

20[#]钢的慢速率高温流变实验和模拟

李建峰^①, 宋茂双^{①*}, 邵同宾^①, 夏莹^{①②}, 张桂男^{①②}, 周微^{①②}, 陈雪霏^{①②}, 王茜^①^① 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640;^② 中国科学院大学, 北京 100049

* 联系人, E-mail: msong@gig.ac.cn

2012-10-14 收稿, 2012-10-30 接受

国家自然科学基金(41174072, 41090373, 41102139, 40772029, 41121002)和中国科学院“百人计划”(KZCX0733221A 07)资助

摘要 碳钢种类繁多且广泛应用于建筑、汽车制造等领域. 选择其中的 20[#]低碳钢, 利用 Paterson 高温高压流变仪在恒温条件下, 完成了单阶恒应变速率和多阶突变应变速率两类轴向压缩实验. 实验条件如下: 温度 700~900℃, 围压 100~300 MPa, 应变速率 10^{-5} ~ 10^{-3} s⁻¹. 测定了不同条件下变形过程中的应力-应变曲线, 并进行了流变本构方程计算. 结果显示, 流变本构方程中的参数对应变的函数依赖关系与快速变形时类似. 由本构方程模拟计算所得的流变应力可以很好地拟合单阶恒应变速率实验; 由于多阶突变应变速率实验受变形历史影响大, 因此拟合精度较差但仍可接受. 另外, 研究表明, 在慢速率变形时无论是低温的铁素体相还是高温的奥氏体相, 20[#]钢的流变行为均可用相同的流变本构方程进行描述, 但是相变区的流变行为则不同, 需要对 $\ln A$ 的表达式稍作修正.

关键词

20[#]低碳钢
应力-应变
慢速率
Paterson 高温高压
流变仪
流变本构方程

金属材料因具有高的韧性和延展性而明显区别于非金属材料, 因此金属材料在承受应力时, 往往表现为塑性流变, 而非脆性破裂. 在现代工业中, 金属冶炼和制造需要我们对金属材料在相应条件下的流变性质有详细的了解和认知. 前人对此进行了大量的工作, 测定实验条件下的应力-应变曲线, 并厘定和修订描述应力与温度、压力、应变以及应变速率关系的流变本构方程^[1~3]. 但是, 基于冶金和制造的需求, 前人多关心金属在高温和快应变速率条件下的变形, 杨现亮和潘家冰^[4]研究了 1, 5 和 10 s⁻¹ 应变速率下的 20[#]钢的流变本构方程和显微结构; 张勇明和白月香^[5]探讨了 0.5 和 5 s⁻¹ 应变速率下低碳钢的重结晶作用和组织演化; 裴新华等人^[6]讨论了 10 s⁻¹ 应变速率下的 Q235 钢的流变行为和显微结构. 然而, 对慢应变速率条件下金属流变行为和显微结构的研究很少. 金属材料、金属制品、车辆机械零部件等工作时往往处于持久拉伸或压缩环境中, 在工况温度

(高温)下发生慢速率热变形, 因此对于慢应变速率流变行为的认识 and 了解也同样重要.

本文选择 20[#]低碳钢, 利用应力测量精度高的 Paterson 高温高压流变仪, 在 700~900℃, 100~300 MPa 条件下完成了轴向压缩实验, 初步研究了其慢速率(10^{-3} ~ 10^{-5} s⁻¹)变形过程中的流变行为. 实验选择的压力可以很好地抑制样品在变形过程中的微破裂, 温度(700~900℃)横跨 20[#]低碳钢的相变曲线, 保证了可以同时掌握 20[#]低碳钢低温铁素体相和高温奥氏体相的流变行为.

