

TWIP 钢中晶粒尺寸对 TWIP 效应的影响 *

王书晗 刘振宇 王国栋

(东北大学轧制技术与连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110004)

摘要 冷轧 TWIP 钢经 1073, 1173, 1273 和 1373 K 固溶处理 10 min 后, 得到了晶粒尺寸分别为 7, 13, 30 和 63 μm 的奥氏体组织. 拉伸实验表明, 随着晶粒尺寸的增加, 加工硬化速率 ($d\sigma/d\varepsilon$) 与真应变 (ε) 的变化关系由 2 阶段变为 3 阶段. 当晶粒尺寸大于 30 μm 时, 加工硬化速率与真应变关系中的第 2 阶段对应的应变长度随着晶粒尺寸的增加而迅速增加. 当真应变为 0—0.2 时, 加工硬化指数随真应变的增加而迅速增加; 在随后的变形中, 与上述 4 个晶粒尺寸对应的试样的加工硬化指数分别稳定在 0.47, 0.53, 0.56 和 0.68. OM 和 TEM 观察显示, 随晶粒尺寸的增大, 变形过程中形变孪晶数量增多. 对于较大晶粒尺寸的试样, 形变孪晶在拉伸变形过程中形核的临界应力较低, 随变形量增加, 形变孪晶可持续形成, 使其加工硬化能力增加, 从而增大了 TWIP 效应; 相反, 晶粒尺寸减小使变形过程中的形变孪晶形核临界应力增大, 抑制形变孪晶的产生, 从而减小了 TWIP 效应.

关键词 TWIP 钢, 晶粒尺寸, 加工硬化速率, 加工硬化指数, TWIP 效应

中图分类号 TG115.213 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2009)09-1083-08

INFLUENCE OF GRAIN SIZE ON TWIP EFFECT IN A TWIP STEEL

WANG Shuhan, LIU Zhenyu, WANG Guodong

State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004

Correspondent: WANG Shuhan, Tel: (024)83688543, E-mail: nmwangshuhan@163.com

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.50873141) and National Basic Research Program of China (No.2004CB619108)

Manuscript received 2009-02-23, in revised form 2009-05-08

ABSTRACT TWIP (twinning induced plasticity) steels possess very high plasticity and high strength. It has been pointed out that deformation twinning plays an important role in controlling the deformation behavior, which divides grains into nano-scale layer-like structures to result in high strain-hardening rate or the so-called “TWIP” effect. The formation of deformation twins is affected by deformation temperature, strain rate, pre-deformation and grain size. The generation of deformation twins in austenitic steel with low stacking fault energy (SFE) is closely related to grain size. However, the relationship between strain hardening rate and grain size in TWIP steels has yet to be clarified, which is important for optimizing the parameters of solution treatments. In the present paper, the specimens of a typical TWIP steel with grain sizes of 7, 13, 30 and 63 μm were fabricated through solution treatments at different temperatures. Mechanical properties were measured by tensile tests, and microstructure evolution was observed by OM and TEM. The results show that the strain-hardening exponent rapidly increases with increasing true strain when it is less than 0.2, but levels off in the subsequent process of deformation. The relationship between strain hardening rate and true strain consists of two stages for the specimen with small grain size and three stages for the specimen with large grain size. Microstructure observation demonstrated that the number of deformation twins increases with the increase of grain size, induced to greater “TWIP” effect in the coarse-grained specimen than in the fine-grained specimen. This can be attributed to the dependence of the critical stress for formation of deformation twins on grain size of $\sigma_T = \sigma_{T0} + K_T d^{-A}$.

* 国家自然科学基金项目 50873141 及国家重点基础研究发展规划项目 2004CB619108 资助

收到初稿日期: 2009-02-23, 收到修改稿日期: 2009-05-08

作者简介: 王书晗, 女, 1982 年生, 博士生

KEY WORDS TWIP steel, grain size, strain hardening rate, strain hardening exponent, TWIP effect

TWIP(twinning induced plasticity) 钢在室温下具有极高的延伸率(最高可达 95%)和较高的抗拉强度(约 650 MPa), 其优良的力学性能来源于变形过程中奥氏体晶粒内部产生的形变孪晶^[1,2]. 由于 TWIP 钢在变形的过程中发生形变诱导孪生, 产生纳米尺度的层状组织, 阻碍位错的运动, 提高了加工硬化速率, 从而导致大的无颈缩延伸, 产生 TWIP 效应^[2-5].

形变孪晶的产生受很多因素的影响, 如变形温度、应变速率、预变形量、晶粒尺寸、织构和第二相等^[6]. Ueji 等^[7]研究了不同晶粒尺寸 TWIP 钢的力学性能, 得出了晶粒尺寸对力学性能的影响大于织构变化对力学性能影响的结论. Danaf 等^[8]研究了几种低层错能合金(如 MP35N, 70/30brass 和 316 不锈钢等)的晶粒尺寸对形变孪晶产生的影响, 指出对于低层错能合金, 晶粒尺寸对加工硬化行为有着强烈的影响; 同时通过显微组织观察得出, 较大晶粒尺寸的试样在变形过程中产生的形变孪晶的数量较多.

但是, TWIP 钢中晶粒尺寸对形变孪晶的产生和演变进程的影响以及对塑性变形过程中加工硬化行为的影响还不明确, 这是优化热处理制度使 TWIP 效应得到最大程度发挥的主要障碍之一. 因此, 研究晶粒尺寸对加工硬化行为的影响机理显得尤为重要. 本文通过对 TWIP 钢进行不同温度的固溶处理得到了不同晶粒尺寸的显微组织, 研究了晶粒尺寸对 TWIP 钢拉伸过程中加工硬化行为及形变孪晶演变的影响规律和机理.

