● 材料改性 Material Propertiest ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.05.016

时效温度对超高锰钢组织及性能的影响

赵跃林[1],陈思达[2],高炳臣[1],李祖来[2],冯海滨[1],山 泉[2]

(1. 云南昆钢耐磨材料科技股份有限公司,云南 昆明 653400; 2. 昆明理工大学 材料科学与工程学院,云南 昆明 650093)

摘 要:超高锰钢作为替代传统的高锰钢的耐磨材料,在高应力、高冲击工况条件下具备优异的抗磨性能,具有比传统高锰钢更高的奥氏体稳定性和水韧处理固溶能力,更快的加工硬化速率,较好的耐磨性。制定了5种不同时效温度的热处理工艺,研究时效温度对合金化超高锰钢的组织和性能的变化规律。实验结果表明:在时效温度为400～600 ℃,随着时效温度的升高,碳化物数量增多,奥氏体晶粒逐渐增大。在400～450 ℃,随着时效温度的升高,碳化物逐渐增多,大部分处于晶粒内部,少量位于奥氏体晶界处,在500～600 ℃,500 ℃时碳化物逐渐析出于晶界处,到600 ℃时碳化物大量存在于晶界处,少量存在于晶粒内。因此硬度逐渐增加,冲击韧度先增大后减小,屈服强度、抗拉强度、断后伸长率均呈先增加后减小的趋势,时效温度为450 ℃时力学性能最好。

关键词:时效温度;超高锰钢;合金化;碳化物;耐磨性

中图分类号:TG156 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)05-0390-07

Effect of Aging Temperature on Microstructure and Properties of Ultra-high Manganese Steel

ZHAO Yuelin[1], CHEN Sida[2], GAO Bingchen[1], LI Zulai[2], FENG Haibin[1], SHAN Quan[2]

(1. Yunnan Kungang Wear Resistant Material Technology Co., Ltd., Kunming 653400, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Five kinds of heat treatment processes with different aging temperatures were developed to study the effect of aging temperature on the microstructure and properties of alloyed ultra-high manganese steel. The results show that with the increasing of aging temperature at 400~600 ℃, the amount of carbide increases and the austenite grain gradually increases. At 400~450 ℃, with the increasing of aging temperature, the carbides gradually increase, most of which are located in the grain interior and a small amount at the austenite grain boundary. When aging at 500~600 ℃, carbides gradually precipitate at grain boundaries at 500 ℃, and a large amount of carbides exist at grain boundaries and a small amount in grains at 600 ℃. Therefore, the hardness increases gradually, the impact toughness increases first and then decreases, the yield strength, tensile strength and elongation after fracture all increase first and then decrease, and the mechanical properties are the best when the aging temperature is 450 ℃.

Key words: aging temperature; ultra-high manganese steel; alloying; carbide; wear resistance

英国研究人员Robert-Hadfield于1882年首次发明了高锰钢,所以高锰钢也被大家称之为Hadifield钢[1]。水韧处理后的高锰钢通常为单一稳定的奥氏体组织,具有极高的韧性及加工硬化能力。在强冲击、高应力的工况条件下迅速发生加工硬化,硬度能得到大量提升,而高锰钢内部依旧保持良好的韧性,内外性能的结合使高锰钢拥有较好的耐磨性[2]。随着现代工业的蓬勃发展和科学技术的突飞猛进,高锰钢仍然作为重载列车、凿岩机械人、新型坦克等先进装备中的首选耐磨材料[3]。

早期我国研究学者主要研究针对高锰钢的合金化处理,改善高锰钢铸造工艺,进行变质处理和完善热处理工艺等方面来提高高锰钢性能。何力等人对高锰钢进行变质处理,在高锰钢中添加了稀土和铬,改善了碳化物的形貌,得到颗粒状碳化物有效强化高锰钢[4]。霍文霞等人在高锰钢中添加稀土元素使性能达到最好[5]。蔡家财等人在传统高锰钢中添加Cr、V、Ti和Re,使高锰钢奥氏体晶粒得到细化,改善碳化物形貌及分布,大大提高了耐磨性[6]。李世峰等人采用新型铁砂造型的消失模铸造工艺,并进行合金化处理,来强化高锰钢[7]。闫华等人在传统的高锰钢中加入Mo和Cr提高高锰钢的力学性能[8]。

随着我国工业化的不断发展,国内金属矿业、冶金、耐磨材料等领域对高锰钢的使用要求越来越高,如何进一步提高高锰钢力学性能和耐磨性成为研究

收稿日期:2020-12-28
基金项目:云南省基础研究计划重点项目(2019A003)
作者简介:赵跃林(1964—),云南大理人,工学学士,铸造工程师.主要从事V法铸造设计方面的工作.
电话:18687161595,Email:1069119399@qq.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

