

孪生诱发塑性(TWIP)钢的研究进展

李海昭^{1, 2}, 王瑞珍², 代建清¹, 崔 岩^{1, 2}

(1. 昆明理工大学材料与冶金工程学院, 云南 昆明 650091; 2. 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081)

摘 要: 综述了孪生诱发塑性(TWIP)钢的研究进展, 重点介绍了产生 TWIP 效应的关键在于低温时具有稳定的奥氏体组织和较低的层错能, 主要合金元素对 TWIP 钢组织和性能的影响, 层错能及其计算, 第一、二代 TWIP 钢的力学性能以及温度、应变速率和加工工艺对其力学性能的影响, 孪生诱发塑性的微观机制。

关键词: TWIP 钢; TWIP 效应; 层错能; 形变孪晶

中图分类号: TG 142.4 文献标志码: A 文章编号: 1001-0777(2010)01-0001-07

Research Progress of Twinning Induced Plasticity (TWIP) Steel

LI Hai-zhao^{1, 2}, WANG Rui-zhen², DAI Jian-qing¹, CUI Yan^{1, 2}

(1. Institute of Materials and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650091, Yunnan, China; 2. Institute of Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: This paper summarized the development of twinning induced plasticity (TWIP) steel. It emphatically introduced that a key factor for TWIP effect is to have a stable austenitic texture and a low stacking fault energy, effect of major alloying components on structure and properties of TWIP steel, the stacking fault energy and its calculation, mechanical properties of the first and second generations of TWIP steel, impact of temperature, strain rate and processing technique on TWIP steel, micro mechanism of TWIP effect.

Key words: TWIP steel; TWIP effect; stacking fault energy; deforming twinning

汽车的轻量化是现代汽车工业的发展方向^[1], 为此, 先进高强韧性钢应运而生, 如双相 (DP) 钢、相变诱发塑性 (TRIP) 钢。1997 年, Grassel 等^[2-3] 在研究 Fe-Mn-Si-Al 系 TRIP 钢时发现, 当锰含量(质量分数) 达到 25%, 铝含量超过 3%, 硅含量在 2% ~ 3% 之间时, 其抗拉强度

和延伸率的乘积在 50000 MPa% 以上, 是高强韧性 TRIP 钢的两倍。由于该类合金的高强韧性来自形变过程中孪晶的形成, 而不是 TRIP 钢中的相变, 故命名为孪生诱发塑性 (twinning induced plasticity, TWIP) 钢。图 1 为各类汽车用板屈服强度和延伸率比较^[4]。

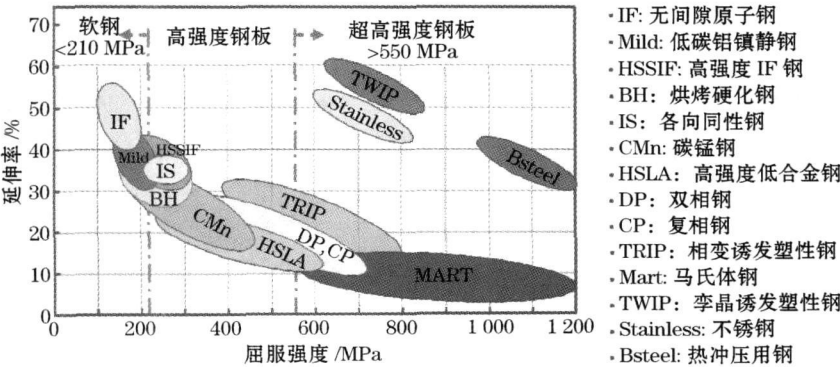


图 1 各类汽车用板的屈服强度和延伸率的关系

Fig. 1 Relationship between yield strength and elongation in various automobile steels

1 TWIP 钢的发展历程

TWIP 钢的研发经历了以下几代: 第一代 TWIP 钢, 其典型成分为 Fe-25Mn-3Al-3Si , 锻造成棒材, 经高温退火后水淬, 然而较高含量的 Al 影响钢水的浇铸, 较高含量的 Si 影响冷轧板的镀锌质量^[5]; 第二代 TWIP 钢, 其典型成分为 Fe-23Mn-0.6C , 铸造成板坯, 经热轧、冷轧、高温退火后快速冷却, 它去除了合金元素铝和硅, 却出现了以前奥氏体和高强度钢存在的延迟断裂、一定程度的切口敏感性两大问题^[9]; 目前钢厂和研究机构正研制第三代 TWIP 钢^[6], 主要集中在高 Mn 钢中通过置换固溶原子 (Mn, Al, Si) 成分调整来获得 TWIP 效应^[7]。

