

· 试验研究 ·

油气田用 SUP13Cr5Ni2Mo 超级马氏体不锈钢热变形加工图研究

方旭东^{1,2} 王岩^{1,2} 夏焱^{1,2} 李莎^{1,2} 李阳^{1,2}

(1 太原钢铁(集团)有限公司先进不锈钢材料国家重点实验室,太原 030003;

2 山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心,太原 030003)

摘要 在 Gleeble-3800 热模拟试验机上,研究了 SUP13Cr5Ni2Mo 合金的热塑性及热变形行为,并建立了合金的热加工图。结果表明,在 900~1 300 ℃,合金均具有较好的热塑性;通过热加工图分析得出,合金适宜初始加工温度范围在 1 100~1 200 ℃,采用此参数变形获得的组织细小均匀。

关键词 超低马氏体不锈钢 SUP13Cr5Ni2Mo 热变形 加工图

Study on Hot Deformation Processing Map of Super Martensitic Stainless Steel SUP13Cr5Ni2Mo for Oil-Gas Field

Fang Xudong^{1,2}, Wang Yan^{1,2}, Xia Yan^{1,2}, Li Sha^{1,2} and Li Yang^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel, Taiyuan Iron and Steel Group Company Limited, Taiyuan 030003;

2 Technology Center, Shanxi Taigang Stainless Steel Co., Ltd, Taiyuan 030003)

Abstract The thermo plastic and thermo deformation characteristics of SUP13Cr5Ni2Mo alloy were studied by using Gleeble-3800 thermal simulation test machine, and the hot processing maps were established. The results show that: In the range of 900~1 300 ℃, the alloys have good thermoplastic; The suitable processing of initial in a temperature range between 1 100~1 200 ℃ through hot processing map analysis, and the deformation microstructure sample is fine and uniform by using this parameters.

Material Index Super Martensitic Stainless Steel SUP13Cr5Ni2Mo, Hot Deformation, Processing Map

随着我国油气资源需求量的日益增加,以及储采比失调矛盾逐渐加大,需要对我国西部深井、超深井、高压油气井以及高含量 CO₂ 和 H₂S 等腐蚀性气体的油气井进行开发。由于油气井用套管和油管的使用温度进一步升高,对油气井用油管套管的强度、硬度和韧性以及在含有一定量的 CO₂、H₂S 和 Cl⁻ 的单一或共存腐蚀介质环境下的耐腐蚀性能都提出了更高的要求。因此,开发出一种比 13Cr 钢性能更为优越、成本比双相不锈钢更低廉的经济型油气井用不锈钢材料非常必要。本文主要研究 SUP13Cr5Ni2Mo 钢热变形加工图,深入了解合金热变形特性,为实际生产提供指导。

1 研究材料与方法

1.1 实验材料

采用 90 t 转炉 + 90 t VOD + LF 冶炼工艺生产 SUP13Cr5Ni2Mo 铸锭,采用径锻机对其锻造开坯,管坯规格为 Φ210 mm。冶炼钢的主要化学成分(%)为:0.01C、0.20Si、0.56Mn、13.0Cr、5.1Ni、2.1Mo、0.045N。

1.2 实验方法

在径锻管坯上切片,切片经 1 180 ℃ 1 h 固溶热处理,而后在切片的 1/2 半径处取 Φ8 mm × 12 mm 圆柱形试样。在 Gleeble3800 热模拟试验机上进行热压缩实验,选取实验温度为 900、950、1 000、1 050、1 100、1 150、1 200 ℃,应变速率为 0.1, 1, 10, 50 s⁻¹,变形量为 60%。以 20 ℃/s 的速度将试样加热到 1 250 ℃ 保温 5 min 后进行热压缩实验,热压缩完成后试样立即水冷至室温,以保留变形组织。采用线切割方法将变形试样沿轴向中心剖开,在 ZEISS AX10 光学显微镜下观测合金金相组织。

