

700 MPa 管线钢热压缩变形及组织研究

杨秀芝^{1,2} 华文林¹ 杨春杰¹ 董春法¹ 肖新华¹

(1 湖北理工学院机电学院, 黄石 435003; 2 华中科技大学材料成形及模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要 利用 Gleeble-3500 型热模拟机, 研究 700 MPa 管线钢(/% : 0.07C, 0.90Si, 0.60Mn, 0.008P, 0.002S, 0.30Ni, 0.10Cr, 0.12Mo, 0.06V, 0.03Nb, 0.28Cu, 0.04Al, 0.006 0N) 20 mm 热轧板在 850 ~ 1 250 °C 和应变速率 0.01 ~ 1 s⁻¹ 下单道次热压缩变形及组织演变, 得出单道次压缩变形真应力-真应变曲线, 热压缩再结晶动态图和动态再结晶开始时间与变形温度关系(RTT)曲线。研究结果表明, 发生再结晶由变形温度和应变速率共同决定, 该 700 MPa 管线钢在温度 1 100 ~ 1 250 °C 和应变速率 0.01 ~ 0.1 s⁻¹ 下压缩变形时容易发生再结晶。再结晶发生机制是热压缩应变, 使得原始晶粒破碎、新晶界产生迁移促使新晶核生成。

关键词 700 MPa 管线钢 20 mm 热轧板 再结晶 热压缩

A Study on Thermal Compression Deformation and Structure of 700 MPa Pipeline Steel

Yang Xiuzhi^{1,2}, Hua Wenlin¹, Yang Chunjie¹, Dong Chunfa¹ and Xiao Xinhua¹

(1 Mechanical and Electrical College, Hubei Polytechnic Institute, Huangshi 435003;

2 State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract With using Gleeble-3500 thermal simulator the single pass hot compression deformation and structure evolution of 20 mm hot-rolled plate of 700 MPa pipeline steel (/% : 0.07C, 0.90Si, 0.60Mn, 0.008P, 0.002S, 0.30Ni, 0.10Cr, 0.12Mo, 0.06V, 0.03Nb, 0.28Cu, 0.04Al, 0.006 0N) with strain rate 0.01 ~ 1 s⁻¹ at 850 ~ 1 250 °C have been studied to get single pass real stress-strain curves, hot compression dynamic recrystallization diagram and relation between dynamic recrystallization initial time and deformation temperature (RTT) curves. Research results show that deformation temperature and strain rate make certain of initial recrystallization, the 700 MPa pipe line steel easily occurs dynamic recrystallization with strain rate 0.01 ~ 0.1 s⁻¹ at 1 100 ~ 1 250 °C. the recrystallization mechanism is hot compression causing the original grain crushing and the new grain boundary migrating to prompt formation of new crystal nucleus.

Material Index 700 MPa Pipeline Steel, 20 mm Hot-Rolled Plate, Recrystallization, Hot Compression

随着对深海油田的开发, 对管线钢综合力学性能要求越来越严格, 通过轧制细化晶粒是提高性能的最直接的途径之一^[1-4]。本文采用热模拟技术研究了 700 MPa 管线钢在不同热压缩变形参量下的热变形及再结晶行为规律, 探讨通过热加工手段获得细小均匀的组织最佳工艺参数, 优化热加工工艺为实际生产提供数据支持。

1 材料选择及试验方法

试验钢化学成分见表 1。在经过精炼及控制轧制(Thermo Mechanical Control Process, TMCP)技术的 20mm 厚的钢板中截取 Φ10 mm × 15 mm 的圆棒试样若干, 试样长度方向垂直于钢板轧制方向。试验在 Gleeble-3500 型热模拟试验机进行单道次压缩变形实验。热模拟变形量定为 60%, 变形温度 T_b 分别取 850 ~ 1 250

°C, 应变速率 0.01、1、0.1 s⁻¹, 具体热模拟工艺如图 1 所示。热压缩模拟试验后即刻进行淬火处理以固定热变形试样后的奥氏体(A)组织, 再用饱和苦味酸水溶液腐蚀、抛光后, 在 65 °C 水浴锅中热侵蚀几分钟吹干, 进行奥氏体晶粒观察试验。

2 结果与分析

2.1 不同应变速率下试验钢流变曲线

热模拟热压缩变形后得到试验钢的流变曲线如图 2 所示, 分析图 2 有: 随着变形温度的降低和应变速率的增加, 流变曲线模型逐渐从加工硬化型向回复和再结晶转变, 试验钢承受的应力最大值与应变