国外对 TWIP 钢的研究比较多, TWIP 钢的研究在欧洲和韩国较热, 德国的 K. H. Spitzer 等人针对 Fe-Mn-Si-Al 系 TRIP/TWIP 钢的冶炼工艺及轧制工艺等问题进行了实验研究, 采用 DSC (Direct strip casting) 工艺制备出 10~15mm 厚的试验板材^[8], 国际上做的较好的是阿塞洛和蒂森合作开发的具有 TWIP 效应的 X-IPTM 高锰系列钢种^[9-10], 安赛乐米塔尔与蒂森克虏伯两家公司正在合作研发新型 TWIP 钢^[5]。

国内开展这方面的研究起步较晚, 研究机构主要有北京科技大学, 上海交通大学和上海大学。米振莉等开发了两种性能优良的高强度 TWIP 钢: 含磷高强 TWIP 和含铜、镍高性能 TWIP 钢, 并可以通过热处理工艺调节其机械性能从而获得高强度型 TWIP 钢和高塑性型 TWIP 钢, 其强度等于或远超过 645 MPa, 延伸率等于或远超过 59%^[11]。代永娟等研究了低 Si 低 Al 的 Fe-23Mn-0.6C TWIP 钢, 其抗拉强度为 1140 MPa, 延伸率为 57.3%^[5]。黄宝旭设计了含 N 低 Al 的 TWIP 钢和含 Nb 的 TWIP 钢, 同时还提出了 TWIP 钢诱发塑性机制^[4]。周小芬等研究了低 Si, 低 Al 的 Fe-23Mn-0.6C TWIP 钢的拉伸应变硬化行为^[12]。

2 TWIP 效应产生的条件及 TWIP 钢的合金化

2.1 TWIP 效应产生的条件

TWIP 钢具有良好强韧性的关键 (即 TWIP 效应产生的条件) 在于: 低温时具有稳定的奥氏体组织和较低层错能。研究表明: 当层错能 (SFE) < 16 mJ/m²、奥氏体向马氏体转变的吉布斯自由能 $\Delta G < 0$ 时, 有利于 $\gamma \rightarrow \alpha$ 和 $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha$ 马氏体转变^[13-14]; 当 $25 < \text{SFE} < 80 \text{ mJ/m}^2$, $\Delta G > 0$ 时发生

TWIP 效应^[14]; 当层错能大于 80 mJ/m² 时, 变形机制主要为全位错滑移。图 2 为层错能与温度、成分和变形机制关系的简略图^[15]。

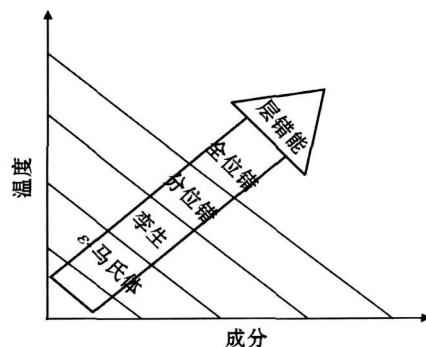


图 2 层错能对奥氏体变形特性的影响

Fig. 2 Schematic presentation for influence of stacking fault energy (temperature and composition) on features in deformation of austenite

2.2 TWIP 钢的合金化

奥氏体钢的力学性能主要取决于堆垛层错能, 层错能主要与材料的成分、温度有关^[16]。在给定变形条件下, 堆垛层错能只取决于化学成分。

1) 合金元素锰。锰作为高锰钢中的主要成分, 不仅扩大合金奥氏体相区, 稳定奥氏体组织, 使高锰钢在室温下得到奥氏体组织, 还可显著地降低马氏体转变温度 M_s ^[17]。另外, Lee, Schumann 和 Volosevich 的研究表明^[18-20], 存在一定的锰含量使层错能达到最低 (图 3)。

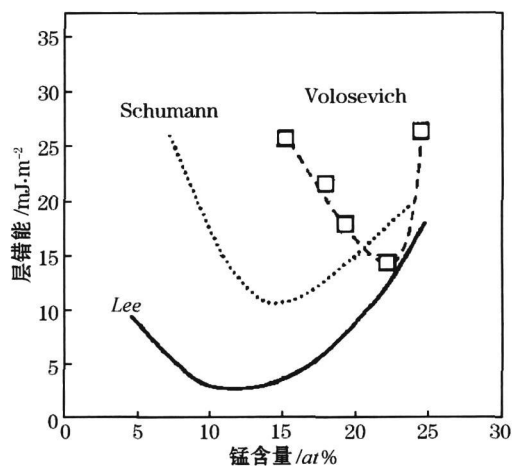


图 3 Fe-Mn 合金中锰含量与层错能关系
Fig. 3 Effect of Mn content on stacking fault energy in Fe-Mn alloys

