

原始组织对 304L 超低碳奥氏体不锈钢等径角挤压变形的影响

邓波^{1,2} 杨钢² 钟毅¹ 张凌义^{1,2} 王立民² 郭富强^{1,2}

(1 昆明理工大学材料与冶金工程学院, 昆明 650093; 2 钢铁研究总院, 北京 100081)

摘要 304L 超低碳奥氏体不锈钢由 25 kg 真空感应炉冶炼, 用透射电镜 (TEM) 研究了该钢铸态组织 200 °C 等径角挤压变形 (ECAP) 后组织演变和铸态组织 1 道次 ECAP + 1 150 °C 1.5 h, AC 处理 (固溶组织) 再进行 ECAP 后的组织。结果表明, 304L 钢铸态组织 1 道次 ECAP 变形过程中主要的变形机制为滑移变形, 同时出现少量的孪晶变形; 304L 钢固溶组织在 ECAP 变形过程中孪晶变形数量急剧增加, 孪晶和滑移共同进行, 细化原始晶粒组织演变。

关键词 304L 奥氏体不锈钢 等径角挤压变形 组织

Influence of Original Structure on Equal Channel Angular Pressing Deformation of 304L Extra-Low Carbon Stainless Steel

Deng Bo^{1,2}, Yang Gang², Zong Yi¹, Zhang Lingyi^{1,2}, Wang Limin² and Guo Fuqiang^{1,2}

(1 Faculty of Materials and Metallurgy, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093;

2 Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The 304L extra-low carbon stainless steel was melted by a 25 kg vacuum induction furnace. The structure evolution of as cast structure of steel after 1 pass equal channel angular pressing (ECAP) at 200 °C and the structure of steel with one pass ECAP of as cast structure + 1 150 °C 1.5 h, AC treatment (solid solution structure) then ECAP have been studied by transmission electron microscopy. Results showed that the main deformation mechanism for as cast structure of 304L steel during 1 pass ECAP was slipping with a small number of twinning deformation; while during ECAP of solid solution structure of 304L steel the amount of twinning deformation obviously increased, the slipping and twinning deformation produced together to fine original grain.

Material Index 304L Austenite Stainless Steel, Equal Channel Angular Pressing, Structure

采用等径角挤压 (ECAP) 变形的方^[1], 在相同的变形温度、变形速度下分别对铸态和固溶态 304L 超低碳奥氏体不锈钢进行 ECAP 变形, 研究其变形机制和原始组织对变形过程中的影响。

1 实验方法

实验用 304L 钢由真空感应炉冶炼 (锭重 25 kg), 化学成分 (%) 为: 0.004C、0.30Si、1.70Mn、18.02Cr、12.28Ni、0.005S、0.006P。切除头尾后, 在铸锭中间沿树枝晶生长方向的柱状晶区用线切割取出直径为 8 mm, 长为 45 mm 的圆棒。在 200 °C 条件下采用 ECAP 变形, 实验模具的主要参数为: $\Phi = 90^\circ$, $\varphi = 30^\circ$ 。道次变形量按以下公式计算^[2]:

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} \left[2 \cot \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\varphi}{2} \right) + \varphi \operatorname{cosec} \left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\varphi}{2} \right) \right]$$

式中: ε_N - N 道次挤压后的总应变; ε - 每道次等效应变; φ - 模具外角; Φ - 模具内角。本实验条件下, 计算得每道次等效应变 $\varepsilon \approx 1.02$ 。

挤压方法采用路径 B_C (每道次挤压后, 试样按同一方向旋转 90° 进行下一道次挤压), 挤压速度控

制在 9 mm/s。实验前模具、试样均涂上 MoS₂。

2 实验结果与分析

2.1 原始组织

图 1(a) 为铸态 304L 钢的原始组织, 为树枝晶和枝晶间组织。图 1(b) 为经过 1 道次 ECAP 变形后的试样, 再经过 1 150 °C 1.5 h + AC (空冷) 的固溶处理, 固溶组织的晶粒呈等轴状, 部分晶粒内部含有