1 材料及方法

实验用 20[#]低碳钢化学成分(质量分数, %)为: C, 0.17~0.24; Si, 0.17~0.37; Mn, 0.35~0.65; S, ≤0.035; P, ≤0.035; Cr, ≤0.25; Ni, ≤0.25; Cu, ≤0.25; 其余为 Fe (深圳市意达特殊钢材有限公司, <http://www.yd-mouldsteel.com/news/html/20-508.shtml>). 其在常温下

引用格式: 李建峰, 宋茂双, 邵同宾, 等. 20[#]钢的慢速率高温流变实验和模拟. 科学通报, 2013, 58: 940-945

Li J F, Song M S, Shao T B, et al. Experimental study and prediction of deformation behavior of low carbon steel at low strain rate and high temperature (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58: 940-945, doi: 10.1360/972012-926

的显微结构特征：渗碳体呈圆球状均匀地分布在铁素体之中。

从 20# 低碳钢棒材上机械加工直径 10 mm，长度 20 mm 的圆柱试样，并将两个端面抛光(±5 μm 的误差)。在干燥箱内 110℃ 温度下烘干 24 h 以上。然后如图 1 所示组装样品：样品两侧对称组装两个 3 mm 厚的 Al₂O₃ 陶瓷垫片、Al₂O₃ 陶瓷活塞和 ZrO₂ 陶瓷活塞，以降低由热传导造成的热量流失和维持沿样品长轴分布的均匀温度剖面。最后用 0.25 mm 厚、直径为 15 mm 的铁筒(20# 低碳钢)包裹以上组装，以便将样品和围压介质(氩气)隔离。

高温高压轴向压缩实验在 Paterson 高温高压流变仪中进行，围压介质为氩气，利用安装在距离样品上表面 3 mm 处的 R 型(Pt13%Rh-Pt)热电偶来测量并控制实验温度，仪器的详细信息和轴向压缩变形的理论基础参考文献[7,8]。以 20℃/min 的速度将样品加热到实验温度，保温 15 min，然后开始变形实验。各变形实验的温度、压力和应变速率设定见表 1。实验根据应变速率设定不同分为两类：(1) 单阶恒应变速率实验：实验开始设定应变速率，直至变形实验结束；(2) 多阶突变应变速率实验：实验开始设定一个应变速率，当达到流变稳态且维持一定应变量之后，

改变应变速率当再次达到流变稳态，且维持一定应变量之后终止或者再次改变应变速率。

应变和应变速率的测定通过测量相对于样品原长度的轴向位移来实现。内部加载模块所测量的内部加载力经过仪器变形量校正和截面积变化校正之后，计算出差应力。具体实验数据处理方法参考文献[8]。

2 流变本构方程

2.1 理论依据

迄今为止，大量的研究工作证明，双曲正弦形式的本构方程^[9]可以很好地描述金属材料变形时稳态流变应力和峰值应力对于温度和应变速率的依赖关系。方程表达式如下：

$$\dot{\epsilon} = A \sinh(\alpha\sigma)^n \exp(-Q/RT), \quad (1)$$

式中 A 和 α 是常数， $\dot{\epsilon}$ 是应变速率， σ 是稳态流变应力或峰值应力， n 是应力指数， Q 是表观活化能， R 是气体常数， T 是绝对温度。

随后，对大量材料的流变研究证实，简化了的幂指数形式本构方程也可以很好地描述材料的流变行为^[10]。其表达式如下：

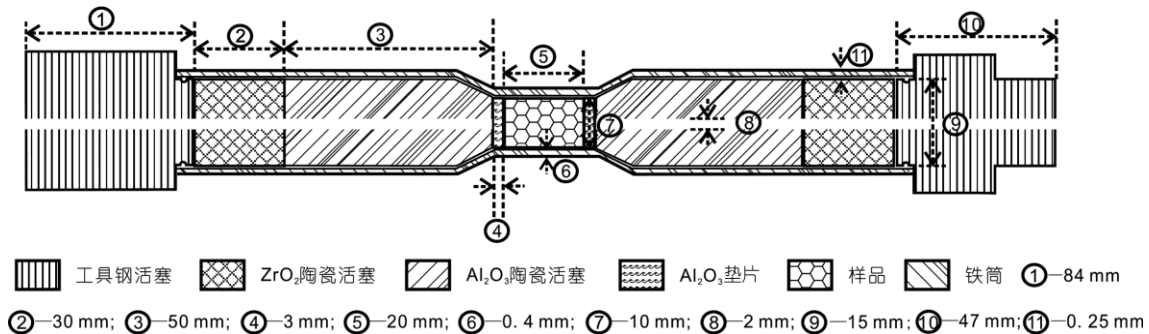


图 1 Paterson 高温高压流变仪样品组装示意图

表 1 高温高压实验条件^{a)}

实验编号	1	2	3	4	5	6	7	8
实验类型	(2)	(2)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
温度(K)	975	1074	976	1074	1172	1173	1167	1177
围压(MPa)	300	300	300	300	300	200	200	129
应变速率(s ⁻¹)	1.1×10 ⁻⁴	1.1×10 ⁻⁴ 1.1×10 ⁻³	1.1×10 ⁻⁴	1.1×10 ⁻⁴	1.1×10 ⁻⁴	1.1×10 ⁻⁵	1.1×10 ⁻³	1.1×10 ⁻³
	1.2×10 ⁻⁵							
	1.1×10 ⁻³							