1 实验方法

实验采用真空感应炉熔炼了 TWIP 钢, 其成分(质量分数, %)为: Mn 24.8, Si 3.17, Al 3.12, C 0.022, S 0.005, P 0.01, Fe 余量. 铸锭在 1473 K 保温 2 h 进行均匀化处理后, 热轧成 10 mm 的板材; 再将板材由 10 mm 热轧至 3 mm, 经过 1373 K 固溶处理 20 min 后, 继续冷轧至 1 mm, 最后分别在 1073, 1173, 1273 和 1373 K 下固溶处理 10 min 后水淬. 将薄板制成标准拉伸试样, 在电子万能试验机上进行拉伸, 拉伸速度为 3 mm/min.

拉伸变形后的试样经线切割制成金相试样. 金相试样经打磨、抛光后用 4% 硝酸酒精腐蚀, 通过光学显微镜(OM)观察其金相组织. 电子背散射衍射(EBSD)试样经 20% 高氯酸 + 10% 醋酸 + 乙醇溶液电解抛光, 消除表面应力层, 抛光电流 0.5 mA, 抛光电压 20 V. 奥氏体晶粒尺寸用 QUANTA 600 型扫描电镜(SEM)的取向成像电子显微术分析. 采用 JEM 2010 和 TECNAI G2 20 型透射电子显微镜(TEM)对变形后的 TWIP 钢薄膜试样进行组织观察.

2 实验结果及讨论

2.1 晶粒尺寸随固溶处理温度的变化关系

图 1 是不同晶粒尺寸 TWIP 钢试样的取向成像图. 由图可见, 在不同温度下固溶处理的 TWIP 钢试样均发生了再结晶, 得到了奥氏体组织, 奥氏体晶粒内部包含大量退火孪晶. 如果晶粒尺寸的计算中包含退火孪晶界, 则在 1073, 1173, 1273 和 1373 K 固溶处理 10 min 后的晶粒尺寸分别为 7, 13, 30 和 63 μm ; 如果晶粒尺寸的计算中不包含退火孪晶界, 则上述条件下的晶粒尺寸分别为 8, 19, 47 和 97 μm . 通常认为退火孪晶界对位错运动的阻碍作用与大角晶界相似^[9], 而晶粒尺寸对拉伸变形过程中形变孪晶的产生有重要影响, 因此, 计算晶粒尺寸的过程中应将退火孪晶界考虑在内.

2.2 加工硬化行为与晶粒尺寸的关系

图 2 为不同晶粒尺寸 TWIP 钢的工程应力-应变曲线及拉伸变形后试样的照片. 由图 2a 可见, 随着晶粒尺寸的增加, TWIP 钢的屈服强度和抗拉强度均降低, 延伸率升高. 表 1 示出了不同晶粒尺寸 TWIP 钢试样的力学性能. 在图 2b 中, L_0 为拉伸试样的标距长度, L 为平行段长度. 可见, 不同晶粒尺寸的 TWIP 钢变形特点有所不同: 晶粒尺寸为 63 μm 的试样拉伸变形后, 试样在整个长度范围内均发生了塑性变形, 即标距之外的长度也发生了塑性变形, 没有明显颈缩现象; 晶粒尺寸为 30 μm 的试样在标距之外的长度仅发生了较小的塑性变形, 并产生颈缩; 而晶粒尺寸为 13 和 7 μm 的试样, 其塑性变形集中在标距内, 且发生了较为明显的颈缩.

图 3a 是不同晶粒尺寸 TWIP 钢试样的加工硬化速率($d\sigma/d\varepsilon$, 其中 σ 为真应力, ε 为真应变)随真应变(ε)的变化关系. 由图可见, 晶粒尺寸为 63 μm 的试样, 加工硬化速率随真应变的变化关系可以分为 3 个阶段: 第 1 阶段(Stage I), 加工硬化速率随真应变的增加迅速降低; 第 2 阶段(Stage II), 加工硬化速率随真应变的增加出现平台, 这代表着形变孪晶的产生^[8,10], 这个平台持续到真应变为 0.2, 在此阶段形变孪晶数量随真应变的增加而增加; 第 3 阶段(Stage III), 加工硬化速率随真应变的增加而缓慢降低, 直到断裂, 这说明形变孪晶数量的增加速率降低^[11]. 晶粒尺寸为 30 μm 的试样, 变形的第 1 个阶段仍然是加工硬化速率随真应变的增加而迅速降低, 而变形的第 2 个阶段则变得相对较短, 平台持续到真应变为 0.13, 随后加工硬化速率就随真应变的增加而下降, 并进入第 3 个变形阶段. 晶粒尺寸为 13 和 7 μm 的试样, 其加工硬化速率随真应变的变化规律只经历了 2 个阶段, 第 1 个阶段与晶粒尺寸为 63 μm 的试样相同, 加工硬化速率随真应变的增加迅速降低, 在随后的变形中并没有出现平台直接

