

00Cr18Ni12 奥氏体不锈钢多道次等通道冷挤压时的组织和性能

龚志华 王宝峰
(内蒙古科技大学, 包头 014010)

杨 钢 刘正东 王立民 程世长 林肇杰
(钢铁研究总院结构材料所, 北京 100081)

摘 要 对 00Cr18Ni12 奥氏体不锈钢进行道次变形量为 1.02 的 8 道次的等通道冷挤压试验。结果表明, 第 2 道次后钢的强度和硬度明显增加, 第 3 道次以后硬度变化很小。随挤压道次的增加, 在 6 道次挤压后, 由于多个滑移系相互作用, 将滑移带分割形成亚晶, 再转化成大角度取向的新晶粒(尺寸为 300 nm), 挤压到 8 道次时出现 150 nm 新晶粒。

关键词 奥氏体不锈钢 等通道挤压 组织 机械性能

Structure and Properties of 00Cr18Ni12 Austenite Stainless Steel during Multi-Pass Equal Channel Angular Pressing Cold Extrusion

Gong Zhihua and Wang Baofeng

(Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010)

Yang Gang, Liu Zhengdong, Wang Liming, Cheng Shichang and Ling Zhaojie

(Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The test of 8 pass cold extrusion of equal channel angular pressing (ECAP) with ratio of extrusion reduction 1.02 of each pass for 00Cr18Ni12 austenite stainless steel has been carried out. The results showed that the strength and hardness of steel increased obviously after two pass extrusion, then increased minor after third pass; due to interaction of slipping bands, with extrusion pass increasing, at 6th pass the slipping bands were separated into sub-grains which finally transformed into 300 nm new grain with large angular boundaries and at 8th pass 150 nm new grains occurred.

Material Index Austenite Stainless Steel, Equal Channel Angular Pressing, Structure, Mechanical Property

SPD (Severe plastic deformation) 技术是制备 UFG (Ultrafine grains) 钢的有效方法。ECAP (Equal Channel Angular Pressing) 作为 SPD 方法的一种在制备块状 UFG 材料的同时保证材料的致密性。Valiev^[1] 发现采用剪切大变形的方法可获得亚微米级晶粒尺寸的纯铜组织。

国内外已对 Al 及 Al 合金^[2~7]、Cu^[8]、Ti^[9] 以及 Ni^[10] 等进行了大量研究, 本文用自己设计和制造的模具对奥氏体不锈钢在路径 B_c (每道次挤压后, 试样沿纵轴线顺时针方向旋转 90° 后进行下一道次挤压) 下的等通道挤压时晶粒细化过程进行分析, 并探讨了纳米组织的形成机理。

1 试验材料和试验方法

试验材料为超低碳奥氏体不锈钢 00Cr18Ni12, 锻成 Φ10 mm 棒材, 1 150 °C × 2 h 空冷热处理后, 加工成 Φ8 mm 试棒, 试棒原始平均晶粒尺寸约为 150 μm, 如图 1a₀ 所示。

挤压采用路径 B_c (挤压路径一般分为 4 种: 路径 A: 每道次挤压后, 试样不旋转, 直接进行下一道次的挤压; 路径 B_A: 每道次挤压后, 试样按 90° 交替旋转进行挤压; 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; 路径 C: 每道次挤压后, 试样旋转 180° 后进行下一道次挤压)^[11], 道次变形量按以下公式计算^[12]:

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

上式中 ϵ 为等效应变, Ψ 为模具外角, φ 为模具内角。本实验条件下, $\varphi = 90^\circ$, $\Psi = 30^\circ$, 计算得每道次等效应变 $\epsilon \approx 1.02$ 。

试验前模具、试样均涂上 MoS₂ 润滑剂。

2 试验结果与分析

室温下对 00Cr18Ni12 进行了 8 道次挤压 (表 1), 由表 1 可以看出变形速度第 1 道次是最高, 由于强烈的加工硬化, 在以后各道次速度大幅度下

