

# Research Progress on Strengthening Method of TWIP Steel for Automobile

Qingwen Li<sup>1</sup>, Shuai Liu<sup>1\*</sup>, Yifan Geng<sup>1</sup>, Zebo Yuan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Metallurgy and Energy, North China University and technology, Tangshan Hebei

<sup>2</sup>Shougang Jingtang Iron & Steel Company, Tangshan Hebei

Email: \*Sliu\_ysu@163.com

Received: May 6<sup>th</sup>, 2019; accepted: May 21<sup>st</sup>, 2019; published: May 28<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

TWIP (Twinning-induced plasticity) steels, which possess high strength and excellent ductility, have received extensive attentions as a promising candidate for next generation of automotive steel. One of the limitations of TWIP steels is their low yield strength (YS), which limits the application of TWIP steels largely. In this article, we introduced some conventional strengthening methods such as cold-rolling and tempering, alloying and grain refinement, which have been used in TWIP steels. Meanwhile, a few unconventional techniques, such as surface mechanical attrition treatment (SMAT) also have been developed to strength TWIP steels, and the research results are analyzed in this article.

## Keywords

TWIP Steel, Cold-Rolling and Tempering, Alloying, Grain Refinement

---

# 汽车用TWIP钢强化方式研究进展

李清稳<sup>1</sup>, 刘 帅<sup>1\*</sup>, 耿一帆<sup>1</sup>, 袁泽博<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华北理工大学冶金与能源学院, 河北 唐山

<sup>2</sup>首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 河北 唐山

Email: \*Sliu\_ysu@163.com

收稿日期: 2019年5月6日; 录用日期: 2019年5月21日; 发布日期: 2019年5月28日

---

## 摘 要

高锰奥氏体孪晶诱发塑性(TWIP)钢具有出色的强度和优越的塑性, 是新一代汽车用钢的有力竞争者, 受

\*通讯作者。

到人们广泛关注。但是TWIP钢屈服强度较低,限制了它的广泛应用。近年来,国内外科研工作者尝试通过各种手段来进一步提高TWIP钢的强度。本文介绍了冷轧结合回火、合金化、细晶强化等传统强大手段以及表面机械研磨(SMAT)等新式强化方式在TWIP钢中的应用以及取得的一系列研究成果。

## 关键词

李晶诱发塑性钢, 冷轧 + 回火, 合金化, 细化晶粒

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

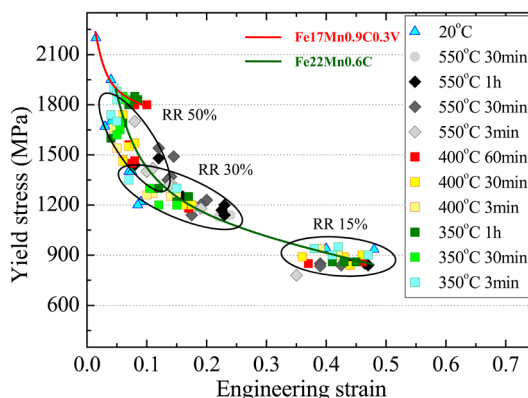
随着汽车工业的快速发展,对汽车轻量化设计、节能环保和安全性能等方面都提出了更高的要求,同时也对汽车用钢铁材料提出了新的挑战。在此背景下,高锰奥氏体李晶诱发塑性(Twinning-Induced Plasticity, TWIP)钢应运而生[1][2]。TWIP钢一经问世,便以其较高的强度( $UTS \geq 800$  MPa)、出色的塑性( $\delta \geq 60\%$ ),良好的成型性和优良的撞击能量吸收能力受到人们广泛关注,并且被认为是新一代汽车用钢的有力竞争者[3][4]。虽然TWIP钢综合力学性能出色,但是其屈服强度较低( $\sim 300$  MPa)大大限制了TWIP钢的应用范围[5]。所以近年来,TWIP钢研究领域的一个主要研究方向,就是尝试通过各种手段,保持其塑性不变或者损失少量塑性的前提下,来进一步提高TWIP钢的强度。所应用的强化手段主要有冷轧结合回火、合金化、细化晶粒等传统手段以及扭转、表面机械研磨(SMAT)等新式的强化技术,并且获得了一系列研究成果。本文主要归纳了以上强化方式对TWIP钢力学性能的影响,分析各种手段的优缺点,希望通过以上总结对TWIP钢的实际生产及应用提供借鉴依据。

