

锰镍比对 Fe-Mn-Ni 系 TWIP 合金铸铁组织和力学性能的影响

王明杰^{1,2}, 朱定一¹

(1. 福州大学 材料科学与工程学院, 福建 福州 350116; 2. 福建工程学院 材料科学与工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 通过制备 4 种不同锰镍比的 TWIP 合金铸铁, 研究了锰镍比对 Fe-Mn-Ni 系 TWIP 合金铸铁组织和力学性能的影响。试验结果表明: 随着锰镍比从 3:2、2:1、3:1 和 4:1 逐渐增加, 铸铁铸态组织中的碳化物含量增加。在 1 050 °C 保温 10 h 后进行水淬, 就能使碳化物分解, 获得单相奥氏体基体组织。经过热处理后, 锰镍比为 3:2 的 TWIP 合金铸铁力学性能最佳, 其抗拉强度为 885 MPa, 伸长率为 29.7%。

关键词: 锰镍比; TWIP 效应; 组织; 力学性能; 铸铁

中图分类号: TG143.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2016)04-0352-04

Effects of Mn and Ni ratios on microstructures and mechanical properties of Fe-Mn-Ni TWIP alloy iron

Wang Mingjie^{1,2}, Zhu Dingyi¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;

2. College of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The Fe-Mn-Ni twinning induced plasticity (TWIP) alloy iron samples of four different Mn and Ni ratios were produced. The effects of Mn and Ni ratios on the microstructures and mechanical properties of TWIP alloy iron were studied. Experimental results show that with the increase of Mn and Ni ratios from 3:2 to 4:1, the carbides in the iron increase. The samples were water-quenched after heating 10 hours at 1,050 °C to decompose the carbides completely to obtain single austenite structure. The TWIP alloy iron with Mn and Ni ratio of 3:2 has the best mechanical properties after heat-treatment with a tensile strength of 885MPa and an elongation of 29.7%.

Keywords: Mn to Ni ratio; twinning induced plasticity (TWIP) effect; microstructure; mechanical property; iron

铸铁以其价廉易用在工业领域里得到广泛应用,但是铸铁属于脆性材料,伸长率几乎为零,限制了铸铁材料在一些特殊领域里的应用^[1]。随着科学技术的发展和科技水平的提高,在不断提高铸铁强度的同时,对铸铁的塑性也提出了很高的要求。研制出具有高强度高塑性的铸铁材料成

为当今材料科学的重要研究目标^[2]。

球墨铸铁因其石墨对基体组织切割作用小,故而具有较高的力学性能,但是目前普通的球墨铸铁的伸长率仍然比较低,只能达到 QT600-5、QT700-2 的水平^[3-5]。上世纪 70 年代开发出具有高强度高塑性的 (austempered ductile iron, ADI

收稿日期: 2016-06-29

基金项目: 福建省科技厅工业引导性重点项目 (2011H0001); 福建工程学院科研发展基金 (GY-Z10069)

第一作者简介: 王明杰 (1972-), 男, 山西万荣人, 副教授, 硕士, 研究方向: 高性能金属材料。

等温淬火)球墨铸铁。将优质球墨铸铁件进行等温淬火,以得到针状铁素体和富碳奥氏体混合组织,从而使 ADI 球墨铸铁具有较高的强度和塑性^[6]。林淑梅^[7] 和 黄芬芬^[8] 分别利用孪生诱发塑性(twinning induced plasticity, TWIP)效应,制备出了 Fe-Ni-Mn-C-Si 系 TWIP 合金铸铁和 Fe-Mn-C-Si-Cu-Ni 系 TWIP 合金铸铁,研发出具有 QT700-20 水平的球墨铸铁。

本文主要在 Fe-Mn-Ni 系 TWIP 合金铸铁(以下简称 TWIP 合金铸铁)基础上,通过调整不同的锰镍比,探索锰镍比对 TWIP 合金铸铁组织和力学性能的影响。

1 材料制备与试验方法

采用南非生铁(Fe 质量分数为 95.30%,C 质量分数为 4.52%,其余为杂质)为主料,使用电解镍、电解锰、75 硅铁和 20 钢进行成分调整。制备出锰镍比为 3:2、2:1、3:1 和 4:1 的 TWIP 合金铸铁,其成分如表 1。原铁液碳质量分数为 4.3%。使用中频感应炉熔炼,熔化温度为 1 520 ℃。使用稀土镁为球化剂进行球化处理,浇注前使用 75 硅铁进行孕育处理。将处理后的铁液浇注成“Y”形试块。铸锭的热处理工艺为:在 1 050 ℃下保温 10 h 后水淬。

