

## 变形量及碳含量对超低碳贝氏体钢动态再结晶的影响

关 云 李平和 陈庆丰 刘继雄  
(武汉钢铁(集团)公司研究院,武汉 430080)

**摘 要** 采用 Thermochemastor-Z 热模拟试验机对 0.019% C 和 0.052% C 的两种超低碳贝氏体 (ULCB) 钢进行单道次热压缩试验,变形温度为 1 100 ℃,应变速率为 2 s<sup>-1</sup>,变形量为 5% ~ 50%。结果表明,当变形量低于 40% 时,两种 ULCB 钢的形变再结晶规律相同:经 10% 变形后产生再结晶晶核,20% 变形后发生部分再结晶,变形 40% 后基本完成再结晶。当变形量超过 40% 后,0.052% C ULCB 钢中晶粒比 0.019% C ULCB 钢细小均匀。

**关键词** 超低碳贝氏体钢 热模拟 应力-应变 动态再结晶

## Effect of Deformation and Carbon Content on Dynamic Recrystallization of Ultra-Low Carbon Bainite Steel

Guan Yun, Li Pinghe, Chen Qingfeng and Liu Jixiong  
(Research and Development Institute, Wuhan Iron and Steel (Group) Co, Wuhan 430080)

**Abstract** The single pass thermal compression test of 0.019C and 0.052C two kinds of ultra-low carbon bainite (ULCB) steel with deformation 5% ~ 50%, strain rate 2 s<sup>-1</sup> at 1 100 ℃ has been carried out by Thermochemastor-Z thermal simulation machine. Results showed that as deformation was lower than 40% the deformation-recrystallization behavior of two kinds of ULCB steel was same that was to form crystal nucleus of recrystallization with 10% deformation, partially recrystallize with 20% deformation, and basically perform recrystallization with 40% deformation. With deformation more than 40%, the grain size of 0.052C ULCB steel was more fine and uniform than that of 0.019C ULCB steel.

**Material Index** Ultra-Low Carbon Bainite Steel, Thermal Simulation, Stress-Strain, Dynamic Recrystallization

近年来,低碳(超低碳)贝氏体(Ultra Low Carbon Bainite, ULCB)钢因具有优良的综合性能得到广泛研究,组织细化理论是研究新一代钢铁材料的核心<sup>[1]</sup>。奥氏体热变形时再结晶规律是制定合理控制轧制工艺、相变前获得最佳奥氏体组织状态的理论基础<sup>[2]</sup>。在高温变形时,变形量及其碳含量是影响动态再结晶的主要因素<sup>[3]</sup>。常见 ULCB 钢中的碳含量范围为 0.02% ~ 0.05%,为此取得碳含量(%)分别为 0.019C 和 0.052C 的两种 ULCB 钢,在 1 100 ℃ 的高温进行单道次热模拟试验,通过应力-应变曲线分析和显微组织观察,研究了变形量及碳含量对 ULCB 钢奥氏体动态再结晶的影响规律。

### 1 试验方法

试验用 ULCB 钢 A 和 B 的成分见表 1,除碳含量明显不同外,其他元素含量相近。加工成 Φ8 mm × 12 mm 圆柱,用 Thermochemastor-Z 热模拟试验机进行单道次热压缩变形试验,试验工艺如下:以 10 ℃/s 升温到 1 200 ℃ 保温 5 min,以 5 ℃/s 降温到 1 100 ℃ 保温 10 s 后,进行单道次压缩变形,快冷。选择的变形量分别为 5%、10%、20%、30%、40%、50%,变形速率为 2 s<sup>-1</sup>。

表 1 试验用 ULCB 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of test ULCB steels / %

编号	C	Si	Mn	Cu	Nb	Ti	Mo	Ni	Cr
A	0.019	0.50	1.48	0.50	0.042	0.076	0.17	0.31	0.29
B	0.052	0.28	1.62	0.51	0.072	0.019	0.14	0.26	0.17

将变形试样沿压缩轴方向切开,观察面平行于压缩方向,机械抛光后用饱和苦味酸水溶液加少量海鸥洗涤剂腐蚀,以显示奥氏体晶界,在图象仪下观察其奥氏体金相组织,测量奥氏体晶粒平均截距和再结晶晶粒面积百分数。