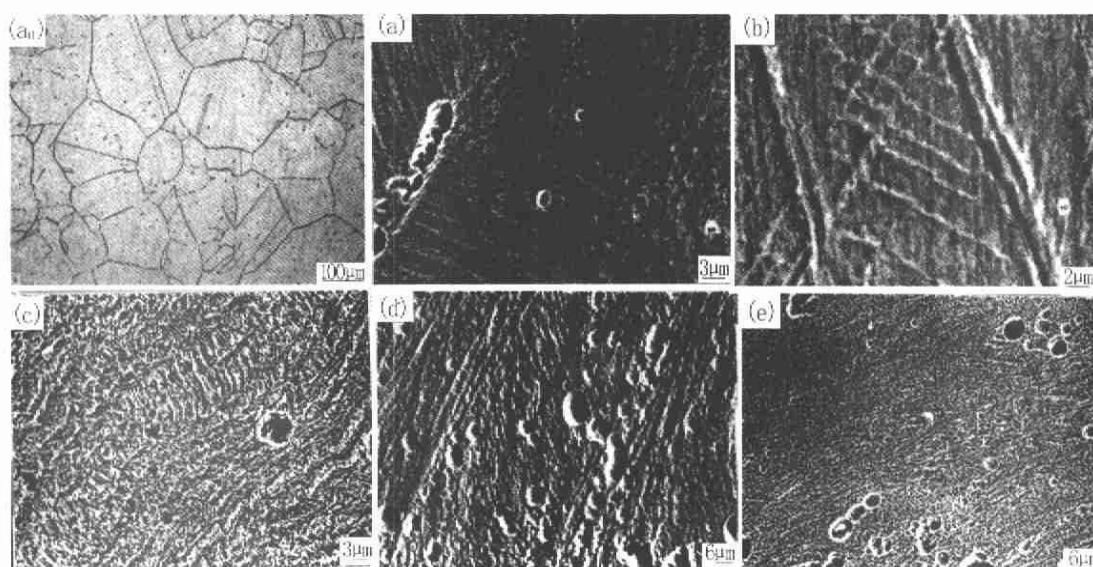


图 1 00Cr18Ni12 不锈钢的原始组织(a_0)和等通道冷挤压后(a~e)的 SEM 组织:(a) 1 道次;(b) 2 道次;(c) 3 道次;(d) 4 道次;(e) 5 道次,10% Cr_2O_3 电解腐蚀

Fig.1 Structure of 00Cr18Ni12 steel before (a_0) and after equal channel angular pressing (a~e), SEM: (a) first pass; (b) second pass; (c) third pass; (d) 4th pass; (e) 5th pass, electrolytic etching in 10% Cr_2O_3

表 1 等通道挤压各道次挤压参数

Table 1 Extrusion parameters of each pass of equal channel angular pressing

变形道次	横截面尺寸 × 长度/ mm	变形速度/ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	变形量
0	$\Phi 7.9 \times 45.0$	—	—
1	$\Phi 8.4 \times 41.0$	0.29	1.02
2	$\Phi 8.48 \times 36.8$	0.10	1.02
3	$\Phi 8.45 \times 35.2$	0.12	1.02
4	$\Phi 8.45 \times 34.6$	0.09	1.02
5	$\Phi 8.46 \times 32.7$	0.14	1.02
6	$\Phi 8.43 \times 30.5$	0.15	1.02
7	$\Phi 8.40 \times 28.8$	0.15	1.02
8	$\Phi 8.41 \times 27.0$	0.17	1.02

降,但是在以后各道次差别并不大。

奥氏体不锈钢原始组织(图 1 a_0)中孪晶在剪切力的作用下扭曲变形(图 1a)。在每个晶粒内

部变形带方向基本一致。图 1b 是一个孪晶在 2 道次变形后的形貌,可以看到孪晶被剪切变形,变形带无法完整穿过孪晶及组织里交叉的滑移带。从图 1a 和 1b 可以看到,孪晶界和晶界的析出对组织的滑移有阻碍作用,滑移带在晶界和有析出物的地方方向发生改变。图 1c、d、e 分别为 3、4、5 道次后的组织,组织里已无孪晶的痕迹,只有滑移带和沿以前晶界的析出物,随着道次增加,组织里的变形带越来越不明显。