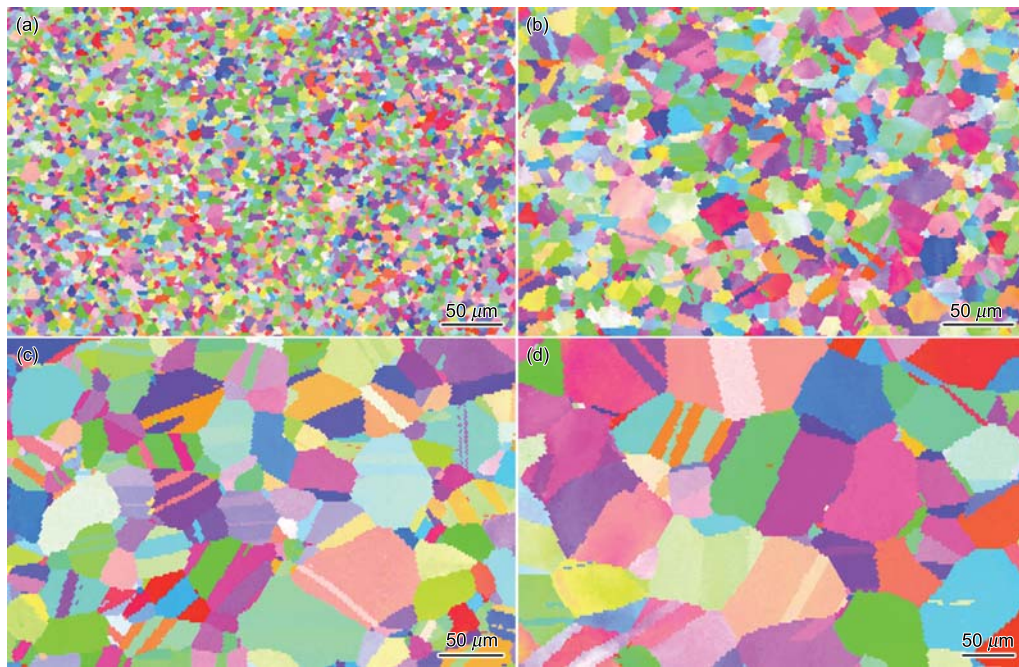


图 1 不同晶粒尺寸 TWIP 钢试样的取向成像图

Fig.1 Orientation maps of the tested TWIP steel (Fe-25Mn-3Si-3Al-0.02C) treated at 1073 K (a), 1173 K (b), 1273 K (c) and 1373 K (d) for 10 min, W.Q. after cold rolling, corresponding to austenite grain sizes of 7, 13, 30 and 63 μm, respectively

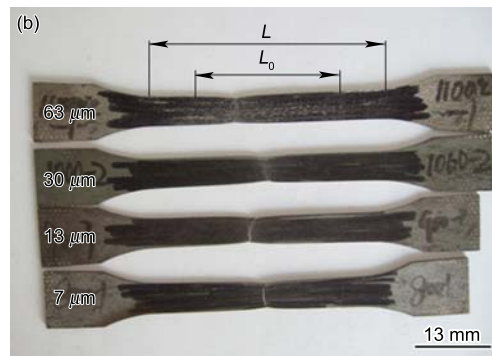
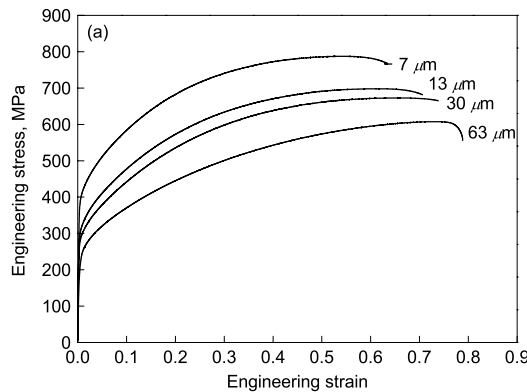


图 2 不同晶粒尺寸 TWIP 钢试样的工程应力 - 应变曲线及拉伸变形后试样的照片

Fig.2 Engineering stress-strain curves of the TWIP steel specimens with different grain sizes (a) and their appearances after tensile deformation (b)

表 1 不同晶粒尺寸 TWIP 钢试样的力学性能

Table 1 Mechanical properties of the tested TWIP steels with different grain sizes

Grain size, μm (after excluding twin boundary)	Yield stress MPa	Tensile stress MPa	Elongation %
7(8)	380	785	68.0
13(19)	285	700	72.0
30(47)	265	675	75.0
63(97)	230	610	79.0

进入第 3 个阶段, 即加工硬化速率随真应变的增加连续降低. 这与其它低层错能合金 (如 70/30 Brass) 的变形行为

对晶粒尺寸的依赖关系一致^[11]. 由图 3a 还可以看出, 随着晶粒尺寸的增加, 在加工硬化速率随真应变变化的第 1 个阶段, 加工硬化速率的下降越来越明显^[11]; 在第 2 阶段和第 3 阶段, 加工硬化速率随晶粒尺寸的增加而下降的速度越来越缓慢. 以上分析说明, 大晶粒尺寸的试样在变形的过程中能够产生持续的加工硬化行为, 其加工硬化能力较大.

图 3b 是不同晶粒尺寸 TWIP 钢试样的加工硬化指数 $n(n = \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{\varepsilon}{\sigma})$ 随真应变 (ε) 的变化关系. 由图可见, n 值随着真应变的变化而变化, 因此 TWIP 钢真应力与真应变不遵循 Hollomond 线性关系^[12]. 不同晶粒尺寸的试样 n 值随真应变的变化规律为: 随着晶粒尺寸的增加,

n 值增加. 在真应变较小的情况下 ($\epsilon < 0.2$), n 随着真应变的增加而增加, 而真应变较大时 ($\epsilon > 0.2$), n 维持在较高的水平, 除 $63 \mu\text{m}$ 试样外基本不发生变化. 由图可知, 晶粒尺寸为 $7, 13, 30$ 和 $63 \mu\text{m}$ 的试样, 变形后期的 n 值分别稳定在 $0.47, 0.53, 0.56$ 和 0.68 . 以上分析说明, 大晶粒尺寸的试样因硬化而使应变均匀分配的能力大, 在变形过程中抵抗颈缩的能力较强.