2 实验结果分析与讨论

2.1 SUP13Cr5Ni2Mo 钢热塑性分析

SUP13Cr5Ni2Mo 钢不同拉伸温度断面收缩率与强度曲线如图 1 所示,从曲线可以看出,温度在 900~1 300 ℃,合金的断面收缩率波动较小,均在 80% 以上,有较好的热塑性。其高温强度由 900 ℃ 时的 230 MPa 下降到 1 300 ℃ 时的 50 MPa 左右。因此,在整个试验温度区间, SUP13Cr5Ni2Mo 均可实现良好的热变形。

2.2 SUP13Cr5Ni2Mo 钢热变形本构方程

SUP13Cr5Ni2Mo 钢在不同变形参数下的热变

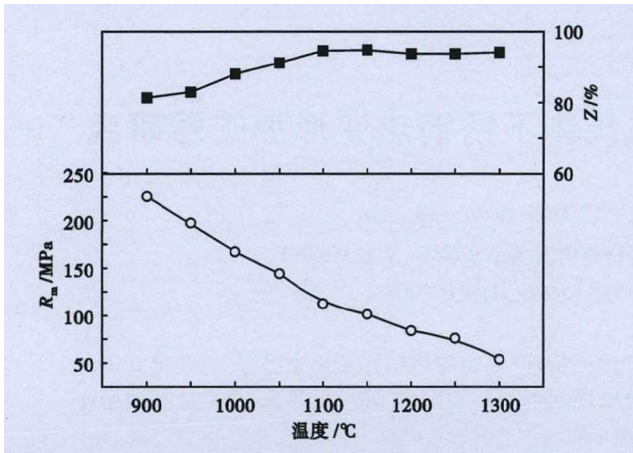


图 1 SUP13Cr5Ni2Mo 钢热塑性曲线
Fig. 1 Thermoplastic curves of steel SUP13Cr5Ni2Mo

形曲线如图 2 所示。从曲线上可以看出,在应变速率较低时,在开始变形阶段,应力随应变量的增加而迅速增大,达到峰值后开始下降,直至形成稳态。当应变速率较高时,在开始变形阶段,应力随应变量的增加而迅速增大,达到峰值形成稳态后应力继续小幅增长。因此,对于 SUP13Cr5Ni2Mo 钢,当应变速率较低时,热变形过程中动态软化占据主导;当应变速率较高时,热变形过程中加工硬化占据主导。

本构模型是指材料变形过程中流动应力与热力学参数之间的关系,它表征材料变形过程中的动态响应。采用双曲正弦数学模型^[1-3],最终计算出 SUP13Cr5Ni2Mo 钢热变形激活能 $Q = 442.63 \text{ kJ}$,并

