^{-1}$  (b)  $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $5 \text{ s}^{-1}$  (c)  $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0.01 \text{ s}^{-1}$

Fig. 3 Metallographic structures of low density steel under different deformation conditions

## 2.2 物理本构方程

物理本构方程是一种基于蠕变理论, 考虑了杨氏模量  $E$  和奥氏体自扩散系数  $D$  以及绝对温度  $T$  的相关性而提出的一种新的材料本构关系, 为提高材料热变形本构模型的准确性和通用性, 本文对 Fe-Mn-Al-C 低密度钢的热变形本构模型引入物理参数 (奥氏体自扩散系数  $D$  和杨氏模量  $E$ ) 构建本构模型, 其表达式如式 (1) ~ 式 (5) 所示<sup>[23-24]</sup>。

$$D(T) = D_0 \times \exp[-Q/(RT)] \quad (1)$$

$$E(T) = E_0 \left( 1 + \frac{T_m}{G_0} \cdot \frac{dG}{dT} \cdot \frac{T - 300}{T_m} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\dot{\varepsilon}}{D(T)} = B_1 \left( \frac{\sigma}{E(T)} \right)^{n_1} \quad (3)$$

$$\frac{\dot{\varepsilon}}{D(T)} = B_2 \exp \left( \frac{\beta \sigma}{E(T)} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\dot{\varepsilon}}{D(T)} = B \left[ \sinh \left( \frac{\alpha \sigma}{E(T)} \right) \right]^n \quad (5)$$

式中:  $D(T)$  为描述奥氏体自扩散系数和绝对温度关系的函数;  $D_0$  为奥氏体自扩散常数;  $Q$  为自扩散激活能, ( $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$ );  $T$  为绝对温度, K;  $R$  为摩尔气体常数, 取  $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ ;  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率,  $\text{s}^{-1}$ ;  $E(T)$  为描述杨氏模量  $E$  与绝对温度  $T$  关系的函数;  $\sigma$  为流动应力, MPa;  $T_m$  为材料熔点, K;  $E_0$  和  $G_0$  分别为材料在绝对温度为 300 K 时的杨氏模量和剪切模量, GPa;  $B$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $n_1$ 、 $\alpha$  和  $\beta$  均为材料常数, 其中  $\alpha = \beta/n_1$ ;  $n$  为材料的蠕变常数。

此外, 材料变形机制受位错滑移和攀移控制时, 需考虑材料自扩散激活能。为简化计算, 本构方程中的蠕变常数  $n$  一般设为 5, 此时物理本构方程式 (5) 又可表达为式 (6), 但是会降低计算精度<sup>[24]</sup>, 本文将根据实际计算结果确定  $n$  值。

$$\dot{\varepsilon}/D(T) = B \{ \sinh[\alpha \sigma/E(T)] \}^5 \quad (6)$$

综上, 基于物理的热变形本构模型考虑了  $D$  和  $E$  随绝对温度的变化, 既反映了低密度钢的流变行为, 又反映了物理性能。

### 2.2.1 基于峰值应力的物理本构方程

为建立 Fe-Mn-Al-C 低密度钢的物理本构方程, 根据参考文献 [23]、文献 [24] 与文献 [28] 的相关参数, 式 (1) 和式 (2) 中的  $D(T)$  和  $E(T)$  可分别表达为式 (7) 和式 (8)。

$$D(T) = D_0 \exp \left( \frac{-Q}{RT} \right) = 1.8 \times 10^{-5} \times \exp \left( \frac{-2.7 \times 10^5}{RT} \right) \quad (7)$$

$$E(T) = E_0 \left( 1 - \frac{T_m}{G_0} \times \frac{dG}{dT} \times \frac{(T - 300)}{T_m} \right) = 2.16 \times 10^5 \times \left( 1 - 0.91 \times \frac{(T - 300)}{1810} \right) = [216 - 0.1085(T - 300)] \times 10^3 \quad (8)$$

对式 (3) 和式 (4) 两边分别取自然对数, 且方程中  $\alpha = \beta/n_1$ , 而  $\beta$  和  $n_1$  分别为曲线  $\ln[\dot{\varepsilon}/D(T)] - \sigma/E(T)$  和  $\ln[\dot{\varepsilon}/D(T)] - \ln[\sigma/E(T)]$  的斜率。图 4 和图 5 分别为曲线  $\ln[\dot{\varepsilon}/D(T)] - \sigma/E(T)$  和  $\ln[\dot{\varepsilon}/D(T)] - \ln[\sigma/E(T)]$  的线性拟合结果, 其线性拟合相关系数分别为 0.968 和 0.972, 由此, 可以得到  $\beta$  和  $n_1$  值分别为 2652.32 和 5.22, 且  $\alpha$  值为 508.107。

