● 今日铸造 Today Foundry ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.12.028

微合金化及应变速率对 TWIP 钢组织与性能影响的研究进展

张贵杰[1],闫 凯[1],林绍峰[2],魏建波[1],梁 慧[1],张阔斌[3]
(1. 华北理工大学 冶金与能源学院,河北 唐山 063210;2. 首钢京唐钢铁联合有限公司 生产制造部,河北 唐山 063200;3. 唐山中厚板材有限公司 生产制造部,河北 唐山 063600)

摘 要:汽车轻量化为高锰 TWIP 钢带来了广阔的开发和应用前景。TWIP 钢从 1997 年被开发出来到现在已经发展了 3 代,在这 20 多年的时间里有大量的研究者对其力学性能、微观组织及加工工艺进行了广泛的研究。本文综述了汽车用高锰 TWIP 钢研究现状及进展,介绍了 TWIP 钢的发展历程与影响 TWIP 效应的因素,同时对微合金化及不同应变速率对 TWIP 钢组织和性能的影响的研究现状进行了概述;总结了国内外相关研究取得的成果,也指出了有待进一步研究的内容,为以后研究方向提出相关建议。

关键词:TWIP 钢;TWIP 效应;微合金化;稀土元素;应变速率
中图分类号:TG142.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)12-1344-06

Research Progress of Microalloying and Strain Rate on Microstructure and Properties of TWIP Steel

ZHANG Guijie[1], YAN Kai[1], LIN Shaofeng[2], WEI Jianbo[1], LIANG Hui[1], ZHANG Kuobin[3]
(1. School of Metallurgy and Energy, North China University of Technology, Tangshan 063210, China; 2. Shougang Jingtang Iron and Steel Co., Ltd., Manufacturing Department, Tangshan 063200, China; 3.Tangshan Zhonghou Plate Co., Ltd., Manufacturing Department, Tangshan 063600, China)

Abstract: Automotive lightweight had brought broad development and application prospects for high manganese TWIP steel. TWIP steel had developed for three generations since it was discovered in 1997. In the past 20 years, a large number of researchers had conducted extensive studies on its mechanical properties, microstructure and processing technology. The development of TWIP steel and the factors affecting TWIP effect were introduced, and the effects of microalloying and different strain rates on the microstructure and properties of TWIP steel were summarized. The achievements of relevant researches at home and abroad is summarized, and points out the contents to be further research direction.

Key words: TWIP steel; TWIP effect; micro-alloying; rare earth elements; strain rate

随着汽车产业的高速发展,汽车的选材成为关键问题。虽然轻质材料一直在积极研发,但钢材仍然是现阶段的首选材料。孪晶诱导塑性钢(TWIP 钢)的性能最为契合汽车用钢高强度、高塑性及优良的减振降噪性能的要求[1],所以 TWIP 钢的研究依然是世界各大钢铁企业及科研单位的研究热点。1997 年,Grässe[2]教授在进行 Fe-Mn-Si-Al 系 TRIP 钢的实验研究时发现了 TWIP 效应。TWIP 钢是通过 TWIP 效应–即孪晶诱导塑性效应所产生的新型高强钢。由于其独特的力学性能,TWIP 钢已成为轻量化应用的主要候选材料,特别是在汽车、造船、石油和天然气工业中[3]。图 1 为各类汽车用钢极限抗拉强度与总伸长率的关系[4]。

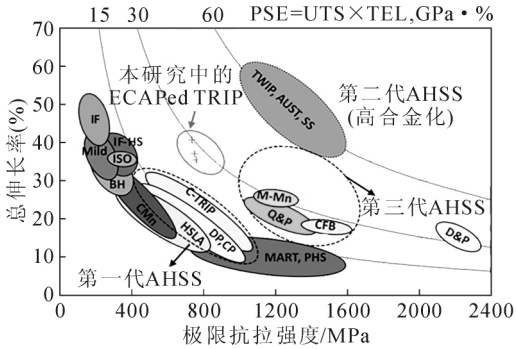


图 1 各类汽车用钢极限抗拉强度与总伸长率之间的关系
Fig.1 Ultimate tensile strength versus total elongation of various automobile steels

