DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4205

USS122G 超高强度不锈钢热变形行为及热加工图

谢　帅[1,2],何　峰[1],施文鹏[2]

(1. 西北工业大学 材料学院,陕西 西安 710072; 2. 江西景航航空锻铸有限公司,江西 景德镇 333000)

摘　要:超高强度不锈钢作为一种兼具优异力学、工艺与耐腐蚀性能的不锈钢,常用来制造航空、航天和海洋等领域的关键零部件。但是,由于目前对该类合金热加工工艺研究不够充分,导致缺乏科学设计该类合金热加工工艺的依据, 难以对其进行合理有效加工。本研究以具有优良综合性能和广阔应用前景的 USS122G 超高强度不锈钢为研究对象,利用 Gleeble-3500 热模拟实验机对该合金在变形量为 60%(应变约为 0.9)、变形温度为 930~1 130 ℃、应变速率为 10^{-2}~10^{1} s^{-1} 的热压缩变形行为进行系统研究,建立了 Arrhenius 型本构模型并对其进行修正,获得了基于 Murty 失稳准则的热加工图。结果表明,随着变形温度的升高(或应变速率的降低),合金流变应力逐渐减小;构建的 Arrhenius 型本构方程能够对该合金在应变为 0.9 时的流变应力进行较好预测。利用基于 Murty 失稳准则建立的热加工图所得到的合理加工工艺为:温度 930~975 ℃时应变速率 0.01~0.28 s^{-1},温度 975~1 050 ℃时应变速率 0.10~0.28 s^{-1} 和温度1 050~1 130 ℃时应变速率 0.01~0.81 s^{-1}。

关键词:超高强度不锈钢;热变形;本构模型;加工图

中图分类号: TG506.7+1　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)12-1145-09

Hot Deformation Behavior and Processing Map of USS122G Ultra-high Strength Stainless Steel

XIE Shuai[1,2], HE Feng[1], SHI Wenpeng[2]

(1. School of Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Jiangxi Jinghang Aviation Forging & Casting Co., Ltd., Jingdezhen 333000, China)

Abstract: Ultra-high strength stainless steel possesses excellent mechanical properties, processing performance and corrosion resistance, and can usually be used to manufacture key devices in the aerospace, aviation and marine fields. However, there is still a lack of documentation for the reasonable design of hot processing maps of ultra-high strength stainless steel since research on hot processing technology for alloys is insufficient and valid technology for processing ultra-high strength stainless steel is lacked. In this work, USS122G ultrahigh-strength stainless steel, which has excellent performance and application potential, was chosen as the subjective alloy. The isothermal compression deformation behavior of the alloy was studied via a Gleeble-3500 thermal simulation experimental machine. The corresponding deformation (strain), deformation temperature and strain rate are approximately 60% (0.9), 930~1 130 ℃ and 10^{-2}~10^{1} s^{-1}, respectively. On this basis, an Arrhenius-type constitutive model of the alloy was established and modified. Furthermore, a hot working diagram based on the Murty instability criterion was obtained. The results show that the flow stress of the alloy decreases with increasing deformation temperature (or decreasing strain rate). The flow stress of the alloy with a strain of 0.9 can be well predicted by the present Arrhenius-type constitutive equation. Moreover, the suitable strain rates for the alloy are 0.01~0.28 s^{-1}, 0.1~0.28 s^{-1} and 0.01~0.81 s^{-1} for temperatures of 930~975 ℃, 975~ 1 050 ℃ and 1 050~1 130 ℃, respectively, according to the present hot working diagram.

Key words: ultra-high strength stainless steel; hot deformation; constitutive model; processing map

近年来,航空航天科学技术突飞猛进,对航空器的主要承力构件材料性能要求也越来越高。高强度不锈钢有着高强度、高韧性、优良耐蚀性、中温耐热性及较宽加工工艺窗口等特性,在航空航天、海洋工

收稿日期:2024-10-18

基金项目:国家自然科学基金(52474425)

作者简介:谢　帅,1985 年生,硕士生.研究方向为材料加工工程. Email: xieshuai85@163.com

通讯作者:何　峰,1991 年生,博士,教授.研究方向为金属的凝固行为与结晶理论. Email: fenghe1991@nwpu.edu.cn

引用格式:谢帅,何峰,施文鹏. USS122G 超高强度不锈钢热变形行为及热加工图[J]. 铸造技术,2024, 45(12): 1145-1153.

XIE S, HE F, SHI W P. Hot deformation behavior and processing map of USS122G ultra-high strength stainless steel[J]. Foundry Technology, 2024, 45(12): 1145-1153.

中国知网 https://www.cnki.net

程、新能源和先进制造等领域得到了广泛应用。例如,17-4PH 和 15-5PH 不锈钢、PH13-8Mo 沉淀硬化不锈钢、AerMet100 和 300M 超高强度钢、10Cr13Co13Mo5Ni3W1VE(S280)超高强度不锈钢等,已被应用于阀口部件、紧固件、冷作和机加工的扣件、轴类件、核反应堆零部件和 F-15 及 B-767 等飞机的起落架等零部件[1-10]。

实际中以超高强度不锈钢制造各种零器件时,通常需要对该类合金进行多种冷热加工。以飞机用起落架构件为例,一般采用锻造的方法生产出整个构件的毛坯,随后采用机加的方法对毛坯进行精加工。但是,在热加工过程中易产生偏析、晶粒粗大、流变失稳等问题[6]。因此,系统研究超高强度不锈钢在热加工过程中的加工工艺,对于解决该类加工工艺问题,合理有效地加工该类合金具有重要的工程意义。Ji 等[7]通过 Arrhenius 型双曲正弦方程和 BP 神经网络对超高强度钢 AerMet100 的热变形行为进行了表征,得出 BP 神经网络在预测流变应力时具有更高的精度。Zhang 等[8]研究了 300M 钢在 800~1 100 ℃、应变速率 10^{-3}~10^{0} s^{-1}、应变为 0.7 时,热压缩变形应力–应变曲线的变化规律,建立了 300M 钢双曲正弦形式的热变形本构模型。任书杰等[9]在 Gleeble-3500 热力模拟机上对 A100 超高强度钢进行了热压缩试验,得到了变形温度为 850~1 200 ℃、应变速率为 10^{-3}~10^{1} s^{-1}、变形度为 60%时的流动应力曲线。同时,分析了摩擦和温升对热压缩过程中流动应力的影响,并对流动应力曲线进行了修正。在此基础上,采用 Arrhenius 双曲正弦函数方程,建立了具有较高预测能力的唯象本构热加工工艺模型。此外,柳木桐等[10]对 10Cr13Co13Mo5Ni3W1VE(S280)超高强度不锈钢进行变形温度为 800~1 150 ℃、应变速率为 10^{-3}~10^{1} s^{-1}、压下率为 70% 条件下的等温恒应变速率压缩实验,通过分析该合金热变形行为,构建了基于 Murty 失稳准则的加工图,并获得了该合金较佳的热变形工艺窗口。这些研究结果表明,利用科学合理的热加工工艺能够有效减少材料的缺陷,合理调控材料的组织,显著改善超高强度不锈钢的性能。