### 2 结果与分析

#### 2.1 应力-应变曲线

0.019C (A) 和 0.052C (B) 两种 ULCB 钢经 1 100 ℃ 单道次变形的应力-应变曲线见图 1。当变形量为 5% ~ 40% 时,两种 ULCB 钢的应力-应变曲线完全重合。变形 5% 应力急剧增加;变形量由 5% 增加到 10%,曲线斜率下降,应力增加速度减小;变形量由 10% 增加到 20%,应力缓慢增加;变形量由 20% 增加到 40%,应力稳定不变,出现应力-应变平台。

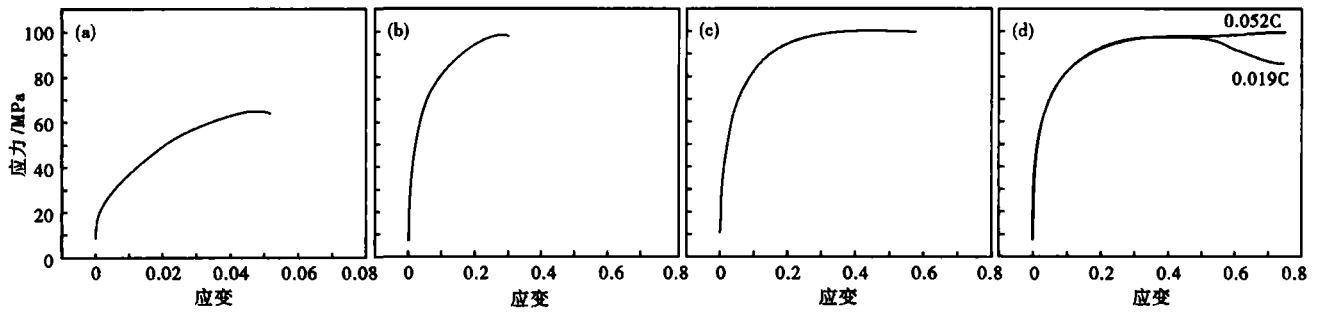


图1 0.019C和0.052C超低碳贝氏体钢的应力-真应变曲线:1100℃,变形量(%):5(a);20(b);40(c);50(d)

Fig. 1 Stress-true strain curves of 0.019C and 0.052C ULCB steel with deformation 5% (a), 20% (b), 40% (c) and 50% (d) at 1100 °C