收稿日期:2019-09-06
作者简介:张贵杰(1973-),河北唐山人,博士,教授.研究方向:金属材料成型理论与工艺、非线性相变和智能金属材料.电话:15373530296,
E-mail: zhguijie@vip.sina.com
通讯作者:闫 凯(1992-),河北张家口人,硕士生.研究方向:金属材料成型及工艺研究.电话:18332301860,
E-mail: 1244368562@qq.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1　TWIP 钢的发展与 TWIP 效应

自 Grässe 等发现 TWIP 效应以来，现在 TWIP 钢的研发已经经历了 3 代。第 1 代为 Fe-Mn-Al-Si 系 TWIP 钢（典型成分 w(%)为 Fe-25Mn-3Al-3Si），这代 TWIP 钢主要被锻造为棒材，其热处理工艺是高温退火后水淬；但是由于较高的 Al 和 Si 含量给钢液浇注及镀锌工艺增加了难度，所以不利于大量推广[5]。第 2 代为 Fe-Mn-C 系 TWIP 钢（典型成分 w(%)为 Fe-23Mn-0.6C），这代 TWIP 钢主要铸造成板坯，加工工艺为热轧—冷轧—高温退火—快速冷却；这代钢消除了铝和硅元素带来的缺陷，但又出现了延迟断裂和缺口敏感性的问题 [6]。第 3 代是 Fe-Mn-Al-C 系 TWIP 钢，主要是通过对高 Mn 钢中的置换固溶原子 (Mn、Al、Si) 进行成分设计得到 TWIP 效应，以避免前两代的缺陷，从而得到更好的性能，但还在研究初期[7]。

TWIP 钢在外力作用下发生形变，形变的过程中产生形变孪晶，由形变孪晶带来优异的力学性能和明显的强化效果，即 TWIP 效应。研究表明[8]，TWIP 效应的产生和层错能的高低有一定的关系，层错能越低，形成孪生所需的应力也越低。在应力作用下，高锰钢中的全位错最先滑移并增殖，当位错分解需要的能量低于滑移需要的能量时，全位错就开始分解为两个不全位错和夹在它们中间的堆垛层错带，这就是孪生产生的机制。若相邻的每层滑移面各有一个全位错分解成两个位错，中间夹一个层错，那么将形成一个形变孪晶，如图 2 所示。在塑性变形过程中，既有孪生产生又会进行滑移，这也是高锰 TWIP 钢具有优良塑性的原因。在应变较小的时候，随应变的增加孪晶会发生转动，在四个 {111}孪生面上都会出现堆剁层错和孪晶。当应变量及孪晶数量增加到一定程度，孪晶间的相互制约使得孪晶将不能发生转动，并且都排列在轧制面上，这样就可以在变形试样中观察到大量形变孪晶，即产生 TWIP 效应[8]。

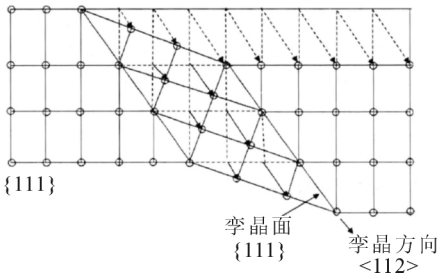


图 2　FCC 形变孪晶示意图
Fig.2　FCC deformation twin diagram

O.Bouaziz[9]在研究 TWIP 效应时发现堆垛层错能决定了钢塑性变形的机制，即 TWIP 效应的决定因素是层错能。而除了层错能的决定性因素外，晶粒尺寸、应变速率、形变温度、合金元素对 TWIP 效应也有较大影响。王书晗[10]等在研究晶粒尺寸对 TWIP 效应的影响时发现，形变孪晶的产生所需要克服的临界应力与晶粒尺寸的关系类似于 Hall-Petch 关系，即。

$$\sigma_T=\sigma_{T0}+K_T d^{-A} \tag{1}$$

式中，σ_T 为形变孪晶形成的临界应力；σ_{T0} 为晶格摩擦力；K_T 为常数；d 为晶粒尺寸；A 为常数 ($0.5\leqslant A\leqslant 1$)。