2) 合金元素碳和氮。碳为有限扩大奥氏体区元

素,固溶于奥氏体的碳可使 M_s 温度强烈下降,在快速冷却时可以使奥氏体保留到室温,从而呈单相奥氏体组织,且随着碳含量的增加,碳的固溶强化作用增加,提高了高锰钢的强度、硬度和耐磨性^[17]。理论和实验表明:在 Fe-Mn-Si-Al 系合金中加入适量的氮可显著提高层错能^[21]、固溶强化效果和抗腐蚀性能^[22]。碳、氮对层错能的影响可通过它们对层错几率的影响获得,因为层错能与层错几率成反比关系。图4为间隙元素 C+N(质量分数,%)与层错几率关系^[23]。

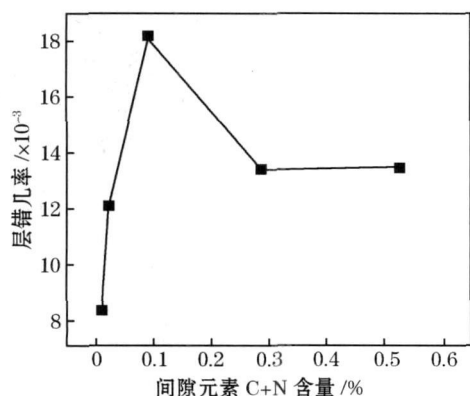


图4 间隙元素 C+N 与层错能几率关系

Fig. 4 Effect of C+N on stacking fault probability

3) 合金元素硅。在 TWIP 钢中硅的加入减少层错能有利于马氏体相变。当锰含量一定时,硅含量的增加,可提高 TWIP 钢的抗拉强度^[13],但较高含量的硅会影响冷轧板的镀锌质量^[5]。

4) 合金元素铝。在 TWIP 钢中加入铝会增加层错能,从而抑制 $\gamma \rightarrow \epsilon$ 相变,稳定奥氏体^[14],但铝含量较高时,影响钢水的浇铸^[5]。A. S. Hamada 等^[24]研究发现:和低碳钢相比,钢中较高的锰含量和一定的铝含量可显著提高钢的热变形抗力;延迟动态再结晶,使奥氏体晶粒在动态再结晶后得到有效细化。

理论和实验表明:降低硅含量可能会使基体的强度降低,可以尝试升高碳的固溶度,增加奥氏体的稳定性,同时 C-Mn 原子对还可能提高基体的强度^[16];氮的加入比碳的加入更有利于抗腐蚀性能,所以可以尝试用氮来部分或完全取代铝,研究和开发含氮 TWIP 钢^[7]。另外,在传统 TWIP 钢化学成分的基础上添加铌,可显著细化奥氏体晶粒,提高钢的屈服强度;铌还可以显著提高钢的层错能,有利于形变过程中形成孪晶发生 TWIP 效应,从而获得优良的塑性^[4]。

3 层错能及其计算

层错能是合金材料的一个重要物理特性,直接影响材料的力学性能、位错交滑移和相稳定性等。堆垛层错能决定的主要变形机制有:滑移、交滑移、不全位错的滑移、孪生变形或应变引起的马氏体转化^[25]。针对 Fe-Mn 合金层错能的计算方法主要有以下几种:①热力学计算模型^[26,21]。②嵌入原子法(EAM)^[27]。③层错能的经验关系式^[28,29]。④金属材料相图计算与材料性能模拟软件 JM atPro: 计算结果的变化趋势同文献[28]相同。⑤层错几率方法:通过 XRD 峰宽法和峰位移法测定层错几率,再通过层错几率与层错能的关系从而间接求出层错能^[4,23]。

4 TWIP 钢力学性能特点及影响因素

4.1 第一代 TWIP 钢的力学性能

Fe-25Mn-3Al-3Si TWIP 钢室温为单一的奥氏体组织,既具有较高的强度又具有良好的塑性,高的吸能性和没有低温脆性转变温度,这些都是由于发生 TWIP 效应所致。

由图5可知,同 IF 钢、含磷 FeP04 钢、烘烤硬化 ZstE180BH 钢和形变热处理 QstE500TM 相比,Fe-25Mn-3Al-3Si TWIP 钢能量吸收值约为 0.5 J/mm³,为以上传统深冲钢的两倍以上,这是由于在高应变率下,大量的孪晶形成所致^[3]。