图 4 是拉伸过程中加工硬化速率与真应变关系 (图 3a) 中第 2 阶段长度 (ϵ_L) 随晶粒尺寸的变化关系. 随晶

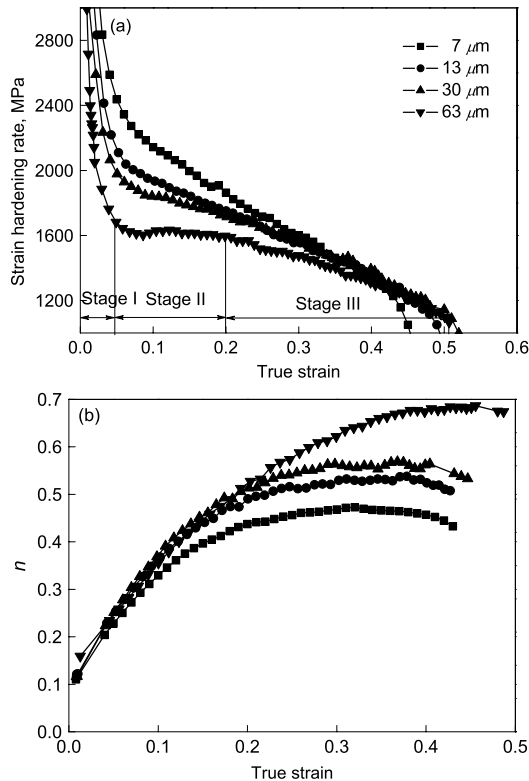


图 3 不同晶粒尺寸 TWIP 钢试样的加工硬化速率及加工硬化指数随真应变的变化关系

Fig.3 Curves of strain hardening rate (a) and strain hardening exponent (n) (b) vs true strain of TWIP steel specimens with different grain sizes (Stage II—deformation induced twins appeared)

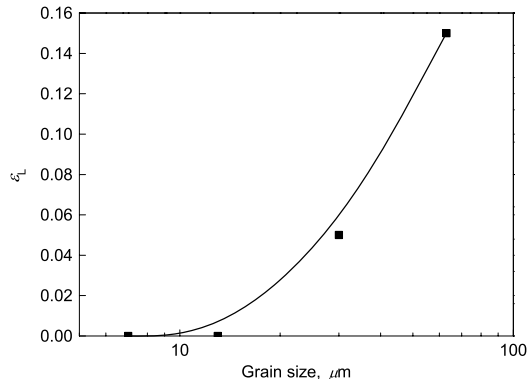


图 4 图 3a 中第 2 阶段长度 (ϵ_L) 随晶粒尺寸的变化关系
Fig.4 Length of the stage II (ϵ_L) in Fig.3a vs grain size

粒尺寸的增加, ϵ_L 迅速增加, 说明晶粒尺寸较大的试样形变孪晶对加工硬化的贡献增大, 能够产生持续的加工硬化效应, 增加了 TWIP 钢的加工硬化能力.

2.3 形变孪晶数量随晶粒尺寸的变化关系

为确定不同晶粒尺寸的试样在拉伸变形过程中显微组织的演变规律, 分别将晶粒尺寸为 $7, 13, 30$ 和 $63 \mu\text{m}$ 的试样拉伸变形至 $5\%, 10\%$ 和 40% , 观察其内部组织的变化规律.

图 5 是不同晶粒尺寸的 TWIP 钢试样在变形初期 ($\epsilon=5\%$) 的金相组织. 由图可知, 随着晶粒尺寸的增加, 组织中逐渐出现形变孪晶, 并且数量越来越多. 经 5% 拉伸变形后, 晶粒尺寸为 $7 \mu\text{m}$ 的试样中没有出现形变孪晶, 晶粒尺寸为 13 和 $30 \mu\text{m}$ 的试样中只有少量形变孪晶, 而晶粒尺寸为 $63 \mu\text{m}$ 的试样中 50% 左右的晶粒中都已经出现形变孪晶.

图 6 是不同晶粒尺寸的 TWIP 钢试样拉伸变形量为 10% 的金相组织. 可以看出, 随着晶粒尺寸的增加, 形变孪晶的数量迅速增加. 小晶粒尺寸 (7 和 $13 \mu\text{m}$) 的试样形变孪晶的数量很少, 而大晶粒尺寸 (30 和 $63 \mu\text{m}$) 的试样中则出现大量的形变孪晶.

图 7 是不同晶粒尺寸的 TWIP 钢试样拉伸变形量为 40% 的金相组织. 在这种变形条件下晶粒发生了严重的变形, 随着晶粒尺寸的增加, 形变孪晶的数量明显增加.

由图 5—7 中相同晶粒尺寸的试样不同拉伸变形量下金相组织的对比可见, 随着拉伸变形量的增加, 组织中逐渐出现形变孪晶, 并且随着变形量的增加, 形变孪晶的数量增加.

2.4 TWIP 效应随晶粒尺寸变化的机理

图 8 是晶粒尺寸为 7 和 $63 \mu\text{m}$ 的 TWIP 钢试样变形 5% 后显微组织的 TEM 照片. 晶粒尺寸为 $7 \mu\text{m}$ 的试样, 显微组织以位错和层错为主. 如图 8a 中 A 晶粒所示, 晶粒内部为高密度的平面位错, 晶粒 B 中含有大量的层错, 并与位错交织在一起. 由于晶粒尺寸为 $7 \mu\text{m}$ 的试样在 1073 K 固溶处理 10 min 后, 再结晶组织发展的不充分, 造成晶粒尺寸不均匀, 晶粒尺寸范围在 $4\text{--}13 \mu\text{m}$, 小晶粒内部的变形组织为平面位错及层错, 只有极少数大晶粒内部出现形变孪晶, 如图 8b 所示, 其右上角为选区电子衍射图 (EDP). 形变孪晶很薄, 因而在金相显微镜下很难观察到. 这说明在变形开始的阶段, 形变孪晶的产生主要取决于晶粒尺寸的大小^[13]. 由图 8c 可知, 晶粒尺寸为 $63 \mu\text{m}$ 的试样经 5% 的拉伸变形后, 组织中有大量的层错, 并且已经产生少量的形变孪晶, 这与金相组织的观察结果相吻合 (图 5d).