表 1 试验管线钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of tested pipeline steel / %

C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Cr	Mo	V	Nb	Cu	N
0.07	0.90	0.60	0.008	0.002	0.30	0.04	0.10	0.12	0.06	0.03	0.28	0.006 0

增大的趋势一致。其原因是,在试验初期,变形程度增加变形抗力同样增加,试样呈现明显的加工硬化现象;在后续的变形过程中位错密度不断增加,变形越来越困难,晶粒内部回复和再结晶的趋势加强,出现软化现象,流变曲线的梯度变缓,回复与再结晶软化机制在热流变中起主导作用,流变曲线变缓。

2.2 热压缩再结晶图

从流变曲线试验数据中提取 ϵ_r 和 ϵ_p 等特征参量,其中, ϵ_p 为峰值应力下的峰值应变, ϵ_r 为试验钢热压缩变形开始到再结晶结束的变形量综合,其值为流变曲线上应力达到峰值到随后下降到稳定态时所对应的应变差值^[5]。 ϵ_c 为发生再结晶的临界

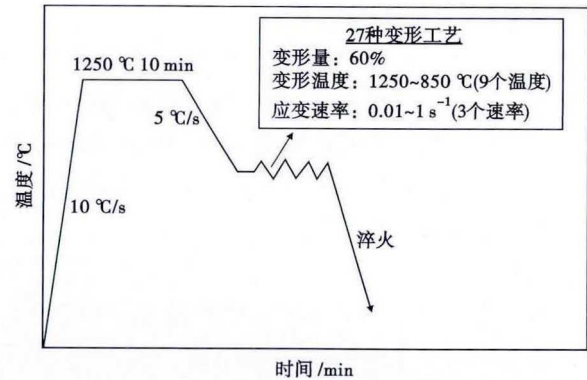


图 1 试验管线钢单道次热压缩工艺参数
Fig. 1 Process parameters of single thermal compression of tested pipeline steel

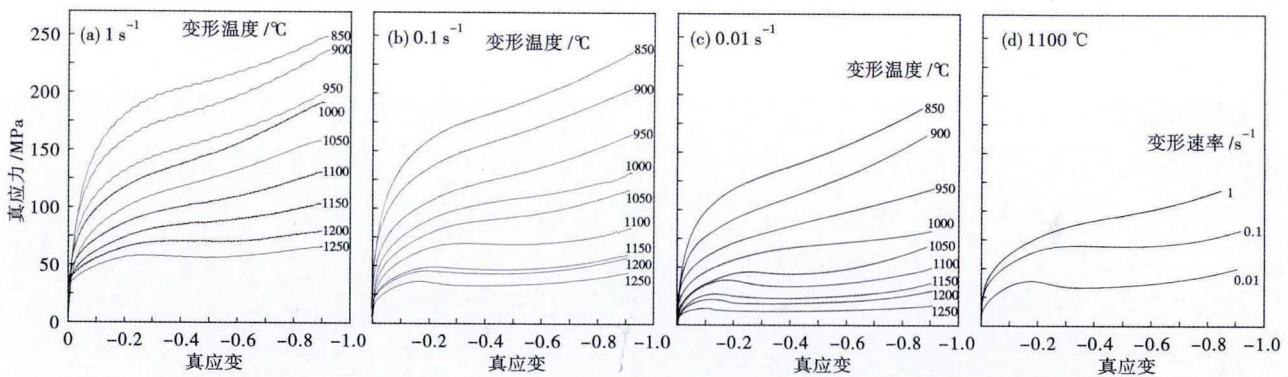


图 2 试验管线钢单道次热压缩真应力-真应变曲线,应变速率:(a) 1 s^{-1} , (b) 0.1 s^{-1} , (c) 0.01 s^{-1} 和 (d) 温度为 $1100 \text{ }^\circ\text{C}$
Fig. 2 True stress-strain curves of single pass compression of tested pipeline steel, train rate: (a) 1 s^{-1} , (b) 0.1 s^{-1} , (c) 0.01 s^{-1} , and (d) temperature at $1100 \text{ }^\circ\text{C}$