a) 实验类型(1)为单阶恒应变速率实验；(2)为多阶突变应变速率实验

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

式中各参数的意义同式(1), 但是避免了对参数 α 的求解.

如果定义 Zener-Hollomon 参数 Z 为

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(-Q/RT). \quad (3)$$

利用实验测定的不同温度和应变速率条件下的应力-应变数据计算对应于给定应变的相应参数 A, n, Q ^[11], 即:

$$n = \partial(\ln \dot{\epsilon}) / \partial(\ln \sigma) |_{T, \quad (4)}$$

$$Q/nR = \partial(\ln \sigma) / \partial(1/T) |_{\dot{\epsilon}}, \quad (5)$$

$$\ln(Z) = \ln(A) + n \ln \sigma. \quad (6)$$

当 $\ln(Z)$ 和 $\ln \sigma$ 之间存在线性关系时, 幂指数形式的本构方程适用于描述材料的流变行为, 其斜率和截距分别为参数 n 和 $\ln(A)$. 虽然该方程最初用来描述稳定态应力, 但是后来发现通过改变方程中的参数, 该方程可以用来描述任何应变下的塑性流变行为^[11]. 根据式(4)和(5)我们可以求出对应于任意给定应变的参数 n 和 Q 值. Rao 等人^[12]发现本构方程中参数 n, Q 和 $\ln A$ 与应变 ϵ 存在如下形式函数关系:

$$Y = (A/\epsilon^B) + C, \quad (7)$$

式中 Y 代表参数 n, Q 和 $\ln A$; A, B, C 为常数.

2.2 求解过程

首先根据式(4), 利用实验 5~8 的数据(图 2(a)), 在温度不变情况下, 求解对应于给定应变(1%~5%, 每隔 0.5%取一次值)的 n 值, 并进行投图和拟合(图 3(a)), 可得:

$$n = 9.36/(\epsilon^{0.025}) - 4.27. \quad (8)$$

然后根据式(5), 利用实验 3~5 的数据(图 2(b)), 在应

变速率不变的情况下, 求解对应于给定应变的 Q 值, 并进行投图和拟合(图 3(b)), 可得:

$$Q = 1664/(\epsilon^{0.012}) - 1604.5. \quad (9)$$

最后根据式(6), 求得对应于给定应变的 $\ln A$ 值, 并进行投图拟合(图 3(c)), 可得:

$$\ln A = 16.49/(\epsilon^{0.083}) - 39.87, \quad (10)$$

即, 对于参数 n, Q 和 $\ln A$, 式(7)中的常数 A, B, C 值如表 2 所示.

3 讨论

3.1 误差分析

为了检验本文所求本构方程的精度, 我们将实验测得数据与根据流变本构方程所求得的模拟数据进行了对比(图 4) 以及相应的误差分析. 对单阶恒应变速率变形实验 3~8 的误差分析表明: 除了实验 4 (1074K) 具有较大的误差 13.63%之外, 其余 5 次实验的误差介于 1.50%~8.40%, 平均误差为 3.43%, 明显小于实验过程中由于应力测量精度、温度压力波动、样品几何结构不稳等带来的应力测量误差. 说明我们求解的本构方程可以很好地预测 20#低碳钢的流变行为. 另外将该方程应用于多阶段突变应变速率变形实验 1, 2 (图 4(b)), 并进行误差分析, 结果表

表 2 式(7)中 A, B, C 常数求解结果表

	n	Q	$\ln A$
A	9.36	1664	16.49
B	0.025	0.012	0.083
C	-4.27	-1604.5	-39.87
			(1074 K 时, -40.74)