在变形量从40%增加到50%的变形过程中,A钢和B钢的应力-应变曲线走势出现差别。A钢的应力-应变曲线转头向下,出现明显软化特征,B钢仍然保持稳定。

## 2.2 奥氏体组织观察

与应力-应变曲线对应的奥氏体组织见图2,变形量与奥氏体晶粒平均截距及再结晶晶粒面积百分数的关系见图3。

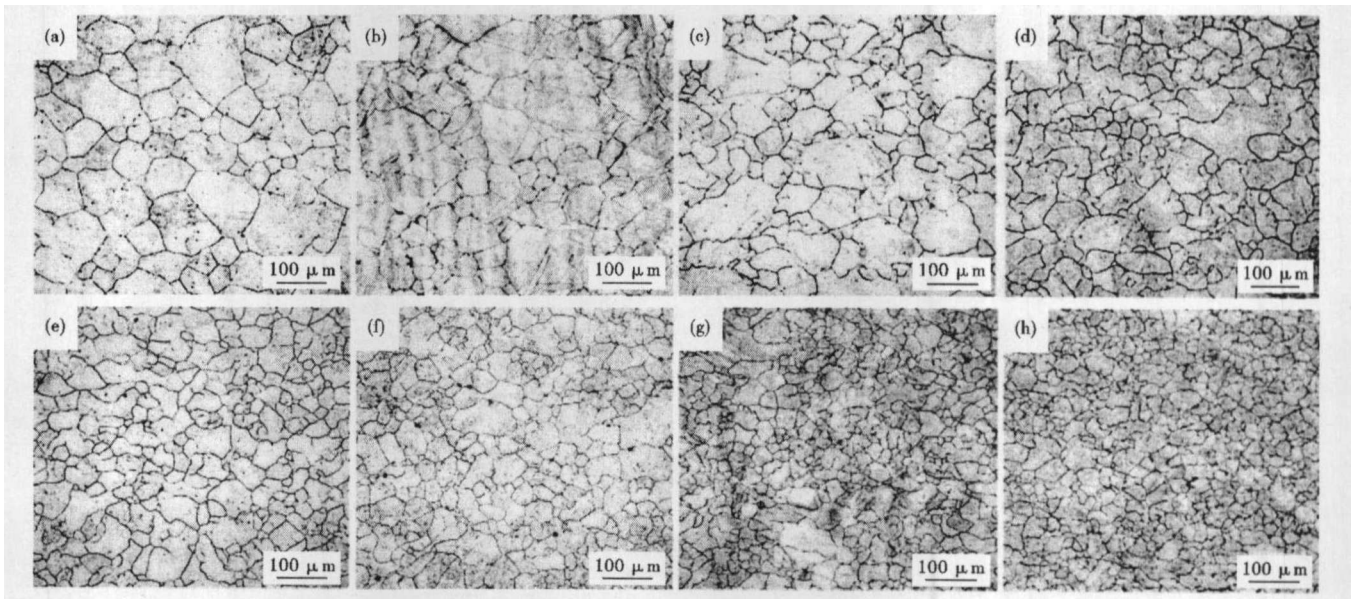


图2 超低碳贝氏体钢1100℃变形后的组织形貌:变形量5%(a)、10%(b)、20%(c)、30%(d)时0.019C钢和0.052C钢组织形貌相同;变形量40%时0.019C钢(e)和0.052C钢(f)均完成再结晶;变形量50%时0.019C钢(g)再结晶晶粒细小,0.052C钢(h)再结晶晶粒更细小

Fig. 2 Structure morphology of ULCB steel deformed at 1100 °C: with deformation 5% (a), 10% (b), 20% (c) and 30% (d), structure of 0.019C steel and 0.052C steel is same in morphology; with deformation 40%, recrystallization finished in 0.019C steel (e) and 0.052C steel (f); with deformation 50%, fined recrystallization grain in 0.019C steel (g), and more fined recrystallization grain in 0.052C steel (h)

变形量低于40%时,两种ULCB钢的动态再结晶组织相同。经5%变形后,奥氏体晶粒保持等轴形状,晶内较完整;变形10%后,晶粒形状仍未发生明显变化,晶内产生滑移形成较多形变带,部分晶界呈锯齿状,并出现少量细小再结晶晶核,说明该阶段再结晶刚开始发生,再结晶形核以奥氏体晶界为主;变形20%后,发生部分再结晶,再结晶晶粒面积百分数急剧上升,但仍有少量未再结晶晶粒,未再结晶

晶内存在极少量形变带;随着变形量继续增加,再结晶晶粒数量持续增加,形变带消失,再结晶晶核在奥氏体晶界和晶内同时发生。变形量达到40%时,再结晶晶粒面积百分数约93%,基本完成再结晶,奥氏体晶粒均匀、细化明显。

变形量达到50%时,两种ULCB钢均实现完全再结晶,但再结晶晶粒尺寸变化出现差别。A钢中的晶粒尺寸不均匀,部分晶粒细化,部分发生合并粗

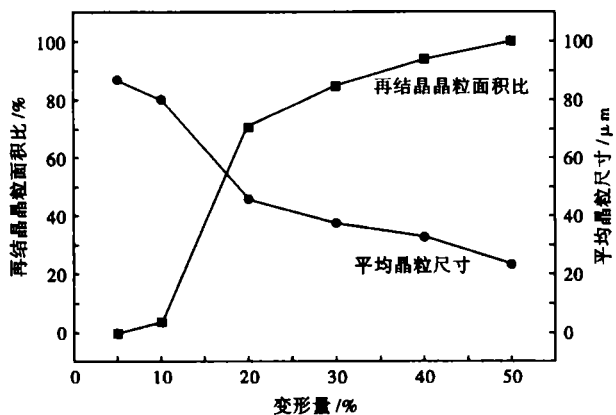


图 3 变形量对 0.052% C 超低碳贝氏体钢 (B) 平均晶粒尺寸及再结晶晶粒面积百分数的影响

Fig.3 Effect of deformation on average austenite grain size and fraction of recrystallization of 0.052C ULCB steel (B)