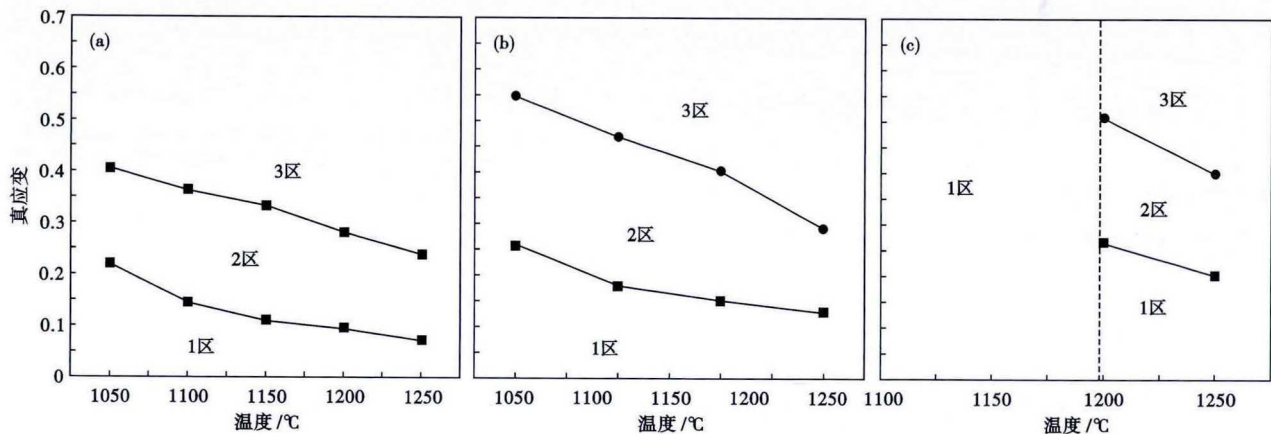


图 3 试验管线钢热压缩再结晶动态图,应变速率:(a) 0.01 s^{-1} ; (b) 0.1 s^{-1} ; (c) 1 s^{-1}
Fig. 3 Thermal compression dynamic recrystallization diagram of tested pipeline steel, strain rate: (a) 0.01 s^{-1} , (b) 0.1 s^{-1} and (c) 1 s^{-1}

变形量, $\epsilon_c \approx 0.83 \epsilon_p$, 根据 ϵ_r 和 ϵ_c 值作出试验钢热压缩再结晶图,如图 3 所示,其中 1 区为再结晶区未发生区,2 区为部分再结晶区,3 区为再结晶结束区。

2.3 再结晶温度与开始时间关系

热压缩再结晶开始时间(τ_c)反映再结晶发生的

早晚,可由式(1)^[5-7]表示: $\tau_c = \epsilon_c / \dot{\epsilon}$ (1)

式中: ϵ_c - 临界应变; $\dot{\epsilon}$ - 应变速率。

由式(1)得出,试验钢的动态再结晶开始时间与变形温度关系的曲线(即 RTT 曲线),如图 4 所示,由图 4 可知,在高温时,试验钢 τ_c 值对温度的变

化敏感度不明显;在变形温度相同时,随应变速率的增大,虽然动态再结晶发生所需的临界应变增大,但热压缩再结晶行为开始时间 τ_c 却明显缩短。在温度较低时, τ_c 受变形温度变化较敏感;在相同的应变速率下,随温度的升高,再结晶行为发生所需的临界应变越小,再结晶的开始时间 τ_c 也缩短。

2.4 同一温度、不同变形量时奥氏体晶粒形态变化

图 5 为变形速率 0.1 s^{-1} , 变形温度 $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 不同变形时刻下, 试验钢发生热压缩再结晶时, 奥氏体组织(A)的演变规律。分析图 5 可知, 变形前(即变形为 0)的奥氏体晶界平直、晶粒粗大。临界应变时(即变形为 0.17 mm)的奥氏体晶界弯曲, 晶界发生迁移, 奥氏体晶粒明显细化。峰值应变时(即变形为 0.21 mm), 大应变促使晶粒细化, 在粗晶界处有

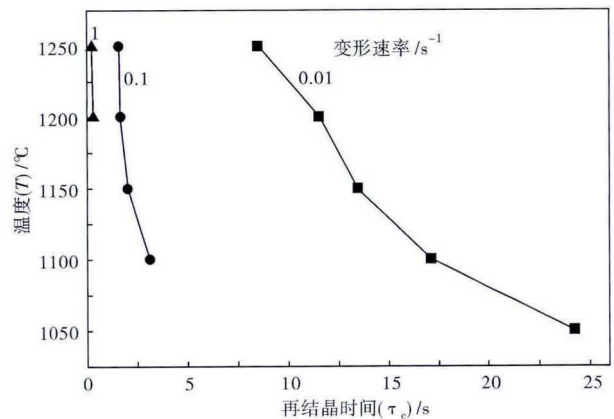


图 4 试验管线钢的动态再结晶开始时间与变形温度的关系(RTT)曲线

Fig. 4 Relation between dynamic recrystallization initial time and deformation temperature (RTT) of tested pipeline steel