图 9 是晶粒尺寸为 7 和 $63 \mu\text{m}$ 的 TWIP 钢试样变形 40% 后显微组织的 TEM 照片. 由图 9a 可知, 晶粒尺寸为 $7 \mu\text{m}$ 的试样, 经过 40% 拉伸变形后, 组织中含有大

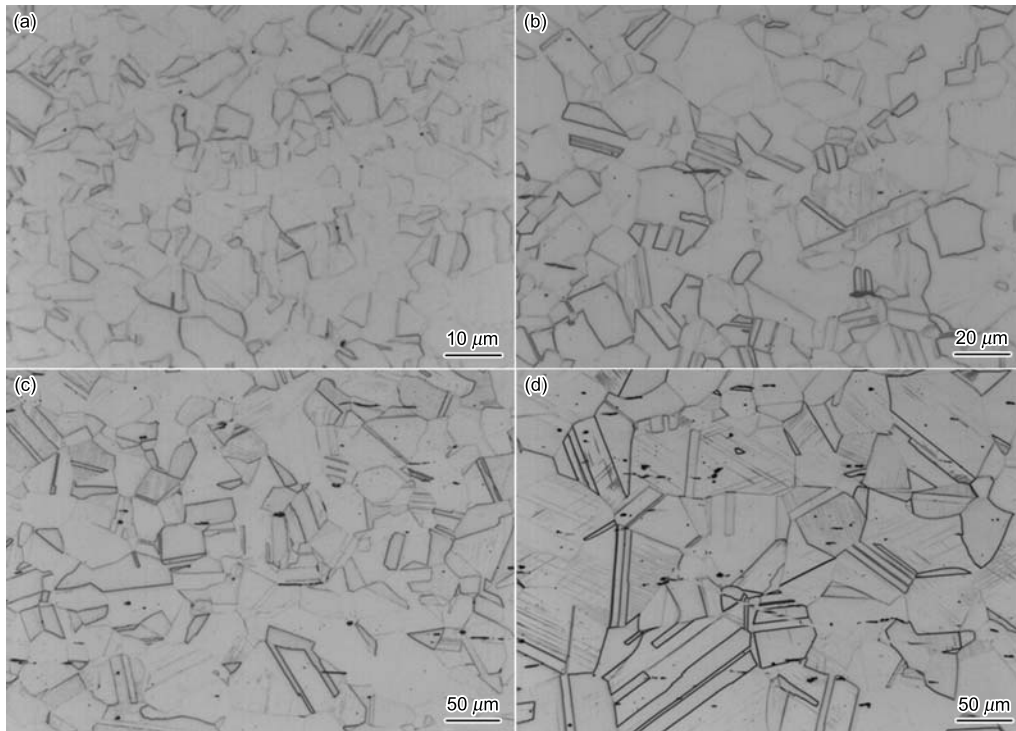


图 5 不同晶粒尺寸的 TWIP 钢试样拉伸变形量为 5% 的金相组织

Fig.5 Optical microstructures of the TWIP steel specimens with grain sizes of 7 μm (a), 13 μm (b), 30 μm (c) and 63 μm (d) after tensile deformation of 5%, deformation twins appeared in 50% grains in Fig.5d

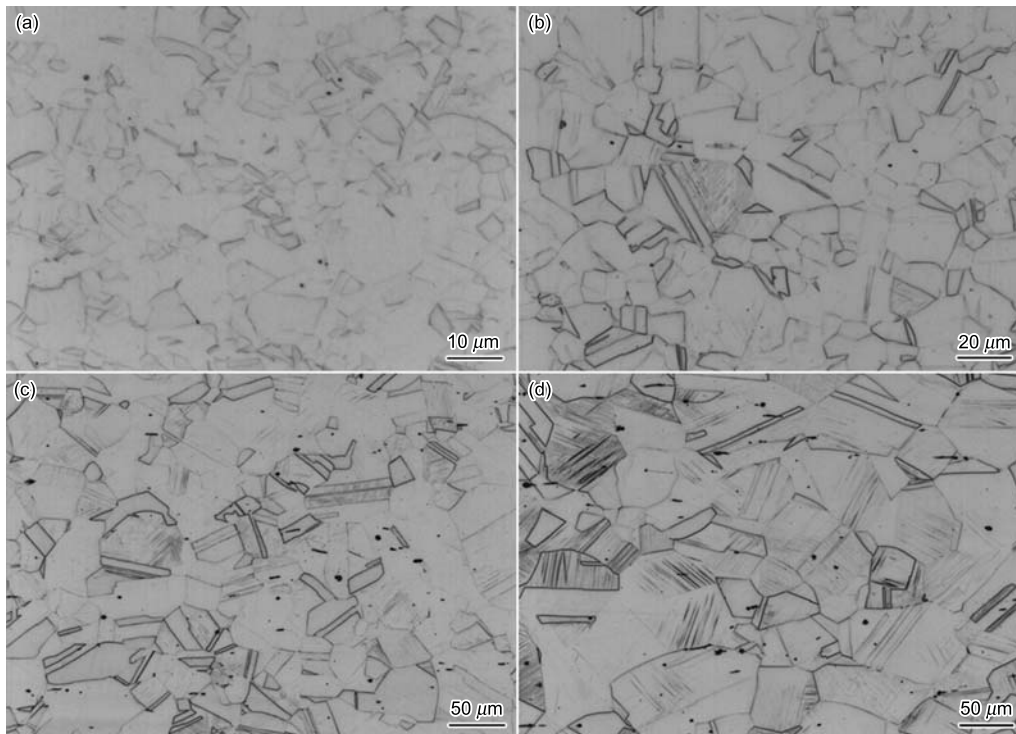


图 6 不同晶粒尺寸的 TWIP 钢试样拉伸变形量为 10% 的金相组织

Fig.6 Optical microstructures of the TWIP steel specimens with grain sizes of 7 μm (a), 13 μm (b), 30 μm (c) and 63 μm (d) after tensile deformation of 10%