USS122G 超高强度不锈钢是由我国钢铁研究总院自主研发的第Ⅲ代超高强度不锈钢,其抗拉强度超过 1 900 MPa、屈服强度超过 1 500 MPa、断裂韧性达到 90 MPa·$m^{1/2}$,同时还具有良好的耐海洋环境腐蚀性能,已经用于制造部分飞机的起落架[11-14]。然而,由于对该合金热加工工艺研究不够充分,目前依然缺乏科学设计其热加工工艺的依据,导致实际中仍然难以对该合金进行合理有效加工,严重制约了其应用与发展。基于此,本文以 USS122G 超高强度不锈钢为研究对象,通过对该合金在不同应变速率和不同温度下进行热压缩实验,获得不同条件下该合金的真应力–应变曲线和流变应力变化趋势等热加工变形行为数据,建立了该合金 Arrhenius 型本构模型并对其进行修正,获得了基于 Murty 失稳准则的热加工图。有望基于该热加工图设计 USS122G 超高强度不锈钢的合理热加工工艺参数,进而获得组织均匀和性能良好的产品。

1 实验材料及方法

实验材料为某厂采用真空感应炉熔炼(vacuum induction melting, VIM)+真空自耗重熔(vacuum arc remelting, VAR)的双真空熔炼工艺,钢锭经均匀化热处理后锻造成直径为 ϕ300 mm 的棒材,其主要化学成分(质量分数,%) 为 0.092 C、12.27 Cr、2.8 Ni、12.85 Co、4.68 Mo、0.92 W、0.24 V。热压缩实验在 Gleeble-3500 型热模拟试验机上进行,实验前须将 USS122G 超高强度不锈钢锻棒冷加工成直径 8 mm、高度 12 mm 的小圆柱试样。实验过程中采用真空感应加热,以 10 ℃/s 的升温速率加热到事先设定好的温度后,保温 300 s,使 USS122G 超高强度不锈钢试样内部与外部表面的温度趋于一致。实验时应该在圆柱试样两端适当涂敷润滑剂,减少试样与机器之间的摩擦力。热压缩温度为 980~1 130 ℃,应变速率为 10^{-2}~10^{1} s^{-1},变形量为 60%(真实应变约 0.9)。试样压缩结束后,由设备系统自动处理并保存相关实验数据,同时绘制真应力－应变曲线,以反映 USS122G 超高强度不锈钢的热变形行为。

2 实验结果与讨论

2.1 真应力应变曲线

图 1 为 USS122G 超高强度钢在不同变形温度下的应力–应变曲线。从图中可以看出,在相同变形温度下,随着应变速率提高,合金的流变应力逐渐增大。这是由于变形温度和应变量一定时,应变速率增加,一方面使得单位时间内产生的位错密度增加,增大了合金的加工硬化程度;另一方面材料的变形时间缩短,动态再结晶形核数目减小,加工软化程度降低,从而使合金的流动应力值相应增大。反之,低应变速率对应的变形时间较长,再结晶形核数量增加,且新生成的晶粒有较长时间长大,使得动态再结晶更易进行。同时应变速率低时材料的临界切应力降低,导致变形抗力降低。因此由动态再结晶引起的软

中国知网 https://www.cnki.net

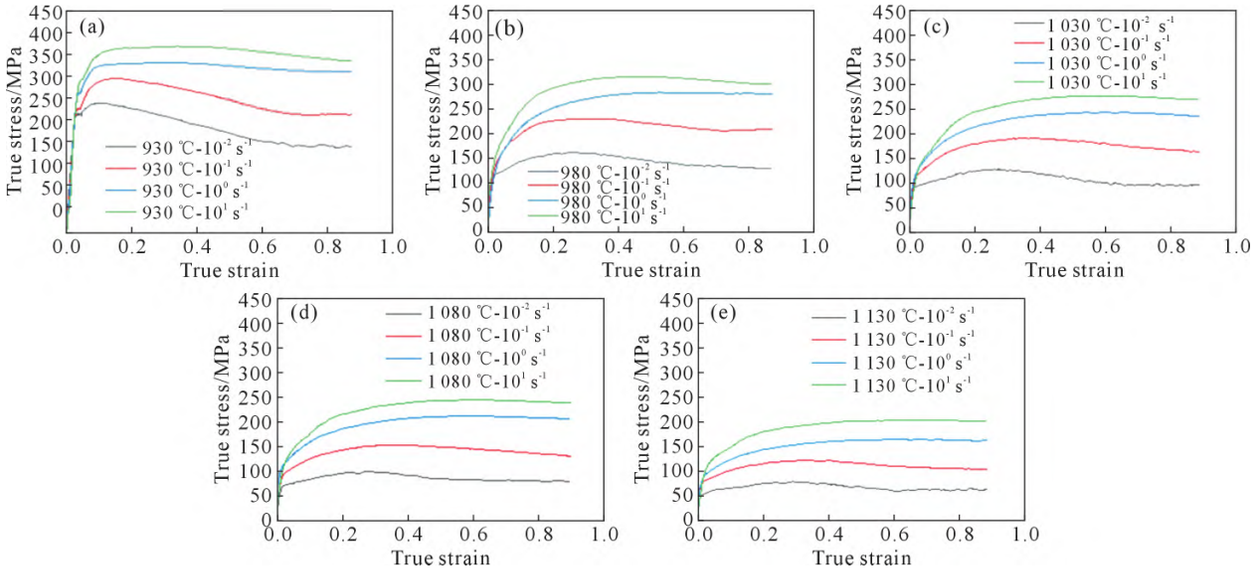

图 1　不同变形温度下 USS122 合金应力–应变曲线：(a) 930 ℃; (b) 980 ℃; (c) 1 030 ℃; (d) 1 080 ℃; (e) 1 130 ℃

Fig.1　Stress-strain curves of USS122 alloys with different deformation temperatures: (a) 930 ℃; (b) 980 ℃; (c) 1 030 ℃; (d) 1 080 ℃; (e) 1 130 ℃

化程度高于由加工硬化引起的应变硬化，在真实应力–应变曲线中体现为流变应力随应变速率的降低而减小。

图 2 为不同应变速率下 USS122G 超高强度不锈钢的应力–应变曲线。从图中可以看出，应变速率不变的情况下，温度升高流动应力降低。这主要是由于随着变形温度的升高，材料的扩散能力得到大幅度提升，原子动能变得更加活跃，能够更好地抵消加工硬化所带来的位错缠结等阻力，有利于动态回复和动态再结晶等软化行为的发生，使得 USS122G 超高强度不锈钢流动应力减小。