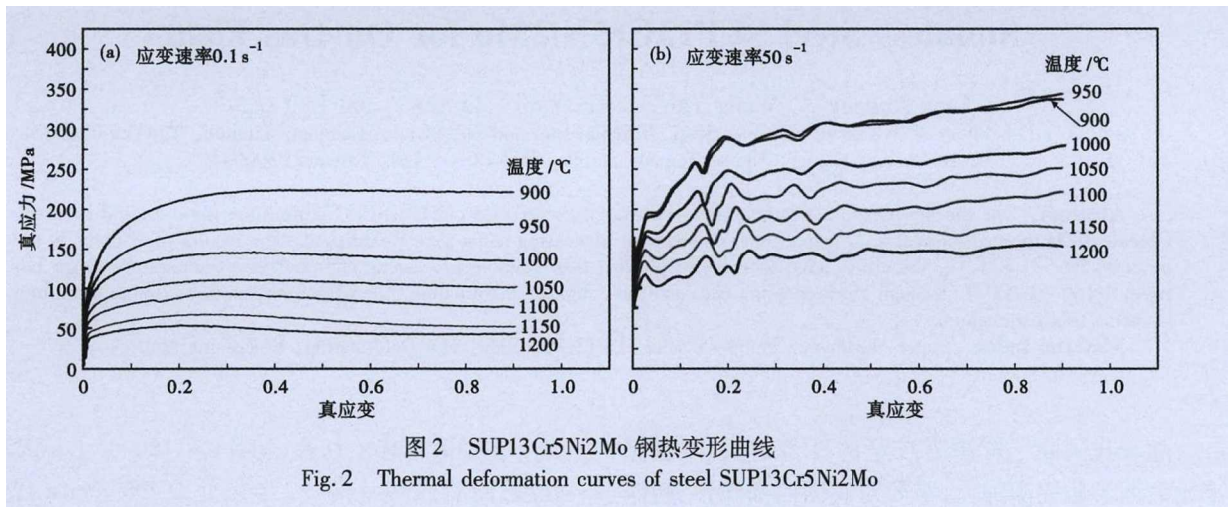


图 2 SUP13Cr5Ni2Mo 钢热变形曲线
Fig. 2 Thermal deformation curves of steel SUP13Cr5Ni2Mo

推导出其本构方程为:

$$\dot{\epsilon} = 4.6 \times 10^{17} [\sinh(0.0057\sigma_p)]^{6.6} \cdot \exp(-442630/RT) \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ - 应变速率; σ_p - 峰值应力; T - 变形温度; R - 热力学常数。

2.3 SUP13Cr5Ni2Mo 钢热变形加工图

2.3.1 加工图建立

基于 Prasad 和 Geggel 等人提出的动态材料模型构造的热加工图^[4-7]能反映材料在不同变形条件下其内部微观组织的变形机制。其认为输入系统的能量 P 由两部分组成:一是塑性变形引起的能量耗散 (G) 大部分转化为热量;二是微观组织演变所耗散的能量 (J)。 P 的数学定义为:

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma \dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = G + J \quad (2)$$

J 与 G 的变化率构成了应变率敏感性指数 m , 即:

$$m = \frac{dJ}{dG} = \frac{\dot{\epsilon} d\sigma}{\sigma d\dot{\epsilon}} = \left. \frac{\partial(\log \sigma)}{\partial(\log \dot{\epsilon})} \right|_{\dot{\epsilon}, T} \quad (3)$$

$$J \text{ 可以由下式给定: } J = \frac{m}{m+1} \sigma \dot{\epsilon} \quad (4)$$

对于理想线性耗散单元 ($m = 1$), J 具有最大值, 且 $J_{\max} = \frac{P}{2} = \frac{\sigma \dot{\epsilon}}{2}$; 对于非线性耗散单元, 能量耗散率 r_i 可表示为:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (5)$$

r_i 为无量纲参数, 它反映由于显微组织变化而消耗的能量与热变形过程中消耗总能量的关系。 r_i 随应变速率和变形温度的变化, 形成了呈现不同区域的功率耗散图。

Prasad 等根据最大熵增原理提出材料发生塑性流动失稳的条件为^[8-12]:

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln \left(\frac{m}{m+1} \right)}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (6)$$

式中: $\xi(\dot{\epsilon})$ - 应变率敏感因子 m 的函数, 并随变形

温度和应变速率而变化,当 $\xi(\dot{\epsilon}) < 0$ 时将发生不稳定的流动过程。在功率耗散图上标出该值为负的区域称为流动失稳图,将其与能量耗散图叠加就构成了热加工图。

2.3.2 热加工图与组织综合分析

图 3 为 SUP13Cr5Ni2Mo 超级马氏体不锈钢在应变速率分别为 0.3、0.5、0.7 和 0.9 时的功率耗散图。当应变速率为 0.3 时,如图 3 (a) 所示,可以看到功率耗散效率有两个区域存在明显的变化:首先是右下角区域,随着变形温度的升高和应变速率的降低,功率耗散效率逐渐升高,说明热变形时材料内部显微组织演变所耗散的能量从低温高应变速率区向高温低应变速率区增大,当变形温度为 1 150 ~ 1 200 °C、

应变速率为 0.1 s^{-1} 时,功率耗散效率达到最大值 40%;另一个区域是中温高应变速率区(温度为 950 ~ 1 150 °C、应变速率为大于 10 s^{-1}),功率耗散效率向中温高应变速率方向逐渐增加,最大值可达到 25%。对比不同应变速率下的功率耗散图,如图 3 (b ~ d),可以看到随着应变速率的增加,功率耗散效率的数值不断增加,说明随着变形加剧,材料内部组织演变所耗散的能量增加,但其总体的变化趋势基本没有改变。