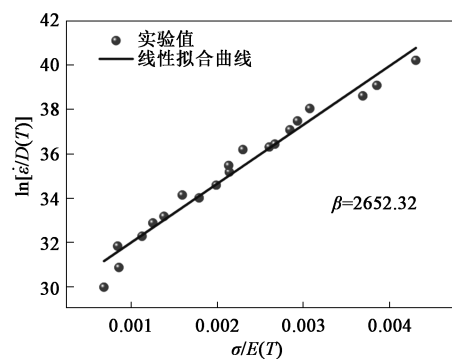


图4  $\ln[\dot{\varepsilon}/D(T)] - \sigma/E(T)$  关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between  $\ln[\dot{\varepsilon}/D(T)]$  and  $\sigma/E(T)$

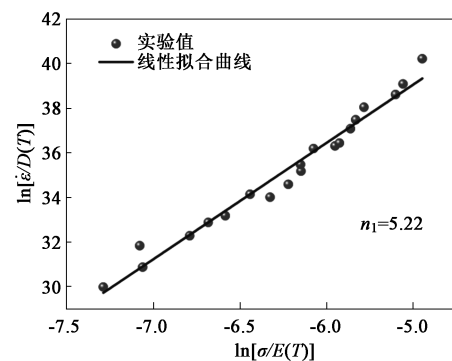


图5  $\ln[\dot{\varepsilon}/D(T)] - \ln[\sigma/E(T)]$  关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between  $\ln[\dot{\varepsilon}/D(T)]$  and  $\ln[\sigma/E(T)]$

然后, 对式 (5) 两边分别取自然对数, 如式 (9) 所示。

$$\ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{D(T)} \right) = n \ln \left[ \sinh \left( \frac{\alpha \sigma}{E(T)} \right) \right] + \ln B \quad (9)$$

$n$  和  $\ln B$  值可以根据线性回归得到, 如图 6 所示, 其线性拟合相关系数为 0.987, 可得  $n$  值为 3.928,  $\ln B$  值为 34.303, 即  $B = 7.8996 \times 10^{14}$ 。

由上述计算可得低密度钢的物理本构方程为:



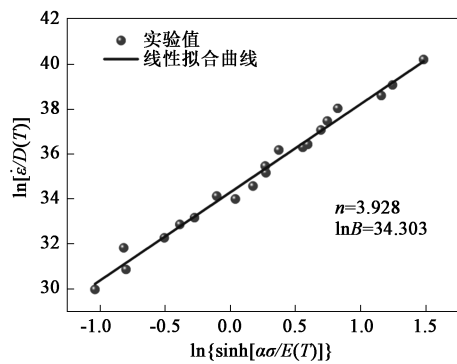


图 6  $\ln[\dot{\varepsilon}/D(T)]-\ln\{\sinh[\sigma/E(T)]\}$  关系曲线  
Fig. 6 Relationship curve of  $\ln[\dot{\varepsilon}/D(T)]$  and  $\ln\{\sinh[\sigma/E(T)]\}$

$$\dot{\varepsilon} \exp(270000/RT) = 1.422 \times 10^{10} \times \left[ \sinh\left(\frac{508.107\sigma}{E(T)}\right) \right]^{3.928} \quad (10)$$
$$\sigma = \frac{E(T)}{\alpha} \ln \left\{ \left( \frac{\dot{\varepsilon} \cdot \exp(2.7 \times 10^5/RT)}{1.8 \times 10^{-5}B} \right)^{1/n} + 1 \right\}^{1/2}$$