## 2. 冷轧 + 回火

在钢铁材料领域,对材料进行预变形处理,是提高其强度的一种有效方式[6]。由于TWIP钢拥有足够好的塑性,即使在经过一定量的变形处理后,获得更高强度的同时也能保留较好的成型性。TWIP钢经不同程度的轧制处理后屈服强度大幅度提高,但是这种强化手段也存在一些问题,比如会导致TWIP钢塑性降低,加工硬化能力减弱,材料中形成变形织构造成材料性能的各向异性等。这些问题可以通过冷轧后进一步的回火来进行改善。但是回火温度要严格控制,回火温度过高使材料发生再结晶时,冷变形带来的高强度将会消失。Dini [7]和Kang等人[8]的研究结果表明,冷轧TWIP钢经 $550^\circ\text{C}$ 以下回火处理后材料屈服强度的牺牲较小,材料并没有发生再结晶现象,冷变形过程中产生的形变孪晶能够保留下来,这是其强度降低幅度较小的主要原因。Bouaziz等人[9]研究了Fe-22Mn-0.6C钢经过冷轧结合高温退火后的显微组织,将冷轧50%后的试样进行 $625^\circ\text{C}$ -120 s保温处理并利用TEM进行观察发现,试样发生部分再结晶,在未再结晶部分依然保存了形变孪晶组织。说明在室温下通过冷轧获得的形变孪晶组织在达到再结晶温度以前都是稳定的。

Bouaziz等人[9]的研究中还冷轧退火处理后的钢板从轧向和截面方向切取试样进行拉伸测试,结果发现两个方向切取的试样力学性能相近,说明通过退火处理明显改善了预变形试样各方向性能不同的缺点。同时,屈服强度从未退火时的1600 MPa下降到1200 MPa,均匀延伸率从2%上升到8%,可见TWIP钢在 $625^\circ\text{C}$ 以下进行退火处理时,能够在不大幅损失材料屈服强度的前提下获得一定的加工硬化能力。Scott

等人[10]对 Fe-22Mn-0.6C 和 Fe-17Mn-0.9C-0.3V 钢进行了系统研究,以探寻轧制与回火处理工艺的最优匹配。对两种钢进行不同轧下量的轧制后,分别在 350℃、400℃、500℃ 三种温度下保温 1 min、30 min、60 min 进行退火处理。将这些不同轧制退火处理后试样的拉伸性能整理在图 1 中,整体来看,随着退火温度升高屈服强度降低,延伸率升高。对于轧下量较小的试样,改变退火温度对其塑性影响不大。但是对于大轧下量试样而言,能够通过后续的回火处理恢复将近 15%的塑性,同时保持屈服强度高于 1000 MPa。



