

## 不同热处理工艺对 Fe-30Mn-3Si-4Al TWIP 钢力学组织性能的影响

包卫平<sup>1</sup>, 熊志平<sup>1</sup>, 赵艳君<sup>1,2</sup>, 任学平<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083; 2. 广西大学材料科学与工程学院, 南宁 530004)

**摘要:** 采用拉伸性能测试、金相观察、SEM 和 EDS 等方法研究了不同热处理工艺对 Fe-30Mn-3Si-4Al TWIP 钢微观组织、拉伸力学性能及断口形貌的影响, 并采用 X 射线衍射仪测定材料的物相组成。结果表明, 冷却速度越快, TWIP 钢的延伸率和强度越高; 热处理后其室温组织为含有退火孪晶的单一奥氏体, 冷却速度越小, 奥氏体晶粒和退火孪晶的尺寸越大。拉伸时发生典型的延性断裂, 在拉伸过程中退火孪晶转变成形变孪晶, 使材料的塑性提高。

**关键词:** TWIP 钢; 热处理; 退火孪晶; 形变孪晶; 力学性能

**中图分类号:** TG113.12; TG113.25 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-6457(2010)01-0005-05

### Effect of Different Heat Treatment Processes on Mechanical Properties and Microstructure of Fe-30Mn-3Si-4Al TWIP Steel

BAO Wei-ping<sup>1</sup>, XIONG Zhi-ping<sup>1</sup>, ZHAO Yan-jun<sup>1,2</sup>, REN Xue-ping<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

**Abstract:** Effects of different heat treatment processes on microstructure, tensile mechanical properties and fractography of Fe-30Mn-3Si-4Al TWIP steel were studied by tensile testing, optical microstructure, SEM and EDS, and the phase composition was measured by X-ray diffraction (XRD). The results indicated that elongation and strength of TWIP steel increase with increasing cooling rate; its microstructure with heat treatment is austenite with annealing twins; and the austenite grain and annealing twins size increase with cooling rate decreasing. The fracture mechanism of TWIP steel is typical toughness fracture under the condition of tensile failure. During tension the annealing twins change into deformation twins, which makes the plasticity of materials increase.

**Key words:** TWIP(Twinning Induced Plasticity) steel; heat treatment; annealing twins; deformation twins; mechanical properties

TWIP(Twinning Induced Plasticity) 钢是一种低层错能合金, 孪生是影响其塑性变形的主要机制, 被称为孪晶诱导塑性钢。Grässel 等<sup>[1-2]</sup> 系统研究了 Fe-Mn-Al-Si 系高锰钢的组织、力学性能、以及变形

机制, 发现 Mn 元素在 15% ~ 30% 之间变化时, Fe-Mn-Al-Si 系高锰钢呈现出不同的加工硬化特征。Mn(质量分数为 25% ~ 30%)、Si(质量分数为 2% ~ 4%)、Al(质量分数为 2% ~ 4%) 的 Fe-Mn-Si-Al

收稿日期: 2009-12-01

基金项目: 广西大学有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室资助项目(GXKFJ-10)

作者简介: 包卫平(1977-), 男, 广西玉林人, 博士研究生, 主要从事金属材料组织性能控制及塑性成形研究。

系合金,表现出 TWIP (孪晶诱导塑性) 效应。自 Grässel 和 Frommeyer 于 1998 年正式提出 TWIP 效应以来,国内外对 TWIP 钢的组织 and 性能进行了大量研究<sup>[3-6]</sup>。研究表明, TWIP 钢具有优异的力学性能,它的强度可以达到 600~1100 MPa,断后伸长率可达 60%~95%,除此之外,还具有高的能量吸收能力,而且没有低温脆性转变温度,如 20 °C 时吸收能能够达到 0.5 J/mm<sup>3</sup><sup>[1]</sup>,比传统深冲钢高 2 倍多。目前,热处理工艺对 TWIP 钢组织性能的影响的探讨还较少<sup>[7-8]</sup>。文中主要研究 Fe-30Mn-3Si-4Al TWIP 钢的热处理工艺,比较不同热处理工艺对 TWIP 钢力学性能和组织的影响,重点探讨 TWIP 钢的塑性变化规律。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验材料

试验钢在真空感应炉氩气保护下熔炼,其化学成分(质量分数)为: Mn 29.5%, Al 2.94%, Si 3.80%, C 0.06%, P 0.006%, S 0.005%, Fe 余量,然后进行模铸。铸锭在始锻温度为 1100~1200 °C,终锻温度不低于 900 °C 的条件下热锻成  $\phi 30$  mm 的棒材。