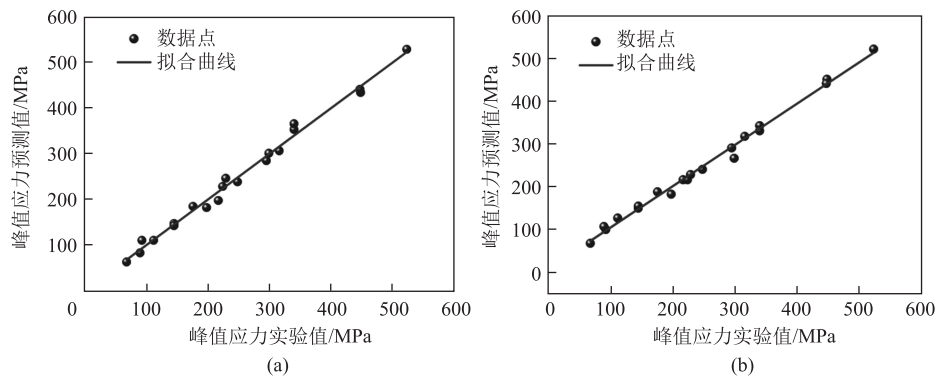


图 7 低密度钢峰值应力的预测值与实测值对比  
(a) 物理本构方程 (b) Arrhenius 方程

Fig. 7 Comparison between predicted and experimental values of peak stress for low density steel  
(a) Physical constitutive equation (b) Arrhenius equation

## 2.2.2 基于应变补偿的物理本构方程

在材料热压缩变形过程中，应变对材料流动应力的变化同样有着重要影响。不同应变量下的材料参数 ( $\alpha$ 、 $n$  和  $\ln B$ ) 是不同的，在单一条件下建立的本构模型不能预测整个材料的流变行为。为此，本文将应变量引入到本构方程中，使所建立的物理本构模型适用于所有应变条件，分析应变对材料参数的影响。根据峰值应力的本构方程计算方法，建立基于应变补偿的低密度钢物理本构方程，取应变范围 0.05~0.80，应变间隔区间为 0.05，进而可以求得在不同应变量下的  $\alpha$ 、 $n$  和  $\ln B$  值，结果如表 1 所示。

经过对表 1 中数据进行多次线性拟合，发现 8

$$\left[ \left( \frac{\dot{\varepsilon} \cdot \exp(2.7 \times 10^5/RT)}{1.8 \times 10^{-5}B} \right)^{2/n} + 1 \right]^{1/2} \quad (11)$$

由此，得到：

$$\sigma = \frac{[216 - 0.1085(T - 300)] \times 10^3}{508.107} \times \ln \left\{ \left( \frac{\dot{\varepsilon} \cdot \exp(2.7 \times 10^5/RT)}{1.422 \times 10^{10}} \right)^{1/3.928} + 1 \right\}^{1/2} \quad (12)$$

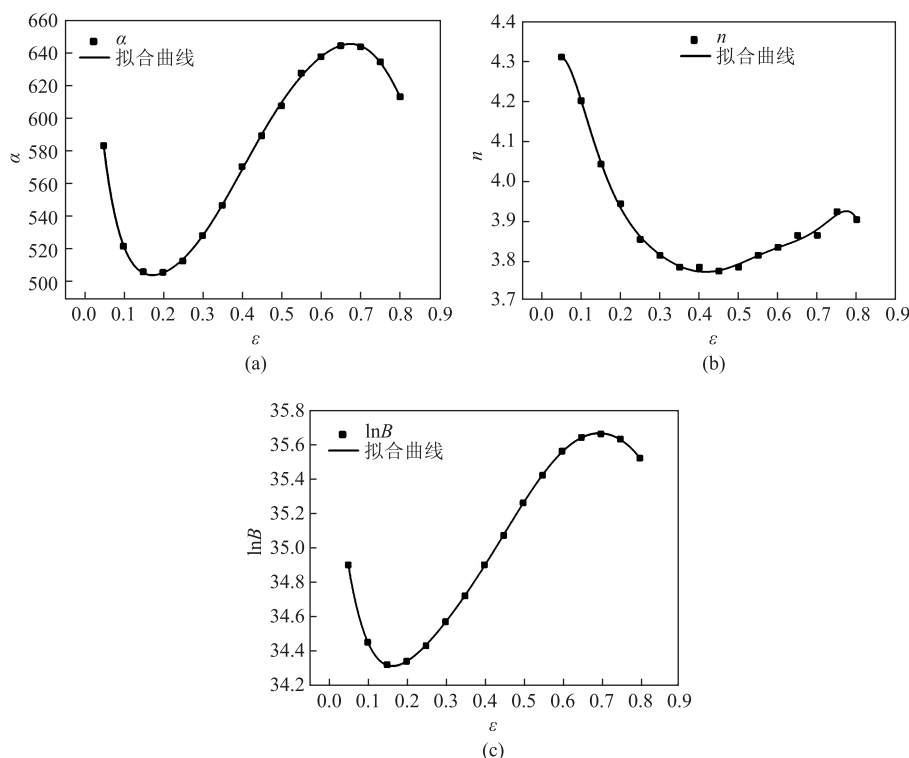
为验证所得本构模型的预测精确程度，将峰值应力的预测值和实验值进行比较，图 7a 所示的线性拟合相关系数为 0.991，表明峰值应力的预测值与实测值吻合度较高。因此，将本文得到峰值应力预测物理本构模型与前期工作所采用的 Arrhenius 本构模型预测精度<sup>[25]</sup> (图 7b 中线性拟合相关系数为 0.992) 进行了横向比较，可以看出，两种模型对低密度钢峰值应力的预测精度相近，均与实验值吻合较好。