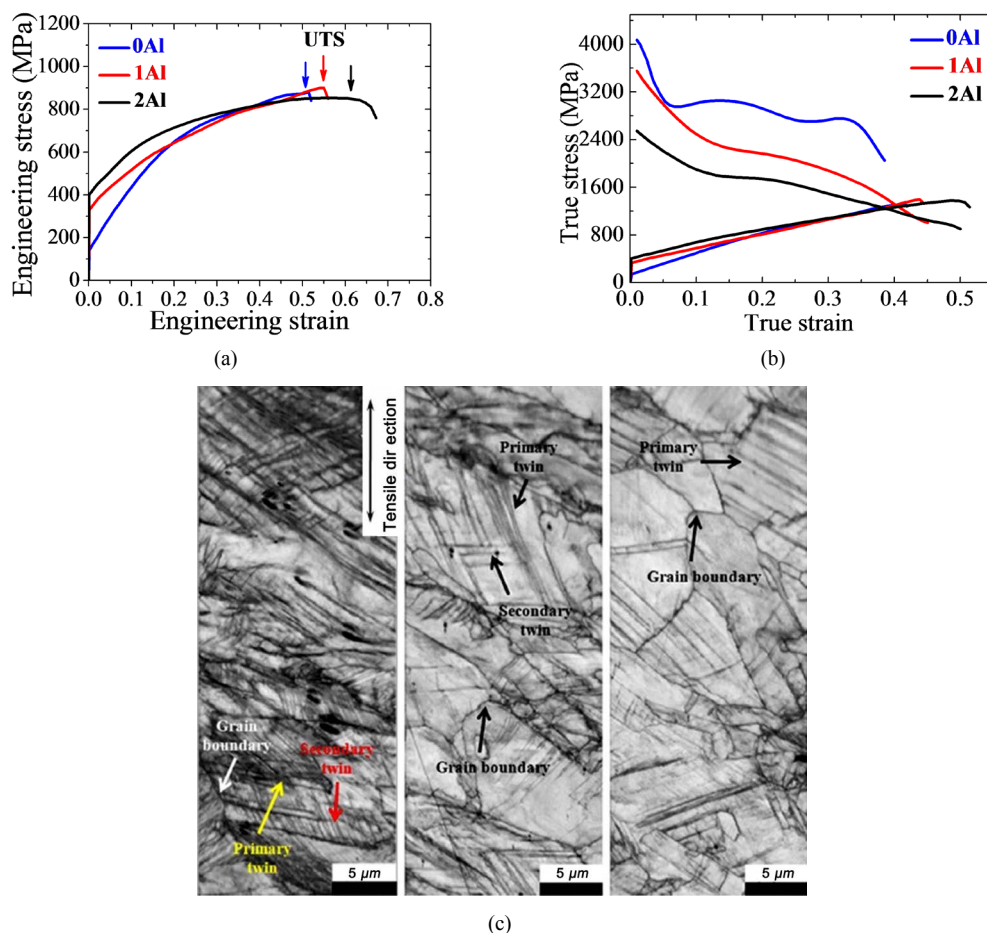
**Figure 1.** Tensile strength versus elongation of Fe-22Mn-0.6C and Fe-17Mn-0.9C-0.3V after various cold-rolling reductions followed by three recovery treatments [10]

**图 1.** Fe-22Mn-0.6C 和 Fe-17Mn-0.9C-0.3V 钢经不同程度冷轧回火处理后的拉伸性能[10]

### 3. 合金化

在钢铁材料中添加合金元素产生固溶强化以及析出强化,是一种有效的提高材料强度的强化手段。在 TWIP 钢中加入 Al、Cu、Si 等合金元素以及 V、Ti、Nb 等微合金元素来改善 TWIP 钢的性能是现阶段一个主要的研究方向。向 TWIP 钢中加入 Al 元素可以明显降低材料的密度[11],这在汽车工业中非常重要。同时 Fe-Mn-C 系 TWIP 钢存在非常明显的氢脆现象, Park 等人[12]的研究表明,向 TWIP 钢中添加 Al 元素能够在材料表面形成致密的  $Al_2O_3$  层,从而抑制 H 向 TWIP 钢中扩散,从而提高 TWIP 钢抵抗氢致延迟断裂的能力。更多的研究集中在 Al 元素对 TWIP 钢层错能以及拉伸变形行为的影响上。Park 等人[13]研究了向 Fe-22Mn-0.6C 钢中添加 Al 元素对层错能以及变形组织演化的影响,结果显示,随着 Al 元素的添加,层错能明显提高,导致孪晶临界应力升高, TWIP 钢中形变孪晶的生成受到抑制,位错滑移逐渐成为主要变形机制。Jin 等人[14]系统研究了 Al 元素对 TWIP 钢拉伸变形行为的影响,结果发现:随着 Al 元素的添加,在固溶强化的作用下 TWIP 钢的屈服强度升高,同时 Al 能显著抑制碳化物的析出使得含 Al 钢的延伸率升高(图 2(a));但是含 Al 钢的抗拉强度和加工硬化能力降低(图 2(b)),通过微观组织观察发现 TWIP 钢拉伸过程中产生的形变孪晶随着 Al 含量增加而减少(图 2(c)),这是其抗拉强度和加工硬化能力降低的主要原因。