2.2　Arrhenius 型本构模型

构建 USS122G 超高强度不锈钢热压缩时的本构方程，可以表达出热压缩过程中流变应力随温度与应变速率的变化情况，从而对热变形过程进行预测。目前来看，应用最为广泛的是 Sellars 等[15]提出的 Arrhenius 型基于双曲正弦函数的本构模型，已经在多种合金中得到了应用[16]，该方程表达式为[17]：

$$\dot{\varepsilon}=A_1\sigma^{n_1}\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \tag{1}$$

$$\dot{\varepsilon}=A_2\exp(\beta\sigma)\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \tag{2}$$

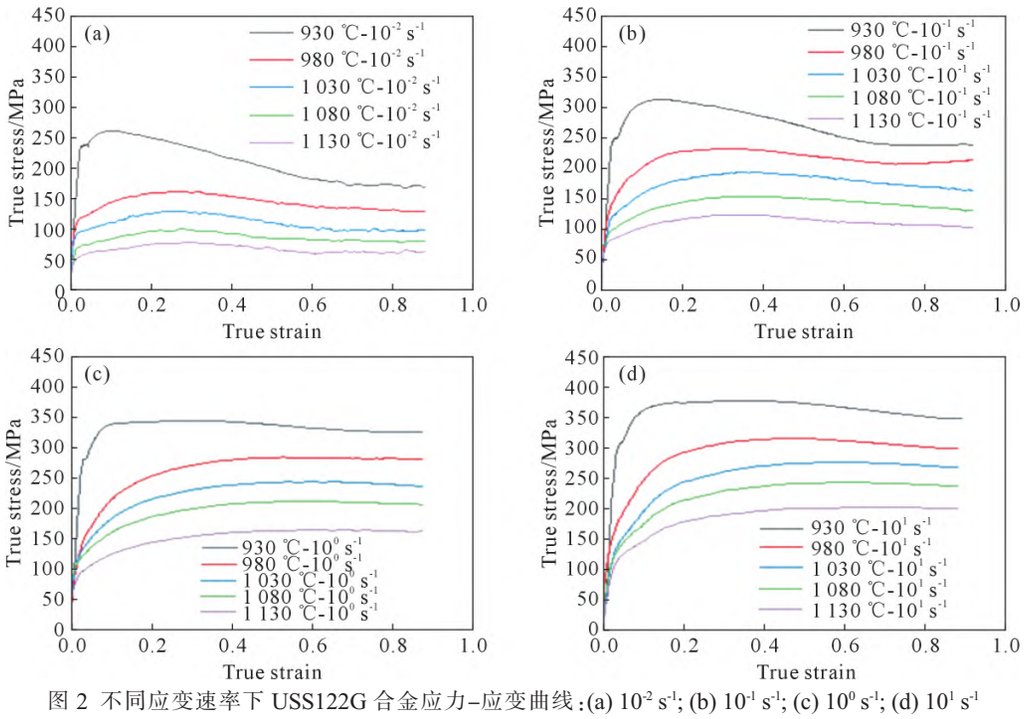

图 2　不同应变速率下 USS122G 合金应力–应变曲线：(a) 10^{-2} s^{-1}; (b) 10^{-1} s^{-1}; (c) 10^{0} s^{-1}; (d) 10^{1} s^{-1}

Fig.2　Stress-strain curves of USS122G alloys with different strain rates: (a) 10^{-2} s^{-1}; (b) 10^{-1} s^{-1}; (c) 10^{0} s^{-1}; (d) 10^{1} s^{-1}

中国知网　https://www.cnki.net

$$\dot{\varepsilon}=A_3[\sinh(\alpha\sigma)]^{n_2}\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \tag{3}$$

式(1)~(3)中，$\dot{\varepsilon}$为应变速率；Q 为热变形激活能，kJ/mol；σ 为真实应力；R 为气体常数，8.314 J/(mol·K)；T 是绝对温度，K；A_1，A_2，A_3，α，β 均为材料常数，β 满足关系式：$\alpha=\beta/n_1$；n_1，n_2 为材料应力指数。

在热压缩过程中，材料常数随着变形量的增加而发生变化。所以，因变量与材料常数有关。这样一来，就可通过数学模型来预测不同温度和变形速率下 USS122G 钢应力的变化。式(1)为幂函数关系式，适用在实验过程中应力较小的情况下（即 $\alpha\sigma<0.8$ 时）。式(2)为指数函数关系式，适用在实验过程中应力较大的情况下(即 $\alpha\sigma>1.2$ 时)。而式(3)为双曲正弦函数关系式，适用在实验过程中任一应力情况下。

由热压缩机得到的数据经过取等间距获得应变 0.1~0.9 对应的应力值，并取出当中峰值应力，建立各形变温度和应变速率下的峰值本构关系。对式(1)~(3)两边分别取对数可以得到：

$$\ln\dot{\varepsilon}=\ln A_1+n_1\ln\sigma-\frac{Q}{RT} \tag{4}$$

$$\ln\dot{\varepsilon}=\ln A_2+\beta\sigma-\frac{Q}{RT} \tag{5}$$

$$\ln\dot{\varepsilon}=\ln A_3+n_2\ln[\sinh(\alpha\sigma)]-\frac{Q}{RT} \tag{6}$$

将各条件下的峰值应力 σ 代入式(4)中，以 $\ln\dot{\varepsilon}$ 为 y 轴，$\ln\sigma$ 为 x 轴，进行曲线拟合得到图 3a，由此得到斜率和截距，对图 3a 的斜率求平均值得到n_1=10.141 7。

与上述一致，式(5)以 $\ln\dot{\varepsilon}$为 y 轴，σ 为 x 轴，经曲线拟合得到图 3b，求图 3b 斜率平均值得到 β=0.049 34；又因为 $\alpha=\beta/n_1$，得到 α=0.004 865。

同理，由式(6)，以 $\ln\dot{\varepsilon}$为 y 轴，$\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$为 x 轴，经曲线拟合得到图 3c，求图 3c 斜率平均值 n_2=7.378 1。

对式(6)两边求偏导，得到热变形激活能 Q 的表达式为：

$$Q=R\left|\frac{\partial\ln\dot{\varepsilon}}{\partial\ln[\sinh(\alpha\sigma)]}\right|_T\cdot\left|\frac{\partial[\ln\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial\left(\frac{1\,000}{T}\right)}\right|_{\dot{\varepsilon}} \tag{7}$$

以 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$为 y 轴，1 000/T 为 x 轴，经曲线拟合得到图 3d，求图 3d 斜率平均值 k=9.549 6，进而求得热激活能 Q 的值为 $Q=Rn_2k$=585.783 5 kJ/mol。

热压缩时，温度和应变速率对钢的热变形行为均存在影响，为此引入一个温度补偿应变速率因子Z参数(亦即 Zener-Hollomon 参数)，Zener 和 Hollomon 提出的 Z 参数可以用来表征应变速率和温度对材料热变形过程的影响规律[18]，其表达式为：

$$Z=\dot{\varepsilon}\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)=A_3[\sinh(\alpha\sigma)]^n \tag{8}$$

