

晶界结构对 IF 钢二次加工脆性的影响

曹圣泉¹, 张津徐¹, 吴建生¹, 陈家光²

(1. 上海交通大学高温材料及高温测试教育部重点实验室, 上海 200030;

2. 上海宝山钢铁股份公司研究院, 上海 201900)

摘 要:采用电子背散射衍射 (EBSD) 技术和 TEM 技术对 IF 钢二次加工脆性与晶界结构之间的关系进行了研究。结果表明, 在 IF 钢板的低温冲压成形过程中, 位错在高能随机晶界处大量塞积而萌生微裂纹, 随后裂纹沿着连续网状的高能随机晶界迅速扩展而导致 IF 钢板二次加工脆性现象; IF 钢板中低 Σ 值的 CSL 晶界和小角度晶界对裂纹的扩展起阻碍作用。

关键词:IF 钢; 二次加工脆性; 晶界结构; 电子背散射衍射

中图分类号: TG142.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0963(2005)01-0051-04

Effect of Grain Boundary Structure on Secondary Working Embrittlement of IF Steels

CAO Sheng-quan¹, ZHANG Jin-xu¹, WU Jian-sheng¹, CHEN Jia-guang²

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Baosteel Group Corp., Shanghai 201900, China)

Abstract: The effect of grain boundary structure on secondary working embrittlement (SWE) of IF steels was studied by electron back-scatter diffraction (EBSD) and TEM. The results show that the cracks nucleate at dislocations jamming at random boundary during deep-draw forming operation, and propagate along high energy continuous random boundary network, which lead to SWE of IF steels. Meanwhile, it has also been demonstrated that a crack can be arrested by low energy boundaries such as low Σ CSL boundaries and low-angle boundaries.

Key words: IF steel; secondary working embrittlement; grain boundary structure; electron back-scatter diffraction

无间隙原子钢 (简称 IF 钢) 因其优异的深冲性能而成为继沸腾钢、铝镇静钢之后的第 3 代汽车冲压用钢, 这解决了汽车上一些难冲件的成形问题^[1]。但由于 IF 钢的钢质纯净, 晶界上缺乏固溶的碳和氮, 因而晶界结合强度低, 在冲压成形后的使用过程中有受低温冲击而断裂的危险, 即存在二次加工脆性现象 (也称冷加工脆性)^[2]。对于含磷的高强度 IF 钢, 由于磷易在晶界偏析, 使其二次加工脆性现象更为明显^[3]。

目前, 对 IF 钢二次加工脆性的研究多为调整成分, 如添加硼抑制磷在晶界偏析以改善 IF 钢的二次加工脆性^[4], 但硼的添加使得 IF 钢的再结晶温度升

高, 且引起严重的晶粒不均匀^[5]。近期的研究表明^[6,7], 多晶材料的断裂、腐蚀、偏析与晶界结构密切相关, 多晶材料中裂纹的扩展可以沿晶也可以穿晶, 但裂纹源的形成却总是位于晶界^[8]。此外, 由重位点阵 (CSL) 模型描述的低 Σ 值的 CSL 晶界被证明在众多纯金属与合金中对裂纹扩展具有很好的阻碍作用^[8,9] (Σ 是用来表示重位点阵的一个特征参数, 它是 CSL 单胞的体积与晶体点阵的单胞体积之比, 即 $\Sigma = \text{CSL 单胞体积} / \text{晶体点阵的单胞体积}$)。对于多晶 IF 钢, 晶界的存在必然对其二次加工脆性有着不容忽视的影响。近年来, 新开发的电子背散射衍射 (简称 EBSD) 技术将显微组织、微区成分与结晶

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50171040)

作者简介: 曹圣泉 (1976-), 男, 博士生; E-mail: csquan1220@163.net; 修订日期: 2004-04-26

学数据分析联系起来,能对晶界类型、取向、位向差和结构及其分布进行观察、统计测定和定量分析^[10,11],从而为研究晶界结构和性能提供了重要的实验手段。笔者采用 EBSD 和 TEM 技术,从晶界特征分布的角度出发,对 IF 钢冲压成形过程中,晶界结构与二次加工脆性之间的关系进行了研究。