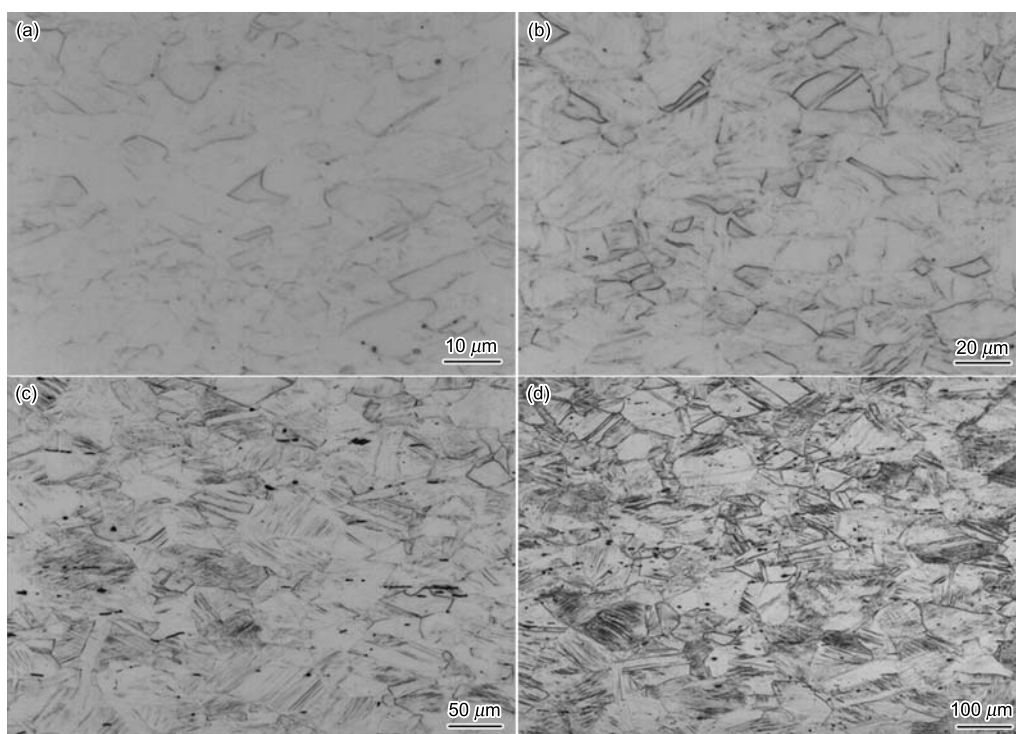


图 7 不同晶粒尺寸的 TWIP 钢试样拉伸变形量为 40% 的金相组织

Fig.7 Optical microstructures of the TWIP steel specimens with grain sizes of $7\ \mu\text{m}$ (a), $13\ \mu\text{m}$ (b), $30\ \mu\text{m}$ (c) and $63\ \mu\text{m}$ (d) after tensile deformation of 40%