学者们主要攻克的难关。涂斌等人研究超高锰钢衬板的耐磨性，将高锰钢的锰含量提高到20.9%，再辅以微量的W、V元素，得到具有超高耐磨性的超高锰钢[9]。

近年来国外研究学者主要致力于高锰钢的合金化处理、优化成分和热处理工艺以及加工硬化机理等方面的研究，Bevis Hutchinson等人进行不同变形速率的拉伸和压缩试验，研究得到，形变孪晶对加工硬化的作用值是位错强化的两倍[10]。Michael F Henry等人研究高温合金相的稳定性，采用热力学计算的方法，研究显示可以较好精准的预测γ相的温度性，为新合金的配比提供有力帮助[11]。Procast模拟铸造软件由法国ESI公司发明，能够精确模拟铸造充型及凝固过程中的温度场、应力场和铸造中缺陷产生的原因[12]。M.C.Uuxalel研制的超高锰钢在寒冷条件下具有较高的冷脆抗力[13]。R.W.Smith等人研究位错现象在金相组织中的作用，分析提高高锰钢强韧化的方法[14]。

国内外研究详细说明了不同合金元素在高锰钢中的作用，添加一种或多种合金元素对高锰钢的影响，合金的综合添加量，变质剂的选择和最佳含量，铸造工艺及热处理工艺的完善，在此基础上，本文作者对超高锰钢成分设计、合金添加量和热处理工艺设计等进行研究。

1　实验材料与方法

1.1　制备工艺及时效温度设计

材料采用V法制备，并且采用水韧处理，化学成分w（%）为：0.85 C，0.76 Si，17 Mn，2 Cr，0.1 Ti，0.3 V，0.1 Nb，0.45 Cu，0.7 Mo，0.25 Ni，0.003 N。水韧处理工艺图如图1。

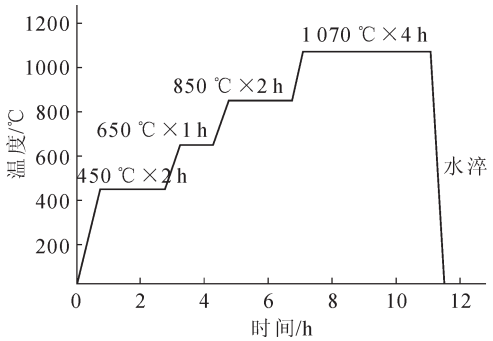


图1　水韧处理工艺

Fig.1　Water toughening treatment process

为探究时效温度对超高锰钢组织及性能的影响，寻找一个合适的温度范围满足超高锰钢组织及性能的使用需要，时效工艺设计为在水韧处理后正常加热速率分别加热到400、450、500、550、600 ℃共同保温4 h后空冷至室温，所用炉子为NCL2010-1105台车式电阻炉，时效工艺图如图2。

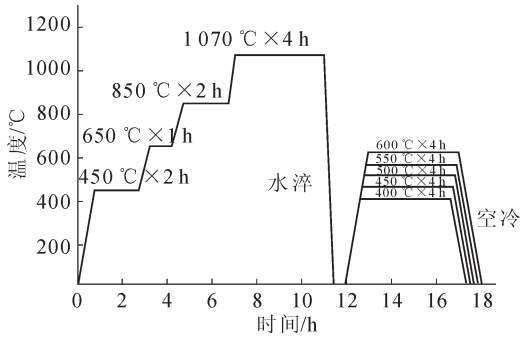


图2　时效处理工艺

Fig.2　Aging process

1.2　组织表征及性能测试

1.2.1　金相组织制备及分析

金相实验样品用稀释的王水溶液进行腐蚀，在Nikon Eclipse MA200金相显微镜上观察样品的显微组织。整理好后的金相照片在Image-Pro plus软件上统计奥氏体晶粒度来分析奥氏体平均晶粒尺寸的变化。

1.2.2　扫描电子显微镜检测分析

超高锰钢的析出相形貌、种类、分布、尺寸及体积分数，拉伸断口和冲击断口以及磨损形貌都在ZEISS EVO18-21-57扫描电子显微镜上进行。扫描电子显微镜上的能谱分析仪（EDS）用于测量元素的含量及其分布，SEM样品的制备过程与金相制备大致相同。