表 1 不同应变量下的材料参数

Table 1 Material parameters under different strains

应变	$\alpha$	$n$	$\ln B$	应变	$\alpha$	$n$	$\ln B$
0.05	583.47	4.31	34.90	0.45	589.40	3.77	35.07
0.10	522.08	4.20	34.45	0.50	607.64	3.78	35.26
0.15	506.50	4.04	34.32	0.55	627.65	3.81	35.42
0.20	506.15	3.94	34.34	0.60	637.65	3.83	35.56
0.25	513.07	3.85	34.43	0.65	644.33	3.86	35.64
0.30	528.58	3.81	34.57	0.70	643.70	3.86	35.66
0.35	547.08	3.78	34.72	0.75	634.54	3.92	35.63
0.40	570.64	3.78	34.9	0.80	613.20	3.90	35.52

阶非线性拟合精度较高，如式 (13) 所示，能较好地表达真应变与各材料参数之间的函数关系，如图 8 所示，其线性拟合相关系数分别为 0.999、0.995

图8 低密度钢的真应变  $\varepsilon$  与  $\alpha$ 、 $n$ 、 $\ln B$  的拟合曲线图(a)  $\alpha$ - $\varepsilon$  (b)  $n$ - $\varepsilon$  (c)  $\ln B$ - $\varepsilon$ Fig. 8 Fitting curve diagrams between  $\varepsilon$  and  $\alpha$ ,  $n$ ,  $\ln B$  of low density steel

和 0.999, 表 2 为拟合多项式系数。

$$\begin{cases} \alpha(\varepsilon) = X_0 + X_1\varepsilon + X_2\varepsilon^2 + X_3\varepsilon^3 + X_4\varepsilon^4 + \\ X_5\varepsilon^5 + X_6\varepsilon^6 + X_7\varepsilon^7 + X_8\varepsilon^8 \\ n(\varepsilon) = Y_0 + Y_1\varepsilon + Y_2\varepsilon^2 + Y_3\varepsilon^3 + Y_4\varepsilon^4 + \\ Y_5\varepsilon^5 + Y_6\varepsilon^6 + Y_7\varepsilon^7 + Y_8\varepsilon^8 \\ \ln(B) = Z_0 + Z_1\varepsilon + Z_2\varepsilon^2 + Z_3\varepsilon^3 + Z_4\varepsilon^4 + \\ Z_5\varepsilon^5 + Z_6\varepsilon^6 + Z_7\varepsilon^7 + Z_8\varepsilon^8 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $X_0 \sim X_8$ 、 $Y_0 \sim Y_8$ 、 $Z_0 \sim Z_8$  为拟合多项式系数。

表 2 材料参数  $\alpha$ 、 $n$ 、 $\ln B$  的 8 阶多项式系数Table 2 The 8th polynomial coefficients of material parameters  $\alpha$ ,  $n$  and  $\ln B$ 

阶数	$\alpha$	$n$	$\ln B$
0	754.42	4.08	35.92
1	-5288.90	11.85	-28.68
2	47966.27	-200.57	194.01
3	-248528.40	1339.15	-658.20
4	800461.12	-4923.73	1265.27
5	-1.58	10722.38	-1217.27
6	1.86	-13720.47	266.50
7	-1.20	9515.65	398.67
8	323311.90	-2756.89	-223.38