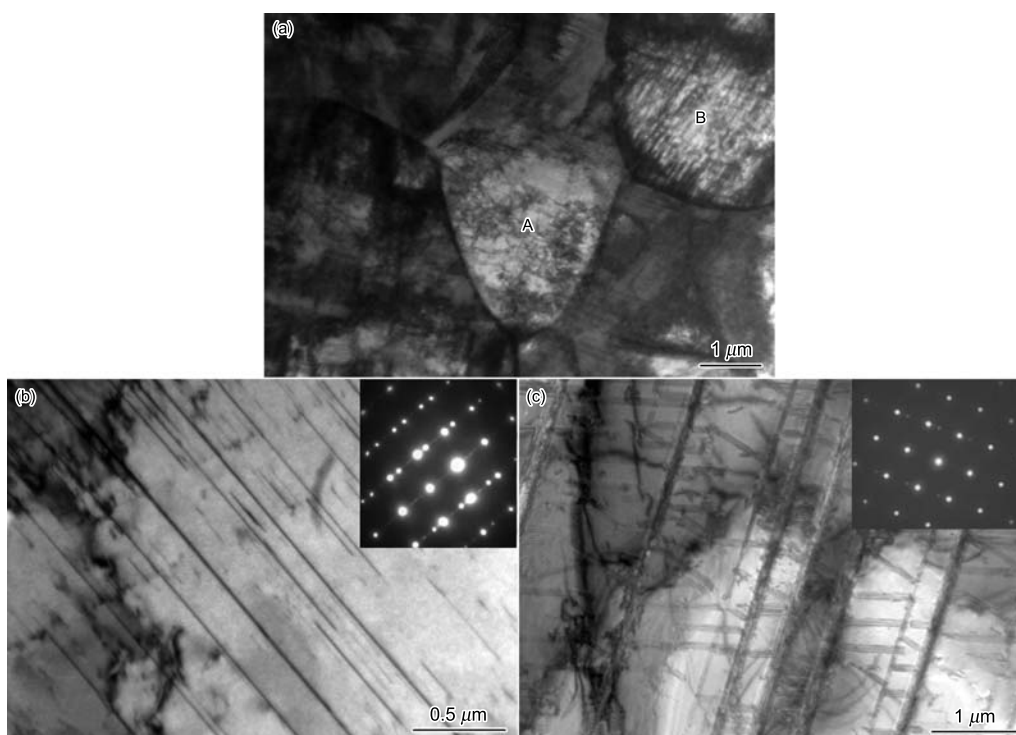


图 8 晶粒尺寸为 7 和 $63\ \mu\text{m}$ 的 TWIP 钢试样变形 5% 后显微组织的 TEM 照片

Fig.8 TEM images of the TWIP steels with the grain sizes of $7\ \mu\text{m}$ (a, b) and $63\ \mu\text{m}$ (c) after tensile deformation of 5%, the insets in Fig.8b and Fig.8c showing composite EDPs of matrix and deformation twin
 (a) dislocations and stacking faults appeared in small grains A and B, respectively
 (b) deformation twins appeared in large grain
 (c) large amounts of stacking faults and deformation twins appeared in the specimen with grain size of $63\ \mu\text{m}$

量的形变带,形变带中有少量形变孪晶产生,而有些晶粒内部则产生胞状位错结构,如图 9b 中箭头所示.晶粒尺寸为 $63\ \mu\text{m}$ 的试样经过 40% 拉伸变形后则含有大量形变孪晶(图 9c),有的晶粒内部出现了两组形变孪晶相互交割的现象,如图 9d 所示,其右上角为两组形变孪晶与基体的 EDP 图.

通常形变孪晶的产生首先需要克服临界应力,形变孪晶的产生是由于孪生位错的运动造成的,任何阻碍位错运动的因素都会造成形变孪晶产生的临界应力增加^[14],因此,形变孪晶产生的临界应力强烈依赖于晶粒尺寸的大小.

通常形变孪晶产生的临界应力与晶粒尺寸的关系满足类似 Hall-Petch 的关系^[11,14,15],即

$$\sigma_T = \sigma_{T0} + K_T d^{-A} \quad (1)$$

式中, σ_T 为形变孪晶产生的临界应力, σ_{T0} 为晶格摩擦力, K_T 为常数, d 为晶粒尺寸, A 为常数 ($1/2 \leq A \leq 1$).

根据式 (1) 可以看出,产生形变孪晶需要的临界应力随晶粒尺寸的减小而增加,如果晶粒尺寸足够小或者产生了足够的应变诱导的晶粒细化,则孪生就会停止.当奥氏体晶粒尺寸由 $63\ \mu\text{m}$ 减小为 $7\ \mu\text{m}$ 时,晶粒尺寸的减小使得 $(\sigma_T - \sigma_{T0})$ 增加了约 3—9 倍.因此,变形量为

5% 时,在晶粒尺寸为 $7\ \mu\text{m}$ 的试样中仅在晶粒尺寸较大的晶粒中发现极少量形变孪晶.同时,晶粒尺寸的减小抑制了拉伸变形过程中形变孪晶的产生^[7,16],导致在相同的变形量下小晶粒尺寸的试样比大晶粒尺寸的试样的形变孪晶数量少,由图 9a 和 b 可以看出,变形的后期,变形组织中含有大量形变带,有的晶粒甚至产生胞状位错结构,而形变孪晶的数量则很少.Ueji 等^[7]研究细晶 TWIP 钢时也得到了相同的结论:在细小的晶粒中形变孪晶受到抑制是由于晶粒细化的结果.与之相对比,在晶粒尺寸为 $63\ \mu\text{m}$ 的试样中形变孪晶在变形的开始就已经产生(变形量 5%,图 8c),并且随着变形量的增加,形变孪晶的数量增多,当变形量为 40% 时,变形组织中有大量形变孪晶,并且出现有两组形变孪晶相互交割的现象.

由于形变孪晶与大角晶界一样,对位错运动形成强烈的阻碍^[4,9,17],变形过程中,形变孪晶不断产生会产生持续的加工硬化现象.如图 3a 中晶粒尺寸为 $63\ \mu\text{m}$ 试样的加工硬化速率随真应变变化的曲线所示,在变形的过程中,加工硬化曲线出现较大平台,正是形变孪晶对加工硬化的贡献,加工硬化指数随着晶粒尺寸的增加而增加,在变形的过程中可以有效抑制颈缩的产生,试样产生了均匀的变形(图 2b),并最终获得了