对式(8)两边取对数可以得到：

$$\ln Z=n\ln[\sinh(\alpha\sigma)]+\ln A_3 \tag{9}$$

结合式(3)和(8)得：

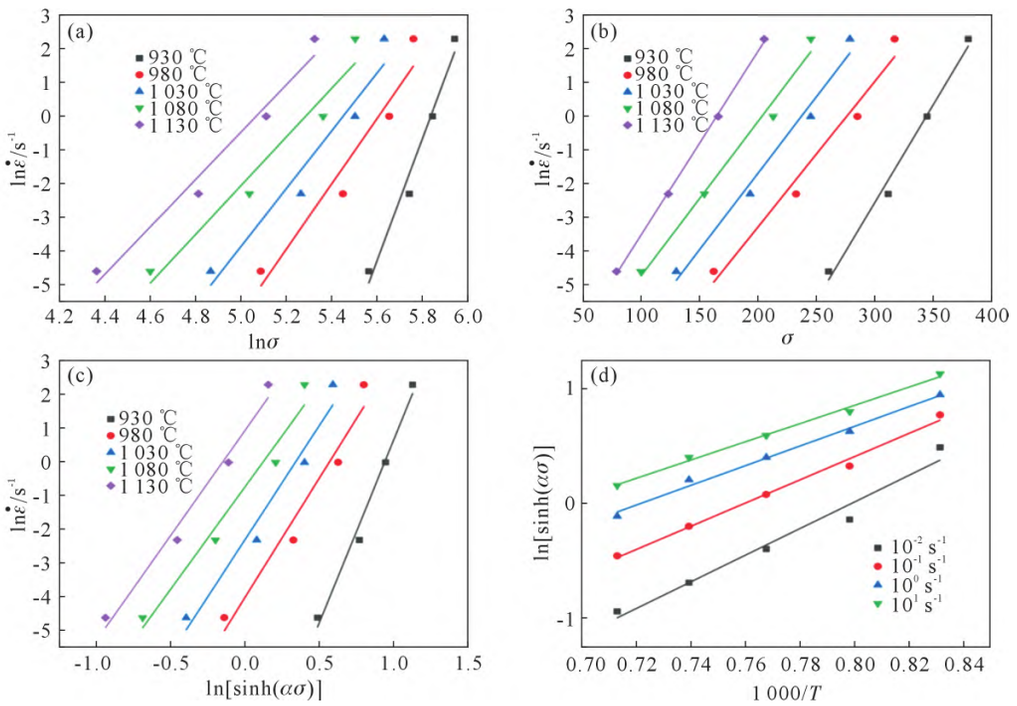

图 3 流变应力与不同变量之间的拟合关系：(a) $\ln\sigma$ vs. $\ln\varepsilon$; (b) σ vs. $\ln\varepsilon$; (c) $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs. $\ln\varepsilon$; (d) 1 000/T vs. $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

Fig.3 Fitting relationships between flow stress and different variables: (a) $\ln\sigma$ vs. $\ln\varepsilon$; (b) σ vs. $\ln\varepsilon$; (c) $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ vs. $\ln\varepsilon$; (d) 1 000/T vs. $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

中国知网 https://www.cnki.net

$$\sigma=\frac{1}{\alpha}\ln\left\{\left(\frac{Z}{A_3}\right)^{\frac{1}{n}}+\left[\left(\frac{Z}{A_3}\right)^{\frac{2}{n}}+1\right]^{\frac{1}{2}}\right\} \tag{10}$$

由式(8)可得 Z 值，继而得到 $\ln Z$，再将峰值应力代入 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$，故以 $\ln Z$ 为 y 轴，以 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 为 x 轴，线性拟合后得到图 4，其斜率为 n=7.094 1，再由其截距得到 $A_3=e^{51.657\,67}$。

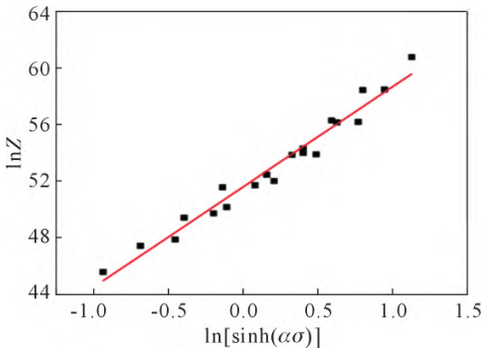

图 4　$\ln Z$-$\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$关系曲线

Fig.4　Relationships between $\ln Z$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$

将上述所求 α、R、n_2 及相对应 $\dot{\varepsilon}$、σ、T 和 Q(取均值)代入式(3)，得到：

$$\dot{\varepsilon}=e^{51.677\,67}[\sinh(0.004\,865\sigma)]^{7.094\,1}\exp\left(\frac{-585.783\,5}{RT}\right) \tag{11}$$

则：

$$\ln Z=7.094\,1\ln[\sinh(\alpha\sigma)]+\ln e^{51.657\,67} \tag{12}$$

即：

$$Z=e^{51.657\,67}[\sinh(0.004\,865\sigma)]^{7.094\,1} \tag{13}$$

那么得到 Arrhenius 型本构方程可以表达为：

$$\sigma=\frac{1}{0.004\,865}\times\ln\left\{\left(\frac{Z}{e^{51.65767}}\right)^{\frac{1}{7.0941}}+\left[\left(\frac{Z}{e^{51.657\,67}}\right)^{\frac{2}{7.0941}}+1\right]^{\frac{1}{2}}\right\} \tag{14}$$

对式(14)进行误差分析，将计算所得应力预测值作为 y 轴，应力实验值作为 x 轴，进行线性拟合得到图 5，确定出该模型的相关性系数 R=0.986 0，平均相对误差 AARE=5.883 5%，说明该本构模型对 USS122G 超高强度不锈钢峰值应力的预测效果比较理想。

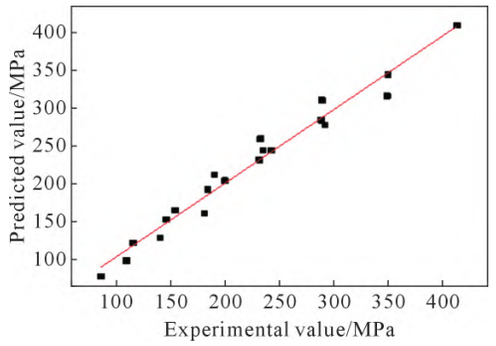

图 5　预测值与实验值的误差分析

Fig.5　Error analysis of the predicted values and the experimental values

2.3　Arrhenius 型本构模型的修正

在热变形过程中，流变应力(峰值应力)随着应变变化而变化，因而上述 USS122G 超高强度不锈钢的材料常数 α、n_2、Q、$\ln A$ 和应变之间是存在相关关系的，本文上述处理过程中，将其视为常数，会对应力预测值存在影响，因此必须考虑到应变对应力的影响，需要对所求 Arrhenius 型本构方程进行一定程度的修正和补偿。

