

汽车用中锰钢的研究现状与展望

齐加胜¹, 徐文权²

(1. 南京理工大学紫金学院, 江苏 南京 210046;

2. 安庆师范大学 电子工程与智能制造学院, 安徽 安庆 246001)

摘要: 从化学成分、强化机制和热处理工艺 3 个方面综述了国内外中锰钢的研究现状。分析总结了 Mn、C、Al 等元素对中锰钢组织性能的影响; 针对中锰钢变形过程中强化机制, 着重介绍了相变诱发塑性 (TRIP) 效应及其影响因素; 中锰钢的组织性能与热处理工艺紧密相关, 重点介绍了奥氏体逆转变 (ART)、淬火+回火 (Q&T)、淬火配分 (Q&P) 等热处理工艺及其对组织性能的影响。最后展望了中锰钢未来研究的方向。

关键词: 中锰钢; 强化机制; TRIP 效应; 热处理; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG142.1 文献标志码: A 文章编号: 0254-6051(2025)03-0244-06

DOI: 10.13251/j.issn.0254-6051.2025.03.039

Research status and prospects of medium manganese steels for automobiles

Qi Jiasheng¹, Xu Wenquan²

(1. Nanjing University of Science and Technology Zijin College, Nanjing Jiangsu 210046, China;

2. School of Electronic Engineering and Intelligent Manufacturing, Anqing Normal University, Anqing Anhui 246001, China)

Abstract: Research status of medium-Mn steels at home and abroad were reviewed from three aspects: chemical composition, strengthening and toughening mechanism, and heat treatment processes. The effects of elements such as Mn, C, and Al on the microstructure and properties of medium-Mn steels were analyzed and summarized. Regarding the strengthening and toughening mechanism during the deformation of medium-Mn steels, the transformation-induced plasticity (TRIP) effect and its influencing factors were emphasized. Considering that the microstructure and properties of medium-Mn steels were closely related to heat treatment processes, the heat treatment processes such as austenite reverse transformation (ART), quenching and tempering (Q&T), quenching and partitioning (Q&P), and their effects on the microstructure and properties were introduced in detail. Finally, the future research directions of medium-Mn steels was prospected.

Keywords: medium manganese steel; strengthening and toughening mechanism; TRIP effect; heat treatment; microstructure; mechanical properties

节能、环保、安全是现今汽车工业发展的主要目标, 通过使用高强度、轻量化的先进材料代替传统材料, 可以在保证车辆安全性要求的前提下, 降低车辆自重, 减少燃油消耗和尾气排放, 进而实现节能、环保、安全的目标^[1]。通常而言, 汽车车身总质量的 60% 为钢铁材料, 因此采用先进高强度钢制造车身及相关零部件是实现降低车身自重的有效途径。汽车用先进高强钢的发展已经历了三代。第一代高强钢合金成分低, 组织是以铁素体为主的多相组织, 通常强塑积在 15 GPa·% 左右。第一代高强钢代表钢有双相 (DP) 钢、无间隙原子钢 (IF)、相变诱导塑性 (TRIP) 钢等^[2]。第二代先进

高强钢成分中 Mn、Cr、Ni 等合金元素含量较高, 其组织中具有大量的亚稳态奥氏体, 在变形过程中通过 TWIP 效应提高钢的强塑性, 其抗拉强度和伸长率一般在 1000 MPa 和 60% 左右, 强塑积可达 60 GPa·% 左右。第二代高强钢虽然具有极佳的力学性能, 但因合金元素含量较高使其生产成本很高, 另外, 第二代高强钢还具有加工性能较差, 易发生延迟开裂等不足, 第二代高强钢代表钢种为奥氏体孪晶诱导塑性 (TWIP) 钢、诱导塑性轻 (L-IP) 钢等^[3]。第三代先进高强钢通过降低合金含量的方式降低生产成本, 同时兼顾了钢的良好应变硬化能力和优异强塑性匹配, 是当前国内

收稿日期: 2024-09-15

修订日期: 2025-01-11

基金项目: 江苏省高等学校自然科学研究面上项目 (18KJB460018); 江苏省知识产权软科学研究计划 (JSIP-2021-R-C11)

作者简介: 齐加胜 (1983—), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为热处理工艺及装备, E-mail: qjs831029@163.com

引文格式: 齐加胜, 徐文权. 汽车用中锰钢的研究现状与展望 [J]. 金属热处理, 2025, 50(3): 244-249.