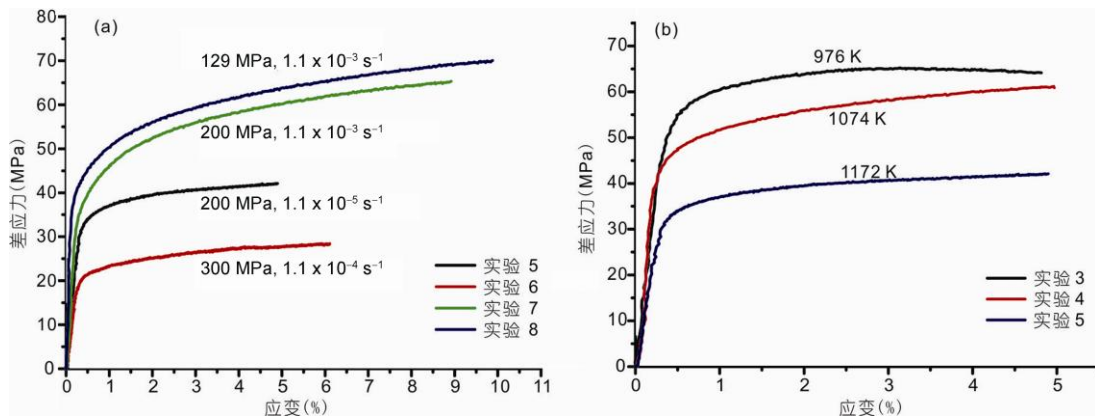


图 2 20#低碳钢不同实验条件下的流变曲线

(a) 1173 K 温度, 不同应变速率的流变曲线; (b) $1.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 应变速率, 不同温度的流变曲线