将表 2 中数据代入式 (11) 中, 并结合式 (13), 可得低密度钢在不同应变变量条件下的物理本构方程, 如式 (14) 所示。图 9 为本构模型对低密度钢流动应力的预测值与实验值的对比。

$$\sigma = \frac{E(T)}{\alpha(\varepsilon)} \ln \left\{ \left( \frac{\dot{\varepsilon} \cdot \exp(2.7 \times 10^5 / RT)}{1.8 \times 10^{-5} B(\varepsilon)} \right)^{1/n(\varepsilon)} + \left[ \left( \frac{\dot{\varepsilon} \cdot \exp(2.7 \times 10^5 / RT)}{1.8 \times 10^{-5} B(\varepsilon)} \right)^{2/n(\varepsilon)} + 1 \right]^{1/2} \right\} \quad (14)$$

为进一步分析所得物理本构模型的预测精度, 在此引入相关系数  $r$  和平均相对误差  $AARE$ , 如式 (15) 和式 (16) [29-30] 所示。

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (15)$$

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{F_i - P_i}{F_i} \right| \times 100 \quad (16)$$

式中:  $F_i$  和  $P_i$  分别为第  $i$  个实验的应力和预测应力,  $i=1, \dots, N$ ;  $N$  为实验值次数;  $\bar{F}$  和  $\bar{P}$  分别为实验应力和预测应力的平均值。

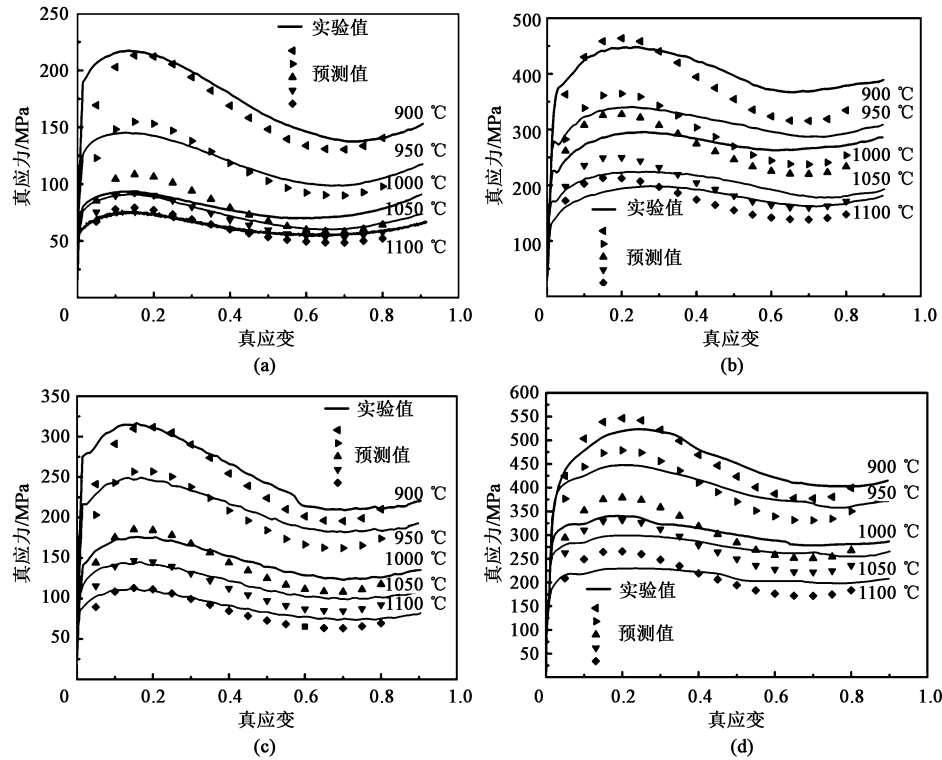


图 9 不同应变速率下低密度钢的流动应力的预测值与实验值对比图

(a)  $0.01\text{ s}^{-1}$  (b)  $0.1\text{ s}^{-1}$  (c)  $1\text{ s}^{-1}$  (d)  $5\text{ s}^{-1}$

Fig. 9 Comparison diagrams between predicted and experimental values of rheological stress for low density steel under different strain rates

图 10 为低密度钢在  $0.01\sim5\text{ s}^{-1}$  应变速率、 $900\sim1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度、真应变  $0\sim0.8$  条件下, 根据式 (14) 所得的预测值与实验值的关系曲线。从图 10 可以看出, 构建的本构模型的精度是合理的 ( $r=0.980$ ,  $AARE=6.9\%$ )。由此可知, 该本构模型能够较好地预测低密度钢的流动应力变化情况。