Qi Jiasheng, Xu Wenquan. Research status and prospects of medium manganese steels for automobiles [J]. Heat Treatment of Metals, 2025, 50(3): 244-249.

外汽车用高强钢研究领域的热点。第三代先进高强钢代表钢种有中锰钢(Medium Mn steel)、QP钢(Quenching-partitioning steel)等。中锰钢(Mn含量一般在3%~12%)主要通过复合配分与亚稳控制的方式来实现高强度、高塑性的良好性能^[4],综合力学性能很好地满足汽车轻量化与安全性方面的要求,同时中锰钢还具有低成本、制备工艺简单、易于加工等优点,这使其成为了极具市场潜力的第三代高强钢的代表钢种。本文主要介绍了当前国内外中锰钢的研究进展,分析总结了中锰钢的强韧化机制及其影响因素,重点介绍了中锰钢的热处理工艺、化学元素对其组织性能影响方面的研究成果,并对中锰钢未来发展提出了展望。

1 中锰钢的化学成分

Mn、C、Al等元素均是中锰钢的主要化学元素,另外一些设计者还会向中锰钢中添加V、Cr、Mo等微合金元素,化学元素成分及添加量对中锰钢的组织与综合性能均有着重要影响,所以有必要对Mn、C、Al等元素对中锰钢组织性能的影响进行总结。

1.1 Mn元素

中锰钢中Mn含量一般在3%~12%,作为中锰钢中最重要的合金元素,Mn是奥氏体的稳定元素,Mn不仅可以扩大中锰钢的奥氏体相区,保证室温条件下

组织中获得更高含量的亚稳奥氏体组织,使中锰钢在变形的过程中发生更充分的相变诱发塑性效应,还可以让TTT曲线右移,使中锰钢在低冷却速度下获得马氏体组织,提高中锰钢的淬透性。但Mn含量过高也会导致中锰钢在凝固过程中发生偏析现象^[5],偏析会对中锰钢的综合力学性能产生不利影响,同时过高的Mn含量还会影响中锰钢的耐腐蚀性和焊接性能。

1.2 C元素

中锰钢中C含量一般应低于4%,C是奥氏体稳定元素,C含量的增加会降低中锰钢的Ms点,最终使中锰钢在室温条件下组织中保存有大量残留奥氏体,保证变形过程中相变诱发塑性效应的有效发生。一方面,C通过固溶强化和与其他合金元素形成细小碳化物起到析出强化作用,使得中锰钢的强度得到显著提高。另一方面,C含量过高也会导致中锰钢在凝固过程中发生严重偏析,对后续加工和性能改善产生不利影响,也影响其焊接性能。文献[6]研究表明,冷轧中锰钢Fe-6Mn-1Al-xC($x=0.06, 0.15, 0.30$)退火后的组织为铁素体+奥氏体的双相组织,其EBSD图像如图1,其中红色和蓝色组织分别为铁素体和奥氏体。可见随着C含量的增加,组织中铁素体体积分数不断减少,奥氏体体积分数不断增加,试验钢带的强塑积由28.0 GPa·%增加到51.4 GPa·%。