式(1)表明，晶粒尺寸越大形变孪晶所需的临界应力越小，即晶粒尺寸越大越容易形成孪晶。Li Da-zhao[11]和 Xiong Rong-gang[12]等研究了应变速率对孪晶的影响，发现应变速率越大越容易形成孪晶，并且随着应变速率的增大所形成的孪晶片数量更多、尺寸更大、相互间更密集。变形温度也会对孪晶产生影响，王书晗等[9]研究发现，变形温度升高会增加材料的层错能，低的层错能对孪晶的形成有促进作用；经热力学计算得到高锰奥氏体钢在室温下的层错能为 21 mJ/m^2，此时的变形机制为孪生。当变形温度升高到一定程度，比如升高到 400 ℃以上时，材料的层错能增加到 76 mJ/m^2 时变形机制为滑移。与以上结果相同，Grässe [2]等研究表明随着变形温度的降低孪晶增加量越大。此外，合金元素也是一个重要的影响因素，其中锰、碳及铝都对 TWIP 效应有促进作用，但并不是越多越好，需要控制含量。而硅元素会使奥氏体层错能降低，不利于 TWIP 效应。以上元素除了影响 TWIP 效应外对 TWIP 钢的力学性能也有所影响，所以其含量需从多方考虑。

2　铌、钒、钛对 TWIP 钢性能及组织的影响

自 Grässel[2]等提出 TWIP 钢的基础成分为 Fe-(15%~30%)Mn-(2%~4%)Si-(2%~4%)Al 后，Mn、C、Si、Al 等几种元素的具体含量对 TWIP 钢相应的影响被进行了大量的研究，并取得了一定的成果。现阶段这几种元素对 TWIP 钢力学性能及微观组织影响的研究已经比较成熟，所以更多的学者将研究方向转到微合金元素，探究微合金化对 TWIP 钢性能及组织的影响。目前的研究热点是铌、钒、钛等几种元素，它们在钢的生产过程中与钢中碳、氮等元素形成纳米尺寸级别的沉淀。这些析出相的本身属性及与其它微观结构的相互作用都会对钢的性能产生影响。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Hojun Gwon 等[13]开展了V微合金化改善TWIP钢屈服强度的研究。V的加入使屈服强度增加了200~300 MPa。Hojun Gwon等[14]将0.01%~0.10%Nb加入到成分w（%）为Fe17Mn0.6C1.5Al TWIP钢中，以探究Nb微合金化对TWIP钢性能的影响。研究表明，加入Nb会使冷轧退火的TWIP钢屈服强度有所提升。这种现象是由于析出强化和低再结晶程度的综合作用造成的。特别是当Nb的含量控制在0.010%~0.025%时，650 ℃退火后的实验钢的强塑积将超过40 000 MPa·%，而屈服强度高于800 MPa。图3为Hojun Gwon等所作的Nb微合金化对热轧TWIP钢力学性能的影响关系图。