将热处理后的铸锭线切割加工成标准板形拉伸试样。在 CMT6104 型万能试验机进行拉伸试验,变形速率为 10⁻³ s⁻¹。采用 XJZ-6A 立式金相显微镜进行金相组织分析。

表 1 TWIP 合金铸铁化学成分

Tab.1 Chemical composition of TWIP alloy iron

元素	Mn	Ni
	18.0	12.0
质量分数/	16.0	8.0
%	16.0	5.0
	16.0	4.0

2 试验结果与分析

2.1 金相组织分析

不同锰镍比的 TWIP 合金铸铁铸态组织如图 1。从图中可看出,尽管各铸铁试样锰镍比不同,但其铸态组织都是由奥氏体基体、碳化物和球状

石墨组成。随着锰镍比由 3:2 增加到 4:1,铸态组织中的碳化物含量不断增加。这些碳化物以厚片状碳化物为主,也存在部分块状碳化物。在锰含量相同的情况下,其碳化物的减少主要因为镍含量提高引起。因为镍和锰一样,可以扩大奥氏体相区,提高奥氏体的稳定性。同时,镍是一种非碳化物形成元素,有利于促进铸铁中碳化物的分解,减少碳化物数量^[9]。

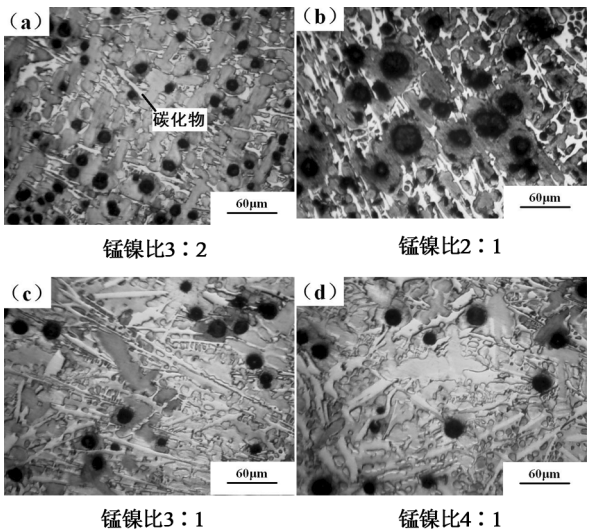


图 1 不同锰镍比的 TWIP 合金铸铁铸态组织

Fig.1 Casting microstructures of TWIP alloy iron with different ratios of Mn to Ni

碳化物的存在会提高铸铁的脆性,降低铸铁的塑性,对铸铁力学性能造成不良影响。通过适当的热处理可以消除碳化物对铸铁力学性能的不良影响。把试样在 1 050 ℃下保温 10 h 后进行水淬,其金相组织如图 2。铸态组织中的碳化物经过热处理已经完全分解。碳化物分解产生的碳原子部分固溶于奥氏体基体,对奥氏体基体产生固溶强化。还有一部分扩散到球状石墨表面,成为球状石墨的一部分^[10]。热处理后的奥氏体基体中产生了一部分退火孪晶。此时,铸铁的组织为奥氏体和球状石墨。这也是铸铁基体组织在受力变形过程中稳定发生 TWIP 效应的基础^[11]。

2.2 力学性能分析

表 2 是热处理后,不同锰镍比的 TWIP 合金铸铁试样在室温环境、变形速率为 10⁻³ s⁻¹ 下进行单向拉伸的力学性能数据。由表 2 可以得出,锰镍比为 3:2 时, TWIP 合金铸铁抗拉强度为 885 MPa,伸长率为 29.7%,具有最佳力学性能。

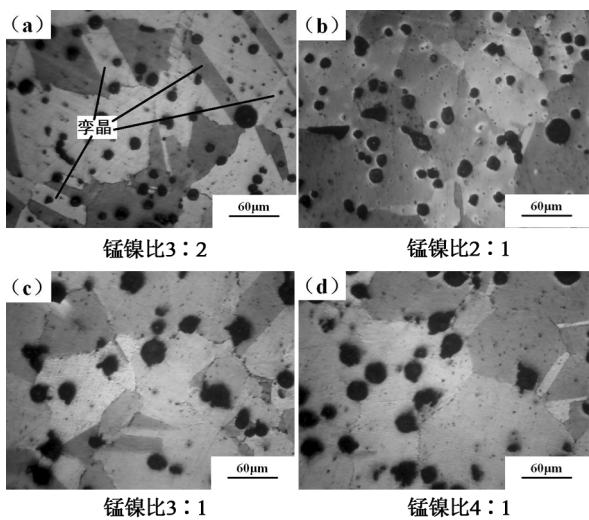


图 2 不同锰镍比的 TWIP 合金铸铁热处理后的组织
Fig.2 Microstructures of TWIP alloy iron with different ratios of Mn to Ni after heat treatment