1.2.3　力学性能测试

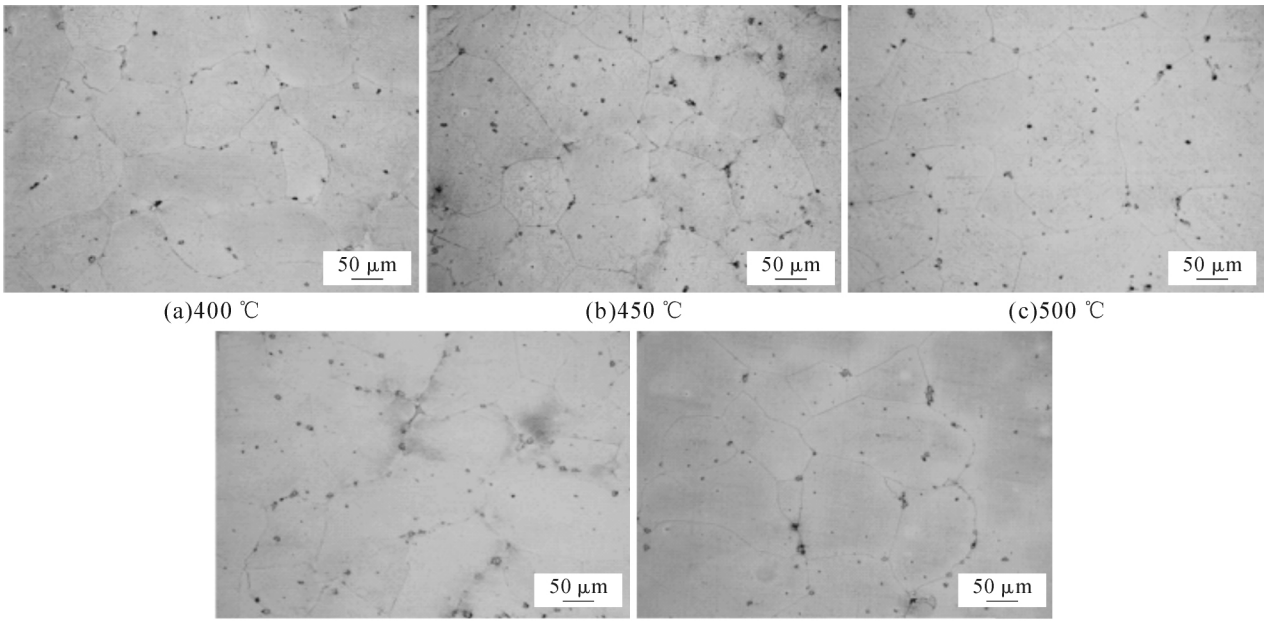
硬度样品在HBE-3000A电子布氏硬度计上进行硬度测试，每个样品测定5个硬度点，取其平均值。材料拉伸性能在SHT4305微机控制电流伺候万能试验机上进行，主要测量材料的抗拉强度（δ_b）、屈服强度（δ_s）以及断后伸长率。材料冲击韧度在摆锤式冲击试验机JBT-50上进行。冲击磨料磨损测试采用MLD-10型动态载荷冲击磨损试验机进行。在室温条件下，实验选择3.0 J冲击功，冲击时长为2.5 h，每0.5 h间隔测量一次磨损失重量。

2　实验结果与分析

2.1　时效温度对超高锰钢组织的影响

图3超高锰钢不同时效温度组织金相图，从图中可以看出，超高锰钢时效处理后组织为奥氏体和碳化物，图(a)时效温度为400 ℃时，奥氏体尺寸较为均匀，此时碳化物的数量最少，碳化物主要存在于奥氏体晶粒内，少量存在奥氏体晶界处，图(b)时效温度450 ℃时，奥氏体尺寸较400 ℃有一定长大，碳

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)400 ℃ (b)450 ℃ (c)500 ℃

(d)550 ℃ (e)600 ℃

图 3 不同时效温度下超高锰钢的微观组织

Fig.3 Microstructure of ultrahigh manganese steel at different aging temperatures

化物数量多于 400 ℃，大量碳化物存在于奥氏体晶粒内，少量碳化物存在于奥氏体晶界处，图(c)时效温度为 500 ℃，此时的超高锰钢奥氏体晶粒尺寸进一步扩大，碳化物数量增加，碳化物开始位于晶界处有聚集的倾向，此时位于晶界处的碳化物较 450 ℃明显增多，块状碳化物位于晶界处虽然有钉扎晶界阻碍晶粒运动从而细化晶粒作用，但是晶界处的块状碳化物也是裂纹产生的源头，会使超高锰钢脆化对力学性能有不利影响，图(d)时效温度为 500 ℃，此时奥氏体晶粒尺寸进一步变大，碳化物数量进一步增加，碳化物开始大量聚集于晶界处，碳化物尺寸也明显变大，图(e)时效温度为 600 ℃，此时的奥氏体晶粒尺寸最大，碳化物大量存在晶界处，少量存在晶粒内。

图 4 为不同时效温度奥氏体粒径分布直方图，从图中可以看出 5 种不同时效温度的超高锰钢奥氏体晶粒尺寸主要分布在 100~325 μm，而晶粒尺寸集中分布在 150~325 μm，总体呈现出正态分布特点，说明实验超高锰钢析出相尺寸较均匀，时效温度为 400 ℃的超高锰钢试样奥氏体晶粒平均尺寸最细 171.55 μm，随着钒时效温度的增加奥氏体晶粒平均尺寸从 171.75 μm 最终增加至 247.05 μm，从图(d)中可以看出奥氏体晶粒平均尺寸随着时效温度的增加逐渐增加。

2.2 时效温度对超高锰钢力学性能的影响

2.2.1 硬度性能

图 5 是不同时效温度超高锰钢布氏硬度图，从图中得到，布氏硬度最低为 400 ℃时只有 227.5 HBW，而 600 ℃时布氏硬度最高为 240.5 HBW，随着时效温度的增加，超高锰钢布氏硬度也逐渐增加，这是由于在 600 ℃时碳化物数量最多，因此布氏硬度最高。

2.2.2 冲击韧度

图 6 是不同时效温度超高锰钢冲击韧度，从图中可以得到在 400～600 ℃时随着时效温度的增加超高锰钢呈现先增加后减小的现象，在 450 ℃时冲击吸收能量最大为 91.2 J，而 600 ℃时冲击吸收能量最小为 58 J。