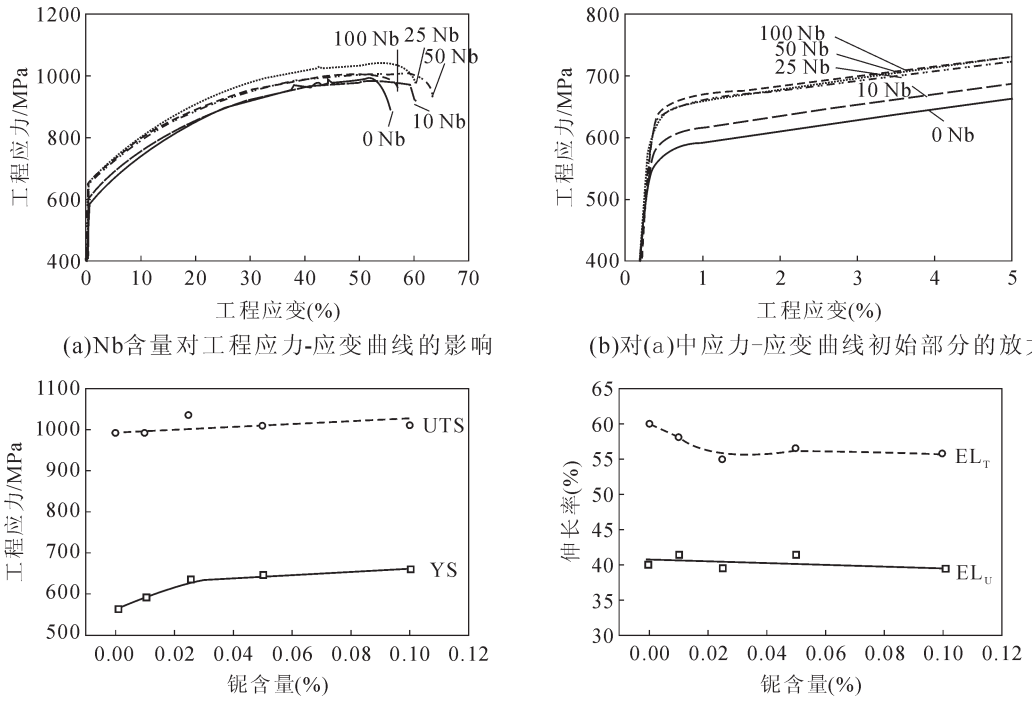
周妍[15]利用普通TWIP钢与微合金化TWIP-MA钢进行比较的方式，从拉伸性能、硬度测试、加工硬化情况及抗冲击性能等方面研究了微合金化对TWIP钢性能的影响。研究发现[15]，TWIP-MA钢比普通TWIP钢的强度和塑性均有一定提升；屈服强度和总伸长率提升较为明显，其中屈服强度增长了55 MPa，增幅14.7%，而总伸长率增长了5.6%，增幅达8.7%。付立铭[16]研究了铌、钛含量对低碳TWIP钢力学性能的影响。经实验得出，只有添加够一定量的铌时才能对低碳TWIP钢有影响，可以细化TWIP钢的再结晶晶粒和组织。与以上结果相似，只有添加够一定量的铌-钛复合剂时，才能显著提高强度，但却会降低塑性，强塑积也会下降。所以添加微合金元素铌、钛时还需对加入量有一个把控。

除了影响TWIP钢的力学性能外，微合金化对钢的微观组织也有一定影响。Mejia等[17]研究发现，V和Ti对再结晶奥氏体晶粒的细化作用最大。因此，在TWIP钢中加入微合金元素可以在热变形过程中更有效地控制奥氏体晶粒长大。与Mejia结果相同，Scott等[18]研究Nb微合金化对成分w(%)为Fe-22Mn-0.6C的TWIP钢的影响时发现，Nb的加入可导致晶粒细化，并得出Nb的强化效果为187 MPa·%。而Hojun Gwon等[14]也研究了0.01%~0.10%Nb微合金化对成分w（%）为Fe-17Mn-0.6C-1.5Al的TWIP钢组织的影响。EBSD分析表明，Nb的加入延缓了热轧钢和冷轧钢的退火再结晶，如图4、图5所示[14]。

综上所述，现阶段对TWIP钢微合金化的研究主要集中在Nb、V、Ti这3种元素，其中关于微合金元素Nb的试验研究较多，相关理论也较成熟，而V及Ti对TWIP钢的影响的研究较少，以后的研究可以侧重这两种元素及新微合金元素的研发。

3 稀土元素对TWIP钢的影响

在以往的研究中，稀土元素大多应用于耐候钢、轨道钢、低合金钢和不锈钢等，近几年大量学者致力于将稀土元素应用于TWIP钢的研究，并取得了一定的进展。从现有的研究成果可以知道，稀土元素主要有细化TWIP钢的晶粒、影响TWIP钢中夹杂物