1 实验材料和方法

实验用材料取自上海宝山钢铁股份公司(宝钢)采用常规罩式炉退火工艺生产的 0.8 mm 厚 Ti-IF 钢板,其化学成分(质量分数,%)为:C 0.001 6, Si 0.012, Mn 0.14, P 0.007, S 0.000 4, Al 0.036, N 0.002 2, Ti 0.072。

将钢板用线切割机制成 $\phi 66$ mm 的圆片,在万能成形试验机上冲压成 $\phi 33$ mm 的圆柱形杯状试样,切去凸耳保留杯高为 22 mm。用液氮将样杯冷却到 -40℃ 后,用锥形锤将样杯冲裂,裂后的样杯如图 1 所示。在样杯开裂处切取块状样品进行金相组织观察,断口形貌观察在 S-4200 型扫描电镜上进行,变形后样品中的位错塞积情况用 H-800 型 TEM 进行观察分析,变形前后 IF 钢板中的晶界结构类型及其特征分布情况均在装有 EBSD 附件的 J CXA-733 型电子探针上进行分析测定。



图 1 在低温冲击时产生二次加工脆性的样杯

Fig 1 Secondary working embrittlement of cup sample

2 实验结果及讨论

2.1 裂纹、断口形貌及其周边的晶界特征分布

图 2 为样杯杯身开裂处的金相显微组织。从图中可看出,在低温冲击过程中,裂纹沿晶界迅速扩展导致样品开裂。图 3 为样品断口形貌的 SEM 照片,为典型的沿晶脆性断口形貌。这充分表明,一次冲压成形后 IF 钢的低温冲击过程中产生的二次加工脆性为典型的沿晶断裂,因而 IF 钢中的晶界结构和

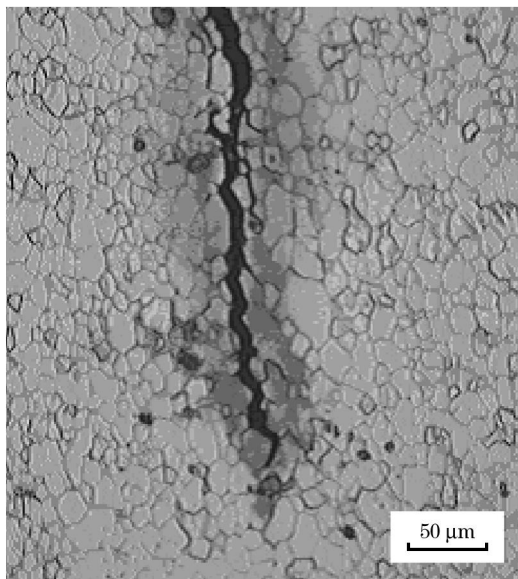


图 2 样杯杯身开裂处的金相显微组织

Fig 2 Morphology of a crack

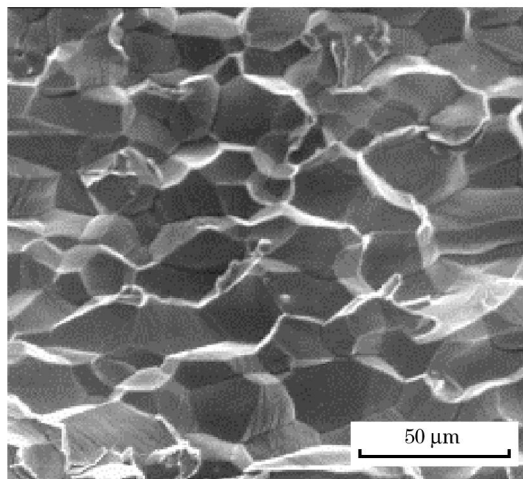


图 3 样品断口形貌的 SEM 照片

Fig 3 Morphology of fracture (SEM)

类型必然对其二次加工脆性现象产生重要的影响。

图 4 为裂纹周边的晶界特征分布图。图中 L 为小角度晶界($\theta = 1^\circ$), $\theta = n^\circ$ 为低 n 值的 CSL 晶界($n = 29$), R 为大角度随机晶界($\theta > 29^\circ$)。实验用 IF 钢板中的重位点阵晶界类型由 Brandon 准则^[12]予以判定:

$$15^\circ \sim 1/2^\circ$$

式中, θ 为晶体中 CSL 晶界的实际取向差角与理论取向差角的偏差($^\circ$)。从图 4 可看出:裂纹沿着高能随机大角度晶界迅速扩展,而低能量的低 n 值 CSL 晶界和小角度晶界对裂纹的扩展有阻碍作用。T