参考文献 [31]~文献[33], 列举了 Arrhenius 本构方程和物理本构方程对不同材料流动应力的预测情况, 如表 3 所示。由此可知, 本文所建立的物理本构模型具有较好的预测精度, 可以较为精确地预测低密度钢的流动应力变化情况。因此, 本研究可以为低密度钢热变形的流动应力预测提供一个新的选择。

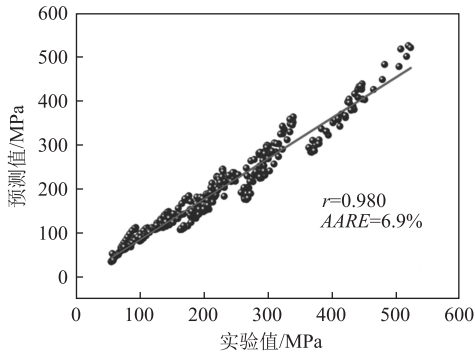


图 10 低密度钢在不同变形条件下的实验值与预测值拟合曲线  
Fig. 10 Fitting curve between predicted and experimental values of low density steel

表 3 不同类型的本构方程对材料热压缩时流动应力的预测情况

Table 3 Prediction condition on material rheological stress for different types of constitutive equations under thermal compression

合金成分	温度/ $^{\circ}\text{C}$	应变速率/ $\text{s}^{-1}$	本构方程类型	$r$	AARE/%
Fe-1.46Mn-0.37C-0.38Si-0.089V 钢	900~1100	0.01~10	物理本构方程	0.980	7.39
Fe-1.41Mn-0.35C-0.35Si-0.044Nb 钢	900~1100	0.01~10	物理本构方程	0.990	5.96
Fe-0.3C-23Cr-8Ni-3Mn-N 钢	1000~1180	0.01~10	Arrhenius 本构方程	0.976	7.80
Fe-11.15Mn-5.6Al-0.07C 钢	800~1100	0.001~0.1	Arrhenius 本构方程	0.998	7.13
TG6 钛合金	850~1050	0.001~10	Arrhenius 本构方程	0.974	14.00
Fe-27.51Mn-8.69Al-1.12C 钢 (本文)	900~1100	0.01~5	物理本构方程	0.980	6.90

### 3 结论

(1) 基于峰值应力的低密度钢物理本构方程为:  $\sigma = \frac{[216 - 0.1085(T - 300)] \times 10^3}{508.107} \times \ln \left\{ \left( \frac{\dot{\varepsilon} \cdot \exp(2.7 \times 10^5/RT)}{1.422 \times 10^{10}} \right)^{1/3.928} + \left[ \left( \frac{\dot{\varepsilon} \cdot \exp(2.7 \times 10^5/RT)}{1.422 \times 10^{10}} \right)^{2/3.928} + 1 \right]^{1/2} \right\}$ , 其线性拟合相关系数为 0.991, 峰值应力的预测值与实验值吻合度较好。

(2) 基于应变补偿的实验钢物理本构方程为:  $\sigma = \frac{E(T)}{\alpha(\varepsilon)} \ln \left\{ \left( \frac{\dot{\varepsilon} \cdot \exp(2.7 \times 10^5/RT)}{1.8 \times 10^{-5}B(\varepsilon)} \right)^{1/n(\varepsilon)} + \left[ \left( \frac{\dot{\varepsilon} \cdot \exp(2.7 \times 10^5/RT)}{1.8 \times 10^{-5}B(\varepsilon)} \right)^{2/n(\varepsilon)} + 1 \right]^{1/2} \right\}$ , 其相关系数  $r=0.980$ , 平均相对误差  $AARE=6.9\%$ , 具有较好的预测精度。