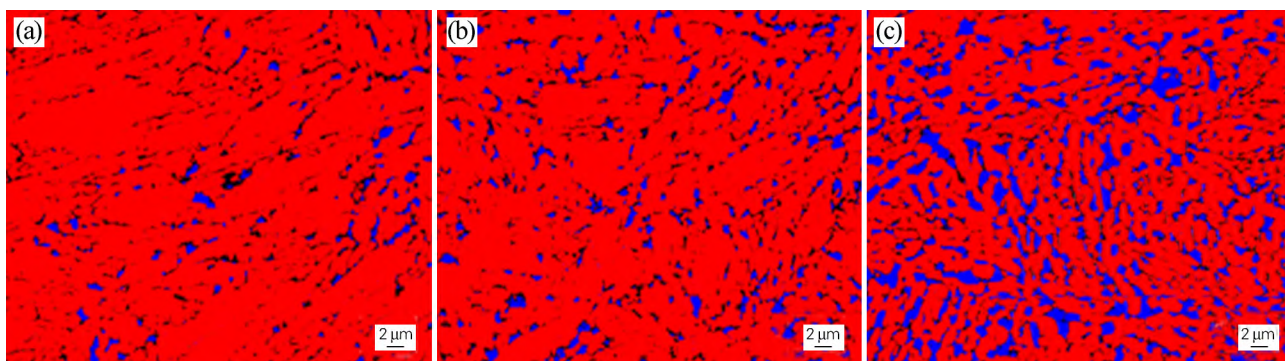


图1 冷轧中锰钢Fe-6Mn-1Al-xC($x=0.06, 0.15, 0.30$)退火后的EBSD图像^[6]

Fig.1 EBSD images of cold-rolled medium manganese steel Fe-6Mn-1Al-xC($x=0.06, 0.15, 0.30$) after annealing^[6]
(a) $x=0.06$; (b) $x=0.15$; (c) $x=0.30$

1.3 Al元素

Al作为一种轻量化元素添加到中锰钢中,可以改变奥氏体逆转变处理后C、Mn在基体中的分布状态,还会影响残留奥氏体的层错能,进而影响其强化机制^[7]。另外,Al的添加会在中锰钢表面形成Al₂O₃保护膜,阻碍H原子移动,进而改善中锰钢氢脆现象。但如果Al添加量过多,会导致中锰钢中铁素体组织的

体积分数过高,这将影响中锰钢的加工硬化效果和力学性能。文献[8]研究表明,对于0.2C-5Mn-0.5Si-(1.0/2.5)Al中锰钢,添加Al能显著扩大中锰钢的临界区温度范围,其中A₃温度提高更为明显。添加2.5%Al后试验钢组织中会出现 δ -铁素体。Al元素的添加,可以显著提高临界退火效率,0.2C-5Mn-0.5Si-2.5Al钢临界退火3 min即可获得良好力学性能。

2 中锰钢的强韧化机制

2.1 中锰钢的强韧化机制

中锰钢通过合适的处理工艺,可以实现超细晶与复杂的多相组织,中锰钢的多相组织可能包括不同类型的奥氏体、马氏体、铁素体,有时也包括 δ 铁素体。多相组织结构使中锰钢在拥有超高强度的同时,还具有很高的塑性。中锰钢通过固溶强化、细晶强化、析出强化、位错强化等传统强化机制与应力变形中发生的相变诱发塑性(TRIP)、孪生诱发塑性(TWIP)等效应的协调强化,使中锰钢的强度与塑性得到同时提升,最终获得优良的强塑性匹配。相关研究表明,中锰钢的层错能(SFE)决定了变形过程中发生的变形强化机制。当 $SFE \leq 18 \text{ mJ/m}^2$ 时,中锰钢变形过程发生TRIP效应,当 $18 \text{ mJ/m}^2 < SFE < 35 \text{ mJ/m}^2$ 时,中锰钢变形过程发生TWIP效应,当 $SFE \geq 35 \text{ mJ/m}^2$ 时,中锰钢变形过程可发生微带诱导塑性(MBIP)效应。中锰钢的层错能(SFE)与化学元素种类、元素含量、晶粒尺寸等多个因素有关^[9],通常而言,中锰钢中Mn、C、Al等元素含量越高,SFE越高,晶粒尺寸越细小,SFE也越高。根据中锰钢化学成分的调控原则,对组织中Mn、C、Al等元素含量控制使中锰钢的SFE不会太高,因此中锰钢变形过程中主要发生TRIP效应,并可能伴有部分TWIP效应。

2.2 相变诱发塑性(TRIP)效应

TRIP效应是中锰钢拥有良好综合力学性能的主要因素。TRIP效应可以实现材料增强增塑的效果,其主要原因是变形过程中钢中会产生硬相组织(马氏体、贝氏体)提高材料的强度,而原组织中的软相(奥氏体、铁素体)可以提高材料的塑性,变形的过程中通过不同比例硬相和软相的相互协调,使得拥有这种复相组织的高强钢可以拥有更好的协同变形能力,在提高材料抗拉强度的同时,也提高了材料的塑性,达到了最终增强增塑的效果。中锰钢组织中含有较高的亚稳态奥氏体相,在变形过程中亚稳态奥氏体相诱发产生硬相马氏体相,马氏体相变使得中锰钢强度得到提升,同时形变诱发马氏体相后,硬相马氏体因变形困难会使形变向周围转移,从而使中锰钢的颈缩推迟^[10-12],因此中锰钢的塑性也得到了明显提升。