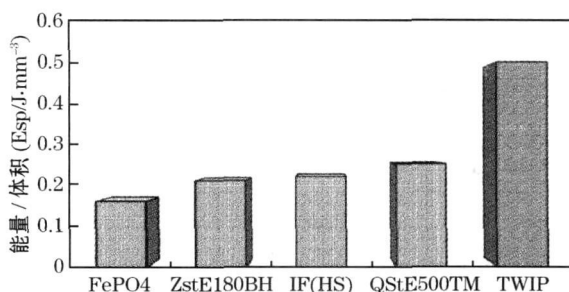


图5 Fe-25Mn-3Al-3Si TWIP 钢与传统深冲钢特定吸收能的比较

测试温度:20℃, 应变速率:10²s⁻¹

Fig. 5 Specific energy absorption of conventional deep drawing steels in comparison with the Fe-25Mn-3Al-3Si TWIP steel. Test temperature: 20℃, strain rate: 10²s⁻¹

图6为 Fe-25Mn-3Al-3Si TWIP 钢夏比冲击性能与温度的关系。研究认为 Fe-25Mn-3Al-3Si TWIP 钢存在两种变形机制: -180~-70℃时发

生部分的 $\gamma \xrightarrow{\epsilon} \epsilon_{bcp}^{M_s} \rightarrow \alpha_{bcc}^{M_s}$ 马氏体相变, 在 $-70 \sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的范围内是由于孪生生成形变孪晶。这清楚地表明 TWIP 钢具有优良的冲击韧性、即使在很低的温度和高的变形率时也不会有明显的脆化^[3]。

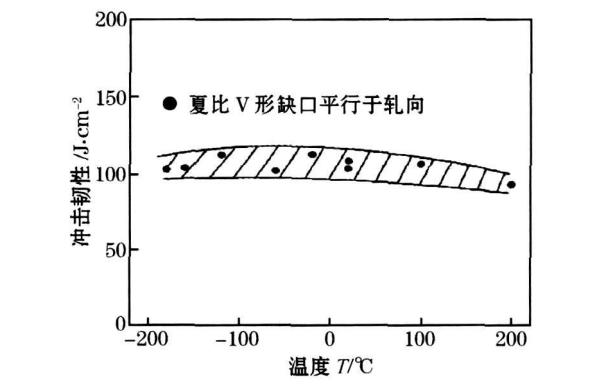


图 6 Fe-25Mn-3Al-3Si TWIP 钢的夏比冲击性能与温度的关系(夏比 V 形缺口平行于轧制方向)

Fig. 6 Charpy impact toughness of the Fe-25Mn-3Al-3Si mass% TWIP steel as a function of temperature (charpy V notch parallel to the rolling direction)

4.2 第二代 TWIP 钢的力学性能

作为第二代 TWIP 钢的典型钢种, X-IP1000 钢是一种完全奥氏体碳钢, 具有极高的抗拉强度, 良好的韧性, 极高的均匀延伸性, 优良的成形性和吸能性, 这些优良性能主要来源于: 全温下的奥氏体组织和孪生的形变机制^[9]。表 2 为 X-IP1000 同其它级别钢力学性能的对比, 可知 X-IP1000 具有极高的抗拉强度、良好的韧性、极高的均匀延伸性和极好的加工硬化特性, n 值高的特点使 TWIP 钢减少局部应变集中现象并具有良好的应变分布。

此外, X-IP 钢还具有良好的成形性和吸能性: 图 7 为厚度均为 1.20 mm, 试验速率为 1 mm/s。X-IP 钢与 DC06 和 TRIP800 钢形变极限曲线(FLC)的比较。由图可知 X-IP1000 钢的 FLC 远远超过传统高强度钢 TRIP800, X-IP1000 钢的 FLC 相当于或优于深冲钢 DC06DE 的 FLC。图 8 为 X-IP 钢的轴向压缩吸能能力同其它相同厚度(1.5 mm)典型钢种的对比, 冲击距离为 150 mm。由图可知, X-IP 钢的结果优于 TRIP800, 和 DP980 相当^[9]。

表 2 X-IP 1000 钢和不同级别钢典型拉伸性能(横向)

Table 2 Typical tensile properties of different grades and X-IP 1000 steels (in transverse direction)

性能	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	均匀延伸率/%	总延伸率/%	应变硬化指数 n (4% > Ag)
HSLA320	342	428	16.0	24.0	0.17
DP590	342	629	15.6	25.9	0.15
TRIP800	478	825	21.1	27.3	0.22
DP980	644	1 009	10.2	15.0	0.11
X-IP1000	599	1 162	52.8	52.8	0.36