### 1.2 实验方法

沿棒材轴向截取拉伸试样坯料,在 1000 °C 保温 45 min 固溶,分别采用水淬、空冷、炉冷等 3 种方式冷却至室温。然后将拉伸试样坯料加工成  $\phi 5$  mm  $\times$  25 mm 的标准拉伸试样,在电子万能试验机上进行室温拉伸试验,拉伸速率为 1 mm/s。沿与拉伸方向平行的纵截面截取拉伸前、后的金相试样,经抛光、浸蚀(硝酸酒精溶液,4%)后在光学显微镜上观察金相组织。拉伸断口形貌扫描及能谱分析在 LEO-1450 型扫描电镜上进行,采用 DMAX-RB12KW

旋转阳极 X 射线衍射仪分析样品固溶处理后和变形后的晶体结构及物相组成。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 力学性能

不同热处理工艺条件下 TWIP 钢的拉伸真应力-真应变曲线如图 1 所示。热处理前材料的应力

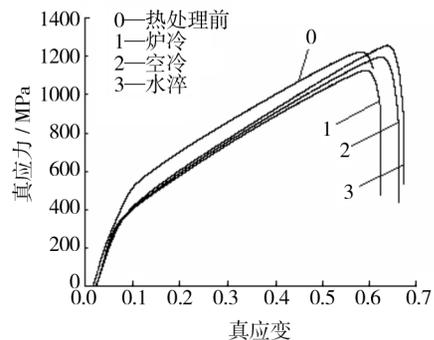


图 1 不同热处理工艺条件下 TWIP 钢的真应力-真应变曲线 (1000 °C, 45 min)

Fig. 1 True stress-strain curves of TWIP steel with different heat treatment processes

水平明显高于热处理后,热处理后材料的最大真应变增加。在不同热处理工艺条件下,随着冷却速度的降低, TWIP 钢的真应力水平降低,最大真应变下降,应变硬化率也随之降低。从真应力-真应变曲线还可以发现, TWIP 钢在拉伸变形过程中,随着应变的增大流变应力连续升高,直到最大真应力为止,表现出连续的塑性变形强化特征。当曲线上升到最大真应力时,试样即发生断裂,没有出现颈缩现象,表现出均匀变形特征。

不同热处理条件下 TWIP 钢的力学性能对比见表 1。可以看出,热处理后 TWIP 钢塑性提高,强

表 1 不同热处理工艺条件下 TWIP 钢的拉伸力学性能

Table 1 Mechanical properties of TWIP steel with different heat treatment processes

热处理工艺	延伸率 $\delta$ / %	断面收缩率 $\psi$ / %	抗拉强度 $\sigma_b$ / MPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ / MPa
热处理前	0.68	0.39	691	438
1000 °C, 45 min, 水淬	0.81	0.50	668	311
1000 °C, 45 min, 空冷	0.77	0.46	646	295
1000 °C, 45 min, 炉冷	0.73	0.46	628	293

度降低,在不同热处理工艺条件下,冷却速度越快, TWIP 钢塑性和强度越高,并且各个工艺条件下延伸率远高于断面收缩率,这也说明材料只有均匀塑性变形而无颈缩现象。

## 2.2 显微组织

TWIP 钢热处理前及不同热处理工艺下的金相组织如图 2 所示。固溶处理前的原始组织照片如图

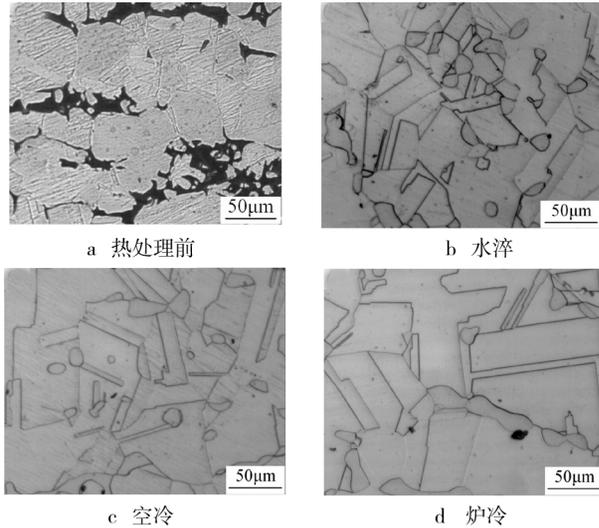


图 2 不同热处理工艺条件下 TWIP 钢的金相组织 (1000 °C, 45 min)

