

· 试验研究 ·

超高压气瓶钢 34CrMo4H 热压缩流变应力行为

原凌云

(山西太钢不锈钢股份有限公司技术中心,太原 030003)

摘要 采用 Gleeble-3800 型热模拟机试验研究了 34CrMo4H 钢在 900 ~ 1 200 °C、应变速率 0.1 ~ 10 s⁻¹ 时的高温热压缩行为,分析了热压缩变形时材料的流变应力与变形温度、应变速率之间的关系,确定了该钢的流变应力本构方程。结果表明,34CrMo4H 钢在热压缩时流变应力随变形温度的升高而减小,随应变速率的增加而增大。应变速率小于 0.1 s⁻¹ 时,该钢应力-应变曲线表现出明显的动态再结晶特征。34CrMo4H 级钢的变形激活能为 395.45 kJ/mol。

关键词 34CrMo4H 热压缩变形 变形激活能 本构方程

Behavior of Hot Compression Flow Stress of Steel 34CrMo4H for Ultrahigh Pressure Vessel

Yuan Lingyun

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

Abstract Hot compression deformation of steel 34CrMo4H with strain rate 0.1 ~ 10 s⁻¹ at 800 ~ 1 200 °C has been tested and studied by using Gleeble-3800 thermo-mechanical simulator to analyze in hot deformation of this steel. The relationships between flow stress and strain rate, as well as flow stress and deformation temperature were studied. Results show that the flow stress increases with the increase of strain rates and decreases with the increase of temperature, and as the strain rate is 0.1 s⁻¹, the feature of dynamic recrystallization occurs obviously on flow stress curves of steel. The hot deformation activation energy of steel 34CrMo4H is 395.45 kJ/mol.

Material Index 34CrMo4H, Hot Compression Deformation, Deformation Activation Energy, Constitutive Equation

高压气瓶主要用于充装氧气、氮气、氢气、氩气、液化天然气以及稀有气体等压缩气体,在工业、民用和国防等领域广泛使用,其使用的工作压力主要有 15 MPa 和 20 MPa。近年来,欧、美等先进国家已经开始使用工作压力 30 MPa 超高压无缝气瓶。该气瓶的设计壁厚比使用其它材料制造的高压无缝气瓶大大减薄,这样不仅实现了冲拔高压无缝气瓶的轻量化,节约了资源,减少了运输和搬运过程中的损耗,最为重要的是提高了单支高压无缝气瓶的气体充装量,实现了节能环保要求。因此,工作压力 30 MPa 的超高压无缝气瓶已经成为市场发展态势,并呈现快速增长^[1]。

在超高压气瓶的发展过程中,尹谢平、南广利等研究了 34CrMo4 钢材在湿硫化氢环境下的应力腐蚀^[2-3],聂爱诚等研究了 34CrMo4 连铸坯的制造工艺^[4-5],尹谢平等还研究了添加不同成分的微量元素对该钢种的低温冲击韧性的影响^[1],但是有关其热加工性能方面的研究鲜有报道,因此本文通过研究 34CrMo4H 级钢的高温热压缩行为,确立了材料的本构方程,为该钢种热加工工艺的制定与优化提供

理论依据。

1 试验材料与方法

试验用钢采用 80 t 转炉冶炼,LF 精炼、VD 真空脱气处理,下铸 5.8 t 矩形锭,Φ 1 000 mm 可逆式初轧机轧成 203 mm × 203 mm 钢坯,热轧后缓冷。该试验钢的化学成分(%)为 0.30C,0.19Si,0.74Mn,0.005P,0.005S,1.05Cr,0.20Ni,0.01V,0.03Nb,0.25Mo,0.03Al,Fe 余量。自钢坯对角线上距角部 1/4 处钻取 Φ 25 mm 毛坯试样。将毛坯试样机加工成 Φ 10 mm × 15 mm 圆棒状热压缩试样。

在 Gleeble-3800 热模拟试验机上进行高温压缩试验。压缩时在试样两端涂敷高温石墨润滑剂,并在试样与压头之间放置钼箔以减少端面摩擦的影响。压缩试验温度为 900 ~ 1 200 °C,应变速率为 0.1,1,5,10 s⁻¹。试验时将试样以 5 °C/s 的速度升温至预设温度,保温 3 min 以使材料温度均匀,然后按照设定的变形速率进行压缩实验,压缩量为真应变 0.7。