2.2.3 拉伸性能

图 7 不同时效温度超高锰钢拉伸性能，图(a)是不同时效温度下超高锰钢的屈服强度，图中可以看出屈服强度均在 500 MPa 以上，在 400～600 ℃时，呈现先增加后减小的趋势，时效温度为 600 ℃时屈服强度最低为 518 MPa，时效温度为 450 ℃时屈服强度达到顶峰为 546 MPa，造成这个现象的主要原因为时效温度为 400 ℃和 450 ℃时，奥氏体晶粒度最小，析出相主要存在于晶粒内，少量存在于晶界处，这时析出相对超高锰钢的屈服强度强化效果最好。而时效温度为 500 ℃时析出相开始较多在晶界处析出，大量聚集于晶界的析出相是裂纹萌生的主要原因，所以屈服强度呈现下降的趋势。

图(b)(c)是不同时效温度下超高锰钢抗拉强度和断后伸长率，和屈服强度呈现相同变化，也都是呈现先增大后减小的趋势，一般结构钢的塑性是随着强度的增加而降低，而超高锰钢的塑性是随着强度增加而增加，这是超高锰钢区别于一般结构材料的特点，因此具有较高屈服强度的超高锰钢其抗拉强

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

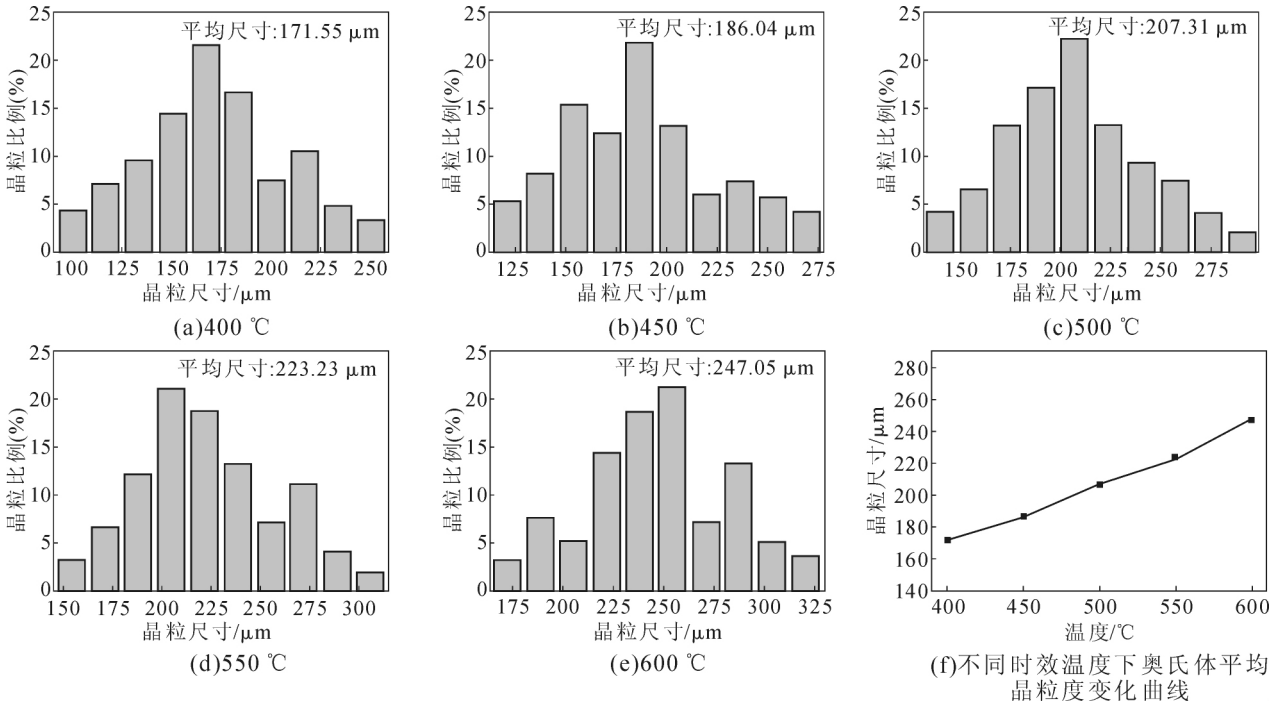


图 4 不同时效温度下超高锰钢奥氏体晶粒度分布直方图

Fig.4 Histogram of austenite grain size distribution of ultrahigh manganese steel at different aging temperatures

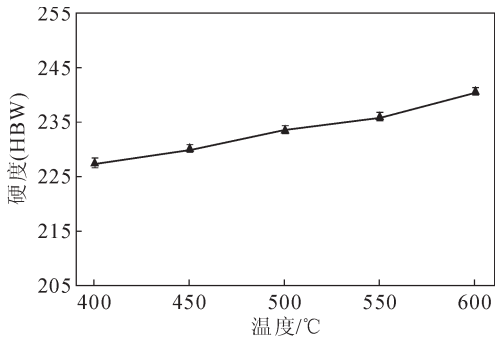


图 5 不同时效温度下超高锰钢的硬度

Fig.5 Hardness of ultrahigh manganese steel at different aging temperatures

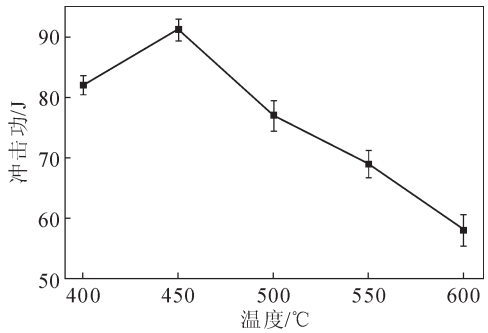


图 6 超高锰钢在不同时效温度下的冲击韧度

Fig.6 Impact toughness of ultrahigh manganese steel at different aging temperatures