从图 2 可以看到 1~8 道次的微观组织演变过程。从图 2a 中可以看到滑移带(5~20 nm)向亚晶(带)转变,图中暗的区域为高密度位错区,在挤压 4 道次时,钢中组织主要由带状结构、胞状结构和亚晶组成,滑移带较前 3 道次碎化加剧,衍射

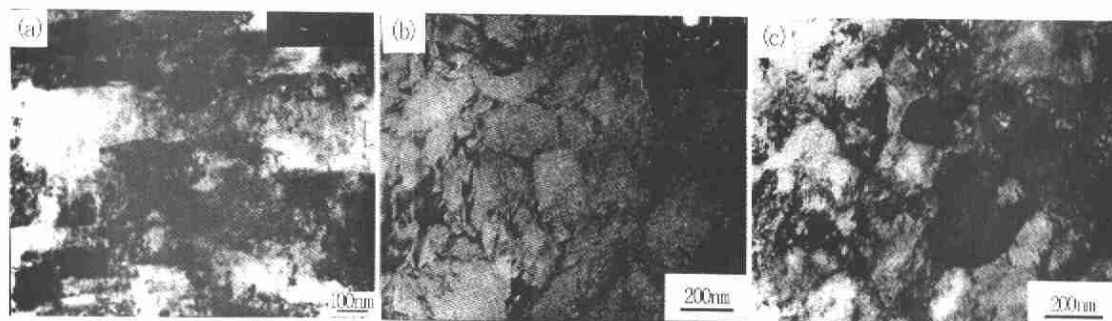


图 2 00Cr18Ni12 钢透射电镜组织形貌:(a) 2 道次;(b) 6 道次;(c) 8 道次

Fig.2 TEM morphology of structure of 00Cr18Ni12 steel: (a) second pass; (b) 6th pass; (c) 8th pass

斑点成密集的环形,在一些区域出现了呈大角度取向的亚晶界。在挤压到 6 道次以后,组织里已不见完整的滑移带,亚晶结构的比例明显增大,并有镶嵌块状的组织(图 2b),在这些镶嵌块连接处,位错密度明显高于块内部,衍射斑点的环更加明显,而且环的数量增加,表明大角度晶界形成,组织里出现尺寸约 300 nm 的新晶粒。从 8 道次的组织(图 2c)中可以看出,组织里有很多亚晶,但组织里的晶界光滑,晶粒更完整,新晶粒的尺寸

约为 150 nm。

由等通道挤压后不锈钢的硬度(图 3)可见,1 道次挤压后的显微硬度是未挤压的两倍多,但 2 道次后变化很小,在 5 道次达到最大值。1 道次后极限抗拉强度由挤压前的 540 MPa 提高到 1 040 MPa,2 道次为 1 320 MPa,屈服强度由挤压前的 175 MPa 提高到 925 MPa,2 道次为 1 150 MPa,但金属的塑性下降很多,1 道次挤压后延伸率由原来的 78% 降至 14%,2 道次延伸率为 11%。

经 ECAP 挤压后,不锈钢的强度成倍提高,但其塑性(韧性)严重恶化,限制了该处理条件下不锈钢的应用。因此研究组正在进行 ECAP 后不锈钢的适当的热处理工艺研究,以获得性能优异和强韧匹配的可实用新型不锈钢制备技术。

3 结论

(1) 在剪切力的作用下,大的孪晶首先分割成小的孪晶,然后转变成亚晶,所有亚晶(包括剪切变形带)被位错墙分割,随亚晶界位错密度的增加,发展为具有大角度位向差的晶粒;

(2) ECAP 后不锈钢的强度和硬度显著增加,6 道次变形新晶粒尺寸 300 nm,8 道次约 150 nm。

本课题获国家高技术研究 863 项目资助(编号:2002AA302501)