(a)Nb含量对工程应力-应变曲线的影响　(b)对(a)中应力-应变曲线初始部分的放大

(c)Nb含量对屈服强度和极限抗拉强度的影响　(d)Nb含量对平均生长率和总伸长率的影响

图3 Nb微合金化对热轧TWIP钢力学性能的影响

Fig.3 Nb-content dependence of mechanical properties of the hot-rolled TWIP steel

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

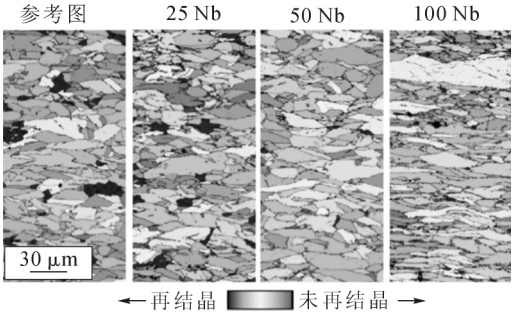


图 4 Nb 含量与再结晶程度的 EBSD 晶粒取向扩展图

Fig.4 EBSD grain orientation spread maps showing Nb-content dependence of a degree of recrystallization in the hot-rolled TWIP steels

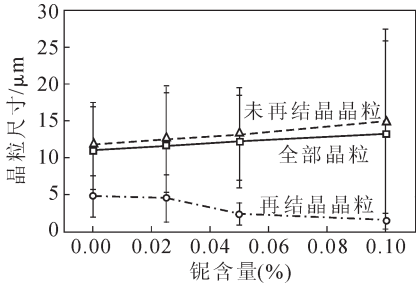


图 5 Nb 含量对热轧 TWIP 钢晶粒尺寸的影响

Fig.5 Nb-content dependence of grain sizes of the hot-rolled TWIP steels

的形态和数量以及与 TWIP 钢中的氢结合，从而减少可扩散氢含量等作用。

Yangyang zhao 等 [19] 以 Fe-15Mn-1.5Al-0.6C TWIP 钢为实验材料，比较了添加稀土元素对钢微观组织和力学性能方面的影响。研究发现，稀土元素对 TWIP 钢的抗拉强度和总伸长率均有改善。稀土元素有均匀化微观组织的作用，而且还可以增加 TWIP 钢的大角度晶界数量，从而延长了 TWIP 钢的寿命。此外，稀土元素促进了 TWIP 钢中孪晶的形成，从而提高了抗拉强度。王立辉等[20]研究了不同稀土含量对 TWIP 钢组织和性能的影响，得出了与以上相近的结论。他们发现稀土元素提高了 TWIP 钢的强度和屈强比；在显微组织方面，随着稀土元素含量增加，有多系孪晶形成。

稀土元素除了对 TWIP 钢力学性能及微观组织有影响外，对其疲劳性能及延迟开裂也有影响。米振莉等[21]研究了不同含量稀土元素 Ce 对 TWIP 钢低周疲劳行为的影响，结果如图 6 所示。图 6 中以迟滞回线面积表示单周期变形力，而在 TWIP 钢疲劳寿命不变的情况下，单周期变形功反映了疲劳塑性吸能能力。由图 6 发现，向 TWIP 钢中加入稀土 Ce 后其迟滞回线面积减小，表明对疲劳变形有害，因为 Ce 元素会给 TWIP 钢引入更多夹杂物，削弱了 TWIP 钢的疲劳吸能能力。

吴彦欣[22]研究了稀土含量对 TWIP 钢疲劳性能

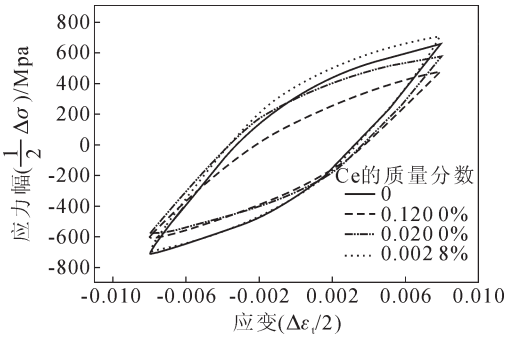


图 6 不同 Ce 含量的 TWIP 钢在±0.8%的应变幅下的循环迟滞回线

Fig.6 Cyclic hysteresis loops of TWIP steels with different Ce contents under strain amplitude of±0.8%