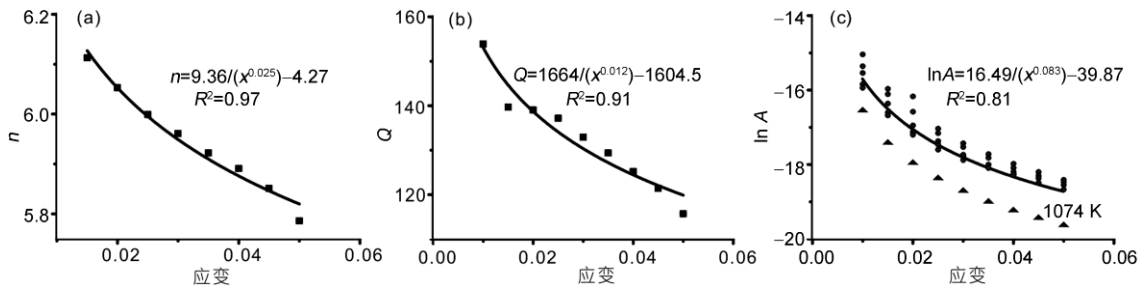


图3 本构方程中参数 n , Q , $\ln A$ 拟合求解

(a) n 值对应变的拟合求解; (b) Q 值对应变的拟合求解; (c) $\ln A$ 值对应变的拟合求解

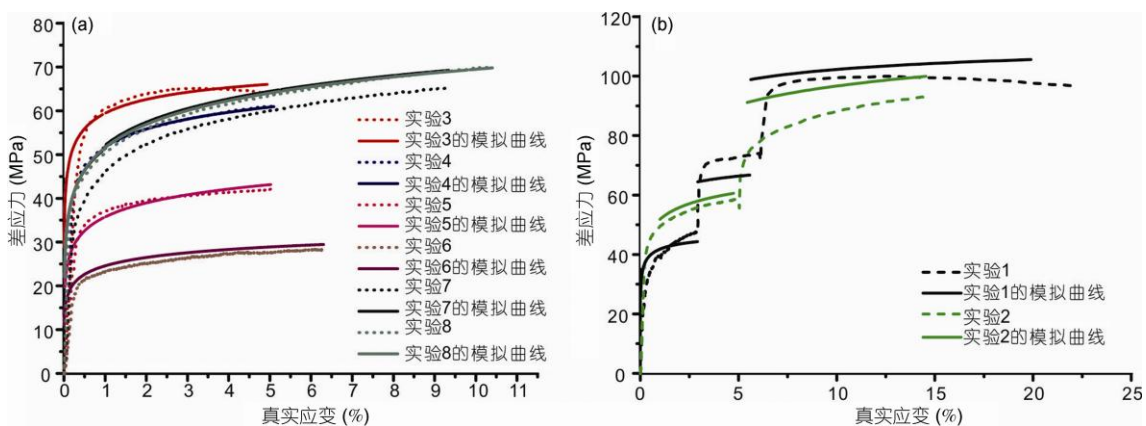


图4 本构方程模拟和实验记录数据对比

(a) 单阶恒应变速率实验; (b) 多阶突变应变速率实验

明实验1具有较小的误差5.57%，实验2(1074 K)具有较大的误差9.08%，但是均小于10%，由此可见我们求解的方程也适用于多阶段的突变应变速率变形实验。同时由图4(b)可见，两次轴向压缩实验达到了较大的应变量(>20%)，因此我们求解的本构方程适用于较大应变量的塑性流变。

本次模拟的结果也显示，无论是973 K的铁素体相，还是1173 K的奥氏体相均可用相同的流变本构方程来描述20#低碳钢的高温变形行为。对于1074 K下的两次实验具有较大的模拟误差，分析发现在 $\ln A$ 求解过程中产生了较大误差。由图3(c)可见，1074 K的实验数据近似平行位于拟合曲线下方，因此只要将对应的截距 C 值由-39.87调整为-40.74，就可以很好地拟合实验数据，对于单阶恒应变速率实验4和多阶突变应变速率实验2中的 $1.1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 变形阶段的拟合误差分别为0.22%和4.15%；实验2中的 $1.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 变形阶段由于受前一阶段变形历史的影响，需要很大的应变量才能再次达到流变稳定态，因

此未进行误差分析。结合钢的相变图，20#钢的 $A_{c1}=735^\circ\text{C}$ ， $A_{c3}=855^\circ\text{C}$ ，由此可见在实验温度1074 K(801°C)时，20#钢正处于相变区间，因此认为是钢的相变导致结构发生改变，导致与结构有关的参数 A 发生较大的改变。

3.2 稳态本构方程

由图2可见，当应变量达到0.5%~1%时，20#低碳钢的应变硬化作用和恢复作用(或重结晶作用)达到近似平衡，流变曲线不再显示明显的硬化或者软化作用，20#低碳钢的流变达到稳定态，此时用本构方程(2)就可以很好地描述材料的稳定态流变。我们选取应变量为5%时的 $n(5.82)$ ， $Q(120.4 \text{ kJ/mol})$ ， $\ln A(-18.73)$ 值作为式(2)中的相应参数来描述20#低碳钢的稳定态流变。其本构方程可以表达如下：

$$\dot{\epsilon} = 7.38 \times 10^{-9} \sigma^{5.82} \exp(-120400/RT). \quad (11)$$

由于具备优良的韧性、延展性和硬度等物理性能，碳钢已经被广泛地应用于建筑和制造行业。而碳钢

的冶炼和加工需要我们对其高温流变性质能够有充分的了解和认识. 前人在冶炼或加工近似条件(高温、快变形速率)下, 以压缩^[13]、拉伸^[14]等变形方式研究了 20#低碳钢的流变力学行为和变形过程中的显微组结构的演化^[15,16]. 杨现亮和潘家冰^[4]根据 20#低碳钢在 800~950℃, 1~10 s⁻¹ 条件下的峰值应力求得其流变本构方程为

$$\dot{\epsilon} = 1.29 \times 10^9 [\sinh(\alpha\sigma)]^{6.71} \exp(-201440/RT). \quad (12)$$