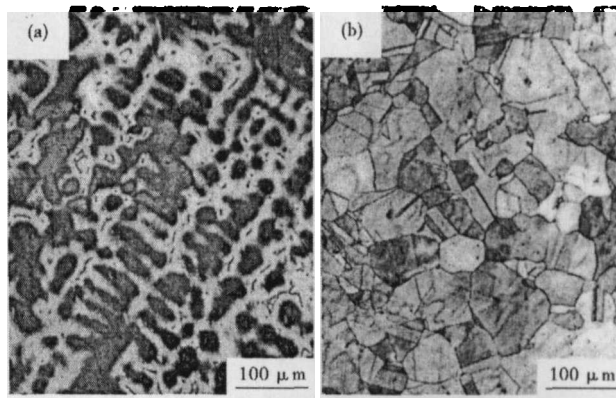


图 1 304L 钢的组织: (a) 铸态; (b) 固溶态
Fig. 1 Structure of 304L steel: (a) as cast; (b) solid solution

退火孪晶。晶粒尺寸为30 ~ 50 μm。

2.2 ECAP 变形后的组织

图 2(a) 为铸态组织经过 1 道次 ECAP 变形后的组织,通过 1 道次的 ECAP 变形后,铸态组织内部形貌发生了很大的改变,主要体现在树枝晶的破碎和流动,等轴晶粒剪切方向被拉长。

2.2.1 滑移带

图 2(c) 为铸态 304L 钢经过 1 道次 ECAP 变形后的滑移带结构 TEM 明场像,试样内部形成的滑移带宽度为 200 ~ 500 nm。滑移带比较平直,说明滑移带只沿剪切方向发生流动。

图 2(d) 为固溶态经过 ECAP 1 道次变形后的

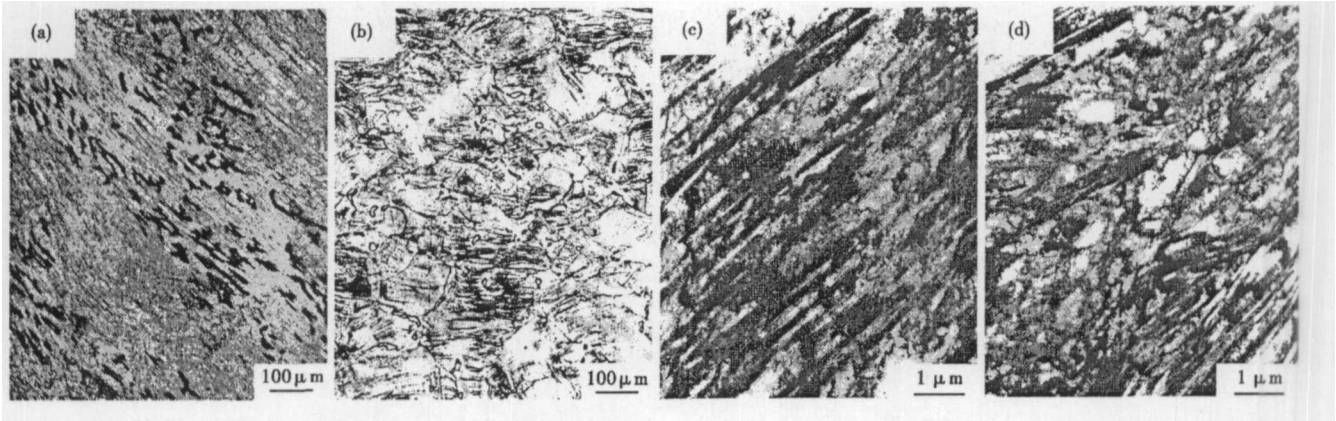


图 2 304L 钢铸态 1 道次 ECAP 后组织(a)和滑移带结构(c);固溶态 ECAP 1 道次后组织(b)和滑移带结构(d),TEM
Fig.2 304L steel; structure of as cast after 1 pass ECAP (a) and slip band structure (c); solid solution (b) and slip band structure (d) after 1 pass ECAP, TEM

滑移带结构形貌,在试样内部发生了滑移变形,不同方向的滑移带相互交割。这主要是在晶粒内部变形中,由于大变形的作用,开动了多个滑移系,同时在固溶态内部位错密度低,不存在第二相粒子的影响,在多个滑移系的同时作用下,使滑移带相互之间发生冲撞,从而导致了部分滑移带的局部弯曲。