Cu 元素加入到铁基合金中,对各种力学性能指标均有明显提升。Takaki 等人[15]的研究表明,在马氏体钢中添加 Cu 元素可以获得更好的强度-塑性匹配。Gonzalez 等[16]研究了 Cu 对奥氏体不锈钢成型性的影响,通过添加 Cu 元素抑制了马氏体的生成,提升了均匀延伸率和总延伸率。然而关于 Cu 对 TWIP 力学性能影响的研究还很少。最近, Lee 等人[17]研究了 Cu 对 Fe-12Mn-0.7C-1.0Al TWIP 钢拉伸变形行为的影响。结果表明, Cu 元素的添加可以改变流变曲线上的锯齿形态,并且小幅提高奥氏体层错能延迟了形变孪晶的产生,使延伸率升高。Peng 等人[18]研究了不同 Cu 含量对 Fe-20Mn-1.3C 钢的影响。研究发现,随着 Cu 元素的添加,层错能逐渐升高, TWIP 钢的屈服强度和延伸率明显升高,但是抗拉强度小幅下降。



**Figure 2.** (a) Stress-strain curves, (b) strain hardening rate curves and (c) deformation twins of Fe-22Mn-0.6C steel with different Al content [14]

**图 2.** 不同 Al 含量 Fe-22Mn-0.6C 钢拉伸的(a)应力-应变曲线、(b)加工硬化率曲线和(c)相同应变下孪晶组织照片[14]

V、Ti、Nb 微合金元素被广泛应用于 HSLA、DP、TRIP 等钢中，对这些高强钢的成分优化、组织控制、提高性能以及控制成本等方面都做出了重大的贡献。大量研究证明，添加微量的 V、Ti、Nb 元素就可以细化材料的组织以此达到显著提高强度的目的。能否通过 V、Nb、Ti 微合金化，提高 TWIP 钢的综合力学性能这一问题值得关注。张志波等人[19]对 Fe-22Mn-0.6C-0.19V 轧制再结晶处理后的拉伸变形行为的研究表明，V 可以明显抑制晶粒长大，同时在固溶强化和析出强化的共同作用下明显提高 TWIP 钢的屈服强度。但是加工硬化曲线分析以及显微组织观察结果发现，TWIP 钢中的 VC 第二相颗粒，在高应变阶段阻碍孪晶生长导致加工硬化能力降低。Huang 等人[20]研究了微量 Nb 对 Fe-20Mn-2Si-2Al 钢性能的影响发现，Nb 能够提高 TWIP 钢的层错能，抑制马氏体相变，同时起到细化晶粒的作用，由于微量 Nb 的加入，合金的低温力学性能明显优于传统成分的 TWIP 钢。Scott 等人[21]对 V、Ti、Nb 等元素对 TWIP 钢拉伸性能的影响进行系统的研究，结果表明：随着 V、Ti、Nb 含量的增加，能够显著提高 TWIP 钢的屈服强度和流变应力；在低应变阶段( $\epsilon < 0.25$ )，微合金化带来的纳米析出物对 TWIP 钢的加工硬化行为没有明显影响，在高应变阶段( $\epsilon > 0.3$ )，析出物会导致 TWIP 钢加工硬化能力降低，同步 X-射线衍射分析发现，形变孪晶的生成受到抑制；Ti 在三种元素中具有最高的强化系数，在 TWIP 钢中当 Ti 含量小于 0.1 wt.% 时，Ti 的强化系数为 1380 MPa/wt.%，但是当 Ti 含量超过 0.1 wt.% 时，Ti 的强化作用达到饱和。