和延迟开裂的影响，发现稀土元素使 TWIP 钢的力学性能和疲劳性能降低，但加入一定量的稀土元素却可以减少奥氏体中的可扩散氢，进而阻止延迟断裂的发生。稀土元素的添加没有改变 TWIP 钢的以孪晶与滑移结合的塑性变形机制。稀土元素对 TWIP 钢有一定的晶粒细化作用，尤其是在稀土添加量达到 0.02%后影响显著。此外，稀土元素可以改良 TWIP 钢中夹杂物的形态，对 TWIP 钢中的夹杂物起到了变质的作用。稀土元素可能引入夹杂物，也增大了夹杂物的尺寸，导致了 TWIP 钢的抗拉强度和伸长率的降低，但对屈服强度几乎没有影响。

由于稀土元素对 TWIP 钢的影响是近几年才开始研究，稀土元素含量对 TWIP 钢的影响及不同稀土元素对 TWIP 钢的不同作用还需进行更详细的研究。此外，应加大对 Ce 以外的其他稀土元素对 TWIP 钢性能及组织的研究，以期找到新的研究突破口。

4 应变速率对 TWIP 钢组织和性能的影响

在制造汽车结构件时的变形速率较低，约为 10^{-1}～10 s^{-1}；而在汽车发生碰撞时的变形速率则是很高的，甚至能达到 10^3 s^{-1}[23]。因此，对于汽车用 TWIP 钢，研究其在不同应变速率下的力学性能和微观组织的变化及压溃吸能行为就尤为重要。

徐梅[23]以屈服强度为 600 MPa 级的 TWIP 钢为实验材料，通过高速拉伸实验测得 TWIP 钢在 10^{-4}～10^3 s^{-1} 范围的变形速率下，屈服强度与应变速率成正比，而抗拉强度则与应变速率成反比。当应变速率超过 10^2 s^{-1} 时，TWIP 钢的断裂吸收能将超过 50 GPa%。可见 TWIP 钢的碰撞吸能能力很好，用其做汽车结构件能保护行车人员的安全。Manjunatha[24]等的研究发现，应变速率对高锰 TWIP 钢屈服强度和抗拉强度的影响很小；而在动态载荷作用

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

下，均匀伸长率和总伸长率下降；在各种应变速率下，TWIP 钢的总能量吸收能力均在 55 kJ/kg 以上。

Shanqing Xu 等[25]研究了一种孪晶诱导塑性钢在 0.001~400.000 s^{-1} 应变速率范围内的动态拉伸行为。结果表明，TWIP 钢具有中等的屈服应力和显著的伸长率。应变速率为 0.001~0.010 s^{-1} 时，TWIP 钢的极限抗拉强度略有下降。当应变速率大于 0.01 s^{-1} 时，极限拉伸强度随应变速率的增加而增大。当应变速率大于 100 s^{-1} 时，极限抗拉强度显著提高，屈服强度基本没有变化。TWIP 钢在实际应变为 0.1~0.5 时，加工硬化率较高；加工硬化率随应变速率的增加呈上升趋势。TWIP 钢高的能量吸收能力与应变速率、高应变硬化指数和较大的断裂伸长率有关。TWIP 钢在低应变速率下具有负应变速率敏感性，在高应变速率条件下具有正应变速率敏感性。

可见，目前国内外对 TWIP 钢动态变形行为的研究主要集中于力学性能随应变速率的变化规律，而对其在不同应变速率下影响力学行为的微观本质还需要进一步探讨。此外，TWIP 钢在不同变形阶段的组织演变规律的研究，大多是集中在准静态下，而对动态加载下的相关研究较少；对不同应变速率下应变量对 TWIP 钢孪生效应的影响，以及变形过程中不同应变区微观组织的变化规律还有待进一步研究。