2.2.2 变形孪晶

图 3 为 1 道次 ECAP 变形后的变形孪晶的 TEM 照片。孪晶形貌为长条的板条状,变形孪晶的长度为 10 μm 左右,宽度仅几十纳米,变形孪晶相对比较平直,同时在局部区域由于强烈的剪切作用下发

生了小的弯曲。变形孪晶在晶粒内部形成了一对孪晶界,通过孪晶界将孪晶部分和基体分开。相互平行的孪晶将晶粒分割成层片状结构(图 3a),这些层片状结构以孪晶界为界。对应的孪晶衍射谱如图 3(c)所示,电子束入射方向平行于[011]晶带轴。经标定,衍射斑点以(111)面为镜面呈对称分布,表明图 3(a)中的变形孪晶为(111)孪晶。此外,衍射斑点有呈环状的趋势,说明部分变形孪晶在强烈的剪切作用下已经开始破碎。

在研究铸态奥氏体不锈钢时,通过 TEM 观察,只发现存在有少量的孪晶变形,其主要的变形方式

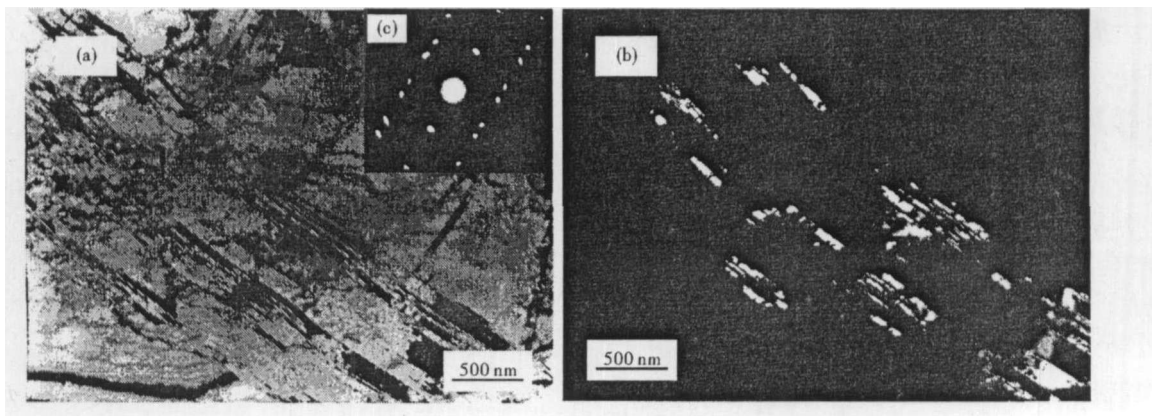


图 3 铸态 304L 钢 1 道次 ECAP 变形后形变孪晶的 TEM 明场像(a);暗场像(b)对应的选区衍射谱及标定(c)
Fig.3 Morphology of twinning- (a) bright field, (b) dark field and corresponding SAD pattern (c), as cast 304L steel after 1 pass ECAP