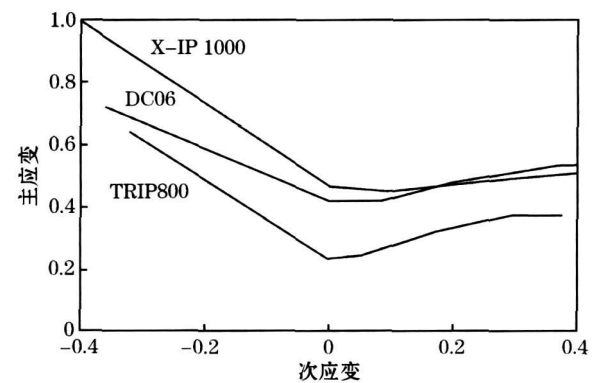


图 7 X-IP1000 钢同 TRIP800 和 DC06 的形变极限曲线(FLC)的比较

Fig. 7 FLC of X-IP1000 in comparison with DD06 and TRIP800 steels

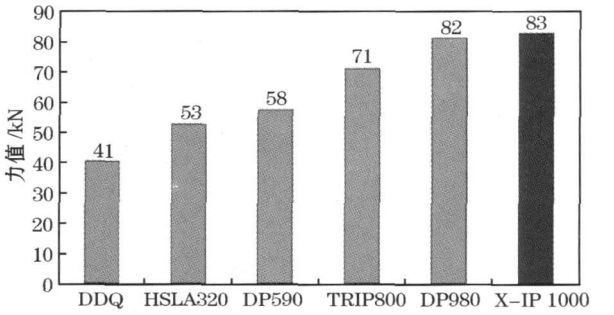


图 8 轴向压缩吸能比较

Fig. 8 Comparison in energy absorption in axial compression

4.3 TWIP 钢力学性能的影响因素

1) 温度对 TWIP 钢力学性能的影响。图 9 为 Fe-25Mn-3Si-3Al TWIP 钢力学性能与温度的关

系, 应变速率为 $10^{-4}/s$, R_m 为抗拉强度, $R_{p0.2}$ 为规定非比例延伸强度, ε_r 为总伸长率, ε_m 为均匀延伸率。奥氏体 TWIP 钢的屈服强度和极限抗拉强度随着温度的降低而平缓增加, 没有明显的硬化, 通常这是纯 fcc 铁合金的典型特征。400 °C 时的总延伸率约为 50%; 室温时最大延伸率增至最大约为 95%, 然后随温度降低而减少; -150 °C 时, 断裂总延伸率约为 75%; 液氮温度时总延伸率达到 65%; 温室时, 最大均匀延伸率高达 80%^[3, 13]。

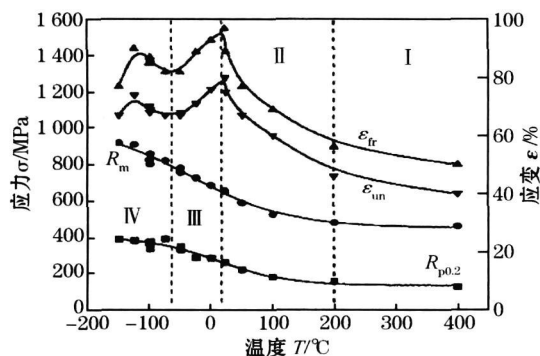


图9 温度对 Fe 25Mn 3Al 3Si TWIP 钢力学性能的影响

Fig. 9 Effect of temperature on mechanical property of Fe 25Mn 3Al 3Si TWIP steel

2) 应变速率对 TWIP 钢力学性能的影响。图 10 为室温时 Fe 25Mn 3Si 3Al TWIP 钢应变速率与力学性能的关系: 应变速率在 $10^{-4} s^{-1}$ 到 $10^3 s^{-1}$ 的范围时, 屈服强度随应变速率的增加而增加; 应变速率在 $10^{-4} s^{-1}$ 到 $10^0 s^{-1}$ 时, 极限抗拉强度保持不变, 当应变速率超过 $10^0 s^{-1}$ 时抗拉强度开始增加; 随着应变速率增至 $10^{-1} s^{-1}$, 均匀和总延伸率均逐步降低, 降至最低点后, 均匀延伸率增长缓慢。在极高应变速率 $1.5 \times 10^3 s^{-1}$ 时, 总延伸率增至最大约为 80%, 抗拉强度达到 800 MPa。即使在最大应变速率下, 通过 X 射线衍射也未观测到马氏体相变, 极高的延伸率是由于大量孪晶的生成发生 TWIP 效应所致^[3, 13]。