度和断后延伸率也会相应提高，所以屈服强度、抗拉强度和断后伸长率会呈现相同的变化规律。所述，时效温度为 450 ℃拉伸性能最好，屈服强度为 546 MPa、抗拉强度为 688 MPa、断后伸长率为 28.5%，而时效温度为 600℃拉伸性能最低，屈服强度为 518 MPa、抗拉强度为 614 MPa、断后伸长率为22%。

图 8 为超高锰钢不同时效处理状态的拉伸断口形貌，从图中可以看到韧窝状是其主要断口形貌，呈现典型的韧性断裂特点，图(a)时效温度为 400 ℃下的拉伸断口形貌，图中分布数量较多几何尺寸大的韧窝，韧窝深度深，韧窝中几乎没有析出相颗粒，

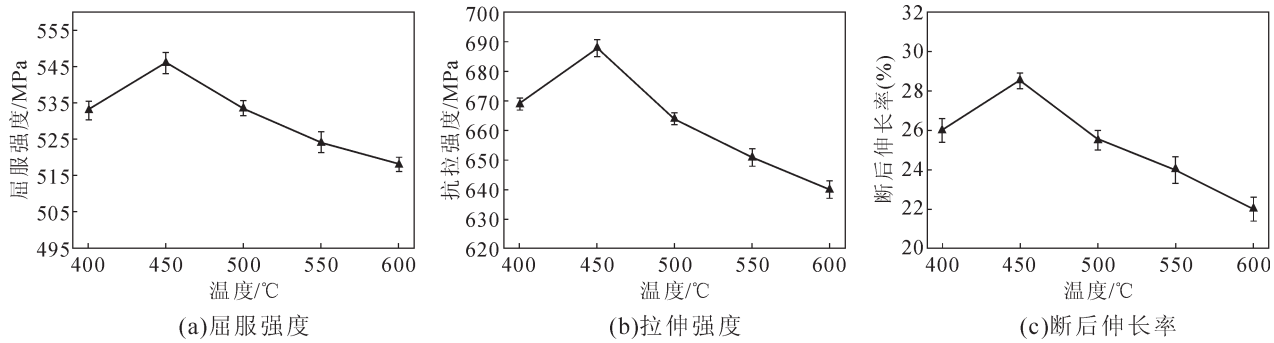
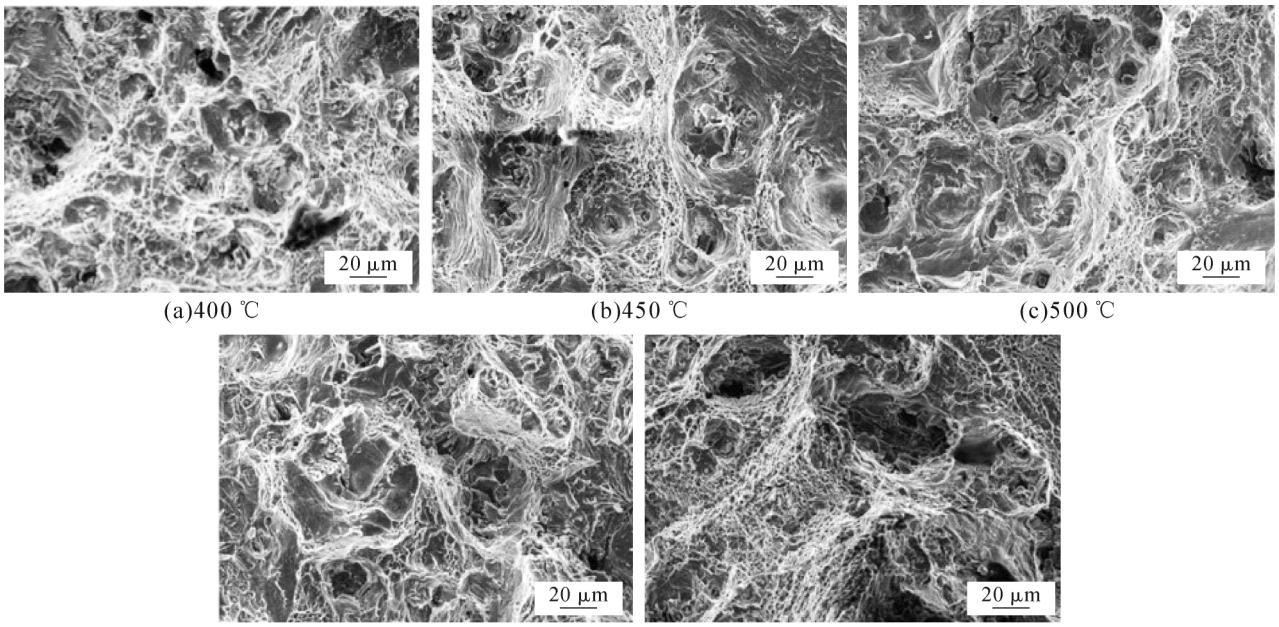