## 4. 晶粒细化

晶粒细化是一种提高材料强度的有效手段。根据 Hall-Petch 关系, 晶粒尺寸减小, 材料的强度将大幅度的提高, 有利于材料综合力学性能的改善[22] [23]。对于 TWIP 钢而言, 除了变形过程中逐渐生成的形变孪晶(孪晶界)能够起到细化晶粒的作用(动态 Hall-Petch 作用), 通过改变制备工艺细化初始奥氏体晶粒也是提高 TWIP 钢强度(尤其屈服强度)的一种有效方法。Ueji 和 Dini 等[24] [25]采用冷轧结合再结晶退火处理的方法, 制备出具有一系列不同晶粒尺寸的 Fe-31Mn-3Al-3Si 钢并进行拉伸性能测试。实验结果显示, 随着晶粒尺寸的减小, 尽管 TWIP 钢的塑性有所下降, 但是其屈服强度明显提升如图 3 所示。这种制备方法得到的最小晶粒尺寸为 2.1  $\mu\text{m}$ , 在此晶粒尺寸下进行拉伸时, TWIP 效应不再是主要的变形方式, 但是组织观察中发现仍然存在少量形变孪晶。Bouaziz 等人[26]对典型 Fe-Mn-C 系 TWIP 钢 Fe-22Mn-0.6C 的研究表明, 当晶粒尺寸下降到 3  $\mu\text{m}$  以下时, TWIP 钢的屈服强度可达到 400 MPa 以上, 如图 3 所示。Lee 等人[27]对比研究了 Fe-17Mn-0.6C 和 Fe-31Mn-3Al-3Si 两种钢晶粒细化对拉伸性能的影响, 发现 Fe-17Mn-0.6C 细晶粒钢具高强度的同时具有比 Fe-31Mn-3Al-3Si 细晶粒钢更好的塑性。Gutierrez-Urrutia 等人[28]对 Fe-22Mn-0.6C 钢大、小晶粒试样拉伸过程中的组织演化进行了研究, 发现细晶粒 Fe-22Mn-0.6C 钢拉伸变形过程中依然能够产生大量形变孪晶是其具有较高塑性的主要原因。此外, 经验分析认为, 晶粒尺寸降低, 对材料的层错能也会产生影响, 进而影响 TWIP 钢的 TWIP 效应[29]。同类型 TWIP 钢发生 TWIP 效应的最小晶粒尺寸存在的差异, 可能与合金成分的影响有关。

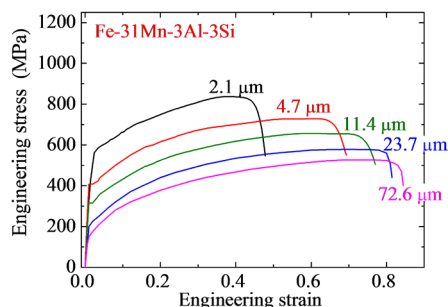


Figure 3. True stress-strain curves of Fe-31Mn-3Al-3Si steel at various grain size [25]

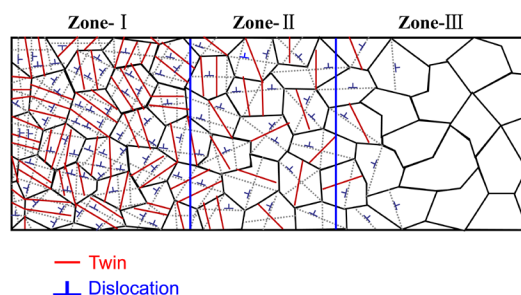
图 3. Fe-31Mn-3Al-3Si 钢不同晶粒尺寸的应力 - 应变曲线[25]