2 试验结果及讨论

2.1 真应力-应变曲线

34CrMo4H 钢在温度 900 ~ 1 200 °C、应变速率

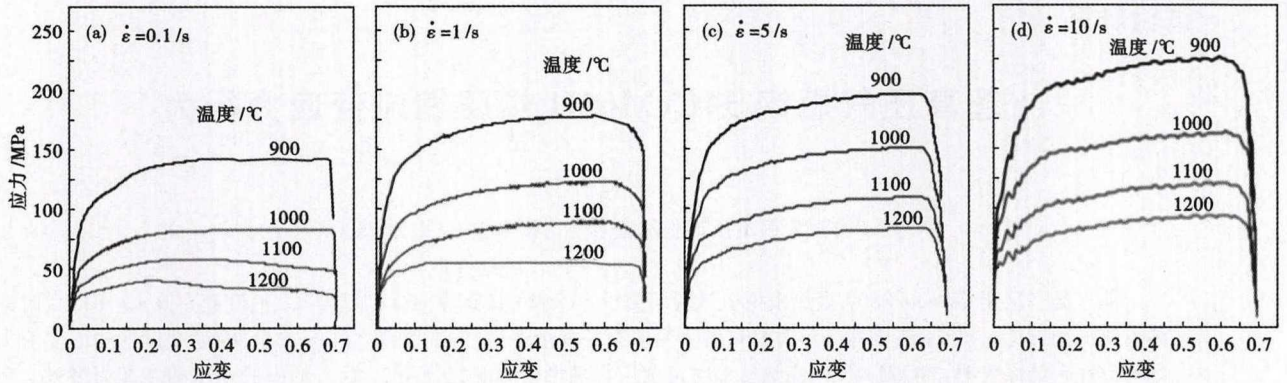


图 1 应变速率 $\dot{\epsilon}$ (a) = 0.1/s; (b) = 1/s; (c) = 5/s; (d) = 10/s 时 34CrMo4H 钢热压缩变形的真应力-真应变曲线

Fig. 1 True stress-strain curves of 34CrMo4H steel during hot compression deformation with strain rate $\dot{\epsilon}$ (a) = 0.1/s, (b) = 1/s, (c) = 5/s, (d) = 10/s

0.1 ~ 10 s⁻¹下的热压缩真应力-真应变曲线见图 1。可以看出,初始变形阶段,随着应变量的增加真应力迅速增大,当应变达到某一值后,材料的真应力趋于稳定。在应变速率一定时,真应力值随温度升高而降低;相同的温度条件时,真应力值随应变速率的升高而增加。图 1(a)和图 1(b)中 1 200 °C 的真应力-真应变曲线中,真应力达到峰值后下降至某一值保持不变,为典型动态再结晶型曲线^[3-5];图 1(b)中 900 ~ 1 100 °C 和图 1(c, d)的曲线中其真应力值在较大应变下保持不变或者仍有上升,为动态回复型曲线^[6-8]。可知,随着应变速率的降低和变形温度的升高,34CrMo4H 钢的真应力-真应变曲线由动态回复型向动态再结晶型转变。

材料热加工过程中,流变应力由其形变层错能、形变温度和应变速率等因素^[4-7]决定。形变引起的位错增殖导致材料的加工硬化,在一定温度下,随着应变速率的增加,材料的位错密度迅速增加,其应力也随之增大。当变形量到达一定程度时,位错将通过攀移或交滑移发生合并、重组等动态回复或动态再结晶转变导致材料软化。在高温和低应变速率状态下,材料达到临界应变以后,将发生动态再结晶,其流变应力达到峰值后略微下降。在低温和高应变速率情况下,材料变形积累的位错能较低,不足以达到发生动态再结晶的条件,此时软化机制主要为动态回复,当动态回复所产生的软化与加工硬化达到平衡后,流变应力将趋于某一稳定值^[9]。

2.2 热激活能与本构方程

金属材料高温时的热变形受热激活过程控制,其应变速率 $\dot{\epsilon}$ 和变形温度 T 之间的关系可用 Zener-Hollomon 参数 Z 表示^[5-9]:

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (1)$$

式中: Q - 变形激活能/(kJ · mol⁻¹); R - 摩尔气体常数; T - 热力学温度/K; $\dot{\epsilon}$ - 应变速率/s⁻¹。