随着锰镍比从 3 : 2 增加到 4 : 1, TWIP 合金铸铁抗拉强度从 885 MPa 降低到 640 MPa, 伸长率从 29.7% 减少为 16.2%。即随着锰镍比的增加, TWIP 合金铸铁力学性能降低。

表 2 不同锰镍比的 TWIP 合金铸铁力学性能
Tab.2 Mechanical properties of TWIP alloy iron with different ratios of Mn to Ni

锰镍比	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ /%
3 : 2	885	29.7
2 : 1	848	27.2
3 : 1	733	21.8
4 : 1	640	16.2

图 3 是不同锰镍比 TWIP 合金铸铁的工程应力-工程应变曲线。从工程应力-工程应变曲线可以看出, TWIP 合金铸铁都存在明显的屈服现象。而且当越过屈服阶段后, 随着变形过程的进行, 位错开始在晶界处聚集。当位错聚集到一定程度, 就会产生机械孪晶。机械孪晶的产生改变了晶粒滑移面法线、滑移方向与拉伸力的位向关系, 使得原先晶粒中处于硬位向的滑移体系转变成成为软位向的滑移体系。与未发生孪晶的情况相比, 显著增加了软位向滑移体系的数量, 从而表现出良好的塑性, 这就是 TWIP 效应。同时, 由于镍

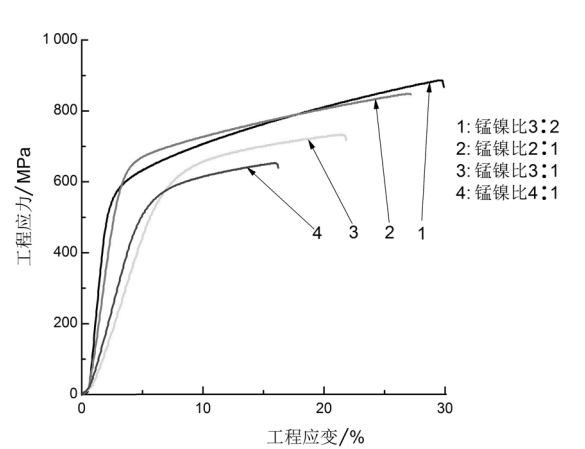


图 3 不同锰镍比的 TWIP 合金铸铁的工程应力-工程应变曲线
Fig.3 Engineering strain-engineering stress curves of TWIP alloy iron with different ratios of Mn to Ni

能够扩大奥氏体相区, 稳定奥氏体组织。奥氏体中可以溶解更多的碳原子, 产生更好的固溶强化作用, 提高奥氏体基体的强度。此外, 机械孪晶晶界本身也相当于亚晶界, 能够起到细晶强化的作用。在这几方面综合作用下, TWIP 合金铸铁表现出良好的强度和塑性。图 4 是 TWIP 合金铸铁拉断后的金相组织图(在断口附近取样)。从图中可以看出, 随着锰镍比增加, TWIP 合金铸铁变形组织中的机械孪晶数量减少。

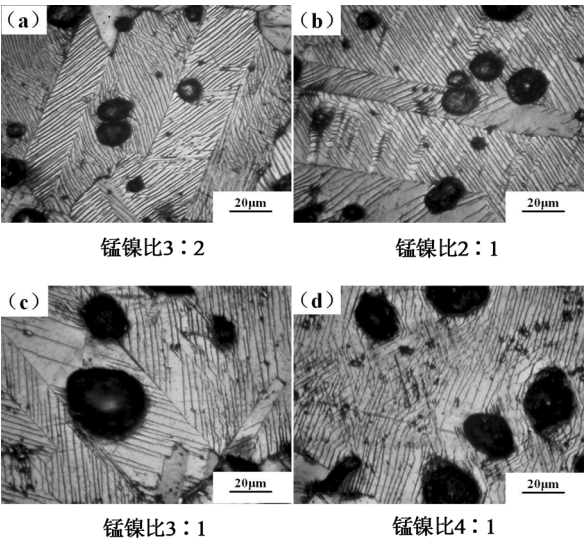


图 4 不同锰镍比的 TWIP 合金铸铁的拉伸变形组织
Fig.4 Deformation microstructures of TWIP alloy iron with different ratios of Mn to Ni