材料常数与应变之间的关系较为复杂，此处可利用多项式拟合的方法将材料常数与应变相互关联起来，需要注意的是，拟合过程中如果多项式的次数过低，将会导致精度不够，修正的目的达不到要求，但若是拟合的次数过高，在提高精度的同时又会导致方程的复杂化，在应用时大大增加工作量，通过计算发现，拟合次数在 6 次时，本构方程的精度提高，能起到良好的修正效果，也不会导致方程的应用过于繁琐。取 USS122G 超高强度不锈钢应变在 0.1~0.9，每隔 0.1 的应变取一点并对其材料常数进行 6 次多项式拟合，各常数可由应变 ε 的 6 次多项式表达，如式(15)~(18)，由此将各常数与应变 ε 关联起来，使应变导致的材料常数变化在流变应力上的影响体现出来。经拟合，各方程系数如表 1 所示。

$$\ln A+B_0+B_1\varepsilon+B_2\varepsilon^2+B_3\varepsilon^3+B_4\varepsilon^4+B_5\varepsilon^5+B_6\varepsilon^6 \tag{15}$$

$$\alpha=C_0+C_1\varepsilon+C_2\varepsilon^2+C_3\varepsilon^3+C_4\varepsilon^4+C_5\varepsilon^5+C_6\varepsilon^6 \tag{16}$$

表1 $\ln A$、α、n_2、Q随应变变化多项式拟合系数

Tab.1 Polynomial fitting coefficients of $\ln A$、α、n_2, and Q with respect to strain

$\ln A$		α		n_2		Q/(kJ·Mol^{-1})	
B_0	90.671 26	C_0	0.006 77	D_0	8.512 02	E_0	1 013.840 85
B_1	-211.514 87	C_1	-0.015 55	D_1	-9.131 2	E_1	-2 344.592 16
B_2	319.435 7	C_2	0.053 47	D_2	67.916 55	E_2	3 935.814 79
B_3	295.854 24	C_3	-0.072 37	D_3	-354.367 9	E_3	-4 850.977 49
B_4	102.448 77	C_4	0.032 46	D_4	745.892 03	E_4	3 715.738 87
B_5	107.849 57	C_5	0.012 11	D_5	-688.269 34	E_5	-759.209 76
B_6	-78.420 37	C_6	-0.011 17	D_6	235.632 41	E_6	-310.223 92

中国知网　https://www.cnki.net

$$n_2=D_0+D_1\varepsilon+D_2\varepsilon^2+D_3\varepsilon^3+D_4\varepsilon^4+D_5\varepsilon^5+D_6\varepsilon^6 \quad (17)$$

$$Q=E_0+E_1\varepsilon+E_2\varepsilon^2+E_3\varepsilon^3+E_4\varepsilon^4+E_5\varepsilon^5+E_6\varepsilon^6 \quad (18)$$

常数 ln$A$ 与应变的拟合曲线如图 6a 所示，其拟合曲线的相关系数 R 为 0.999 9；常数 α 与应变的拟合曲线如图 6b 所示，其拟合曲线的相关系数 R 为 0.999 8；常数 n_2 与应变的拟合曲线如图 6c 所示，其拟合曲线的相关系数 R 为 0.999 9；常数 Q 与应变的拟合曲线如图 6d 所示，其拟合曲线的相关系数 R 为 0.999 9，拟合效果都不错。将拟合后的各常数表达式代入式(14)中，得到经应变补偿后的 Arrhenius 型本构方程：

$$\sigma=\frac{1}{\alpha(\varepsilon)}\times\ln\left\{\left(Z'(\varepsilon)\frac{1}{A(\varepsilon)}\right)^{\frac{1}{n(\varepsilon)}}+\left[\left(Z'(\varepsilon)\frac{1}{A(\varepsilon)}\right)^{\frac{2}{n(\varepsilon)}}+1\right]^{\frac{1}{2}}\right\} \quad (19)$$

式中，$Z'(\varepsilon)$为含 $Q(\varepsilon)$的 Z 参数。

由式(19)可计算出应变补偿后本构方程的应力预测值，与实验所得应力值进行作图比较，如图 7 所示。可以看出，补偿后本构方程的预测值和实验值相差不大，整体趋势一致，预测结果较为准确。

通过各温度下实验值与预测值之间的相关系数 R 和平均相对误差 AARE 的分析，得到在 930 ℃下 R 的值为 0.974 3，AARE 的值为 4.088 6%；在980 ℃下 R 的值为 0.973 6，AARE 的值为 6.047 1%；在1 030 ℃下 R 的值为 0.972 5，AARE 的值为 6.957 2%；在1080℃下 R 的值为 0.9778，AARE 的值为7.033 3%；在 1130℃下 R 的值为 0.984 9，AARE 的值为 6.856 3%。可以看出在高温段，应变补偿后 Arrhenius 型本构模型精确度较高，具有良好的预测效果，可用应变补偿后的 Arrhenius 型本构方程在此温度段对 USS122G 超高强度不锈钢热变形过程中的流变应力大小变化进行预测。

2.4 热加工图

2.4.1 热加工图的失稳判据

热加工图主要有两大类，第 1 种是原子理论模型(atomistic model)，这种模型需要很多材料的参数，简单的金属在获取这些参数的时候更为容易，所以原子理论模型对于简单的金属合金更加适用。第2种是动态材料模型(dynamic material model, DMM)[19]，这个模型因为是将整个工件视为一个功率耗散的整体，使得工件在热变形过程中的能量耗散与微观组织演变联系在了一起，所以目前得到了更加广泛的应用。本文通过绘制第二种动态材料模型的热加工图来研究 USS122G 超高强度不锈钢的热变形行为。因为热加工图是功率耗散图与流变失稳图的叠加，所以需要先确定出 USS122G 超高强度不锈钢在不同热变形参数下的流变失稳参数及功率耗散参数，在这之前还需要确定应变速率敏感性指数。