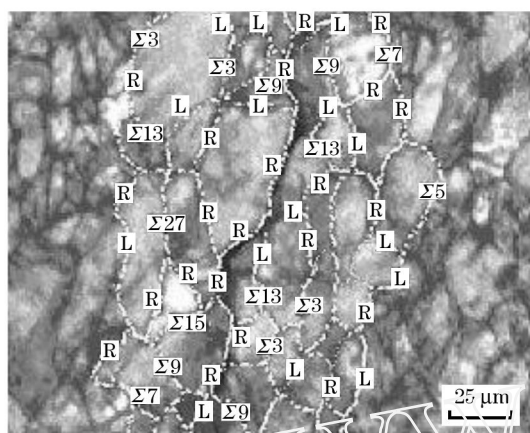


图 4 裂纹周边的晶界特征分布

Fig 4 GBCD of cracks

Watanabe^[13] 也曾其它合金中观察到类似的结果。

2.2 晶界结构对二次加工脆性的影响

图 5 为变形前 IF 钢板中的晶界特征分布图,图中黑线为高能随机晶界,白线为低能晶界(小角度晶界和低 Σ 值的 CSL 晶界)。可见:低能晶界呈团状集中分布,而高能随机晶界分布在团簇周围构成连续粗大的网状结构,磷、硫等杂质元素易在高能晶界上偏聚,降低晶界的结合力。IF 钢板冲压成形时,位错在团状的低能晶界处运动不受阻挡,快速移动到高能随机晶界时受到阻碍而产生塞积作用(见图 6)。位错大量塞积而产生应力集中,从而在高能随机晶界处产生微裂纹,而连续网状结构的高能随机晶界又为微裂纹的扩展提供了便利的通道,这样裂纹沿着高能随机晶界迅速扩展最终导致 IF 钢板产生二次加工脆性现象。对于含磷的高强 IF 钢,磷含量的增加使其晶界偏聚量成倍增大,晶界的结合强度大幅度下降,因而更易产生二次加工脆性现象。

图 7 给出多晶材料中晶界特征分布与材料断裂

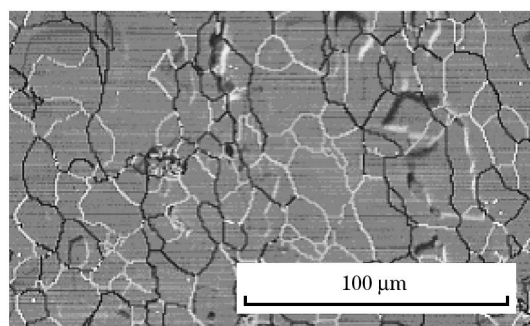


图 5 变形前实验钢板中的晶界特征分布图

Fig 5 GBCD of tested steel sheet

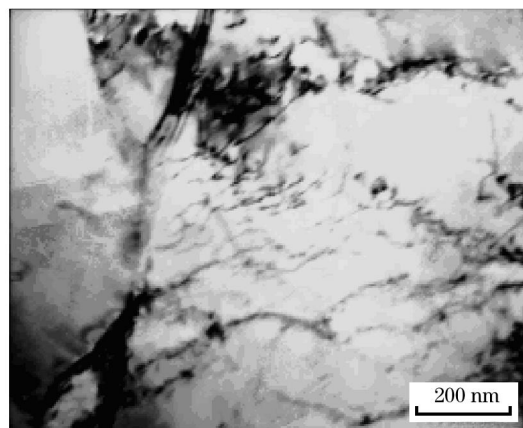
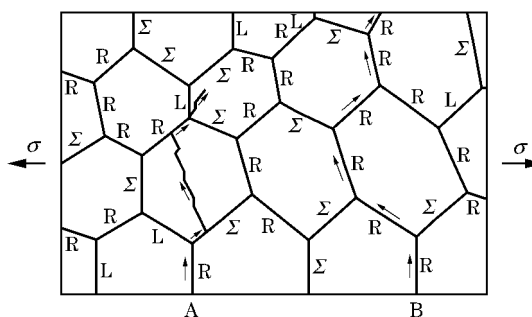