Fig. 2 Microstructure of TWIP steel with different heat treatments (1000 °C, 45 min)

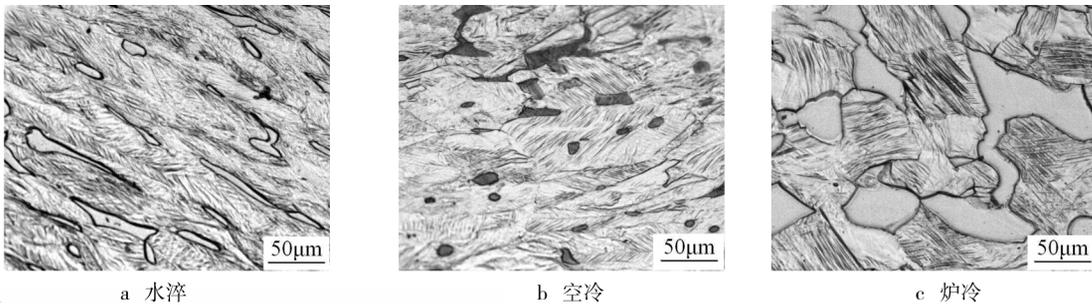


图 3 不同热处理态的 TWIP 钢拉伸后的金相组织

Fig. 3 Microstructure of TWIP steel with different heat treatment condition after tension

晶内贯穿,分割奥氏体晶粒,细小的形变孪晶呈交织状分布于奥氏体晶粒内,起到了亚晶界的作用,从而使基体组织得到细化。受退火孪晶尺寸的影响,拉伸前孪晶尺寸越小,拉伸后产生的形变孪晶尺寸也越小,而且密度越高,孪生变形所占比例越大,因此,材料的塑性和强度越高。这也是 TWIP 钢固溶后的

2a 所示,可以看出该实验材料热处理前的组织主要为奥氏体基体和少量分布于晶界上的由金属化合物组成的剩余相。热处理后, TWIP 钢基体组织为含有片状退火孪晶组织的奥氏体,原始组织中的剩余相已全部固溶于奥氏体基体。从图 2b-d 可以看出,随着冷却速度的减小,奥氏体晶粒明显长大,奥氏体晶界开始平直化,炉冷时晶界已经基本上变直,奥氏体晶粒内的退火孪晶尺寸也随之增大。

退火条件下,在一些中低层错能的面心立方金属或合金中(如奥氏体  $\gamma$ -Fe),经常在再结晶组织中发现两界面平直的孪晶片,即退火孪晶。 $\gamma$ -Fe 的孪生面为  $\{111\}$ ,这种退火孪晶是在一次再结晶晶粒的生长过程中伴随生成的。再结晶过程中,如果在界面推移过程中发生层错现象,即出现孪晶界面,它们随着晶粒的长大而长大<sup>[9]</sup>。同时,在晶粒长大的过程中也会有为数不多的孪晶继续形成。因此,随着冷却速度的减小,奥氏体晶粒有更充分的时间长大,退火孪晶也随之长大。比较炉冷与水淬的组织,可发现炉冷的退火孪晶尺寸明显比水淬的粗大。

热处理的 TWIP 钢拉伸后的金相照片如图 3 所示。可以看见,经拉伸变形后,奥氏体晶粒沿着变形方向拉长成为变形带,材料的显微组织中出现大量的高密度形变孪晶,这些形变孪晶仍然保留有初始退火孪晶的位向关系。形变孪晶从奥氏体晶界向

冷却速度越高,塑性和强度越高的主要原因。

由于 TWIP 钢具有稳定的奥氏体组织和低的层错能,因而其变形机制以孪生为主。在 TWIP 钢的孪生变形过程中将产生大量的形变孪晶,而且随变形量增加,形变孪晶越来越多。由于孪晶对位错的钉扎作用阻止了滑移变形,促成了应变诱发孪晶,从

而发生了机械孪晶诱发塑性,即 TWIP 效应。一方面,形变生成的孪晶层片呈交织状分布于奥氏体晶粒内分割晶粒,实质上起到了亚晶界的作用,在一定程度上起着细化基体的作用,对强韧性也有一定的贡献;另一方面,孪生变形通过改变晶体位向为位向不利或难滑移的滑移系的运动提供了可能,孪生变形增加了塑性变形方式,更利于基体金属均匀变形,而且孪生本身也有一定的塑性形变量,故孪生变形对基体金属塑性的增加有着积极的作用,推迟颈缩的形成,极大提高了断后伸长率。