## 5. 表面机械研磨(SMAT)

近年来, 通过不同制备手段, 得到显微组织梯度式分布的材料成为一个新的研究热点。卢珂等人在金属 Ni 中通过表面机械研磨(SMAT)方法, 制备出由表层到心部应变量逐渐减小的梯度式分布的材料[30], 通过力学性能测试发现, 这种并且最终获得出色的力学性能。这一强化方式也被应用到 TWIP 钢研究领域。Rajib 等人[31]对 Fe-10Mn-0.5C-3Ni TWIP 钢进行 SMAT 处理, 处理后的试样经组织观察发现, 试样表层产生大量的形变孪晶组织和高密度位错, 随着距表层的深度增加试样的变形程度减小孪晶以及位错的数量逐渐减少, 如图 4 所示。TWIP 钢经 SMAT 处理后试样表层形成变形较大的硬化层, 这对材的强度产生很大贡献, 同时心部变形较小的区域依然保持了较好的塑性, 所以经过 SMAT 处理后的 TWIP 钢表现出更加优良的强度塑性匹配。

## 6. 结论

1) 对 TWIP 钢冷轧后进行回火处理能够在一定程度上消除变形织构造成的各向异性, 同时提高材料加工硬化的能力, 使冷轧钢板的塑性得到提升, 但是由于 TWIP 钢中含有一定量的碳元素, 所以在选择



**Figure 4.** Schematic figure displays the variation of twin and dislocation from surface to centre [31]  
**图 4.** 试样表层到心部的孪晶和位错分布示意图[31]

回火温度和回火时间时一定要严格控制防止碳化物析出对材料性能产生严重影响;

2) 在 TWIP 钢中加入 Al、Cu 等改变层错能的合金元素往往会对 TWIP 钢中形变孪晶的产生造成影响, 提高层错能将抑制形变孪晶产生, 加入 V、Ti、Nb 等微合金元素能够在固溶强化和析出强化的作用下显著提高 TWIP 钢强度, 但是这种析出物一定程度上会影响形变孪晶的增殖;

3) 晶粒细化能够显著提高 TWIP 钢的屈服强度, 但是晶粒细化后在一定程度上抑制形变孪晶的产生造成塑性降低;

4) SMAT 等先进的制备加工手段能够使 TWIP 钢由表层到心部产生梯度式分布的孪晶及位错组织, 这种梯度式分布的材料同时具有较高的强度和较好的塑性, 但是这种制备材料的方法还停留在实验室阶段, 并不能应用于大型的工程构建, 如何扩宽这种方法的应用范围, 增大加工试样的尺寸是今后发展的一个主要方向。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(51801063); 河北省高等学校科学技术研究项目(BJ2019018); 唐山市科技局计划项目(18130217a)。