3 结论

1)Fe-Mn-Ni 系 TWIP 合金铸铁的力学性能随着锰镍比的提高而降低,在锰镍比为 3 : 2 时,力学性能最好。此时材料的抗拉强度为 885 MPa,伸长率为 29.7%。

2)随着锰镍比的提高,铸态组织中碳化物的含量逐渐增加。

3)通过热处理(1 050 ℃保温 10 h 后进行水淬)可以使 TWIP 合金铸铁铸态组织中的碳化物分解,得到单相奥氏体基体组织。

参考文献:

[1] 郝石坚.现代铸铁学[M].北京:冶金工业出版社,2004:353-364.
[2] 吴德海.球墨铸铁[M].北京:中国水利水电出版社,2006:50-68.
[3] 万仁芳.浅谈近年来铸铁件的发展[J].现代铸铁,2014,34(3):15-24.
[4] 王亚萍,高峰,王顺序,等.高强度、高伸长率球铁件的研究与开发[C]//第六届湖北省铸造学术年会论文集.北京:中国铸造协会,2013:66-69.
[5] 张伯明.六十年来我国铸铁材料的发展[J].铸造,2012,61(1):1-10.
[6] 张云,龚文邦,刘欢. ADI 的研究应用前景探讨[J].铸造,2014,63(5):439-443.
[7] 林淑梅,朱定一,杨泽斌,等.高强韧 TWIP 铸铁的形变组织与力学性能[J].铸造,2010,59(12):1267-1270.
[8] 黄芬芬,朱定一,宋卫涛,等. Mn 含量对高强韧 TWIP 球墨铸铁组织和性能的影响[J].铸造,2011,60(9):831-840.
[9] 陈希杰.高锰钢[M].北京:机械工业出版社,1989:98-99.
[10] 陆文华.铸造合金及其熔炼[M].北京:机械工业出版社,2008:73-90.
[11] Grassel O,Kruger 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.

(责任编辑:陈雯)

(上接第 343 页)

的最大沉降值,增长量在 8.2%~10.1%之间。在实际施工过程中,通过加强支护和优化施工参数等措施来确保施工过程的安全性。

2)盾构掘进对掌子面前方(未开挖部分为前方)土体的影响范围在 20 m 内,对后方(已开挖部分为后方)土体的影响范围在 30 m 内,整体范围约为隧道直径的 6 倍。对后方 30 m 处影响达到最大累计沉降,对前方 20 m 处及之后沉降影响

几乎为 0。且左、右隧道正上方地表的最大沉降值均出现在隧道中间正上方的位置。

3)监测值与计算结果虽存在一定的误差,但整体规律基本一致。验证了数值模拟分析方法在福州地铁一号线(罗汉山站~福州火车站区间)应用的合理性和适用性。在实际工程中可采取数值计算方法对盾构开挖过程中的路基沉降规律进行估算,从而提高施工过程中的可靠性和安全性。

参考文献:

[1] 霍军帅,王炳龙,周华顺.地铁盾构隧道下穿城际铁路地基加固方案安全性分级[J].中国铁道科学,2011,32(5):71-77.
[2] 张印涛,陶连金,边金.盾构隧道开挖引起地表沉降数值模拟与实测分析[J].北京工业大学学报,2006,32(4):332-337.
[3] 肖立,张庆贺.盾构长距离下穿铁路股道引起的地表沉降分析[J].上海交通大学学报,2011,45(5):672-676.
[4] 肖立,张庆贺.铁路轨道下盾构施工所致地面沉降的数值模拟[J].同济大学学报,2011,39(9):1286-1265.
[5] 吕培林,周顺华.软土地区盾构隧道下穿铁路干线引起的线路沉降规律分析[J].中国铁道科学,2007,28(2):12-16.
[6] 吴波,高波,索晓明.地铁隧道开挖与失水引起地表沉降的数值分析[J].中国铁道科学,2004,25(4):59-63.
[7] 铁道第一勘察设计院.铁路路基设计规范:TB10001-2005[S].北京:中国铁道出版社,2005.
[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部.盾构法隧道施工与验收规范:GB50446-2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.

(责任编辑:陈雯)