为进一步研究不同热处理工艺条件下及变形后 TWIP 钢的微观组织结构,采用 DMAX-RB12KW 旋转阳极 X 射线衍射仪分析其晶体结构及物相组成。不同热处理态及变形态 TWIP 钢的 X 射线衍射 (XRD) 图谱如图 4 所示。通过 XRD 图谱来分析

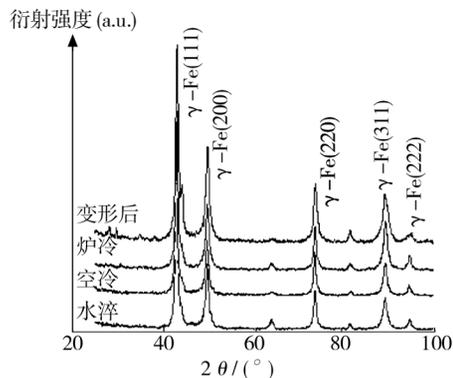


图4 不同状态下 TWIP 钢的 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of TWIP steel with different conditions

TWIP 钢不同状态下的相组成可发现,变形前后的不同状态下只有  $\gamma$ -Fe 衍射峰出现,表明热处理和变形过程中没有发生相变,经热处理及拉伸变形后的 TWIP 钢均为单一的奥氏体结构,即 TWIP 钢变形前后的室温组织均为完全的奥氏体状态。此外,从衍射图谱可以看出,相比热处理状态,拉伸变形状态的衍射角有一定的偏移,表明经过拉伸变形后,晶格发生了畸变,但变形过程中材料的相组成没有发生变化。

### 2.3 断口形貌分析

从试样的宏观断口观察发现,拉伸断口附近失效前后没有出现明显颈缩,说明在拉伸变形过程中沿试样纵向发生了均匀延伸变形,而横向收缩较少。

给出了 TWIP 钢拉伸断口形貌 SEM 照片如图 5 所

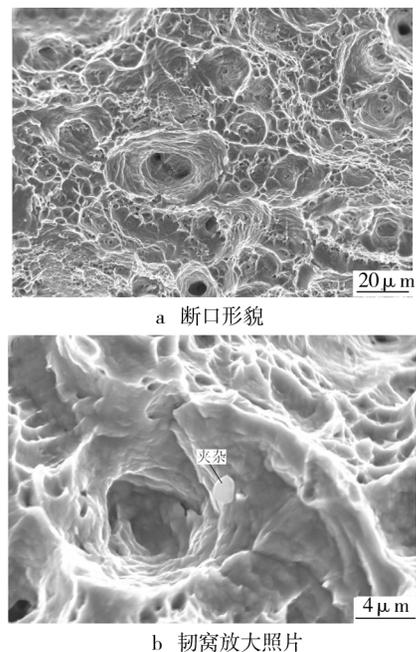


图5 TWIP 钢拉伸断口分析照片

Fig.5 Micrograph of the fracture of TWIP steel after tension

示,韧窝底部夹杂物能谱分析结果见表 2。

表2 TWIP 钢拉伸断口夹杂物能谱分析结果(质量分数,%)  
Table 2 Energy spectrum analysis result of fracture inclusions for TWIP steel

Al	Si	Mn	S	Fe
3.37	2.23	41.51	13.75	39.15

从图 5 可以看出,断口的微观形貌呈现出许多细小、等轴状的韧窝结构,断口的韧窝很深且沿深度方向呈锥状。韧窝底部夹杂物能谱分析结果表明,夹杂物主要为 Mn 的非金属化合物,而且主要以球状 MnS 的形式存在。由于单轴拉伸应力分布在整个断面上,而夹杂物或第二相粒子形成的显微空洞沿空间 3 个方向长大速率相同,因此,在断口表面上形成了形状相同的等轴韧窝,这种等轴韧窝为典型的延性断裂形式。