2.3 TRIP效应的影响因素

影响TRIP效应的因素主要有两方面:亚稳态奥氏体相和应变形式。亚稳态奥氏体相的含量和稳定性均对中锰钢的TRIP效应有着重要的影响。根据相关研究成果^[13-14],中锰钢中的亚稳态奥氏体含量越多,其加工硬化行为提高越显著,力学性能提升越明显。

文献[14]研究表明,与奥氏体体积分数6.9%的0.1C-4.98Mn中锰钢相比,在同一预应变变量下,奥氏体体积分数为13.6%的中锰钢抗拉强度提高40 MPa、伸长率提高7%,试验的加工硬化效果也得到显著提高。文献[15]研究表明,随残留奥氏体含量增多,在大载荷条件下中锰钢的耐磨性不断增强,但在小载荷下,其耐磨性有所减弱。另一方面,亚稳态奥氏体相的稳定性对中锰钢的TRIP效应也有着重要的影响。当中锰钢中亚稳态奥氏体相的稳定性较低时,在应力变形行为的早期,中锰钢中马氏体相变就完全发生,这使得变形过程中TRIP效应发生不明显,中锰钢的强塑性提升也不显著。另外,如果中锰钢中亚稳态奥氏体相的稳定性过高,在应力变形濒临结束时,中锰钢中仍未完全发生马氏体相变,这使得变形过程中TRIP效应未充分发生,试验钢的强塑性也不会得到明显提高。文献[16]研究表明,薄膜状残留奥氏体中碳含量高于块状残留奥氏体,因此薄膜状残留奥氏体稳定性更好,在变形过程中试验钢发生TRIP效应更明显,力学性能改善更显著。

应变形式包括应变方式与速率,应变方式与速率对中锰钢TRIP效应也有着重要的影响。在材料的力学性能测试中,当前主要采用单轴拉伸、双轴拉伸以及平面应变等形式,这些不同的应变方式会对中锰钢中亚稳态奥氏体含量和稳定性产生不同的影响,并最终导致中锰钢变形时发生TRIP效应效果不同。文献[17]研究表明,在变形过程中,应变方式对试验钢组织中残留奥氏体含量有着重要影响,按照变形前后中锰钢中残留奥氏体变化量排序结果为:平面应变>双向拉伸>单向拉伸。文献[18]研究表明,Fe-11Mn-2Al-0.2C中锰钢在 $2 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 低应变速率范围内发生TRIP效应明显,当应变速率提高到 $2 \times 10^{-2} \sim 2 \text{ s}^{-1}$ 范围时,试验钢变形过程中TRIP效应受到抑制,并出现了TWIP效应。

3 中锰钢的热处理工艺

合适的热处理工艺可以使中锰钢在室温条件下获得数量较多、稳定性适中的亚稳态残留奥氏体(RA)组织,在变形过程中展现出更好的TRIP效应,使其表现出更为优异的综合力学性能。中锰钢的主要热处理工艺包括奥氏体逆转变(ART)工艺、淬火+回火(Q&T)工艺、淬火配分(Q&P)工艺。

3.1 奥氏体逆转变(ART)工艺

ART工艺指的是将试验钢加热至奥氏体-铁素体双相区并保温一段时间后,空冷至室温。最终使试验

钢在室温条件下拥有较高体积分数的奥氏体、一定体积分数的铁素体和少量马氏体组织。温度、时间、升温速率等都是 ART 工艺的重要参数,对钢的组织形貌有着重要的影响。国内外科研人员也对其进行了大量的研究。文献[19]研究结果表明,退火温度从 630 °C 升高至 670 °C,热轧态 Fe-0.05C-5Mn-0.2Si 中锰钢的室温组织中逆转变奥氏体体积分数不断增加,形貌从板条状转变为块状。630、670 °C 退火试验钢的 TEM 形貌如图 2 所示。另外,还发现高体积分数、低稳定性的逆转变奥氏体对中锰钢的屈服强度产生不利影响,但会提高中锰钢的抗拉强度和低温韧性。