在给定温度和应变的条件下，材料对应变速率的动态响应可用本构方程(20)来表示：

$$\sigma=K\dot{\varepsilon}^m \quad (20)$$

式中，σ 为等效应力；$\dot{\varepsilon}$为等效应变速率；K 为常数；m 为应变速率敏感性指数，m 的定义式如下：

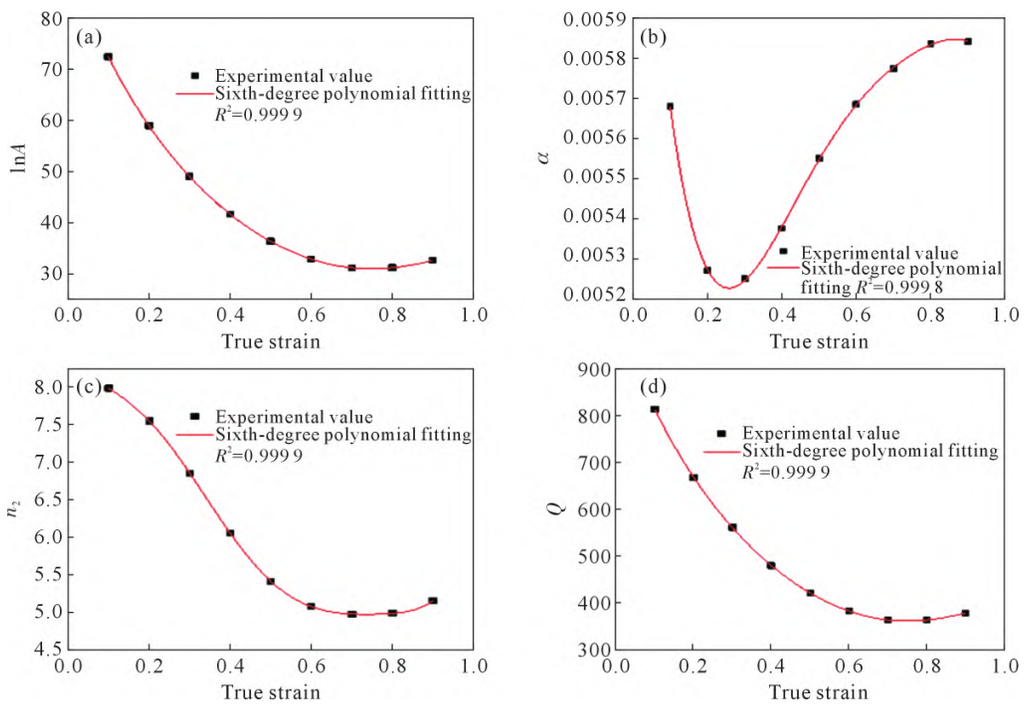

图 6 材料常数与应变的 6 次多项式拟合关系：(a) ln$A$；(b) α; (c) n_2; (d) Q

Fig.6 Sixth-degree polynomial fitting between material constants and strain: (a) ln$A$; (b) α; (c) n_2; (d) Q

中国知网 https://www.cnki.net

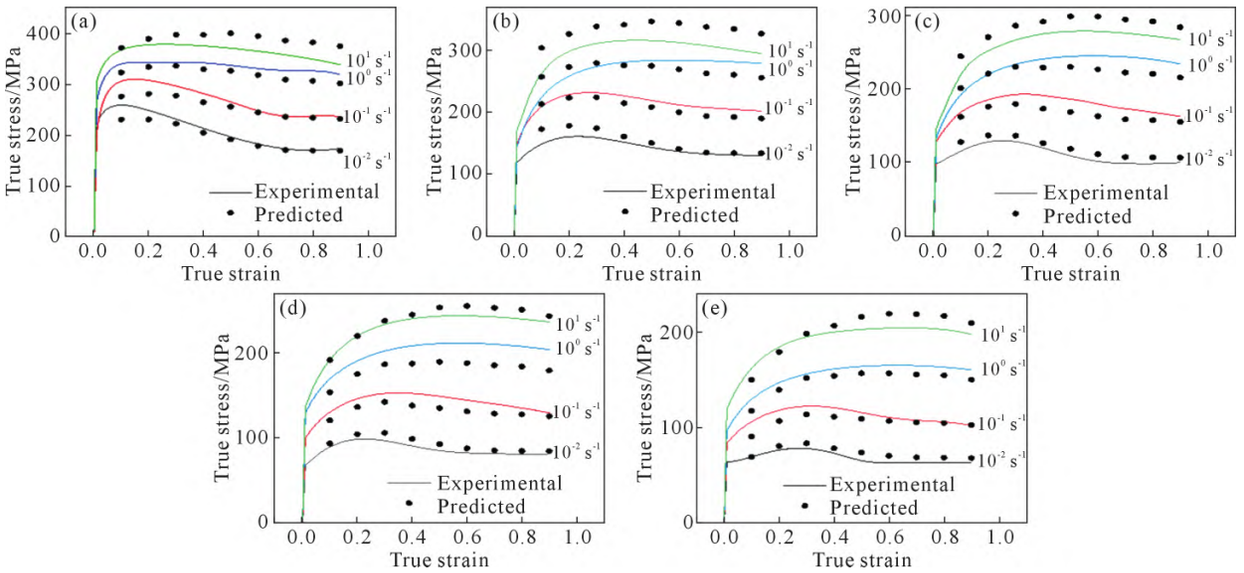

图 7　不同温度下实验值与预测值的误差分析：(a) 930 ℃; (b) 980 ℃; (c) 1 030 ℃; (d) 1 080 ℃; (e) 1 130 ℃

Fig.7　Error analysis of experimental and predicted values at different temperatures: (a) 930 ℃; (b) 980 ℃; (c) 1 030 ℃; (d) 1 080 ℃; (e) 1 130 ℃

$$m=\frac{\mathrm{d}J}{\mathrm{d}G}=\frac{\mathrm{d}(\lg\sigma)}{\mathrm{d}(\lg\dot{\varepsilon})} \tag{21}$$

材料在热变形过程中需要消耗能量，总共需要的能量为 P，其中大部分会转换为热能，还有少部分会储存在材料内部，这种能量称为耗散量 G，还有部分是材料在热变形过程中组织结构发生转变所需要的能量，这种能量称为耗散协量 J。这样能量前后分配的关系可以表达为：

$$P=G+J=\sigma\dot{\varepsilon}=\int_0^{\dot{\varepsilon}}\sigma\mathrm{d}\dot{\varepsilon}+\int_0^{\sigma}\dot{\varepsilon}\mathrm{d}\sigma \tag{22}$$

其中：

$$G=\int_0^{\dot{\varepsilon}}\sigma\mathrm{d}\dot{\varepsilon} \tag{23}$$

$$J=\int_0^{\sigma}\dot{\varepsilon}\mathrm{d}\sigma \tag{24}$$

式中，G 和 J 是 2 个互补的函数，G 表示由塑性变形引起的功率耗散，其中大部分转变为粘塑性热，少量以晶格畸变能的形式存储。J 表示在变形过程中与组织演变，如动态再结晶、超塑性变形及内部裂纹等相关的功率耗散。

对于理想线性耗散(m=1)来说，J 具有最大值 J_{max}：

$$J_{max}=\frac{P}{2} \tag{25}$$

定义功率耗散因子 η 为：

$$\eta=\frac{J}{J_{max}} \tag{26}$$

则：

$$\eta=\frac{J}{J_{max}}=2\left(1-\frac{\int_0^{\dot{\varepsilon}}\sigma\mathrm{d}\dot{\varepsilon}}{\sigma\dot{\varepsilon}}\right) \tag{27}$$