## 参考文献

- [1] Grassel, O., Frommeyer, G., Derder, C., *et al.* (1997) Phase Transformation and Mechanical Properties of Fe-Mn-Si-Al TRIP-Steel. *Journal de Physique IV France*, **5**, 383-388.
- [2] Grässel, O., Krüger, L., Frommeyer, G. and Meyer, L.W. (2000) High Strength Fe-Mn-(Al, Si) TRIP/TWIP Steels Development-Properties-Application. *International Journal of Plasticity*, **16**, 1391-1409. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(00\)00015-2](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(00)00015-2)
- [3] Qian, L., Qian, Z., Zhang, F., *et al.* (2012) Microstructure and Mechanical Properties of a Low Carbon Carbide-Free Bainitic Steel Co-Alloyed with Al and Si. *Material and Design*, **39**, 264-268. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.02.053>
- [4] Chakraborty, J., Bhattacharjee, D. and Manna, I. (2008) Austempering of Bearing Steel for Improved Mechanical Properties. *Scripta Material*, **59**, 247-250. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.03.023>
- [5] Bouaziz, O., Allain, S., Scott, C.P., Cugy, P. and Barbier, D. (2011) High Manganese Austenitic Twinning Induced Plasticity Steels: A Review of the Microstructure Properties Relationships. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, **15**, 141-168. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2011.04.002>
- [6] Bouaziz, O., Allain, S. and Estrin, Y. (2010) Effect of Pre-Strain at Elevated Temperature on Strain Hardening of Twinning-Induced Plasticity Steels. *Scripta Materialia*, **62**, 713-715. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.01.040>
- [7] Dini, G., Najafzadeh, A., Ueji, R. and Monir-Vaghefi, S.M. (2010) Improved Tensile Properties of Partially Recrystallized Submicron Grained TWIP Steel. *Material Letters*, **64**, 15-18. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2009.09.057>
- [8] Kang, S., Jung, Y.-S., Jun, J.-H. and Lee, Y.-K. (2010) Effects of Recrystallization Annealing Temperature on Carbide Precipitation, Microstructure, and Mechanical Properties in Fe-18Mn-0.6C-1.5Al TWIP Steel. *Material Science and Engineering A*, **527**, 745-751. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2009.08.048>
- [9] Bouaziz, O., Scott, C.P. and Petitgand, G. (2009) Nanostructured Steel with High Work-Hardening by the Exploitation