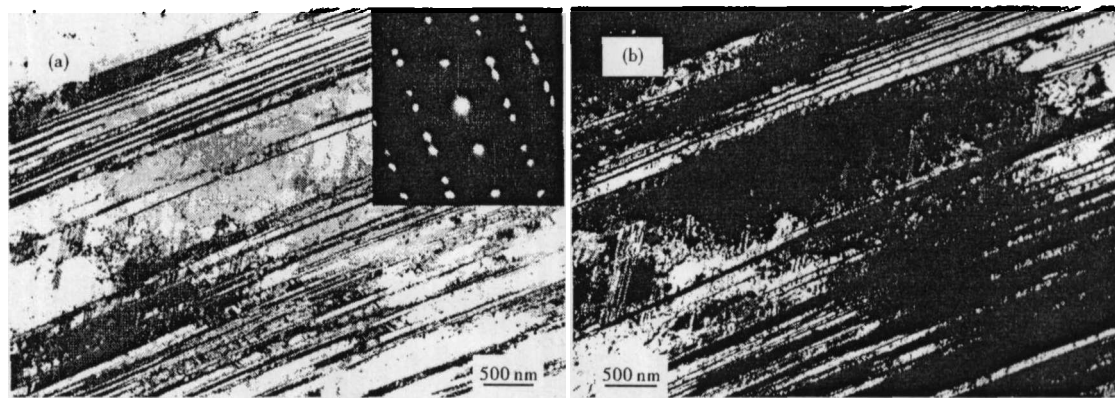


图4 固溶态304L钢1道次ECAP变形后形变孪晶明场像以及对应的选区衍射谱(a);暗场像(b),TEM
Fig.4 Morphology of twinning- (a) BF and corresponding SAD pattern, (b) DF, solid solution 304L steel after 1 pass ECAP, TEM

为滑移变形,位错机制导致晶粒细化。

固溶态试样经过ECAP 1道次变形后试样中存在大量的变形孪晶和层错(图4)。孪晶形貌呈长条的板条状,孪晶形貌沿变形方向非常平直,同时在孪晶间存在大量的微孪晶和层错(图4b)。对应的选区衍射谱如图4(a)右上角所示,衍射斑点以 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 面为镜面呈对称分布,表明图4(a)中的变形孪晶为 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 孪晶。此外,衍射斑点沿 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 方向拉长呈线状,表明 $(\bar{1}\bar{1}\bar{1})$ 面上存在大量层错,与暗场像观察的结果一致,同时衍射斑存在芒线,说明在孪晶内部形成了部分的微孪晶。

对比图3和图4,固溶态组织中,孪晶片层间组织比较复杂,存在大量的层错和微孪晶。固溶态304L钢经过ECAP变形后出现了大片的形变孪晶,孪晶片层数量比铸态1道次ECAP变形后的数量多。

3 讨论

通过实验结果观察,铸态组织经过ECAP变形,主要的塑性变形机制为滑移变形加上少量的孪晶变形辅助。而经过1道次ECAP变形后再进行固溶后的304L钢,滑移和孪生两种变形方式共同作用导致晶粒细化,但是孪晶数量却急剧增加。

试样在进行ECAP变形的过程中,由于位错的堆积,产生局部应力集中。位错堆积的数量主要取决于位错源与障碍物之间的距离 L ^[3]。在障碍物附近的局部应力的大小完全由位错数量来决定。由于孪晶的产生需要临界切应力,由此判断,孪晶产生的临界切应力可能主要由 L 来决定。对于铸态304L钢,由于在大晶粒内分布着大量的树枝晶,在位错

运动的过程中,树枝晶阻碍了位错的运动,从而在枝晶附近发生塞积了部分位错,当位错堆积数量达到一定数量时,产生滑移变形。固溶态通过再结晶,在奥氏体晶粒内部没有相似的阻碍物,只有当位错运动到晶界附近时,才能发生堆积现象。由于局部应力的大小取决于 L 的长度,所以对于固溶态能够产生大的局部应力,从而导致孪晶形核,诱发孪晶变形。

4 结论

(1)与铸态相比,固溶态304L钢在ECAP变形过程中,孪晶变形数量急剧增加。固溶态在变形过程中孪生和滑移共同进行,导致晶粒的细化。而铸态组织1道次ECAP变形时,以滑移变形加上少量的孪晶变形辅助,使晶粒细化。

(2)铸态组织中的树枝晶在ECAP变形过程中,通过阻碍位错的大量塞积,限制了孪晶的产生。

国家高新技术“863”研究发展计划基金资助项目(2002AA302501)

参考文献

- 1 王昌,杨钢,王立民,等.等通道热挤压00Cr19Ni10奥氏体不锈钢的晶粒细化机制.特殊钢,2007,28(2):10
- 2 Yoshinori Iwahashi, Wang Jingtao, Zenji Horita. Principle of Equal-channel Angular Pressing for the Processing of Ultra-fine Grained Materials. Scripta Materialia, 1996, 35(2):143
- 3 Meyers M A, Vöhringer O, Lubarda V A. The Onset of Twinning in Metals: a Constitutive Description. Acta Mater, 2001, 49:4025

邓波(1983-),男,硕士研究生,冶金新材料制备与加工。

收稿日期:2006-12-30