3) 加工工艺对 TWIP 钢力学性能的影响。代永娟、米振莉等^[11, 30, 31, 32] 通过研究 Fe 25Mn 3Si 3Al TWIP 钢晶粒尺寸和轧制工艺对 TWIP 钢组织和性能的影响发现: 采用加热保温 → 热轧 → 冷轧 → 高温退火 → 快冷工艺可以得到性能优良的 TWIP 钢, 其中关键工艺是高温退火和快速冷却。研究确定了冷轧压下率在 65% 左右, 退火温度在 900~

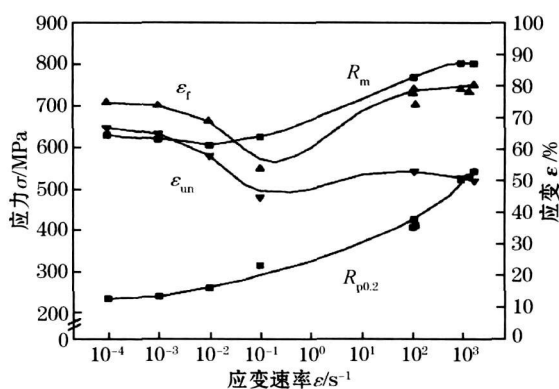


图 10 应变速率对 Fe 25Mn 3Al 3Si TWIP 钢力学性能的影响

Fig. 10 Effect of strain rate on mechanical property of Fe 25Mn 3Al 3Si TWIP steel uniform elongations

1000 °C 之间, 退火后快冷获得退火孪晶组织, 且晶粒尺寸在 30~35 μm 时, 钢的性能最佳。对以上工艺得到的 TWIP 钢进行 X 射线衍射分析, 得知其全部为面心立方结构, 观测显微组织发现, 组织为单相奥氏体, 且存在大量的层错和退火孪晶, 拉伸后观测到在原有退火孪晶的基础上形成大量更为细小的形变孪晶, 即产生 TWIP 效应。

5 TWIP 效应的微观机理

TWIP 钢经轧制并退火、水淬处理后基体组织为奥氏体, 并伴有大量退火孪晶。孪生作为塑性变形的另一种机制, 是产生孪晶的过程。孪晶出现的频率和尺寸取决于晶体结构和层错能的大小。对于低层错能的面心立方结构金属在形变时易发生孪生, 组织为形变孪晶^[33]。在退火过程中存在的退火孪晶是产生形变孪晶的基础, 在发生塑性变形的时候, 形变孪晶在退火孪晶的晶粒内最先出现。当晶体在切应力的作用下发生了孪生变形时, 晶体的一部分沿一定的孪生面和孪生方向相对于另一部分晶体作均匀的切变, 晶体的点阵类型不发生变化, 但它使均匀切变区中的晶体取向发生变更, 变为与未切变区晶体成镜面对称的取向。变形部分的晶体位向发生改变, 可使原来处于不利取向的滑移系转变为新的有利取向, 可以进一步激发滑移。孪生和滑移交替进行, 使 TWIP 钢的塑性优异。在轧制过程中, 随着形变增加, 孪晶会发生转动, 在 4 个 {111} 孪晶面都会出现堆垛层错和孪晶, 这样排列的孪晶因孪晶间的相互制约, 在应变增加时孪晶不能发生转动, 沿轧制面排列。在外力作用下, 随着应变增

加,变形试样中观察到大量形变孪晶,产生 TWIP 效应^[30]。

TWIP 效应可分步解释^[16]为: ①拉伸变形最大的部位首先诱发孪晶,孪晶界阻止了该区滑移的进行从而导致位错的塞积,是局部的强度提高,难以继续变形,导致变形向其他应变较低区转移,从而推迟颈缩的形成,极大提高了断后延伸率。②拉伸后的奥氏体晶粒内包含大量的形变孪晶。粗大的透镜状形变孪晶从奥氏体晶界处向晶内贯穿,分割奥氏体晶粒。接着,更细小的形变孪晶呈交织状分布于奥氏体晶粒内。实质上,分割晶粒后的孪晶起到了亚晶界的作用,阻碍了位错的滑移,这就起到了加工硬化的作用,使得 TWIP 钢在变形后获得非常高的抗拉强度。③由于孪晶与奥氏体基体的共格作用,高的界面能不利于裂纹的扩展,因此宏观表现为拉伸是的伸长率,特别是均匀伸长率的提高。