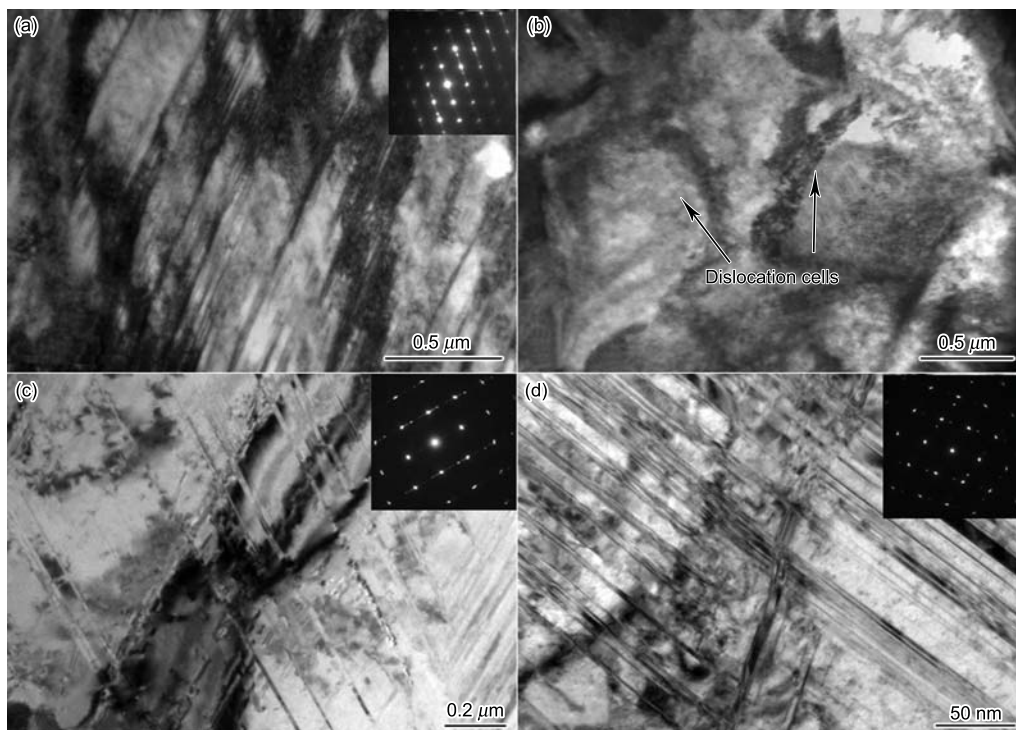


图 9 晶粒尺寸为 7 和 $63\ \mu\text{m}$ 的 TWIP 钢试样变形 40% 后显微组织的 TEM 照片

Fig.9 TEM images of TWIP steel specimens with grain sizes of $7\ \mu\text{m}$ (a, b) and $63\ \mu\text{m}$ (c, d) after tensile deformation of 40%, the insets in Fig.9a, Fig.9c and Fig.9d showing composite EDPs of matrix and deformation twins

- (a) more deformation bands, deformation twins appeared in some grains
- (b) dislocation cells appeared
- (c) more deformation twins appeared
- (d) intersection of two sets of deformation twins appeared

较大的均匀延伸率^[18].

对于晶粒尺寸较大的试样, 形变孪晶在拉伸变形过程中不断产生, 从而出现持续的加工硬化, 并产生无颈缩的大延伸, 增加了“TWIP 效应”; 而对于晶粒尺寸相对较小的试样, 形变孪晶产生较晚, 并且在随后的变形中形变孪晶的产生受到抑制, 形变孪晶对加工硬化的作用相对较小, 造成较小的均匀变形, 导致“TWIP 效应”减小.

3 结论

(1) 随着晶粒尺寸的增加, TWIP 钢的加工硬化速率随真应变的关系, 曲线由 2 阶段变为 3 阶段, 当晶粒尺寸大于 30 μm 时, 随着晶粒尺寸的增加, 第 2 阶段的长度迅速增加.

(2) 晶粒尺寸为 7, 13, 30 和 63 μm 的 TWIP 钢, 在真应变为 0—0.2 时, 加工硬化指数随真应变的增加而增加, 在随后的变形中, 加工硬化指数则稳定在较高的水平, 分别为 0.47, 0.53, 0.56 和 0.68.

(3) 晶粒尺寸的增加导致形变孪晶产生的临界应力降低, 使得形变孪晶在拉伸变形中持续形成, 产生持续的加工硬化效应, 进而增加了“TWIP 效应”; 而晶粒尺寸的降低, 抑制形变孪晶的产生, 即抑制“TWIP 效应”.

参考文献

- [1] Frommeyer G, Brüx U, Neumann P. *ISIJ Int*, 2003; 43: 438
- [2] Grässel O, Krüger L, Frommeyer G, Meyer L W. *Int J Plast*, 2000; 16: 1391
- [3] Vercammen S, Blanpai B, Cooman B C D, Wollants P. *Acta Mater*, 2004; 52: 2005
- [4] Bouaziz O, Guelton N. *Mater Sci Eng*, 2001; A319–321: 246
- [5] Shiekhelsouk M N, Favier V, Inal K, Cherkaoui M. *Int J Plast*, 2009; 25: 105
- [6] Christian J W, Mahajan S. *Pro Mater Sci*, 1995; 39: 1
- [7] Ueji R, Tsuchida N, Terada D, Tsuji N, Tanaka Y, Take-mura A, Kunishige K. *Scr Mater*, 2008; 59: 963
- [8] Danaf E E, Kalidindi S R, Doherty R D. *Int J Plast*, 2001; 17: 1245
- [9] Lu L, Shen Y, Chen X, Qian L, Lu K. *Science*, 2004; 304: 422
- [10] Kalidindi S R. *Int J Plast*, 1998; 14: 1265
- [11] Danaf E E, Kalidindi S R, Doherty R D. *Metall Mater Trans*, 1999; 30A: 1223
- [12] Xiong R G, Fu R Y, Li Q, Zhang M, Li L. *Iron Steel*, 2007; 42: 61
(熊荣刚, 符仁钰, 黎倩, 张梅, 李麟. 钢铁, 2007; 42: 61)
- [13] Barbier D, Gey N, Allain S, Bozzolo N, Humbert M. *Mater Sci Eng*, 2009; A500: 196
- [14] Sevillano J G. *Scr Mater*, 2008; 59: 135
- [15] Meyers M A, Vöhringer O, Lubarda V A. *Acta Mater*, 2001; 49: 4025
- [16] Barnett M R. *Scr Mater*, 2008; 59: 696
- [17] Allain S, Chateau J-P, Kahmoun K, Bouaziz O. *Mater Sci Eng*, 2004; A387–389: 272
- [18] Allain S, Chateau J-P, Bouaziz O, Migot S, Guelton N. *Mater Sci Eng*, 2004; A387–389: 158