## 3 结语

1) 热处理工艺对 TWIP 钢的力学性能有较大的影响,冷却速度越快, TWIP 钢的塑性和强度越高, TWIP 钢在拉伸变形过程中表现出连续的塑性

变形强化特征,而且只有均匀变形发生。

2) 不同热处理工艺条件下和变形过程中没有发生相变,经固溶处理及拉伸变形后的 TWIP 钢均为单一的奥氏体结构。热处理后有大量退火孪晶产生,冷却速度越小,奥氏体晶粒和退火孪晶尺寸越大,拉伸变形后产生的形变孪晶尺寸也越大,密度越低。

3) TWIP 钢的断裂类型表现为延性断裂,韧窝较深且呈等轴状,断裂试样表现出均匀延伸,断口处没有出现颈缩现象。

#### 参考文献:

- [1] GRÄSSEL O, KRÜGER L, FROMMEYER G, et al. High strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP steels development-properties-application [J]. International Journal of Plasticity, 2000, 16(10-11): 1391-1409.
- [2] FROMMEYER G, BRUEX U, NEUMANN P. Supra-ductile and High-strength Manganese-TRIP/TWIP Steels for High Energy Absorption Purpose [J]. ISIJ International, 2003, 43(3): 438-446.
- [3] MI Zhen-li, TANG Di, JIANG Hai-tao, et al. Effects of Annealing Temperature on the Microstructure and Properties of the 25Mn-3Si-3Al TWIP Steel [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2009, 16(2): 154-158.
- [4] 黎倩,符仁钰,史文,等. 汽车用 TWIP 钢的探索研究 [J]. 金属热处理, 2008, 33(5): 1-4.
- [5] BRUX U, FROMMEYER G, GRÄSSEL O, et al. Development and Characterization of High Strength Impact Resistant Fe-Mn-(Al-Si) TRIP/TWIP Steels [J]. Steel Res, 2002, 73(13): 294-298.
- [6] 严玲,唐荻,米振莉,等. 汽车用 TWIP 钢的力学性能与微观组织 [J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(8): 739-743.
- [7] 王书晗,刘振宇,王国栋,等. 热处理工艺对 TWIP 钢组织性能的影响 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2008, 29(9): 1283-1286.
- [8] 李慎升,米振莉,唐荻,等. 退火工艺对 TWIP 钢显微组织的影响 [J]. 材料热处理技术, 2008, 37(18): 64-66.
- [9] 毛卫民,赵新兵. 金属的再结晶与晶粒长大 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1994: 63-65.

## 半固态触变压铸技术

触变注射成形的工艺过程接近于注塑成形。首先将镁合金锭加工切成细颗粒状,将此镁合金颗粒装入料斗中,强制输送到粒筒中,粒筒中旋转的螺杆驱使镁合金颗粒向模具方向运动,当其到达粒筒的加热部位时,合金颗粒呈部分熔融状态,在螺旋体的剪切作用下,具有枝晶组织的合金料形成了具有触变结构的半固态合金,当其累积到一定体积时,被高速(5.5 m/s)注射到抽成真空的预热型腔中成形。半固态合金在外力作用下可以像热塑性塑料一样流动成形,但触变注射成形的温度、压力以及螺杆旋转速度远远高于注塑设备的。成形的加热系统采用了电阻和感应加热的复合工艺,将合金加热至  $582 \pm 2$  °C,固相体积分数达 60%,同时通入氩气进行保护。

与传统的压铸相比,触变注射成形无需液态金属熔融和浇注等过程,生产过程较为清洁、安全和节能。没有熔液产生,单位成形件的原材料消耗大为减少,无爆炸危险,无需 SF<sub>6</sub> 气体保护,消除 SF<sub>6</sub> 对臭氧层的破坏,成形过程中卷入的气体大幅度减少,零件孔隙度小于 0.069%,因此成形件可以热处理,成形件致密度高,机械性能好,耐蚀能力强。与传统压铸相比,工作温度约降低 100 °C,有利于提高压铸模寿命,并使其生产过程具有良好的一致性,减少了镁铸件在型内的收缩率,减少了铸件的脱型阻力,提高了铸件的尺寸精度,零件表面质量好,可铸造壁厚达 0.70.8 mm 的轻薄件。目前已用此法生产出汽车的传动器壳体、盖、点火器壳体等,所用的镁合金是 AZ91D。高度自动化的镁合金半固态射铸成形机及其生产线在工业发达国家发展很快,我国台湾省的镁合金压铸业也在开始大量使用半固态射铸成形机,仅华孚公司一家在 2002 年就计划采购 58 台全新的半固态射铸机,今后它将成为生产镁合金铸件的主流。

(摘自中国压铸网)