通过式(20)和(22)，可以得到：

$$G=\int_0^{\dot{\varepsilon}}\sigma\mathrm{d}\dot{\varepsilon}=\frac{\sigma\dot{\varepsilon}}{m+1} \tag{28}$$

$$J=\int_0^{\sigma}\dot{\varepsilon}\mathrm{d}\sigma=\frac{m\sigma\dot{\varepsilon}}{m+1} \tag{29}$$

从而：

$$\eta=\frac{2m}{m+1} \tag{30}$$

在 Prasad 准则中 m 值为常数，这在一般合金中比较合适，但是对于复杂合金而言，m 值并不是常数，因此造成了 Prasad 准则会有一定的缺陷与局限。根据大塑性变形连续理论，可以得到 Murthy 流变失稳准则的失稳判据为[20]：

$$\xi=2m-\eta<2 \text{ 或 } \eta\leqslant 0 \tag{31}$$

2.4.2　热加工图

图 8 是 USS122G 超高强度不锈钢在真应变为 0.3、0.5、0.7 和 0.9 时基于 Murty 准则的加工图，图中曲线为功率耗散因子 η 的等值线，其上的数字代表各等值线 η 值的大小，阴影部分为塑性流动失稳区。图中等高线上的数字代表材料在加工过程的耗散效率 η，耗散效率值越高，表示材料在变形过程中用于组织变化消耗的能量越多。图 8 中的灰色区域为失稳区，可以看出失稳区主要集中于高应变速率区域，且随着应变的增大，失稳区域逐渐减小。

从图 8d 中可以得知失稳区(I)主要有：①温度 930~1 050 ℃，应变速率 0.28~10.00 s^{-1}；②温度 1 050~

中国知网　https://www.cnki.net

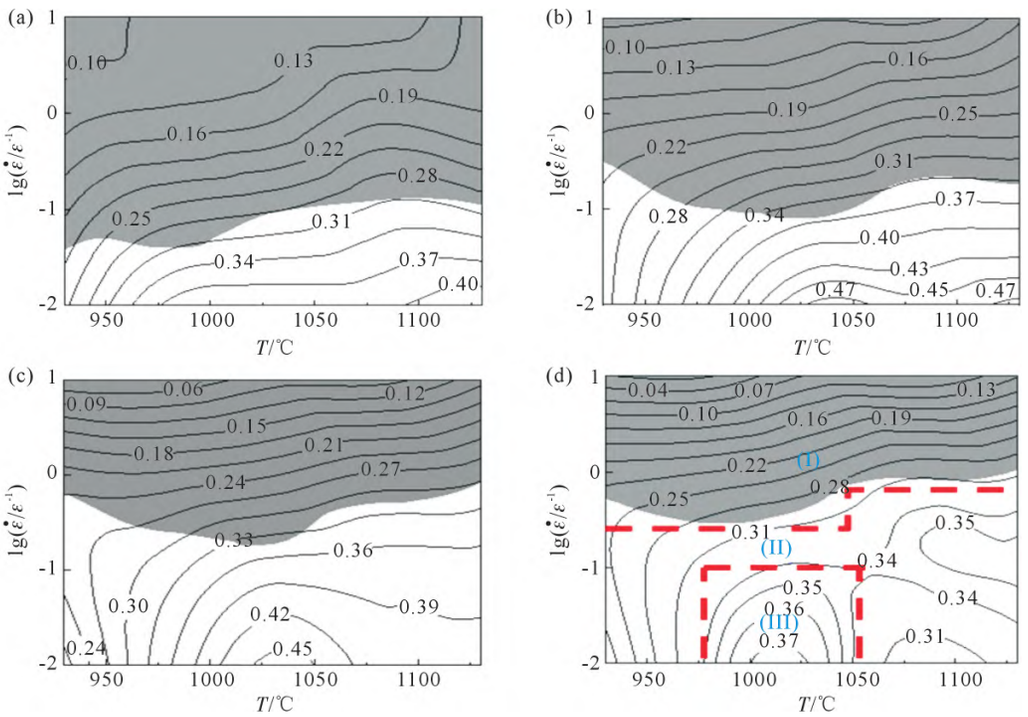

图 8 USS122G 超高强度不锈钢在不同应变下的加工图:(a) 0.3; (b) 0.5; (c) 0.7; (d) 0.9

Fig.8 Processing maps of USS122G ultrahigh-strength stainless steel under different strains: (a) 0.3; (b) 0.5; (c) 0.7; (d) 0.9

1 130 ℃,应变速率 0.81~10.00 s^{-1};加工图中失稳区以外的区域为稳定加工区。图 8d 稳定加工区中有 1 个功率耗散因子峰值区域(III),在温度 975~1 050 ℃、应变速率 0.01~0.10 s^{-1} 范围,其 η 值最大为 0.37。一般来说,加工图中高 η 值的区域由于用于组织演变的能量较多,往往对应着较佳的加工区。可见,这个功率耗散因子峰值区域(III)为 USS122G 超高强度不锈钢较佳的加工区域。图 8d 中稳定加工区功率耗散因子峰值区域(III)以外的区域有 3 个,分别为温度930~ 975 ℃、应变速率 0.01~0.28 s^{-1},温度 975~1 050 ℃、应变速率 0.10~0.28 s^{-1} 和温度 1 050~1 130 ℃、应变速率 0.01~0.81 s^{-1}。这 3 个区域(II)中功率耗散因子 η 均没有朝中心明显收敛,η 值在 0.20~0.35 之间平缓变化,这说明 2 个区域(II)并不对应最佳的热变形机制,因此,这 3 个区域为 USS122G 超高强度不锈钢变形时的适宜加工区域。

综上,利用基于 Murty 失稳准则的加工图可知,其塑性流动失稳区为温度 930~1 050 ℃,应变速率 0.28~10.00 s^{-1} 和温度 1 050~1 130 ℃,应变速率0.81~10.00 s^{-1}。较佳加工区为温度 975~1 050 ℃、应变速率 0.01~0.10 s^{-1}。适宜加工区分别为温度930~975 ℃、应变速率 0.01~0.28 s^{-1},温度 975~1 050 ℃、应变速率 0.10~0.28 s^{-1} 和温度 1 050~1 130 ℃、应变速率 0.01~0.81 s^{-1}。

3 结论

(1)USS122G 超高强度不锈钢在变形温度 930~1 130 ℃,应变速率 10^{-2} s^{-1}~10^{1} s^{-1},变形量 60%(真应变 0.9)发生变形时,流变应力随着温度增加而减小,随着应变速率的降低而减小,整个变形过程先是因为加工硬化作用,流变应力迅速上升达到峰值,随后因为动态软化作用的出现,流变应力趋于稳态。