图 7 超高锰钢在不同时效温度下的拉伸性能

Fig.7 Tensile properties of ultrahigh manganese steels at different aging temperature

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)400 ℃ (b)450 ℃ (c)500 ℃

(d)550 ℃ (e)600 ℃

图 8 不同时效温度下超高锰钢的拉伸断口扫描电镜形貌

Fig.8 SEM morphology of tensile fracture of ultrahigh manganese steel at different aging temperature

图(b)时效温度为 450 ℃下的拉伸断口形貌，图中有数量较 400 ℃更多几何尺寸更大的韧窝，深度更深，较少韧窝中存在细小的析出相颗粒，此时的断口韧性最佳，图(c)时效温度为 500 ℃下的拉伸断口形貌，图中存在较少几何尺寸大小不均的韧窝，尺寸大的韧窝深度较深，尺寸小的韧窝深度浅，尺寸大的韧窝中存在数量较多尺寸较大的析出相颗粒，尺寸小的韧窝中存在细小的析出相颗粒，图(d)时效温度为 550 ℃下的拉伸断口形貌，图中含有少量几何尺寸大小不均的韧窝，深度均较浅，韧窝中含有较大尺寸的析出相颗粒，图(e)时效温度为 600 ℃下的拉伸断口形貌，图中分布少量几何尺寸大的韧窝，深度较浅，韧窝中含有较大尺寸的析出相颗粒。

2.2.4 冲击磨料磨损性能

图 9 为 3.0 J 冲击功，冲击时间为 2.5 h，每半小时测量一次磨损重量后得到的不同时效温度超高锰钢冲击磨料磨损性能。从图中看出时效温度为

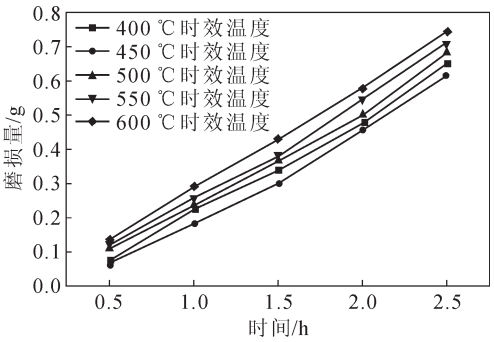


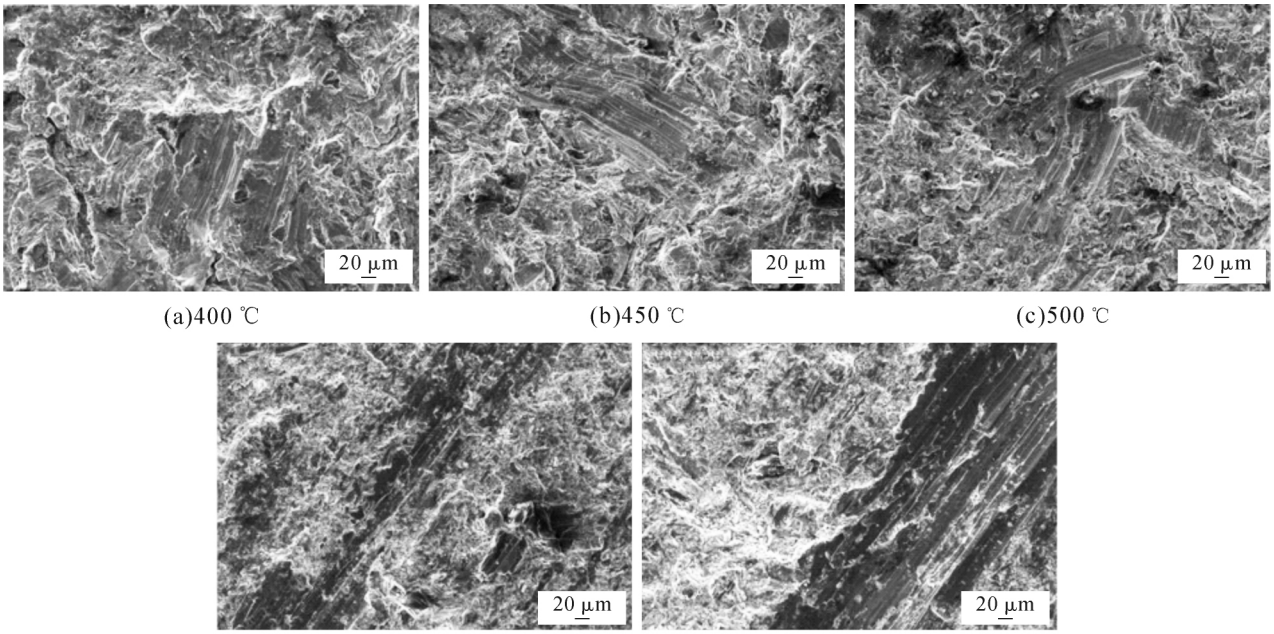
图 9 超高锰钢在不同时效温度下的冲击磨损性能

Fig.9 Impact wear properties of ultrahigh manganese steel at different aging temperatures