#### 参考文献:

- [1] Chen S P, Rana R, Halder A, et al. Current state of Fe-Mn-Al-C low density steels [J]. Progress in Materials Science, 2017, 89 (8): 345-391.
- [2] Pierce D T, Field D M, Limmer K R, et al. Hot deformation behavior of an industrially cast large grained low density austenitic steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 825: 141785-141795.
- [3] Xie Z Q, Hui W J, Zhang Y J, et al. Effect of Cu and solid solution temperature on microstructure and mechanical properties of Fe-Mn-Al-C low-density steels [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 1307-1321.
- [4] 曹晨星, 王存宇, 张婧, 等. 冷却速率对奥氏体型 FeMnAlC 钢组织和性能的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2022, 34 (3): 272-279.  
Cao C X, Wang C Y, Zhang J, et al. Effect of cooling rate on microstructure and properties of austenitic FeMnAlC steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2022, 34 (3): 272-279.
- [5] Kwok T W J, Rahman K M, Vorontsov V A, et al. Strengthening  $\kappa$ -carbide steels using residual dislocation content [J]. Scripta Materialia, 2022, 213: 114626-114631.
- [6] Hu S F, Zheng Z B, Yang W P, et al. Fe-Mn-C-Al low-density steel for structural materials: A review of alloying, heat treatment, microstructure, and mechanical properties [J]. Steel Research International, 2022, 93 (9): 2200191-2200204.
- [7] Wei L L, Gao G H, Kim J, et al. Ultrahigh strength-high ductility 1 GPa low density austenitic steel with ordered precipitation strengthening phase and dynamic slip band refinement [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 838: 142829-142839.
- [8] Yoo J D, Hwang S W, Park K T. Origin of extended tensile ductility of a Fe-28Mn-10Al-1C steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2009, 40: 1520-1523.
- [9] Frommeyer G, Brück U. Microstructures and mechanical properties of high-strength Fe-Mn-Al-C light-weight TRIPLEX steels [J]. Steel Research International, 2006, 77 (9-10): 627-633.
- [10] Li G Q, Shen Y F, Jia N, et al. Microstructural evolution and mechanical properties of a micro-alloyed low-density  $\delta$ -TRIP steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 848: 143430-143446.
- [11] Li Z, Wang Y, Cheng X, et al. The effect of Ti-Mo-Nb on the microstructures and tensile properties of a Fe-Mn-Al-C austenitic steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 780: 139220-139229.
- [12] Moon J, Jo H H, Park S J, et al. Ti-bearing lightweight steel with large high temperature ductility via thermally stable multi-phase microstructure [J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 808: 140954-140962.
- [13] Moon J, Park S J, Lee C, et al. Microstructure evolution and age-hardening behavior of microalloyed austenitic Fe-30Mn-9Al-0.9C light-weight steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2017, 48 (10): 4500-4510.
- [14] Ramos J, Piamba J F, Sanchez H, et al. Mössbauer and XRD characterization of the effect of heat treatment and the tribological test on the physical and mechanical properties of a Fe-Mn-Al-C alloy [J]. Hyperfine Interactions, 2017, 238 (1): 1-8.
- [15] Song N, Zhao W M, Dong L S, et al. Effect of solution treatment temperature on microstructure and properties of Fe-0.72Mn-3.7Al-0.53C low-density cast steel [J]. Metals, 2022, 12 (8): 1290-1301.
- [16] Zhang J L, Hu C H, Zhang Y H, et al. Microstructures, mechanical properties and deformation of near-rapidly solidified low-density Fe-20Mn-9Al-1.2 C-xCr steels [J]. Materials & Design, 2020, 186: 108307-108320.
- [17] 杨富强, 宋仁伯, 李亚萍, 等. 退火温度对冷轧 Fe-Mn-Al-C 低密度钢性能的影响 [J]. 材料研究学报, 2015, 29 (2): 108-114.  
Yang F Q, Song R B, Li Y P, et al. Effect of annealing temperature on properties of cold rolled Fe-Mn-Al-C low density steel [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2015, 29 (2): 108-114.
- [18] Lee J, Kim H, Park S J, et al. Correlation between macroscale tensile properties and small-scale intrinsic mechanical behavior of