高温热变形时 $\dot{\epsilon}$ 、 σ 和 T 之间的关系根据应力水平状况分别由下述 3 种形式描述。

低应力水平下 ($\alpha\sigma < 0.8$ 时):

$$\dot{\epsilon} = A_1 \sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

高应力水平下 ($\alpha\sigma > 1.2$ 时):

$$\dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp(-Q/RT) \quad (3)$$

整个应力水平时:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp(-Q/RT) \quad (4)$$

式中: A_1, A_2, β, A - 常数; σ - 稳态流变应力/MPa; α - 应力水平参数/MPa, $\alpha = \beta/n$; n - 应力指数。

对式(2)和(3)取对数,将试验获得的真应力-真应变曲线数据代入,分别以 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln \sigma$ 、 $\ln \dot{\epsilon}$ 和 σ 为坐标作图见图 2。采用最小二乘法进行线性回归,得到图 2(a)中 4 条直线的斜率,取平均值获得 n 值, $n = 7.241$;由图 2(b)中 4 条直线的斜率平均值得到 β 值, $\beta = 0.078$, $\alpha = \beta/n = 0.011$ 。

对于整个应力水平,将式(4)取对数并求偏微分,得到式(5):

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]} \right\}_T \left\{ \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right\}; \quad (5)$$

将 34CrMo4H 钢在 900 ~ 1 200 °C 的应变速率、流变应力和应力水平参数数据做 $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - 1/T$ 散点图,见图 3(a);将应变速率 0.1 ~ 10 s⁻¹ 的流变应力、变形温度和应力水平参数数据做以 $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ 散点图,见图 3(b)。采用最小二乘法线性回归得到图 3(a)中 4 条直线的平均斜率为 9 085.845,图 3(b)中 4 条直线的平均斜率为 5.235,

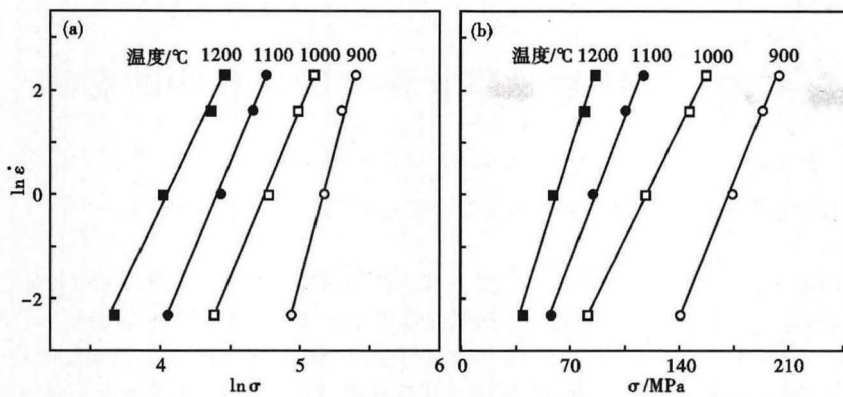


图2 34CrMo4H 钢峰值应力 $\ln\sigma$ 、 σ 与应变速率 $\ln\dot{\epsilon}$ 之间的关系

Fig.2 Relationship between peak stress $\ln\sigma$ 、 σ and $\ln\dot{\epsilon}$ of 34CrMo4H steel

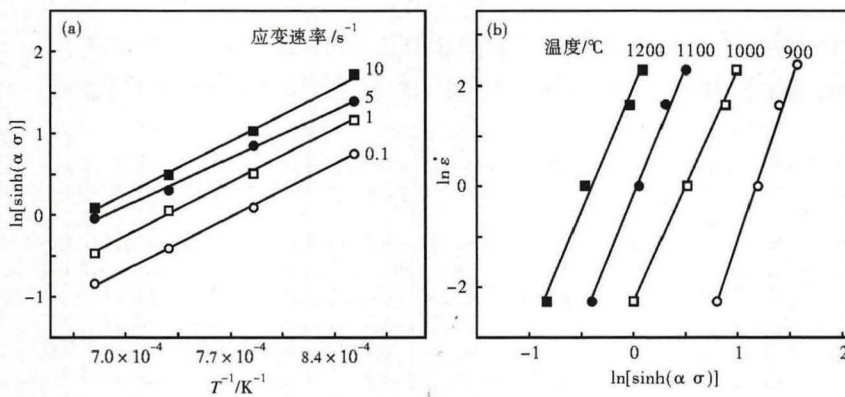


图3 (a) $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 和 $1/T$; (b) $\ln\dot{\epsilon}$ 和 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系