功率耗散效率反映了材料在不同变形条件下的组织演化规律,尤其反映了动态回复和动态再结晶的进行程度。从耗散图 3 中可以看到,变形温度和应变速率对功率耗散效率的影响较大,即对热变形过程中组织变化的影响较大。随着温度的升高,功率耗散效率普遍增大,说明组织发生了明显的变化。在较低温度下,动态回复是超级马氏体不锈钢主要的软化机制,温度的升高加快了动态再结晶形核率和晶核长大速率,使软化机制从动态回复向动态再结晶转化。在实际生产中,动态再结晶比动态回复更有利于热加工,所对应的功率耗散效率也较高。另一方面,在较低的应变

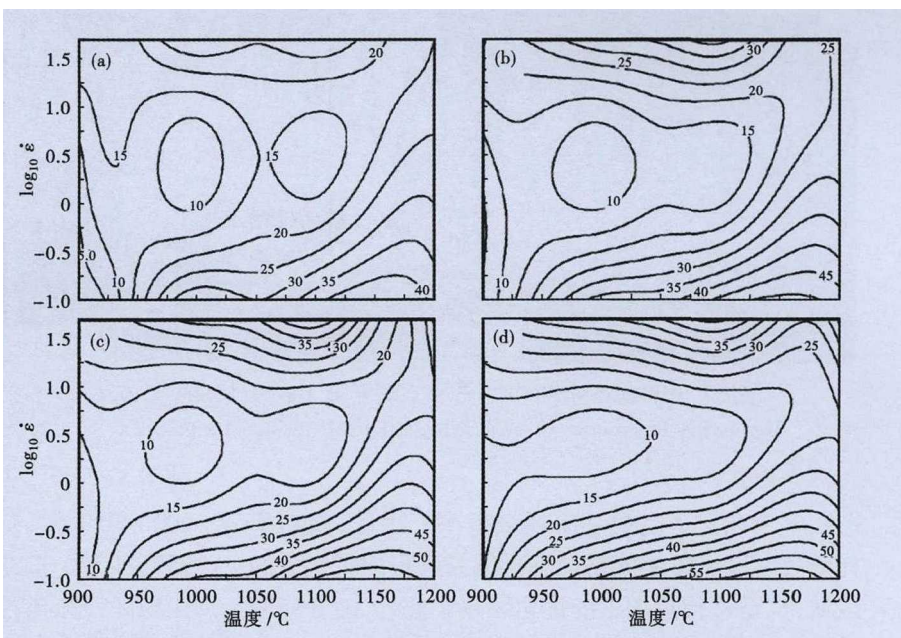


图 3 SUP13Cr5Ni2Mo 钢(a) 0.3; (b) 0.5; (c) 0.7; (d) 0.9 应变时的功率耗散图
Fig. 3 Diagram of power dissipation of steel SUP13Cr5Ni2Mo with strain 0.3 (a), 0.5 (b), 0.7 (c) and 0.9 (d)

速率下 ($< 1 \text{ s}^{-1}$),应变速率越低,动态软化所需要的时间越充分,再结晶形核和长大就越容易,所以功率耗散效率较高,并且这种升高的趋势逐渐向高温方向拓展;而在中高应变速率下 ($> 1 \text{ s}^{-1}$),随着应变速率的升高,对应的功率耗散效率也随之升高,这可能是因为在高应变速率下,材料由于变形速度太快以至于发生的动态回复进行的不充分,位错密度在短时间内迅速上升,促进了动态再结晶形核,高的