5 结语

(1)TWIP 钢已研发到第 3 代，每代都有其独特的性能和相应的产品，但也都存在缺陷，制约了 TWIP 钢的量产。关于 TWIP 效应的研究也取得了一定的成果，基本了解了 TWIP 效应的产生机理及影响因素，但还不能有效控制形变孪晶。

(2)现阶段 TWIP 钢主要的微合金元素是 Nb、V、Ti，其中以 Nb 的研究最多。这几种微合金元素作用相差不大，主要是通过析出强化和低再结晶程度的作用，控制奥氏体晶粒的长大，以提高 TWIP 钢的屈服强度。应着手对其它微合金元素的研发。

(3)稀土元素对 TWIP 钢的主要作用有 3 个：一是稀土元素达到 0.02%后有明显的细化晶粒作用，产生这一作用的原因是稀土元素的添加使 TWIP 钢中形成多系孪晶；二是适量稀土元素可以通过降低奥氏体中可扩散氢的含量，从而可抑制 TWIP 钢的延迟断裂倾向；三是增大了 TWIP 钢的大角度晶界分数，从而延长了 TWIP 钢的寿命。

(4)TWIP 钢在低应变速率时，其极限抗拉强度有所下降，中等应变速率时极限抗拉强度与应变速率成正比，在高应变速率时极限抗拉强度有了明显的提高，而屈服强度保持不变。此外，各种应变速率下 TWIP 钢的断裂能量吸收能力都很高。在应变速率影响性能的微观本质及动态加载方面还存在研究盲点，是后续研究者的突破口。

(5)关于 TWIP 钢的研究虽然有一定的成果，也有了一部分产品，但距离大量工业生产还有一定路要走。而阻碍大量生产的原因主要有以下几点：还没有很好解决屈服强度低的方法，延迟断裂还不能有效的抑制，没有合理的合金成分设计以炼出更高强塑积的产品，不能澄清孪晶行为机制。现阶段这几点亟待解决的难题也为后续研究提供了方向。

参考文献：

[1] 米振莉，唐荻，严玲，等. 高强度高塑性 TWIP 钢的开发研究[J]. 钢铁，2005，40(1): 58-60.

[2] 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: 1391-1409.

[3] Bruno C. De Cooman, Yuri Estrin, et al. Twinning-induced plasticity (TWIP) steels[J]. Acta Materialia, 2018, 142: 283-362.

[4] Tang Z T, Huang J N, Ding H, et al. Austenite stability and mechanical properties of a low-alloyed ECAPed TRIP-aided steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2018, 724: 95-102.

[5] 代永娟，米振莉，唐荻，等. Fe-Mn-C 系 TWIP 钢的组织和性能[J]. 上海金属, 2007, 29(5): 132-136.

[6] 陈盛良. 不同退火温度和应变速率对 Fe-20Mn-0.6C TWIP 钢拉伸性能的影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.

[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): 4-6.

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

[9] Bouaziz O, Migot S, Guelton N. Modelling of twip effect on work hardening [J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 319-321: 246-249.

[10] 王书晗，刘振宇，王国栋. TWIP 钢中晶粒尺寸对 TWIP 效应的影响[J]. 金属学报，2009，45(9): 1083-1090.

[11] Zhao D L, Ying H W, Chunyue L, et al. Effects of high strain rate on properties and microstructure evolution of TWIP steel subject to impact loading [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2010, 17(6): 67-73.

[12] Xiong R G, Fu R Y, Su Y, et al. Tensile Properties of TWIP Steel at High Strain Rate [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2009, 16(1): 81-21.

[13] H.Gwon, J.K.Kim, S.Shin, et al. The effect of vanadium microstructure and the tensile behavior of TWIP steel [J]. Material Science & Engineering A, 2017,696: 416-428.