(2)建立了 Arrhenius 型本构模型,对 USS122G 超高强度不锈钢在热变形中的流变应力进行预测,平均相关系数 R 为 0.986 0,平均相对误差 AARE 为 5.883 5%。同时采用多项式拟合的方法对模型进行补偿和修正,基于平均相对误差 AARE 和相关系数 R 的分析,应变补偿后 Arrhenius 型本构模型的精确度较高,具有良好预测效果。

(3)根据 DMM 理论,建立了 USS122G 超高强度不锈钢在应变为 0.3、0.5、0.7 和 0.9 时,基于Murty 失稳判据下的加工图,得到 USS122G 超高强度不锈钢适宜加工区分别为温度 930~975 ℃、应变速率 0.01~0.28 s^{-1},温度 975~1 050 ℃、应变速率 0.10~0.28 s^{-1} 和温度 1 050~1 130 ℃、应变速率 0.01~0.81 s^{-1}。

参考文献:

[1] 赵先存,宋顺为,杨志勇,梁剑雄,李文辉. 高强度超高强度不锈钢[M]. 北京:高等教育出版社,2008.
ZHAO X C, SONG S W, YANG Z Y, LIANG J X, LI W H. High strength and ultra-high strength stainless steel[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008.

[2] PANTAZOPOULOS G, PAPAZOGLOU T, PSYLLAKI P, SFANTOS G, ANTONIOU S, PAPADIMITRIOU K, SIDERIS J. Sliding wear behavior of a liquid nitrocarburised precipitation-

中国知网 https://www.cnki.net

hardening (PH) stainless steel[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 187(1): 77-85.

[3] AGILAN M, VENKATESWRAN T, SIVAKUMAR D, PANT B. Plasma ion nitriding of low carbon stainless maraging steel [J]. Materials Science Forum, 2015, 830-831: 675-678.

[4] 王晓辉, 罗海文. 飞机起落架用超高强度不锈钢的研究及应用进展[J]. 材料工程,2019, 47(9): 1-12.
WANG X H, LUO H W. Research and application progress in ultra-high strength stainless steel for aircraft landing gear [J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(9): 1-12.

[5] 朱晶,姜元军,何大川. 制造船用螺旋桨不锈钢材料的研究进展[J]. 中国冶金,2019, 29(7): 1-5.
ZHU J, JIANG Y J, HE D C. Research development of stainless steel material for manufacturing marine propeller[J]. China Metallurgy, 2019, 29(7): 1-5.

[6] 于梦晓,李佳,李卓,冉先喆,张述泉,刘栋. 热处理对激光增材制造 AerMet100 超高强度钢动态力学性能的影响[J]. 中国激光,2020, 47(11): 55-63.
YU M X, LI J, LI Z, RAN X Z, ZHANG S Q, LIU D. Effect of heat treatmet on dynamic mechanical properties of AerMet100 ultra-high strength steel by laser additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(11): 55-63.

[7] JI G L, LI F G, LI Q H, LI H Q, LI Z. A comparative study on Arrhenius-type constitutive model and artificial neural network model to predict high-temperature deformation behavior in Aermet100 steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 538(13-14): 4774-4782.

[8] ZHANG H P, ZHAO N, SHI X, ZHANG X L, REN Y. Research on the high temperature constitutive model of 300M ultra-high strength steel [J]. Materials Science Forum, 2016, 836-837: 484-492.

[9] 任书杰,罗飞,田野,刘大博,王克鲁,鲁世强. 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.
REN S J, LUO F, TIAN Y, LIU D B, WANG K L, LU S Q. Flow stress curve correction and phenomenological constitutive relationship of A100 ultra-high strength steel [J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(6): 144-151.

[10] 柳木桐,钟平,刘大博,王克鲁,张开铭,鲁世强. 超高强度不锈钢热变形行为及加工图[J]. 航空材料学报,2022, 42(4): 49-56.
LIU M T, ZHONG P, LIU D B, WANG K L, ZHANG K M, LU S Q. Hot deformation behavior and processing map of ultra-high strength stainless steel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2022, 42(4): 49-56.

[11] 刘振宝,杨志勇,雍歧龙,梁剑雄,孙永庆,李文辉,卢伦. 1 900 MPa 级超高强度不锈钢的研制[J]. 机械工程材料,2008, 32(3): 48-52.
LIU Z B, YANG Z Y, YONG Q L, LIANG J X, SUN Y Q , LI W H, LU L. A 1 900 MPa grade ultra-high strength stainless steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008, 32(3): 48-52.

[12] 王晓辉. USS122 超高强度不锈钢热变形行为与强韧化机理的研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2015.
WANG X H. Hot deformation behavior and strengthening and toughening mechanism of USS122 ultra-high strength stainless steel[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.

[13] 金国忠,裴和中,刘振宝,梁剑雄,王晓辉. 铬质量分数对超高强度不锈钢组织与性能的影响[J]. 钢铁,2018, 53(9): 69-73.
JIN G Z, PEI H Z, LIU Z B, LIANG J X, WANG X H. Effect of mass percent of chromium on microstructure and properties of ultra high strength stainless steel [J]. Iron & Steel, 2018, 53 (9): 69-73.

[14] 张超,苏杰,梁剑雄,刘振宝,葛启录. 超高强度不锈钢沉淀行为研究进展[J]. 钢铁,2018, 53(4): 48-61.
ZHANG C, SU J, LIANG J X, LIU Z B, GE Q L. Research development of precipitation behavior of ultra high strength stainless steels[J]. Iron & Steel, 2018, 53(4): 48-61.

[15] SELLARS C M, MCTEGART W J. On the mechanism of hot deformation[J]. Acta Metallurgica, 1966, 14(9): 1136-1138.

[16] WANG W, MA R, LI L P, ZHAI R X, MA S B, YAN H J, ZHANG S J, GONG S Y. Constitutive analysis and dynamic recrystallization behavior of as-cast 40CrNiMo alloy steel during isothermal compression[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(2): 1929-1940.

[17] 胡家齐,王长军,杨哲,梁剑雄,董瀚. AM355 不锈钢的热变形行为[J]. 金属热处理,2020, 45(3): 50-59.
HU J Q, WANG C J, YANG Z, LIANG J X, DONG H. Hot deformation behaviors of AM355 stainless steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(3): 50-59.

[18] ZHANG J Y, TANG Y, ZHOU H M, CHEN Q, ZHOU J, MENG Y. Investigation on thermal rheological behavior and processing map of 30CrMnSiNi2A ultra-strength steel[J]. International Journal of Material Forming, 2021, 14: 507-521.

[19] PRASAD Y V R K. Author's Reply: Dynamic Materials Model: Basis and Principles[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27: 235-236.

[20] NARAYANA MURTY S V S, NAGESWARA RAO B. On the development of instability criteria during hot-working with reference to IN718 [J]. Materials Science and Engineering: A, 1998, 254(1-2): 76-82.

中国知网 https://www.cnki.net