Fig.3 Relation between $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and $1/T$ (a) and $\ln\dot{\epsilon}$ and $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (b)

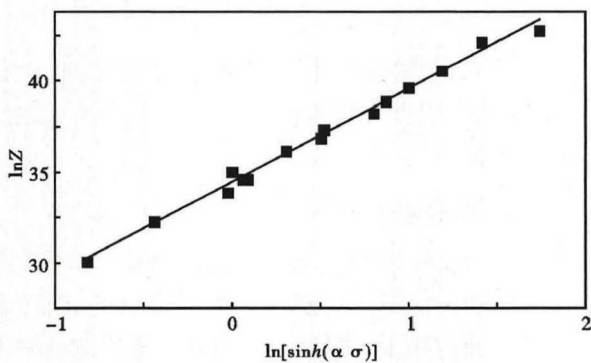


图4 参数 Z 与 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 的关系

Fig.4 Relation of $\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ and Zener-Hollomon parameter

从而计算获得形变激活能 $Q = 395.45 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

将式(4)代入式(1),并对式两边取自然对数,可得: $\ln Z = \ln \dot{\epsilon} + Q/RT$ (6)

$$\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] \quad (7)$$

将前述所得材料的形变激活能 Q 、变形温度、应变速率数据代入式(6)求得 $\ln Z$ 值。取不同温度和不同应变速率下的峰值流变应力数据,做 $\ln Z$ -

$\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 散点图,并利用最小二乘法进行线性回归,如图4所示。由式(7)可知, $\ln A$ 和 n 分别为 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线中的截距和斜率,可得 $n = 5.14$, $\ln A = 34.45$,则 $A = 9.132 \times 10^{14}$ 。

将计算所得参数代入式(4),得到 34CrMo4H 钢热塑性加工时的流变应力方程为:

$$\dot{\epsilon} = 9.132 \times 10^{14} [\sinh(0.011\sigma)]^{5.14} \cdot \exp(-395.45 \times 10^3/RT) \quad (8)$$

利用方程式(8)可为 34CrMo4H 钢热加工工艺的制定提供理论依据。

3 结论

(1) 34CrMo4H 钢热变形时的流变应力随变形温度的降低而升高,随应变速率的增大而提高。当应变速率小于 1 s^{-1} 时,流变应力曲线表现为动态再结晶特征。

(2) 34CrMo4H 钢热加工时的形变激活能为 395.45 kJ/mol ,流变应力本构方程为:

$$\dot{\epsilon} = 9.132 \times 10^{14} [\sinh(0.011\sigma)]^{5.14} \cdot \exp(-395.45 \times 10^3/RT)$$

参考文献

- [1] 尹谢平,陆明,徐淑芳,等. 高压气瓶用 34CrMo4-H 高强度钢的研究[J]. 压力容器,2014,31(10):1-8.
- [2] 尹谢平,吴传潇,蒋锡军,等. 高压气瓶用 34CrMo4 钢的抗氢脆性能及影响因素[J]. 机械工程材料,2018,42(1):23-27.
- [3] 南广利. 34CrMo4 钢在湿硫化氢介质环境下的应力腐蚀试验研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2011.
- [4] 聂爱诚,徐国庆,孙鸿平,等. 轧制气瓶用 34CrMo4 连铸坯生产实践[J]. 江苏冶金,2009,37(2):17-20.
- [5] 卢秉军,齐峰,沈万林,等. 连铸电磁搅拌和轻压下对气瓶钢 34CrMo4 冶金质量的影响[J]. 特殊钢,2017,38(5):40-43.
- [6] 胡美娟,王鹏,李金凤,等. 20CrMo 合金钢热压缩流变应力研究[J]. 热加工工艺,2011,40(17):42-44.
- [7] 孔进丽,董汉雄,邹德辉,等. Q550 级桥梁钢动态再结晶行为研究[J]. 材料热处理技术,2012,41(4):39-42.
- [8] 王玉玲,成生伟. 动车组车轴用钢 EA1N 的热压缩流变应力行为[J]. 特殊钢,2017,38(1):63-65.
- [9] 蔺永诚,陈明松,钟掘. 42CrMo 钢的热压缩流变应力行为[J]. 中南大学学报(自然科学版),2008,39(3):549-553.

原凌云(1973-),男,硕士,高级工程师,1997年东北大学(本科)毕业,钢铁新产品和技术开发。
E-mail: yly725@163.com.

收稿日期:2019-02-15