6 结语

TWIP 钢显示出很大的潜力,其发展正处于实验研究向产业转化阶段,所面临的主要问题是 TWIP 钢的加工工艺,特别是冷轧工艺,这就需要加强对 TWIP 钢轧制工艺进行深入细致的研究。此外,孪晶、层错能及其计算也相当重要。随着对 TWIP 钢研究的进一步深入,有理由相信研制和开发含 Nb/N、较高碳、低硅、低铝或不含铝的新一代高强韧性 TWIP 钢,对钢铁工业和汽车轻量化的发展将起到积极地推动作用,必将产生重要的经济意义。

参考文献:

- [1] 王利,杨雄飞,陆匠心. 汽车轻量化用高强度钢板的发展[J]. 钢铁,2006,41(9): 1.
- [2] Grassel O, Frommeyer G, Dereder C, et al. Phase Transformation and Mechanical Properties of Fe-Mn-Si-Al TRIP Steel [J]. J. Physic. Iv. France, 1997(5): 383.
- [3] Frommeyer Georg, Brux U do, Neumann Peter. Supra Ductile and High Strength Manganese TRIP/TWIP Steel for High Energy Absorption Purpose [J]. ISIJ International, 2003, 43(3): 438.
- [4] 黄包旭. 氮、铌合金化孪生诱发塑性(TWIP)钢的研究[D]. 上海交通大学, 2007.
- [5] 代永娟,米振莉,唐荻,等. Fe-Mn-C 系 TWIP 钢的组织 and 性能[J]. 上海金属,2007(5): 132.
- [6] Jurg en Kiese. 汽车用铌微合金化钢板[M]. 冶金工业出版社, 2006: 68.
- [7] 黄宝旭,王晓东,戎咏华,等. TWIP 钢研究的现状与展望[J].

热处理, 2005, 20(4): 4.

- [8] Spitzer K H, Direct Strip Casting (DSC)-An Option for the Production of HSD Steel Grades[C]//1st International Conference for Super High Strength Steel. Roma, Italy,2005, 10.
- [9] Cugy P, Hildenbrand A, Bouzekri M. A Super-High Strength Fe-Mn-C A Steel With Excellent Formability for Automobile Applications[C]//1st International Conference on Super-High Strength Steels, Rome,Italy, 2005, 10.
- [10] 江海涛,唐荻,米振莉. 汽车用先进高强度钢的开发及应用进展[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(8): 1.
- [11] 米振莉. 新一代汽车用高强度高塑性 TWIP 钢的研究与开发[D]. 北京: 北京科技大学, 2007.
- [12] 周小芬,符仁钰,苏钰,等. Fe-Mn-C 系 TWIP 钢的拉伸应变硬化行为研究[J]. 钢铁,2009,44(3): 71.
- [13] Grassel O, Kruger L, Frommeyer G, et al. High Strength Fe-Mn (Al, Si) TRIP/TWIP Steel Development Properties Application [J]. Int. J. Plasticity, 2000(16): 1391.
- [14] Kazunori Sato, Michiyuki Ichinose, Yoshihiko Hirotsu, et al. Effects of Deformation Induced Phase Transformation and Twinning on the Mechanical Properties of Austenitic Fe-Mn-Al Alloys [J]. ISIJ International, 1989, 29(10): 868.
- [15] Vercammen S. Processing and Tensile Behaviour of TWIP Steels Microstructural and Texture Analysis [D]. Belgium Thesis Katholieke University, 2004.
- [16] 王铁娜,黎倩,何燕霖,等. 高强度高塑性 TWIP 钢的组织 and 性能[J]. 热处理,2006,21(3): 25.
- [17] 崔忠圻. 金属学与热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [18] H. Schumann. Influence of stacking fault energy on the crystal lattice change mechanisms in the γ/α phase transformation in high alloy steels [J]. kristall Technik, 1974, 9(10): 1141.
- [19] Lee Y k, Choi C S. Driving Force for $\gamma \rightarrow \epsilon$ Martensitic Transformation and Stacking Fault Energy of γ in Fe-Mn Binary System [J]. Metall Mater Trans A, 2000(31A): 355.
- [20] Volosevich P Y, Grindnev V N, Petrov Y N. Manganese Influence on Stacking Fault Energy in Iron-Manganese Alloys [J]. Phys Met Metallogr, 1976(42): 126.
- [21] 万见峰,陈世朴,徐祖耀. Fe-30Mn-6Si-XN 形状记忆合金层错能的热力学计算[J]. 金属学报,2000(36): 679.
- [22] 黄幸,万见峰,陈世朴,等. Fe-Mn-Si 基形状记忆合金在水溶液中的电化学腐蚀[J]. 上海交通大学学报,2002(36): 21.
- [23] 陈科,金学军. C、N 元素对 Fe-Mn-Si 合金层错能的影响[J]. 功能材料,2007,(增刊 38): 3236.
- [24] Hamada A S, Karjalainen L P, Somani M C. The Influence of Aluminum on Hot Deformation Behavior and Tensile Properties of High-Mn TWIP Steels [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 467(2): 114.
- [25] Bouaziz O, Guelton N. Modeling of TWIP Effect on Work-Hardening [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 319(8): 246.
- [26] Jae Eun Jin, Young Kook Lee. Strain Hardening Behavior of a Fe-18Mn-0.6C-15Al TWIP Steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2009, 527(1-2): 157.