图 6 位错在高能随机晶界处大量塞积(TEM)

Fig 6 Dislocations jamming at random boundary (TEM)



A—沿晶+穿晶开裂; B—沿晶开裂

图 7 多晶材料的晶界特征分布与材料断裂方式之间的关系

Fig 7 Schematic of grain boundary structure-dependent fracture type in polycrystal

方式之间的关系。可见:当裂纹遇到连续网状结构的高能量大角度随机晶界 R 时将迅速扩展,导致材料沿晶脆性开裂;而当裂纹遇到低能量的小角度晶界 L 和低 Σ 值的 CSL 晶界时,扩展将被抑制或改为穿晶断裂,从而提高了材料的断裂强度和韧性。因此设法增加 IF 钢板中低 Σ 值的 CSL 晶界,并使其均匀分布,从而避免高能随机晶界形成连续网状结构,将有利于抑制裂纹扩展,改善 IF 钢板的二次加工脆性。

3 结 论

(1) 在 IF 钢板一次冲压成形后的低温变形过程中产生的二次加工脆性现象属于沿晶脆性开裂。

(2) 在 IF 钢板冲压成形过程中,位错大量在高能随机晶界处塞积并产生应力集中,从而在晶界处萌生微裂纹。微裂纹沿着连续网状结构的高能随机

晶界迅速扩展,导致 IF 钢板产生二次加工脆性现象。

(3)低 值的 CSL 晶界(29)和小角度晶界(= 1)对裂纹扩展起阻碍作用。

参考文献:

- [1] 王先进,茹 铮,马衍伟. 我国汽车用钢板的现状和研究进展[J]. 钢铁,1998,33(10):68-72.
- [2] Seto K, Larson D J, Warren P J. Grain Boundary Segregation in Boron Added Interstitial Free Steels Studied by 3-Dimensional Atom Probe [J]. Scripta Mater,1998,40(9):1029-1034.
- [3] 王作成. 冶金因素对超低碳高强 IF 钢组织及性能影响的研究[M]. 北京:北京科技大学出版社,1995.
- [4] 刘常升,才庆魁. 硼对冷轧 IF 钢板疲劳性能的影响[J]. 钢铁研究学报,1999,11(5):34-37.
- [5] 初元璋,潘 岩. IF 钢二次加工脆性及其评定方法[J]. 特殊钢,2000,21(1):36-39.
- [6] Matsumoto K, Shibayanagi T, Umakoshi Y. Effect of Grain Size on Grain Orientations and Grain Boundary Character Distribution in Recrystallized Al-0.3 mass % Mg Alloy [J]. Scripta Metall,1995,33(8):1321-1326.
- [7] Shimada M, Kokawa H, WANG Z J, et al. Optimization of Grain Boundary Character Distribution for Intergranular Corrosion Resistant 304 Stainless Steel by Twin-Induced Grain Boundary Engineering [J]. Acta Mater,2002,50(2):2331-2341.
- [8] Lehockey E M, Palumbo G, LIN P. Grain Boundary Structure Effects on Cold Work Embrittlement of Microalloyed Steels [J]. Scripta Mater,1998,39(3):353-358.
- [9] ZHOU B, GAO M, CHOU Y T. Effect of Boron on Grain Boundary Character Distribution in Ni₃Al [J]. Scripta Mater,1997,37(3):341-346.
- [10] Wall M A, Schwartz A J, Nguyen L. A High-Resolution Serial Sectioning Specimen Preparation Technique for Application to Electron Backscatter Diffraction [J]. Ultramicroscopy,2001,88(7):73-83.
- [11] 陈家光,李 忠. 电子背散射衍射在材料科学研究中的应用[J]. 理化检验—物理分册,2000,36(2):71-75.
- [12] Brandon D G. The Structure of High-Angle Grain Boundaries [J]. Acta Mater,1966,14(11):1479-1484.
- [13] Watanabe T, Tsurekawa S. The Control of Brittleness and Development of Desirable Mechanical Properties in Polycrystalline Systems by Grain Boundary Engineering [J]. Acta Mater,1999,47(15):4171-4185.