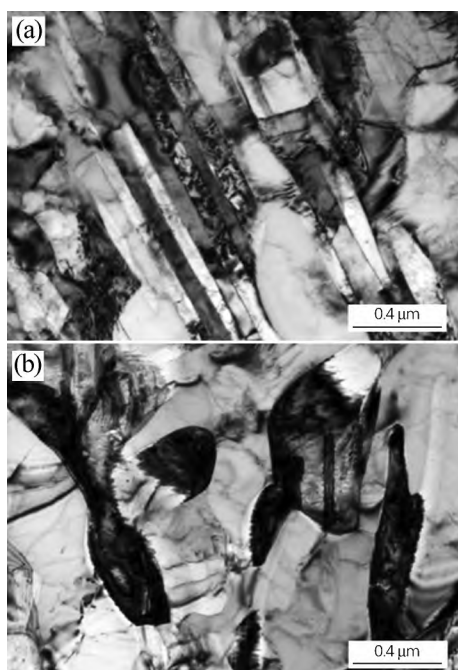


图2 不同温度退火 Fe-0.05C-5Mn-0.2Si 钢的 TEM 组织^[19]
Fig.2 TEM microstructure of Fe-0.05C-5Mn-0.2Si steel
annealed at different temperatures^[19]
(a) 630 °C; (b) 670 °C

文献[20]研究表明,冷轧态 Fe-0.14C-5Mn 钢进行 650 °C×1 min 的奥氏体逆转变处理,室温组织中即形成体积分数 20% 以上的亚稳奥氏体。随退火时间的延长,试验钢的抗拉强度不断升高,伸长率和强塑积先升高而后降低。650 °C×10 min 退火试验钢的伸长率和强塑积达到最高,分别为 46% 和 46 GPa·%。文献[21]研究表明,越高的加热速率越有利于中锰钢中块状奥氏体的形成。加热速率越高,室温条件下形成的奥氏体晶粒越细小,加热速率越低,越利于针状奥氏体的形成。

3.2 淬火+回火(Q&T)工艺

对含 Al 量较高的中锰钢而言,ART 工艺处理会导

致中锰钢中奥氏体位错密度减小,加工硬化效果减弱,奥氏体稳定性过高等问题。因此对含 Al 量较高的中锰钢通常采用 Q&T 工艺。Q&T 工艺是指将中锰钢加热至双相区保温后水冷,再经 200~400 °C 的低温回火后空冷,以保证中锰钢中 Mn、C 稳定奥氏体相,并使组织中析出大量细小的碳化物。Q&T 处理中锰钢在室温条件下会获得多相混合组织,在变形过程中,多相协调使材料获得良好的力学性能。与 ART 工艺相比,采用 Q&T 工艺处理的含 Al 量较高的中锰钢具有更高的强塑积,因此对含 Al 量较高的中锰钢采用 Q&T 工艺会有较好的实际效果。文献[22]研究表明,0.2% C-8.5% Mn-3.0% Al-Fe 冷轧中锰钢经过淬火+回火处理后,组织中奥氏体含量较高,变形过程中 TRIP 效应明显,其抗拉强度、伸长率和强塑积分别达到 1160 MPa、53% 和 61 GPa·%。文献[23]研究表明,热轧态 0.2C-1.6Al-6.1Mn-Fe 中锰钢经过淬火+回火处理后,亚稳态奥氏体相稳定性适中,625 °C 淬火试验钢的力学性能最佳,强塑积达到 43.6 GPa·%。文献[24]研究表明,800 °C 淬火+250 °C 回火处理的 Fe-10Mn-0.44C-1.87Al-0.67V 中锰钢组织为细小马氏体+残留奥氏体+VC 碳化物,综合力学性能最佳,其强塑积达到 32.4 GPa·%。