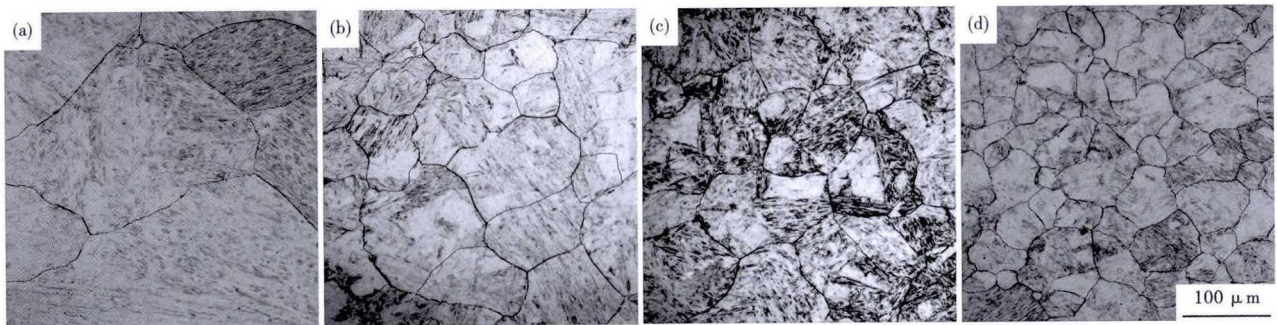


图 5 试验管线钢在 $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ 、应变速率 0.1 s^{-1} , 变形量 0, 未变形(a), 0.17 , 临界变形(b), 0.21 , 变形峰值(c)和 0.60 , 再结晶结束(d)时原始奥氏体晶粒形貌

Fig. 5 Original austenite grain morphology of tested pipeline steel at $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ with strain rate 0.1 s^{-1} and deformation: 0, non-deformation (a), 0.17 , critical deformation (b), 0.21 , deformation peak (c) and 0.60 , finished recrystallization (d)

细小的再结晶晶粒, 奥氏体晶粒尺寸相差较大。当变形进入稳定阶段(即变形为 0.60 mm), 奥氏体组织已完成了一轮热压缩再结晶行为, 新晶界具有明显的分割效应, 再结晶最大程度细化了晶粒。

3 结论

(1) 热压缩再结晶发生受到应变速率和变形温度共同影响。

(2) 在应变速率为 0.1 s^{-1} , 变形温度 $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下, 不同变形程度使得奥氏体晶粒都不同程度细化, 其中热压缩再结晶结束时刻, 试验钢奥氏体晶粒得到最大程度的均匀化和细化。

华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室开放课题(No. P2018-014)资助

参考文献

[1] 董阳, 刘正, 毛萍莉, 等. Mg-4Zn-0.5Y-0.5Nd-0.3Zr 镁合金动态压缩行为及变形组织[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 29

(4):1-6.

- [2] 王小江, 孙新军, 李昭东, 等. 卷取温度对高 Nb 微合金钢组织、力学性能及第二相析出的影响[J]. 材料工程, 2016, 44(2): 35-42.
- [3] 李小琳, 王昭东, 邓想涛, 等. Nb 元素对含 Ti 低碳微合金钢连续冷却转变及析出行为的影响[J]. 轧钢, 2016(1): 5-9.
- [4] 王晓峰, 王雷. 34CrMoV 结构钢动态再结晶行为研究[J]. 钢铁钒钛, 2007, 28(1): 18-21.
- [5] 王天一, 丁汉林, 刘育锋, 等. Mg-1.0% Zn-1.5% Ca 合金热压缩过程的显微组织及动态再结晶行为[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(10): 2474-2478.
- [6] 洪光涛, 孔进丽, 李海洋, 等. Q460GJE 钢形变奥氏体的动态再结晶行为研究[J]. 上海金属, 2014, 36(3): 20-23.
- [7] 高建忠, 郭斌, 徐进桥, 等. X120 管线钢热变形行为及动态再结晶晶粒的演变规律[J]. 上海金属, 2011, 33(3): 6-9.

杨秀芝(1974-), 女, 博士(2010 年华南理工大学), 副教授, 1997 年武汉汽车工业大学(本科)毕业, 焊接新材料新工艺, 金属线材工艺等方面的研究。

E-mail: yangliushuzhi@163.com

收稿日期: 2017-11-23