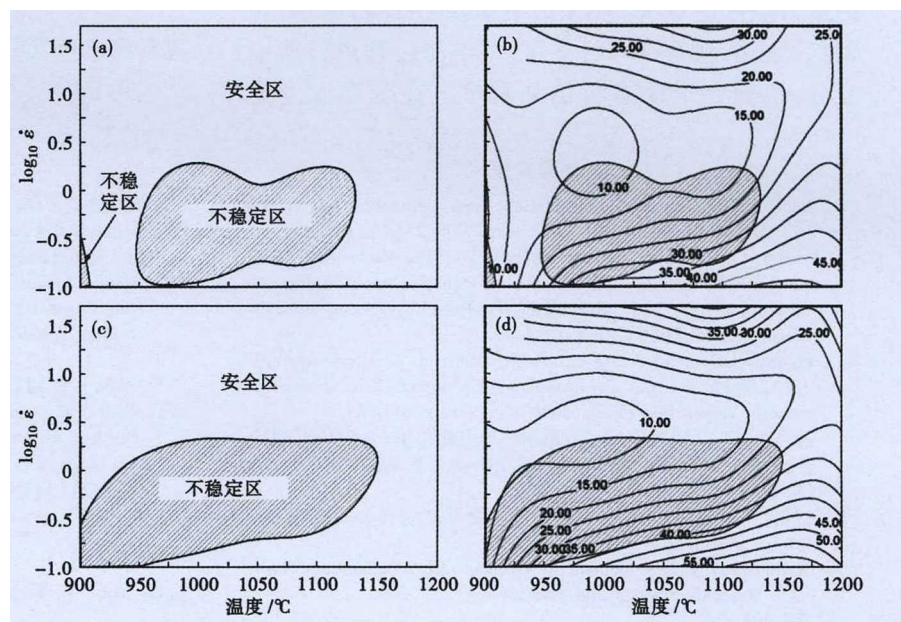


图 4 SUP13Cr5Ni2Mo 钢真应变为 0.5 (a) (b) 和 0.9 (c) (d) 时的失稳图和加工图
Fig. 4 Diagram of safe and unstable regime of process of steel SUP13Cr5Ni2Mo with true strain 0.5 (a) (b) and 0.9 (c) (d)

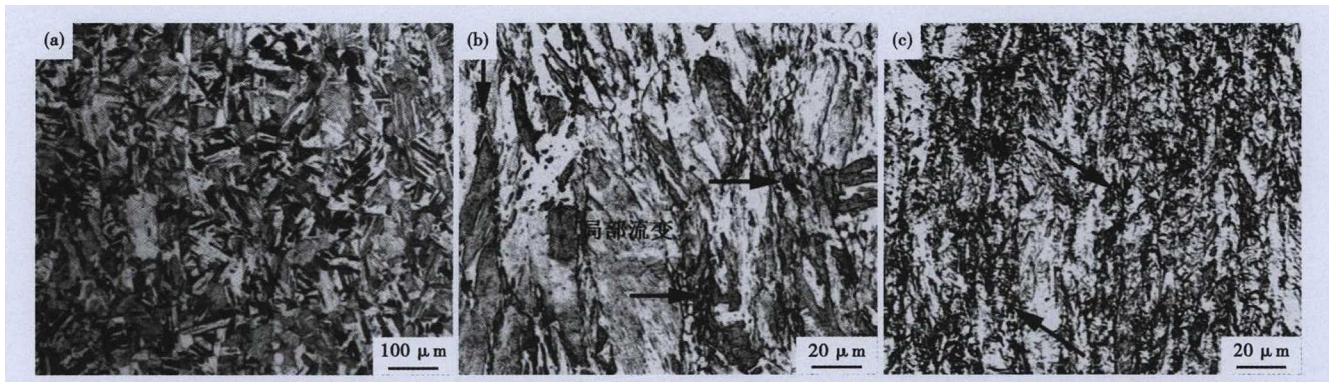


图 5 SUP13Cr5Ni2Mo 钢在(a)1 200 °C, 0.1 s⁻¹; (b)900 °C, 0.1 s⁻¹; (c)1 000 °C, 1 s⁻¹ 变形后组织形貌

Fig. 5 Morphology of structure of steel SUP13Cr5Ni2Mo deformed with 0.1 s⁻¹ at 1 200 °C (a); 0.1 s⁻¹ at 900 °C (b) and 1 s⁻¹ at 1 000 °C

形核率表现出了高的功率耗散效率。因此,高功率耗散效率区域可能就是动态再结晶进行的较充分的区域,也是进行热加工的优化区域。此外,随着应变的增加,组织获得的应变也随之增加,动态回复和动态再结晶过程进行的越来越充分,因此,功率耗散效率有增大的趋势。