[14] Hojun Gwon, Jin Kyung Kim, Bian Jian, et al. Partially-recrystallized Nb-alloyed TWIP steels with a superior strength-ductility balance[J]. Materials Science & Engineering A, 2018: 711: 130-139.

[15] 周妍. 微合金化对孪晶诱导塑性(TWIP)钢力学性能和微观组织

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

演变影响研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
[16] 付立铭. 高强韧低碳 TWIP 钢的制备及组织与性能研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
[17] Meijia, F Reyes-Calderon, J M Cabrera. Modeling the hot flow behavior of a Fe-22Mn-0.41C-1.6Al-1.4Si TWIP steel microalloyed with Ti, V and Nb [J]. Materials Science & Engineering A, 2015, 644: 374-385.
[18] C Scott, B Remy, J L Collet, et al. Precipitation strengthening in high manganese austenitic TWIP steels[J]. International Journal of Materials Research, 2011, 102: 538-549.
[19] Yangyang Zhao, Junfeng Wang, Shu Zhou, et al. Effects of rare earth addition on microstructure and mechanical properties of a Fe-15Mn-1.5Al-0.6C TWIP steel [J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 608: 106-113.
[20] 王立辉，唐荻，赵爱民，等. 稀土含量对 TRIP/TWIP 钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报，2016，37(2)，110-115.
[21] 米振莉，吴海鹏，吴彦欣，等. 稀土元素 Ce 对 TWIP 钢低周疲劳行为的影响[J]. 钢铁研究学报，2015，27(11): 48-53.
[22] 吴彦欣. TWIP 钢的疲劳行为及延迟断裂研究[D]. 北京: 北京科技大学，2015.
[23] 徐梅. 高屈服强度 TWIP 钢动态变形及其构件压溃吸能行为的研究[D]. 北京: 北京科技大学，2018.
[24] Manjunatha Madivala, Alexander Schwedt, Ulrich Prahl, et al. Anisotropy and strain rate effects on the failure behavior of TWIP steel: A multiscale experimental study [J]. International Journal of Plasticity, 2019, 115: 178-199.
[25] Shanqing Xu, Dong Ruan, John H. Beynon, et al. Dynamic tensile behaviour of TWIP steel under intermediate strain rate loading[J]. Materials Science & Engineering A, 2013, 573: 132-140.

招贤纳士

襄阳聚力新材料科技有限公司

一、招聘销售工程师

任职要求：

1. 本科及以上学历，铸造、耐火材料、冶金、有色金属专业，熟悉二维、三维绘图软件者优先考虑。
2. 2 年以上铸造行业耐火材料销售或铸造涂料销售经验者。
3. 2 年以上铸造行业用中频炉或压铸行业工业炉销售经验者。
4. 2 年以上铸造行业铁合金生产或销售经验者。
5. 2 年以上耐火材料技术研发或产品应用经验者。
6. 2 年以上铸造涂料技术研发或产品应用经验者。
7. 2 年以上有在铸造厂工作经验，对中频炉熔炼或造型工艺熟悉者。
8. 在压铸厂或铝厂工作 2 年以上，对有色金属铜铝熔炼工艺流程熟悉者。

二、招聘销售经理

任职要求：

1. 大专及以上学历，铸造、耐火材料、冶金、有色金属专业，熟练掌握办公软件，懂产品市场宣传，营销策划者优先考虑。
2. 5 年以上铸造行业耐火材料销售、铸造涂料或类似工业品销售经验者。
3. 5 年以上铸造行业用中频炉或压铸行业工业炉销售经验者。
4. 性格外向，诚信可靠，乐观向上，抗压力强。
5. 逻辑思维清晰，做事干净利落，工作效率高。
6. 善于多部门或多层次沟通协调。

三、销售助理

任职要求：

1. 男性，30 岁以下，本科学历，身体健康，适合经常出差。
2. 性格外向，诚信可靠，乐观向上，抗压力强。
3. 逻辑思维清晰，做事干净利落，工作效率高。
4. 善于多部门或多层次沟通协调。

有意向者请将简历发送至邮箱 wuhaiyan@xyjllc.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net