[27] 戎咏华, 孟庆平, 何刚, 等. Fe M n 合金层错能的嵌入原子法计算[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(2): 171.

[28] 戴起勋, 王安东, 程晓农. 低温奥氏体钢的层错能[J]. 钢铁研究学报, 2002, 14(4): 34.

[29] Schramm R E, Reed R P. Stacking Fault Energies of Seven Commercial Austenitic Stainless Steels [J]. Metal Trans A 1975, 16(7): 1345.

[30] 严玲, 唐荻, 米振莉, 等. 不同加工工艺对高强高塑性 TWIP

钢组织与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2005(8): 15.

[31] 代永娟, 米振莉, 唐荻, 等. 冷轧压下率对 TWIP 钢组织和力学性能的影响[R]. Baosteel BAC 2006: 408.

[32] 米振莉, 唐荻, 代永娟, 等. 退火温度对 25Mn 3Si 3Al TWIP 钢组织和力学性能的影响[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29 (增刊 2): 117.

[33] 余永宁. 金属学原理[M]. 北京, 冶金工业出版社, 2005, 400.

《钢铁》、《中国冶金》、《钢铁研究学报》、《物理测试》和《连铸》

2010 年重要征订启事

尊敬的读者朋友: 您好!

为进一步加强与读者的联系和拓宽为读者服务的渠道。《钢铁》、《中国冶金》、《钢铁研究学报》中文版、《钢铁研究学报》英文版、《物理测试》和《连铸》等 6 本刊物现为自办发行, 停止邮局发行。

请直接与发行部联系订阅 2010 年期刊, 订阅方式:

(1) 登陆 www. chinamet. cn 网站, 从网站“ 期刊征订” 中下载 2010 年期刊信息及联合征订单”, 逐项填写完成后, 将征订单发邮件至 chinamet. faxing@ yahoo. com. cn。

(2) 将“ 2010 年期刊信息及联合征订单” 逐项填写完成后(复印有效) , 传真、邮寄给发行部。

(3) 汇款方式见征订单。

2010 年期刊信息及联合征订单

期刊	刊号	刊期	页码	价格	订阅数量/套	金额/元
《中国冶金》	CN 11- 3729/TF	月刊	64 页	120 元/年		
《钢铁研究学报》(中)	CN 11- 2133/TF	月刊	64 页	240 元/年		
《钢铁研究学报》(英)	CN 11- 3678/TF	月刊	80 页	360 元/年		
《物理测试》	CN11- 2119/ O4	双月刊	64 页	90 元/年		
《钢铁》	CN 11- 2118/TF	月刊	88 页	240 元/年		
《连铸》	CN11- 3385/ TG	双月刊	48 页	48 元/年		
合计金额/元	大写				小写	
期刊订阅单位						
期刊邮寄地址					邮编	
收信人姓名	电话	E mail				
是否接受刊物以邮寄或电子文档的形式赠阅的其它信息?			接受	不接受		
您所采用的付款方式			邮局	银行		
汇款发票抬头	发票寄至					
杂志发行部 联系信息	李树祺, 中国钢研科技集团有限公司科技信息室, 北京市海淀区学院南路 76 号, 邮编 100081 电话/ 传真: 010- 62182270, 010 62186760, E mail: chinamet. faxing@ yahoo. com. cn					
银行汇款	开户行: 工商银行北京新街市支行 户名: 中国钢研科技集团有限公司 帐号: 0200002909003200456- 28		邮局汇款	收款人姓名: 《钢铁》杂志编辑部 收款人地址: 北京市海淀区学院南路 76 号 邮编 100081		
银行汇款说明: 如果在银行汇款时您无法输入账号尾号(- 28), 请务必在汇款留言中注明“ 信息室订刊” 以便及时返回发票和邮寄刊物。						