- of the Thermal Stability of Mechanically Induced Twins. *Scripta Mater*, **60**, 714-716. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2009.01.004>
- [10] Scott, C., Allain, S., Faral, M. and Guelton, N. (2006) The Development of a New Fe-Mn-C Austenitic Steel for Automotive Applications. *La Revue de Métallurgie-CIT*, **103**, 293-302. <https://doi.org/10.1051/metal:2006142>
- [11] Gutierrez-Urrutia, I. and Raabe, D. (2013) Influence of Al Content and Precipitation State on the Mechanical Behavior of Austenitic High-Mn Low-Density Steels. *Scripta Materialia*, **68**, 343-347. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.08.038>
- [12] Park, I.-J., Jeong, K.-H., Jung, J.-G., Lee, C.S. and Lee, Y.-K. (2012) The Mechanism of Enhanced Resistance to the Hydrogen Delayed Fracture in Al-Added Fe-18Mn-0.6C Twinning-Induced Plasticity Steels. *International Journal of Hydrogen Energy*, **37**, 9925-9932. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.100>
- [13] Park, K.-T., Jin, K.G., Han, S.H., *et al.* (2010) Stacking Fault Energy and Plastic Deformation of Fully Austenitic High Manganese Steels: Effect of Al Addition. *Materials Science and Engineering A*, **527**, 3651-3661. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.02.058>
- [14] Jin, J.-E. and Lee, Y.-K. (2012) Effects of Al on Microstructure and Tensile Properties of C-Bearing High Mn TWIP Steel. *Acta Materialia*, **60**, 1680-1688. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2011.12.004>
- [15] Takaki, S., Fujioka, M., Aihara, S., *et al.* (2004) Effect of Copper on Tensile Properties and Grain-Refinement of Steel and Its Relation to Precipitation Behavior. *Materials Transactions*, **45**, 2239-2244.
- [16] Gonzalez, B.M., Castro, C.S.B., Buono, V.T.L., *et al.* (2003) The Influence of Copper Addition on the Formability of AISI 304 Stainless Steel. *Material Science and Engineering A*, **343**, 51-56. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(02\)00362-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(02)00362-3)
- [17] Lee, S., Kim, J., Lee, S.-J. and De Cooman, B.C. (2011) Effect of Cu Addition on the Mechanical Behavior of Austenitic Twinning-Induced Plasticity Steel. *Scripta Materialia*, **65**, 1073-1076. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2011.09.019>
- [18] Peng, X., Zhu, D., Hu, Z., Yi, W.F., Liu, H.J. and Wang, M.J. (2013) Stacking Fault Energy and Tensile Deformation Behavior of High-Carbon Twinning-Induced Plasticity Steels: Effect of Cu Addition. *Materials and Design*, **45**, 518-523. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.09.014>
- [19] 张志波, 刘振宇, 张维娜. VC 沉淀粒子对 TWIP 钢加工硬化行为的影响[J]. 金属学报, 2012, 48(9): 1067-1073.
- [20] Huang, B.X., Wang, X.D., Rong, Y.H., Wang, L. and Jin, L. (2006) Mechanical Behavior and Martensitic Transformation of Fe-Mn-Si-Al-Nb Alloy. *Materials Science and Engineering A*, **438-400**, 306-311. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.02.150>
- [21] Scott, C., Remy, B., Collet, J.-L., *et al.* (2011) Precipitation Strengthening in High Manganese Austenitic TWIP Steels. *International Journal of Materials Research*, **102**, 539-549. <https://doi.org/10.3139/146.110508>
- [22] Hall, E.O. (1951) The Deformation and Ageing of Mild Steel: III Discussion of Results. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, **64**, 747-753. <https://doi.org/10.1088/0370-1301/64/9/302>
- [23] Petch, N.J. (1953) The Cleavage Strength of Polycrystals. *The Journal of the Iron and Steel Institute*, **174**, 25-28.
- [24] Ueji, R., Tsuchida, N., Terada, D., *et al.* (2008) Tensile Properties and Twinning Behavior of High Manganese Austenitic Steel with Fine-Grained Structure. *Scripta Materialia*, **59**, 963-966. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2008.06.050>
- [25] Dini, G., Najafizadeh, A., Ueji, R. and Monir-Vaghefi, S.M. (2010) Tensile Deformation Behavior of High Manganese Austenitic Steel: The Role of Grain Size. *Materials and Design*, **31**, 3395-3402. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.01.049>
- [26] Bouaziz, O., Allain, S. and Scott, C. (2008) Effect of Grain and Twin Boundaries on the Hardening Mechanisms of Twinning-Induced Plasticity Steels. *Scripta Materialia*, **58**, 484-487. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.10.050>
- [27] Lee, T., Koyama, M., Tsuzaki, K., *et al.* (2012) Tensile Deformation Behavior of Fe-Mn-C TWIP Steel with Ultrafine Elongated Grain Structure. *Materials Letters*, **75**, 169-171. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.02.012>
- [28] Gutierrez-Urrutia, I., Zaeferrer, S. and Raabe, D. (2010) The Effect of Grain Size and Grain Orientation on Deformation Twinning in a Fe-22 wt.% Mn-0.6 wt.% C TWIP Steel. *Materials Science and Engineering A*, **527**, 3552-3560. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.02.041>
- [29] Saeed-Akbari, A., Imlau, J., Prah, U. and Bleck, W. (2009) Derivation and Variation in Composition-Dependent Stacking Fault Energy Maps Based on Subregular Solution Model in High-Manganese Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **40**, 3076-3090. <https://doi.org/10.1007/s11661-009-0050-8>
- [30] Liu, X.C., Zhang, H.W. and Lu, K. (2013) Strain-Induced Ultrahard and Ultrastable Nanolaminated Structure in Nickel. *Science*, **342**, 337-340. <https://doi.org/10.1126/science.1242578>
- [31] Rajib, K. and Satyam, S. (2018) A Novel Way to Enhance the Strength of Twinning Induced Plasticity (TWIP) Steels. *Scripta Materialia*, **154**, 207-211. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2018.05.045>

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2160-7613，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)