450 ℃时试样的耐磨性最好，其次是 400 ℃而 600 ℃时耐磨性最差，这也和力学性能相符合，时效温度为 450 ℃的组织和力学性能最好，耐磨性也最好。

图 10 是不同时效温度超高锰钢冲击磨损形貌图，从图中能看到不同时效温度的试样经冲击磨损后的表面形貌，超高锰钢冲击磨损表面形貌主要是以材料表面发生塑性变形引起的挤出棱为主，并且发生一定程度的剥落产生犁沟。图(a)时效温度为 400 ℃，磨损表面不平整，有明显的凿坑变形痕迹，可以看出磨面上分布着由于局部挤压而产生的较浅的犁沟，犁沟未出现贯穿，因此可以判断出磨损并不严重，图(b)时效温度为 450 ℃，磨损表面不平整，有一定的凿坑变形痕迹，磨面上分布着由于局部挤压而产生的较浅的犁沟，犁沟未出现贯穿，因此可以判断出磨损并不严重，图(c)时效温度为 500 ℃，磨损表面不平整，有多道凿坑变形痕迹，磨面上分布着由于局部挤压而产生的较深的犁沟，犁沟数量有所增加，犁沟未出现贯穿，因此可以判断出磨损进一步严重，图(d)时效温度为 550 ℃，磨损表面较为平整，有凿坑变形痕迹，磨面上分布着由于局部挤压而产生的较深的犁沟，犁沟出现贯穿痕迹，宽度较窄，因此可以判断出磨损较为严重，图(e)时效温度为 600 ℃，磨损表面较为平整，有凿坑变形痕迹，磨面上分布着由于局部挤压而产生的较深的犁沟，犁沟出现贯穿痕迹，且宽度较窄，因此可以判断出磨损最为严重，磨损形貌反应了材料的磨损状况，和耐磨性相符合，时效温度为 450 ℃磨损不严重，而时效温度

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



(a)400 ℃　(b)450 ℃　(c)500 ℃

(d)550 ℃　(e)600 ℃

图 10 超高锰钢在不同时效温度下的冲击磨损形貌

Fig.10 Impact wear morphology of ultrahigh manganese steel at different aging temperatures

为 600 ℃时磨损最为严重。

图 11 是不同时效温度超高锰钢冲击磨损后的显微硬度值，从图中能很较好的体现出超高锰钢加工硬化水准，时效处理后，碳化物沉淀相逐渐存在于超高锰钢晶粒内，析出相的析存在有效的减缓了位错的运动，推动位错在析出相周围聚集，提升其硬度，时效温度为 400 ℃时，基体中碳化物的数量最少，尺寸最细，均匀分布，碳化物阻碍位错滑移的效果最为显著，加工硬化能力最佳，在距离磨损表面 1.5 mm 左右的硬度与未发生加工硬化的基体硬度一致，硬化层深度在 1.5 mm 左右，硬化后显微硬度提升至 519 HV，随着时效温度的升高，奥氏体基体虽然存在更多碳化物，但碳化物尺寸逐渐长大，且渐渐有在晶界处聚集的趋势，这对超高锰钢加工硬化不利，因此，时效温度为 600 ℃时加工硬化能力最弱。

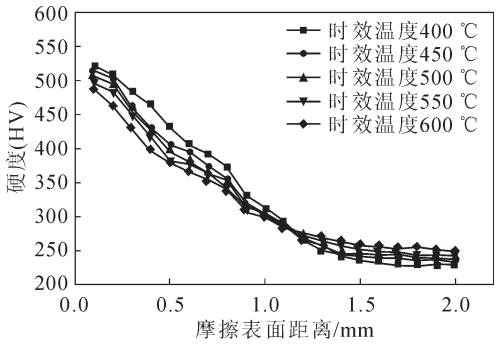


图 11 不同时效温度下超高锰钢冲击磨损后的显微硬度

Fig.11 Microhardness of ultrahigh manganese steel after impact wear at different aging temperatures

3 结论

（1）超高锰钢的组织在时效温度为 400～600 ℃，随着时效温度的增加，碳化物对晶界的钉扎力小于晶粒长大驱动力，因此超高锰钢奥氏体晶粒尺寸逐渐增加，析出驱动力增加，碳化物数量及尺寸也逐渐增加，在 400～450 ℃时，随着时效温度的增加，碳化物逐渐增加，主要分布于晶粒内部，少数位于晶界处，在 500～600 ℃时，碳化物逐渐析出于晶界处，到 600 ℃时碳化物大量位于晶界处，少量位于晶界内。在时效温度为 400～600 ℃析出相种类没有发生变化，数量和尺寸逐渐增大，在 500 ℃时析出相开始较多析出于晶界处，到 600 ℃时大量聚集析出于晶界处。

（2）超高锰钢的力学性能和耐磨性：①在时效温度为 400～600 ℃，随着时效温度的增加，奥氏体晶粒尺寸逐渐增加，碳化物尺寸和数量逐渐增加，在 400～450 ℃时，随着时效温度的增加，碳化物主要存在于晶粒内部，少数存在于晶界处，在 500～600 ℃时，碳化物逐渐析出于晶界处，到 600 ℃时碳化物大量位于晶界处，少量位于晶界内布氏硬度逐渐增加，因此初始布氏硬度逐渐增加，冲击韧性先增大后减小，屈服强度、抗拉强度、断后延伸率呈一致先增加后减小的变化规律，力学性能最好的是时效温度为 450 ℃时，初始布氏硬度为 230 HBW，冲击韧性为 91.2 J/cm^2，屈服强度为 546 MPa，抗拉强度为 688 MPa，断后伸长率为 28.5%；②超高锰钢耐磨性能最好的是时效温度为 450 ℃时，有良好的耐磨性，