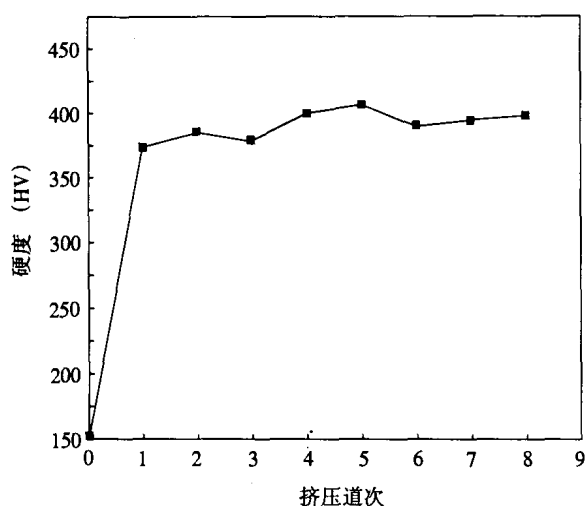


图 3 ECAP 后 00Cr18Ni12 不锈钢硬度(HV)变化
Fig.3 Hardness (HV) change of 00Cr18Ni12 steel after equal channel angular pressing

参考文献

- Valiev R Z, Krasilnikov N A, Tsenev N K. Plastic Deformation of Alloys with Submicron-grained Structure. *Materials Science & Engineering A*, 1991, 137(15): 30
- Chang C P, Sun P L and Kao P W. Deformation Induced Grain Boundaries in Commercially Pure Aluminum. *Acta Materialia*, 2000, 48(13): 3377
- Gholinia A, Prangnell P B, Markushev M V. The Effect of Strain Path on the Development of Deformation Structures in Severely Deformed Aluminum Alloys Processed by ECAP. *Acta Materialia*, 2000, 48(5): 1115
- Alexandre Goloborodko, Oleg Sitdikov, Taku SDakai, et al. Grain Refinement in as-cast 7475 Aluminum Alloy Under hot Equal-channel Angular Pressing. *Materials Transactions*, 2003, 44(4): 766
- Cao W Q, Godfrey A, Liu W, et al. Annealing Behavior of Aluminium Deformed by Equal Channel Angular Pressing. *Materials Letters*, 2003, 57: 3767
- 张 郑, 席明哲, 王经涛. 7475 铝合金的 ECAP 组织细化研究. *轻合金加工技术*, 2000, 28(10): 37
- 郑子樵, 李红英, 李 伟, 等. 铝合金的晶粒细化研究. *湘潭矿业学院学报*, 2003, 18(2): 41
- Mughurabi H, Höppel H W, Kautz M, et al. Annealing Treatments to Enhance Thermal and Mechanical Stability of Ultrafine-grained Metals Produced by Severe Plastic Deformation. *Z. Metallkd*, 2003, 94: 1079
- Shin D H, Kim J, Oh Y J, et al. Bulk Nanostructured Steels(BCC), Al (FCC) and Pure Ti (HCP) Processed by Equal Channel Angular Pressing. *Materials Science Form*, 2003, 426-432: 2801
- Zhu Y T, Kolobon Y R, Grabovetskaya G P, et al. Microstructures and Mechanical Properties of Ultrafine-grained Ti Foil Processed by Equal-channel Angular Pressing and Cold Rolling. *Journal of Materials Research*, 2003, 18(4): 1011
- Yoshinori Iwahashi, Zenji Horita, Minoru Nemoto, et al. The Process of Grain Refinement in Equal-channel Angular Pressing. *Acta Materialia*, 1998, 46(9): 3317
- Such J Y, Kim H S, Park J W, et al. Finite Element Analysis of Material Flow in Equal Channel Angular Pressing. *Scripta Mater*, 2001, 44(4): 677

龚志华, 男, 24 岁, 在读硕士研究生。主要从事塑性方法制备纳米级金属材料的研究。