3.3 淬火配分(Q&P)工艺

元素富集对中锰钢的综合力学性能也有着较大的影响,因此 Q&P 工艺是中锰钢的常见热处理工艺。Q&P 工艺是先将中锰钢加热至 A_{c3} 温度以上进行奥氏体化,再在马氏体转变起始温度和终了温度区间,即 $M_s \sim M_f$ 区间某温度下淬火,获得马氏体与亚稳奥氏体组织,最后通过低温回火使碳、锰、硅等元素从马氏体配分到亚稳态奥氏体中,进而得到稳定的奥氏体组织。中锰钢经 Q&P 处理后,组织中的马氏体可以增加钢带强度,组织中残留奥氏体也在变形过程中通过 TRIP 效应增强增塑,最终使中锰钢达到良好的强塑性配比。文献[25]研究表明,经 Q&P 处理后,冷轧态 Fe-3.08Mn-0.2C-1.85Si-0.05Nb 中锰钢组织为回火马氏体(TM)、铁素体(Ferrite)和残留奥氏体,其 SEM 组织如图 3 所示。与 140 °C 淬火试验钢相比,180 °C 淬火试验钢中白亮部分的残留奥氏体明显增多,说明淬火温度升高,试验钢残留奥氏体含量增加。淬火温度为 180 °C 时,试验钢综合力学性能最佳,强塑积最高为 30.3 GPa·%。

文献[15]研究表明,经 170 °C 淬火+400 °C 配分处理的热轧态 Fe-5Mn-0.23C-1.5Si-0.4Ni 中锰钢组织为马氏体和残留奥氏体。随着配分时间的延长,试验钢中残留奥氏体、奥氏体中含碳量先增加后减少,配分 20 min 的试验钢中残留奥氏体含量和奥氏体中含碳量

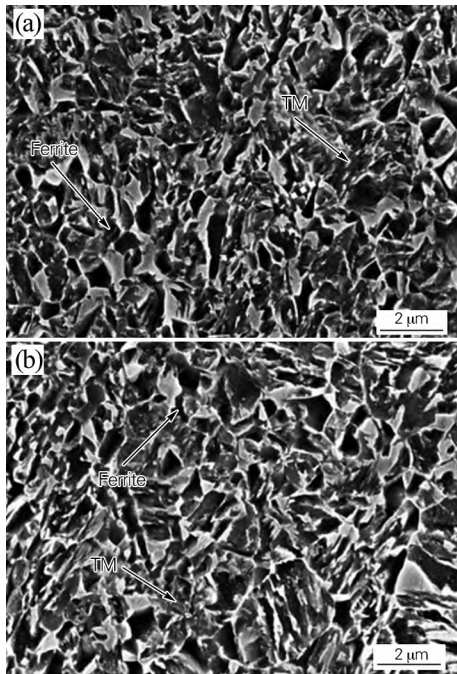


图3 不同温度淬火 Fe-3.08Mn-0.2C-1.85Si-0.05Nb 钢的 SEM 组织^[25]

Fig.3 SEM images of Fe-3.08Mn-0.2C-1.85Si-0.05Nb steel annealed at different temperatures^[25]
(a) 140 °C; (b) 180 °C

均最高。随着配分时间的延长,试验钢的硬度先升高后降低再升高,小载荷情况下试验钢的耐磨性不断下降,大载荷情况下试验钢的耐磨性不断增强。

4 结语

1) 中锰钢的主要化学元素有 Mn、C 和 Al。Mn、C 为奥氏体的稳定元素,合适的 Mn、C 含量使中锰钢在变形的过程中发生 TRIP 效应,获得马氏体组织,提高中锰钢的淬透性,但过高的 Mn、C 含量会导致偏析,不利于中锰钢的耐腐蚀性和焊接性能;适量 Al 的添加会改善中锰钢氢脆现象,使其获得良好力学性能。

2) 中锰钢通过固溶强化、细晶强化、析出强化、位错强化等机制与 TRIP、TWIP 等效应的协调强化,获得优良的强塑性匹配。TRIP 效应是中锰钢拥有良好综合力学性能的重要原因,亚稳态奥氏体相和应变形式是影响 TRIP 效应的两个主要因素。

3) 奥氏体逆转变(ART)工艺、淬火+回火(Q&T)工艺、淬火配分(Q&P)工艺是中锰钢常用的热处理工艺,通过合理的热处理工艺可以使中锰钢在室温条件下获得数量较多、稳定性适中的亚稳态残留奥氏体(RA)组织,在变形过程中展现出更好的 TRIP 效应,使其表现出更为优异的力学性能。