化, B 钢中的晶粒尺寸均匀且更为细小。

结果表明,在试验条件下,变形量低于 40% 时,两种 ULCB 钢的形变再结晶规律相同。发生动态再结晶的最低变形量为 10%,再结晶形核优先在奥氏体晶界产生;随着变形量增大,变形加剧,再结晶形核在晶界和晶内变形带上同时发生,经 20% 变形后,发生部分再结晶,再结晶面积急剧上升,使晶粒平均截距显著变小。随着变形量的继续增大,再结晶面积进一步增大,再结晶软化作用增强,同时晶粒尺寸的细化使变形抗力得到提高,故应力-应变曲线得以保持稳定。变形量达到 40% 时已基本完成再结晶,细化效果明显。

变形量为 50% 时,两种 ULCB 钢均发生完全再结晶,但应力-应变曲线和晶粒尺寸均出现差别。可能是因为当变形量超过 40% 后,一方面变形带随着变形量增大而增多,使再结晶形核位置增多,有利于晶粒细化,同时,优先再结晶的晶粒在继续变形的应

力作用下,可能发生晶界迁移使晶粒长大。在较高碳含量(0.052% C)的 ULCB 钢(B)中,固溶碳对晶界迁移的钉扎阻止作用较强,再结晶晶粒得到进一步细化,而较低碳含量(0.019% C)的 ULCB 钢(A)再结晶晶界容易发生迁移,使部分晶粒长大粗化,应力-应变曲线出现明显软化特征。

### 3 结论

(1)在试验条件下,当变形量低于 40% 时,两种 ULCB 钢的形变再结晶规律相同,发生奥氏体形变再结晶的最低变形量为 10%,经 20% 变形后发生部分再结晶。随着变形量的继续增大,再结晶晶粒面积百分数进一步增加,变形 40% 后基本完成再结晶,细化效果明显。

(2)当变形量超过 40% 后,两种 ULCB 钢均发生完全再结晶,但晶粒尺寸变化不同,较高碳含量的 ULCB 钢(B)中晶粒更加细小均匀,应力-应变曲线稳定;较低碳含量的 ULCB 钢(A)中再结晶晶界容易发生迁移长大,部分晶粒长大粗化,应力-应变曲线出现明显软化特征。

### 参考文献

- 1 翁宇庆. 超细晶钢-钢组织细化理论与控制技术. 北京:冶金工业出版社,2003
- 2 周海涛,曾小勤,刘六法. 热变形工艺参数对超低碳贝氏体钢转变行为和显微结构的影响. 上海交通大学学报,2004,38:1091
- 3 李龙飞,杨王月,孙祖庆. 低碳钢在 Acl 点下温度变形时的铁素体动态再结晶. 金属学报,2003,39:419

关 云(1964-),女,高级工程师,1987 年武汉大学毕业,金属材料研究。

收稿日期:2007-06-07

## 下 期 要 目

奇数边中空钢杆几何参数及拉拔过程数值模拟 .....	姜杰凤等
高合金钢 Vanadis4 凝固过程及组织 .....	颜 飞等
电磁搅拌对电渣重熔钢锭温度场的影响 .....	白海军等
低密度伴随湍流流场的仿真研究 .....	刘 坤等
转炉复吹过程渣滴分散相粒度及空间分布的水模型研究 .....	陈 韧等
合金结构钢中尖晶石夹杂物生成的热力学研究 .....	姜 敏等
添加 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 纳米粉对中空钢 55SiMnMo 力学性能与夹杂物的影响 .....	王国承等
奥氏体不锈钢 15Mn-22Cr-0.56N 的热塑性和轧制工艺 .....	周 勇等