我们在慢速率变形实验中求解出应力指数 $n = 5.82$, 小于杨现亮和潘家冰^[4]的求解结果 $n = 6.71$, 这应当是应变速率降低导致 20#低碳钢的主导变形机制由位错蠕变向扩散蠕变转变所致, 前人在其他材料(大理岩)中曾发现过类似现象并给予了解释^[17]; 我们求解的 Q 值 120.4 kJ/mol 明显小于前人在高速率变形下测得的 Q 值 201.44^[4], 356.62^[18]和 300.4 kJ/mol^[19]. Q 值的不同, 可能不仅是实验应变速率的影响, 实验材料的成分、结构不同(如晶粒粒度, 铁素体、珠光体或奥氏体的分布), 很可能是 Q 值差异较大的主要原因之一. 由于慢应变速率变形研究少, 式(1)中的常数 α 很难确定, 因此我们采用了简化的流变本构方程, 造成方程中的结构参数 A 与前人的求解结果不具有对比性. 尽管前人很少研究慢应变速率变形, 但李龙飞等人^[9]曾完成了 Q235 钢在 550~720℃, 变形速率在 $5 \times 10^{-4} \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 的热变形研究. 利用我们所获得的稳定态流变本构方程(11)计算相应条件(温度、压力和应变速率)下的差应力, 并与其分析结果对比(表 3)可见: 除了 993 K 下两个较快速率变形实验 3, 4 和一个 923 K 下的慢速率变形实验 10 的计算结果误差较大之外, 其余实验的计算应力值 $\sigma_{0.05}$ (应变为 5% 时的应力值)与李龙飞等人^[9]实验测得的峰值应力 σ_p 的误差小于 11%. 考虑到高温流变实验所采用的实验仪器、测试方法、实验材料以及结果表达形式(σ_p 和 $\sigma_{0.05}$)所代表意义的差异, 小于 11% 的误差表明我们的流变方程可以很好地用来预测实验条件(温度、压力和应变速率)下的流变应力.

总之, 由于缺乏对于 20#低碳钢的低速率高温流

表 3 本构方程计算得应力 $\sigma_{0.05}$ 与李龙飞等人实验测得峰值应力 σ_p 对比

序号	T (K)	$\dot{\epsilon}$ (s ⁻¹)	σ_p (MPa) ^{a)} (文献[19])	$\sigma_{0.05}$ (MPa) ^{b)}	误差 (%)
1	993	5.00×10^{-4}	87.60	82.95	5.31
2	993	1.00×10^{-3}	93.40	93.44	-0.05
3	993	1.00×10^{-2}	122.20	138.79	-13.58
4	993	1.00×10^{-1}	174.90	206.15	-17.87
5	973	5.00×10^{-4}	97.50	87.34	10.42
6	973	1.00×10^{-3}	109.60	98.39	10.23
7	973	1.00×10^{-2}	151.10	146.13	3.29
8	973	1.00×10^{-1}	232.50	217.06	6.64
9	923	5.00×10^{-4}	101.40	100.32	1.06
10	923	1.00×10^{-3}	129.40	113.01	12.66
11	923	1.00×10^{-2}	179.30	167.86	6.38
12	923	1.00×10^{-1}	239.60	249.32	-4.06

a) σ_p 表示峰值应力; b) $\sigma_{0.05}$ 表示应变为 5% 时的应力值

变行为的研究, 使得我们无法进行更充分对比从而确定我们研究的可靠性; 反之, 也正是由于相关研究的缺乏, 本次工作对于弥补 20#低碳钢慢速率流变理论研究具有重要意义, 也为探讨以 20#低碳钢为原料的金属制品、车辆机械零部件等在工况下的热变形行为提供了实验和理论支持. 由于本文只是对慢速率变形的初步研究, 因此在其变形机制解释方面缺乏足够的显微分析支持, 在以后的研究中我们会予以加强, 以期取得更具说服力的研究成果.

4 结论

完成了 973~1173 K, 100~300 MPa, 应变速率介于 $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下的 20#低碳钢高温变形实验. 通过实验和模拟研究发现:

(1) 20#低碳钢的高温慢速率流变行为可以用幂指数形式的本构方程很好的描述. 方程中的各参数和变形量之间仍然存在由 Rao 等人^[12]提出的适用于快速率流变的式(7)形式的函数关系.

(2) 在实验条件下, 20#低碳钢只需要很小的应变($<1\%$)就可以达到稳定态流变, 其本构方程为

$$\dot{\epsilon} = 7.38 \times 10^{-9} \sigma^{5.82} \exp(-120400/RT).$$

参考文献

- 1 Bodner S R, Merzer A. Visco-plastic constitutive equation for copper with strain rate history and temperature effects. J Eng Mater Technol, 1978, 100: 388-394
- 2 Tanimura S. A practical constitutive equation covering a wide range of strain rate. Int J Eng Sci, 1979, 17: 997-1004