- Mo-added Fe-Mn-Al-C lightweight steels [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 768: 138460–138469.
- [19] Li Y P, Song R B, Wen E D, et al. Hot deformation and dynamic recrystallization behavior of austenite-based low-density Fe-Mn-Al-C steel [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 29 (5): 441–449.
- [20] Liu D G, Ding H, Cai M H, et al. Hot deformation behavior and processing map of a Fe-11Mn-10Al-0.9C duplex low-density steel susceptible to  $\kappa$ -carbides [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28 (8): 5116–5126.
- [21] Kalantari A R, Zarei-Hanzaki A, Abedi H R, et al. The high temperature deformation behavior of a Triplex (ferrite+ austenite+ martensite) low density steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13: 1388–1401.
- [22] Sun J, Li J H, Wang P, et al. Hot deformation behavior, dynamic recrystallization and processing map of Fe-30Mn-10Al-1C low-density steel [J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2022, 75: 699–716.
- [23] 魏海莲, 周红伟, 潘红波. 微合金化高强钢的热变形行为及物理本构方程 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (5): 217–225.
- Wei H L, Zhou H W, Pan H B. Hot deformation behavior and physical constitutive equation of microalloyed high strength steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 217–225.
- [24] Wan P, Yu H X, Li F, et al. Hot deformation behaviors and process parameters optimization of low-density high-strength Fe-Mn-A-C alloy steel [J]. Metals and Materials International, 2022, 28 (10): 2498–2512.
- [25] 孙建, 黄贞益, 李景辉, 等. Fe-28Mn-9Al-1C 轻质合金钢的热变形行为 [J]. 材料热处理学报, 2022, 43 (3): 142–150.
- Sun J, Huang Z Y, Li J H, et al. Hot deformation behavior of Fe-28Mn-9Al-1C lightweight alloy steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43 (3): 142–150.
- [26] Liu D G, Ding H, Hu X, et al. Dynamic recrystallization and precipitation behaviors during hot deformation of a  $k$ -carbide-bearing multiphase Fe-11Mn-10Al-0.9C light weight steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 772: 138682–138693.
- [27] 张婧, 王存宇, 王辉, 等. 奥氏体型 Fe30Mn9Al0.9C 低密度钢的热变形行为研究 [J]. 钢铁研究学报, 2023, 35 (4): 434–442.
- Zhang J, Wang C Y, Wang H, et al. Study on thermal deformation behavior of austenitic Fe30Mn9Al0.9C low density steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2023, 35 (4): 434–442.
- [28] Frost H J, Ashby M F. Deformation-Mechanism Maps: The Plasticity and Creep of Metals and Ceramics [M]. Oxford: Pergamon Press, 1982.
- [29] Yu R H, Wang P C, Li G S, et al. Correction and modeling of flow stress during hot deformation of 7055 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2022, 31 (8): 6870–6879.
- [30] Churyumov A Y, Kazakova A A, Pozdniakov A V, et al. Investigation of hot deformation behavior and microstructure evolution of lightweight Fe-35Mn-10Al-1C steel [J]. Metals, 2022, 12 (5): 831–844.
- [31] 魏海莲, 邓笑举, 潘红波, 等. 基于蠕变理论的钒和铌微合金化中碳钢的物理本构方程 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (9): 207–215.
- Wei H L, Deng X J, Pan H B, et al. Physical constitutive equation of vanadium and niobium microalloyed medium carbon steel based on creep theory [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (9): 207–215.
- [32] Cai Z M, Ji H C, Pei W C, et al. Hot workability, constitutive model and processing map of 3Cr23Ni8Mn3N heat resistant steel [J]. Vacuum, 2019, 165: 324–336.
- [33] Yu R H, Li X, Li W J, et al. Application of four different models for predicting the high-temperature flow behavior of TG6 titanium alloy [J]. Materials Today Communications, 2021, 26: 102004–102016.

## “全国锻压技术与装备高级研修班” 在上海成功举办

由中国机械工程学会塑性工程分会主办、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司以及湖北三环锻造有限公司联合举办的“全国锻压技术与装备高级研修班”于2023年6月10日至12日在上海成功举办。近50名来自锻压企业的技术骨干、高校教师和在籍学生参加了培训。中国机械工程学会塑性工程分会秘书长金红研究员为开班仪式致辞,鼓励学员珍惜学习机会,提升技术水平,为塑性工程领域创新发展蓄力前行。

此次培训邀请了国内锻压领域相关科研机构、高校和企业的知名专家担任主讲教师。中国机械总院集团北京机电研究所有限公司李亚军总工程师、湖北三环锻造有限公司张运军董事长、江苏大学王雷刚教授和上海交通大学庄新村教授分别以“锻压设备与应用”、“塑性近净成形及锻造智能化技术的研究与应用”、“模锻工序分析及模锻工艺设计、模锻案例和新技术进展”和“面向零件轻量化的精冲及板料锻造成形技术”为主题开展授课,并结合丰富的实践经验为学员们进行了精彩讲解。同时还安排学员统一前往“2023上海锻压技术与装备展”进行参观,并聆听了同期举办的“锻压技术与装备高质量发展论坛”。

今后塑性工程分会将继续为青年科研人才成长成才搭建更广阔平台,行稳致远,脚踏实地,为提升我国锻压领域的研发和制造水平,提供更强大动能,奋进逐梦新征程。

中国机械工程学会塑性工程分会