从图 4 的不同真应变加工图可以看出,当应变量为 0.5 时,失稳区主要集中在低中温和较低应变率区(温度 < 1 150 °C、应变速率 < 1.78 s⁻¹)。随着应变速率的增大,失稳区呈现增大的趋势,可加工区(安全区)减小。

以应变为 0.9 的加工图为例分析合金在易加工区及失稳区间变形的组织特点。当变形温度 1 100 ~ 1 200 °C、应变速率 0.1 s⁻¹,功率耗散效率的最大值可达 60%,热变形组织如图 5(a) 所示,等轴状的再结晶晶粒均匀分布,再结晶过程进行的很充分,达到完全动态再结晶程度。在变形温度为

900 ~ 950 °C、应变速率为 0.1 s⁻¹ 和变形温度为 950 ~ 1 150 °C、应变速率为 1 s⁻¹ 的阴影区域为材料失稳区,越向阴影区的中心靠近,发生失稳的可能性越大。图 5(b, c) 为合金失稳处的微观组织。可以看到在较低应变速率下,低中温度下材料的应变分布不均匀,出现了局部流变现象,此处的动态回复过程进行的也不充分,因此,该区域不宜进行热加工。

3 结论

(1) SUP13Cr5Ni2Mo 马氏体不锈钢在 900 ~ 1 300 °C, 均具有较好的热塑性。

(2) 基于热加工图以及热变形显微组织分析,确定变形温度为 1 100 ~ 1 200 °C、应变速率为 0.1 s⁻¹ 是最佳的热加工区间,该区域动态再结晶进行充分,功率耗散效率为 60%。

国家重点研发计划课题(2016YFB0300204)资助

参考文献

- [1] Rae C. Alloys by Design: Modelling Next Generation Superalloys [J]. Materials Science and Technology, 2009, 25(4): 479-487.
- [2] Cowen C J, Danielson P E and Jablonski P D. The Microstructural Evolution of Inconel Alloy 740 During Solution Treatment, Aging, and Exposure at 760 °C [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2011, 20(6): 1078-1083.
- [3] Viswanathan R, Coleman K and Rao U. Materials for Ultra-Supercritical Coal-Fired Power Palnt Boilers [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2006, 83(11-12): 778-783.
- [4] 谢锡善, 赵双群, 董建新, 等. 超超临界电站用 Inconel740 镍基合金的组织稳定性及其改型研究 [J]. 动力工程学报, 2011, 31(8): 638-643.
- [5] 赵美兰, 孙文儒, 杨树林, 等. GH761 变形高温合金的热变形行为 [J]. 金属学报, 2009, 45(1): 79-83.
- [6] McQueen H J. Development of Dynamic Recrystallization Theory [J]. Materials Science and Engineering (A), 2004, (387-389): 203-208.
- [7] Poliak E I and Jonass J J. A One-Parameter Approach to Determining the Critical Condition for the Initiation of Dynamic Recrystallization [J]. Acta Materialia, 1996, 44(1): 127-136.
- [8] 李莎, 曾莉, 苗华军, 等. 镍基高温合金 GH4700 的热变形行为及热加工图 [J]. 材料热处理学报, 2013, 34(9): 51-56.
- [9] McQueen H J and Ryan N D. Constitutive Analysis in Hot Working [J]. Materials Science and Engineering (A), 2002, 322: 43-63.
- [10] Robi P S and Dixit U S. Application of Neural Networks in Generating Processing Map for Hot Working [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142: 289-294.
- [11] 王岩, 方旭东, 范光伟, 等. 超超临界锅炉用 S31042 钢的热变形加工图 [J]. 金属热处理, 2015, 40(4): 35-38.
- [12] Park N K, Yoem J T and Na Y S. Characterization of Deformation Stability in Hot Forging of Conventional Ti-6Al-4V Using Processing Maps [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130-131(3): 540-545.

方旭东(1975-), 男, 硕士(2014年太原理工大学), 高级工程师, 1997年天津理工学院(本科)毕业, 不锈钢型材和无缝管研发。E-mail: fangxd@tisco.com.cn

收稿日期: 2018-04-10