- 3 Ogawa K. Mechanical behavior of metals under tension-compression loading at high strain rate. *Int J Plast*, 1985, 1: 347–358
- 4 杨现亮, 潘家冰. 20#钢的热变形行为探讨. *热加工工艺*, 2010, 39: 71–81
- 5 张勇明, 白月香. 低碳钢变形奥氏体动态再结晶行为及组织演变. *材料热处理技术*, 2012, 41: 45–48
- 6 裴新华, 吴申庆, 胡恒法, 等. 低碳钢临界奥氏体区的变形行为. *机械工程材料*, 2006, 30: 26–29
- 7 邵同宾, 嵇少丞, 李建峰, 等. Paterson 高温高压流变仪及其在岩石流变学中的应用. *大地构造与成矿学*, 2011, 35: 457–476
- 8 李建峰, 宋茂双, 邵同宾, 等. Paterson 高温高压流变仪轴向变形数据的校正方法. *大地构造与成矿学*, 2013, 37: 127–133
- 9 Sellars C M, Tegart W J McG. Hot workability. *Int Met Rev*, 1972, 17: 1–24
- 10 Poirier J P. *Creep of Crystals*. New York: Cambridge University Press, 1985. 260
- 11 Rao K P, Hawbolt E B. Development of constitutive relationships using compression testing of a medium carbon steel. *J Eng Mater Technol*, 1992, 114: 116–123
- 12 Rao K P, Prasad Y K D V, Hawbolt E B. Hot deformation studies on a low-carbon steel: Part 1. Flow curves and the constitutive relationship. *J Mater Process Technol*, 1996, 56: 897–907
- 13 Sun Z Q, Yang W Y, Qi J J, et al. Deformation enhanced transformation and dynamic recrystallization of ferrite in a low carbon steel during multipass hot deformation. *Mater Sci Eng A*, 2002, 334: 201–206
- 14 Wolańska N, Lis A K. The deformation analysis of 1008 steel at 0.01/s strain rate. *J Achievements Mat M*, 2007, 25: 37–40
- 15 Murty SVS N, Torizuka S, Nagai K, et al. Dynamic recrystallization of ferrite during warm deformation of ultrafine grained ultra-low carbon steel. *Scr Mater*, 2005, 53: 763–768
- 16 Wolańska N, Lis A K, Lis J. Microstructure investigation of low carbon steel after hot deformation. *J Achievements Mat M*, 2007, 20: 291–294
- 17 Schmid S M, Boland J N, Paterson M S. Superplastic flow in finegrained limestone. *Tectonophysics*, 1977, 43: 257–291
- 18 张麦仓, 董建新, 曾燕屏, 等. Q235 低碳钢高温变形过程的动态组织演化分析. *北京科技大学学报*, 2005, 27: 183–196
- 19 李龙飞, 杨王玥, 孙祖庆, 等. 低碳钢铁素体相区变形特性. *北京科技大学学报*, 2001, 23: 225–229

Experimental study and prediction of deformation behavior of low carbon steel at low strain rate and high temperature

LI JianFeng¹, SONG MaoShuang¹, SHAO TongBin^{1,2}, XIA Ying^{1,2}, ZHANG GuiNan^{1,2}, ZHOU Wei^{1,2}, CHEN Xue Fei^{1,2} & WANG Qian¹

¹State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Various types of carbon steel have been used extensively in construction and manufacturing. In this paper, axial deformation tests of 20# low carbon steel using either constant strain rate or suddenly jumping strain rates were carried out in a high pressure, high temperature Paterson-type gas apparatus. The test pressures, temperatures and strain rates ranged from 100 to 300 MPa, 700 to 900°C, and 10^{-5} to 10^{-3} s⁻¹, respectively. The stress-strain curves from the experiments were used to obtain the deformation constitutive equation. The functions relating the parameters in the constitutive equation and the strain are similar at both low and high strain rates. The predicted flow stress calculated from the constitutive equation fits the experimental data from the constant strain rate tests well, but only roughly fits the data from the strain rate jump tests. Regardless of whether the steel is ferritic or austenitic, the deformation behavior of 20# low carbon steel at low strain rate can be described by the same constitutive equation; however the parameter $\ln A$ in the equation needs to be corrected when deformation is carried out at temperatures where a phase change is occurring.

20# low carbon steel, stress-strain curve, low strain rate, paterson-type high pressure high temperature apparatus, rheological constitutive equation

doi: 10.1360/972012-926