4) 高强度、高塑韧性的中锰钢已经基本可以满足当前汽车用先进高强钢的性能要求,为汽车轻量化材料提供了更多的选择,为汽车工业实现节能、环保、安全的生产目标提供了保障。当前中锰钢的实际批量生产中还存在很多问题需要进一步的探索解决,例如,中锰钢热处理工艺过程中的脱碳,大炉冶炼过程中中锰钢合金元素的控制,化学成分含量、晶粒尺寸、位错密度等因素对中锰钢中奥氏体稳定性的影响,中锰钢服役过程中在循环载荷作用下的疲劳性和可能发生的延迟开裂,吕德斯应变对冷轧中锰钢表面质量的影响,中锰钢抗氢脆、耐腐蚀特性等。以上这些问题还需科研工作者进一步探索,以使中锰钢成为可大规模应用的先进汽车用钢材料。

参考文献:

- [1] 刘倩,郑小平,张荣华,等. 新型汽车用高强度中锰钢研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2019, 33(7): 1215-1220.
Liu Qian, Zheng Xiaoping, Zhang Ronghua, et al. Medium manganese high strength steel for automotive application: Status quo and prospects [J]. Materials Reports, 2019, 33(7): 1215-1220.
- [2] Chen S P, Rana R, Haldar A, et al. Current state of Fe-Mn-Al-C low density steels [J]. Progress in Materials Science, 2017, 89: 345-351.
- [3] 白韶斌,牛伟强,肖文涛,等. 中锰钢的研究进展及未来研究展望[J]. 热加工工艺, 2022, 51(14): 1-9.
Bai Shaobin, Niu Weiqiang, Xiao Wentao, et al. Research progress and future research prospect of medium Mn steels [J]. Hot Working Technology, 2022, 51(14): 1-9.
- [4] Bouaziz O, Zurob H, Huang M. Driving force and logic of development of advanced high strength steels for automotive applications [J]. Steel Research International, 2013, 84(10): 937-947.
- [5] Emmanuel M D, Glover Alexandra G, Mueller Josh J, et al. Processing, properties, and microstructure interrelationships in medium manganese steels [J]. BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte, 2022, 167(11): 522-525.
- [6] 赵彦乐,邹宇明,丁桦. C 含量对冷轧 Fe-6Mn-1Al 中锰钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(2): 35-40.
Zhao Yanle, Zou Yuming, Ding Hua. Effect of C content on microstructure and mechanical properties of cold-rolled Fe-6Mn-1Al medium manganese steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(2): 35-40.
- [7] Kang S, Yan L, Yan X, et al. Effect of chloride ion concentration on stress corrosion cracking and electrochemical corrosion of high manganese steel [J]. High Temperature Materials and Processes, 2022, 41(1): 389-402.
- [8] 张楠. Al 微合金化中锰钢力学性能研究及退火前原始组织控制[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2022.
Zhang Nan. Study on mechanical properties and control of original structure before annealing of Al microalloyed medium manganese steel [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2022.