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

磨损形貌显示磨损不严重，加工硬化能力好。

综上超高锰钢时效处理最佳温度为 450 ℃，在这个温度超高锰钢奥氏体均匀尺寸较小，碳化物数量较多，且主要存在于晶粒内，力学性能最佳，有良好的耐磨性，在 450 ℃时能最大提升超高锰钢性能。

参考文献：

[1] 杜健，汪永江. 奥氏体锰钢耐磨性的几点评述 [J]. 现代机械, 2004(4):96-98.
[2] 蔡家财. 合金化处理对高锰钢组织和性能的影响[D]. 长沙:湖南大学, 2014.
[3] 李树索. 高锰钢的发展与应用[J]. 矿山机械, 1998, 000(3):70-71.
[4] 何力，金志浩，卢锦德，等. 稀土变质处理及合金化对高锰钢组织结构的影响[J]. 金属热处理学报, 2000(3):51-54.
[5] 霍文霞，任慧平，金自力，等. 不同稀土加入量对高锰钢组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2012, 41(7):15-17.
[6] 傅定发，蔡家财，高文理. 多元合金化处理对高锰钢组织和性能的影响[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2014, 41(7):30-34.
[7] 李世峰，甘玉生，李永堂，等. 破碎机环锤制造工艺及性能研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(4):54-59.
[8] 闫华，谢敬佩，王文焱，等. 合金化高锰钢 ZGMn13CrMo 的组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2006(2):11-13.
[9] 涂斌. 超高锰钢耐磨衬板的制备工艺及组织性能研究[D]. 赣州:江西理工大学,2017.
[10] HUTCHINSON B, RIDLEY N. On dislocation accumulation and work hardening in Hadfield steel [J]. Elsevier Ltd, 2006, 55(4): 299-302.
[11] RITTER A M, HENRY M F, SAVAGE W F. High temperature phase chemistries and solidification mode prediction in nitrogen-strengthened austenitic stainless steels [J]. Springer-Verlag, 1984,15(7): 1339-1351.
[12] 邹晓文. ESI 集团宣布向市场推出新版本有限元铸造模拟软件[J]. 材料导报, 2005(7):23.
[13] 王家炘. 苏联破碎设备用的耐磨合金钢[J]. 铸造, 1989(9):5-8.
[14] SMITH M. Austenitc manganese steels-developments for heavy haul rail transportation [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2003,42(3): 333-342.

（上接第 389 页）

在进行有组织的排放，达到环保排放标准，对环境的污染几乎为零。

4 产品质量控制方面

提高产品质量不仅对企业发展有着至关重要的意义，还将对社会产生深远的影响。采用震动落砂机清砂的创新工艺，不但取得了实际的经济效益，而且从企业发展的角度考虑同样意义深远。

采用震动落砂机之前，操作者清砂时经常出现敲伤产品的情况，有的比较严重，有的比较轻，造成产品外观磕碰伤的情况很多，严重影响产品的合格率，而且还有可能出现外观缺陷的产品未及时检查挑选出来发往安装现场的情况，不但会造成损失，而且严重影响公司形象。现采用震动落砂机后，消除了手工清砂不可控因素，很好的解决这一问题，震动落砂机根据每个产品的形状配有工装夹具，稳定性非常高，操作非常便捷，操作工很容易上手而且设备非常稳定，很好的避免了清砂敲伤产品的情况，清砂工序产品报废率几乎为零。

5 结论

（1）自从铸造车间使用该设备后，清砂工序生产效率大大提高，产品质量得到保证，同时，生产作业环境也大大改善，有利于生产作业人员的身心健康发展。

（2）由于棘轮本体，结构复杂且笨重，后续考虑采用机械手臂上料系统，减轻操作工的劳动强度。

参考文献：

[1] 刘小龙. 现代铸件清理方式 [J]. 铸造设备与工艺, 2011(8):6-7,36.
[2] 阎荫槐. 铸件落砂清理技术设备的发展与展望 [J]. 铸造设备研究, 2000(2):1-7,38.
[3] 郭敬文，张汉强，张志方. 振动落砂破碎一体机的应用[J]. 铸造设备与工艺, 2012(4):8-10.
[4] 谢其林，魏喜新. 滚筒式落砂设备及其使用[J]. 中国铸造装备与技术. 2000(2):11-13.
[5] 于海涛. 论铸件的落砂与表面清理[J]. 一重技术. 2009(6):56-57.

杭州文特机电有限公司

热处理炉、加热炉、工业自动化工程、环保节能工程、机电设备的设计、制造、加工、安装、技术开发、技术咨询、技术服务。工业自动化设备、仪器仪表、工业炉窑配件、计算机等的生产、批发、零售。

地址：杭州市西湖区万塘路 262 号 6 号楼 5-65 室
厂址：长兴县林城镇午山岗开发区
联系人：丁为兵
电话：15088362822
传真：0572-6087688
邮箱：dwb150@163.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net