- [9] Rana R, Moor E D, Speer J G, et al. Effects of hot band annealing on the mechanical properties of cold-rolled and intercritically annealed medium manganese steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50(9): 4016-4020.
- [10] Sarmast-Ghahfarokhi S, Zhang S, Midawi A R H, et al. Mechanical properties and failure behavior of resistance spot welded medium-Mn steel under static and quasi-static shear-tension loading [J]. Welding in the World, 2022, 66(8): 1609-1622.
- [11] 董航宇. 超高强度双相钢中残留奥氏体的调控及其对机械性能的影响[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2018.
Dong Hangyu. Regulation of retained austenite in ultra-high strength dual-phase steel and its effect on mechanical properties [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2018.
- [12] 齐祥羽, 严玲, 李广龙, 等. 逆转变奥氏体稳定性对中锰钢强韧性的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(9): 205-210.
Qi Xiangyu, Yan Ling, Li Guanglong, et al. Effect of reversed austenite stability on strength and toughness of medium-Mn steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2021, 46(9): 205-210.
- [13] Cai H Z, Zhang M K, Jing Y S, et al. Influence of nickel on microstructure and mechanical properties of medium-manganese steels [J]. Materials Science and Technology, 2019, 35(1): 68-76.
- [14] 张磊, 吴泽启, 王存宇, 等. 奥氏体量及预应变对0.1C-4.98Mn中锰钢力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2021, 42(4): 71-74.
Zhang Lei, Wu Zeqi, Wang Cunyu, et al. Effect of austenite volume and pre-strain on the mechanical properties of 0.1C-4.98Mn medium manganese steel [J]. Special Steel, 2021, 42(4): 71-74.
- [15] 贾涓, 江萱, 蒋建江, 等. 淬火配分时间对一种中锰钢耐磨性的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(5): 270-274.
Jia Juan, Jiang Xuan, Jiang Jianjiang, et al. Effect of quenching-partition time on wear resistance of a medium manganese steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(5): 270-274.
- [16] Liang X K, Fu H, Cui M, et al. Effect of intercritical tempering temperature on microstructure evolution and mechanical properties of high strength and toughness medium manganese steel [J]. Materials, 2022, 15(6): 2162-2162.
- [17] 余海燕, 陈关龙, 李淑慧, 等. 不同应变方式下 TRIP 钢中残余奥氏体的体积分数随应变量的变化[J]. 钢铁研究学报, 2005, 17(2): 48-51, 78.
Yu Haiyan, Chen Guanlong, Li Shuhui, et al. Change of volume fraction of austenite with strain in TRIP steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2005, 17(2): 48-51, 78.
- [18] 蔡志辉, 张德良, 周彦君, 等. 应变速率对 Fe-11Mn-2Al-0.2C 中锰钢变形行为的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(7): 1041-1047.
Cai Zhihui, Zhang Deliang, Zhou Yanjun, et al. Effect of strain rate on deformation behavior of Fe-11Mn-2Al-0.2C medium-Mn steel [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2020, 41(7): 1041-1047.
- [19] 李楠, 时捷, 王存宇, 等. 两相区退火时间对冷轧中锰钢组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(8): 74-78.
Li Nan, Shi Jie, Wang Cunyu, et al. Effect of annealing time on microstructure and mechanical properties of a cold rolled medium manganese steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(8): 74-78.
- [20] 张献光, 宫本吾郎, 古原忠. 加热速率对逆转变奥氏体微观组织的影响[J]. 钢铁, 2019, 54(2): 83-89.
Zhang Xianguang, Miyamoto Goro, Gu Yuanzhong. Effects of heating rate on microstructure of reverted austenite [J]. Iron and Steel, 2019, 54(2): 83-89.
- [21] Li Z C, Li X J, Mou Y J, et al. Effect of Q&P and Q&T treatments on the stability of austenite and mechanical properties of steel 0.2% C-8.5% Mn-3.0% Al [J]. Metal Science and Heat Treatment, 2023, 64(9-10): 539-546.
- [22] Li Z C, Ding H, Misra R D K, et al. Microstructure-mechanical property relationship and austenite stability in medium-Mn TRIP steels: The effect of austenite-reverted transformation and quenching-tempering treatments [J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 682: 211-219.
- [23] 李帅帅, 王昕, 贾建文, 等. 淬火处理对中锰钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(1): 123-130.
Li Shuaishuai, Wang Xin, Jia Jianwen, et al. Effect of quenching treatment on microstructure and properties of medium-Mn steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2024, 45(1): 123-130.
- [24] Zhao Y, Yang D C, Yin X D, et al. 0.1C-11Mn medium manganese steel treated by quenching and tempering process [J]. Materials Science and Technology, 2022, 38: 1490-1500.
- [25] 王亚婷, 万德成, 冯树明, 等. 淬火温度对中锰 QP 钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2020, 45(5): 172-176.
Wang Yating, Wan Decheng, Feng Shuming, et al. Effect of quenching temperature on microstructure and mechanical properties of medium manganese QP steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(5): 172-176.

关于投稿注册作者邮箱地址有效性的说明

近期由于某些投稿作者邮箱的问题 给编辑部的稿件处理工作带来了不少困扰! 因此再次强调说明,《金属热处理》投稿网站中所有注册作者的信息务必准确,尤其需要保证邮箱地址的准确性和有效性! 如果邮箱地址填写错误或者邮箱不能正常收取邮件,这会严重影响作者收取有关稿件处理通知以及版面费的电子发票,导致稿件无法进入下一流程,从而耽误来稿的及时处理和刊出!

希望广大作者投稿时务必注意,尤其要注意确认一起署名的其他作者邮箱的准确性和有效性!

感谢大家的理解与支持!