

ZG06Cr13Ni4Mo 不锈钢的强韧化研究现状

宋 蕾^{1, 2}, 赵 岭^{1, 2}, 高云保², 王增睿^{1, 2}, 史同瑞², 陈 瑞^{1, 2}

(1. 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022; 2. 沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022)

摘要: 低碳马氏体不锈钢ZG06Cr13Ni4Mo是应用较为广泛的一种马氏体铬镍不锈钢。本文介绍了铸造不锈钢ZG06Cr13Ni4Mo的成分、组织及强韧性特点。总结了ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢纯净化、铬/镍当量调整、合金化、热处理等强韧化方法, 并展望了该钢种强韧化的成分设计方法及电渣重熔工艺。

关键词: ZG06Cr13Ni4Mo; 低碳马氏体不锈钢; 强韧化方法; 成分设计; 电渣重熔

ZG06Cr13Ni4Mo铸造低碳马氏体不锈钢具有较高的强度、良好的韧性以及优良的铸造性和服役性能(耐腐蚀、抗气蚀等), 在电力工业和石化领域有广泛的应用, 如水电站设备所用的大型铸件、泵阀类铸件、石油开采用的无缝管、输送管道、液态天然气输送管线和天然气处理设施等。随着高水头电站的建设和油田开发深度的不断加大, 高强低碳马氏体不锈钢市场需求巨大。作为水电站和油田开采建设的重要候选材料之一, 如何兼顾高强度和韧性是ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢未来的重点发展方向。

本文主要介绍了ZG06Cr13Ni4Mo铸造不锈钢的强韧化现状, 并展望了该钢种强韧化的成分设计方法及电渣重熔工艺, 以期ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的强韧化提供借鉴。

1 ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢概述

ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢是在ZG1Cr13不锈钢的基础上发展而来的。ZG1Cr13不锈钢用于早期水轮机制造, 具有一定的强度、塑性、优良的耐腐蚀性和良好的结构稳定性。然而, 随着水电设备大型化, 水轮机转轮制造和后期维护过程中需要进行大量的焊接工作, ZG1Cr13不锈钢焊接工艺性能较差, 冷却时易在焊缝和不完全熔化区、过热区产生裂纹, 因此研究人员将含碳量降低至0.06%以下(后期碳逐步降到0.04%或0.03%以下), 同时为了在高温下获得稳定均匀的奥氏体, 又在钢中加入3.5%~5%镍, 并加入少量钼, 以提高回火稳定性, 研制出了ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢, 其成分范围如表1所示^[1]。

ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的铸态组织: 板条状马氏体+ δ -铁素体, 如图1a。采用适当的热处理后可获得板条状回火马氏体与逆变奥氏体的复相组织, 有时含有少量的 δ -铁素体以及少量均匀分布的细小碳化物或碳氮化物, 如图1b^[2-4]。

马氏体内具有高位错密度, 可保持材料具有较高强度。强化效果与马氏体板条尺寸有关, 原奥氏体晶粒越细, 马氏体板条尺寸(亚结构)越小, 材料性能越好。

逆变奥氏体是马氏体不锈钢在两相区温度范围内回火时发生马氏体向奥氏体的

作者简介:

宋 蕾(1996-), 女, 硕士生, 主要研究方向为特种钢材料及工艺。E-mail: 771050413@qq.com

通讯作者:

陈 瑞, 男, 研究员, 副总工程师, 硕士。E-mail: Chenrui320@sina.com

中图分类号: TG142.71

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)11-1259-06

基金项目:

辽宁省自然科学基金(No.2020-BS-279)。

收稿日期:

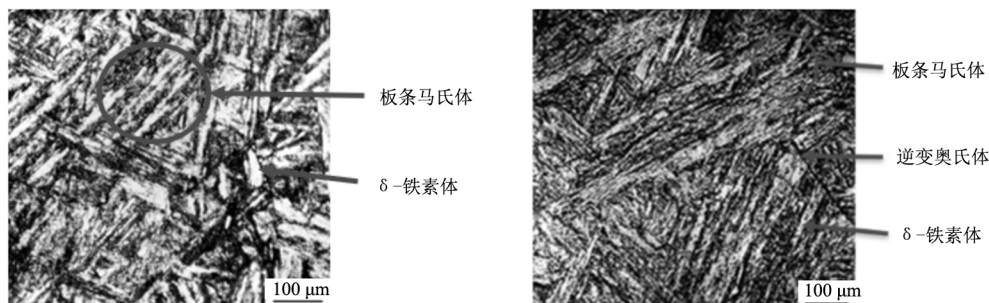
2021-08-13 收到初稿,

2021-10-11 收到修订稿。

表1 ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of the ZG06Cr13Ni4Mo stainless steel $w_B/\%$

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
≤ 0.06	≤ 0.80	≤ 1.00	≤ 0.035	≤ 0.025	11.5~13.5	3.5~5.0	0.4~1.0



(a) ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的铸态组织 (b) ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢热处理后的组织

图1 ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的铸态组织和热处理后组织

Fig. 1 Microstructures of the ZG06Cr13Ni4Mo stainless steel under as-cast and heat treatment conditions

逆转变所形成的，这种奥氏体内部富集大量奥氏体形成元素，冷却时可保留至室温，即使在-196℃也能稳定存在^[5]。逆变奥氏体通常呈块状或盘状弥散分布在低碳马氏体板条之间或原奥氏体晶界处，且与马氏体基体呈现Nishiyama-Wassermann关系^[6]。张盛华等人^[7]发现：在应变作用下，ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢中逆变奥氏体含量逐渐减少，产生形变诱发马氏体相变（TRIP效应），起到形变强化作用。已有研究表明：逆变奥氏体可改善材料的韧性而不明显降低材料的强度^[8]。

沿原奥氏体晶界分布的白亮色条块状组织是δ铁素体，该相形成温度较高，在后续热处理工艺中无法消除。通常呈块状分布于原奥氏体晶界，相内易形成大量树枝状碳化物，从而恶化钢的冲击韧性。

因而，在选用适当的成分和热处理工艺后，具有低碳板条马氏体和逆变奥氏体复相组织的ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢有着优良的强韧性，具体力学性能如表2所示。

ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的强韧性介于高强低合金钢与TRIP钢之间（图2^[9]），大多数TRIP钢等高强钢均需通过轧制细化组织而获得高性能，而ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢经铸造即可获得较好的性能，通过热处理细化晶粒还能进一步提高其强度，且ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢具有TRIP效应，所以该钢种的性能提升空间较大。

2 ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的强韧化

晶粒细化、第二相强化以及固溶强化是提高材料性能的主要机制。国内外研究人员通过细化晶粒使材

料强度翻番^[10]。第二相强化与固溶强化虽然能够提高材料的强度，但同时会损失材料的韧性。晶粒细化是同时提高材料强度和韧性的重要方法。近年来，国内外学者通过纯净化、调整Ni-Cr当量、添加合金元素调整逆变奥氏体含量，并细化组织及析出相，获得了性能优良的ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢。

2.1 纯净化

纯净度对缺陷的形成有决定性作用，氧化物、硫化物以及宏观夹杂易导致铸件表面和内部质量出现严重缺陷，大大降低材料强度与塑性。纯净钢铁材料要求不含氧化物、硫化物等宏观夹杂，一般要求[S]+[O]（或[N]）<150×10⁻⁶，超纯净钢则要求[S]+[O]（或[N]）<100×10⁻⁶^[11]。尽可能降低S、P、H、O元素含量，保证钢的洁净度，可以提高钢的耐蚀性、韧塑性和可焊性，特别是疲劳性能。

低碳马氏体不锈钢一般采用VOD、AOD等精炼技术保证纯净度。沈阳铸造研究所采用AOD、VOD钢液精炼工艺和纯净度控制工艺，提高了铬的收得率，进而提高合金元素的固溶强化效果，并减小M₂₃C₆等有害析出相尺寸，结合480~520℃的低温热处理工艺和相

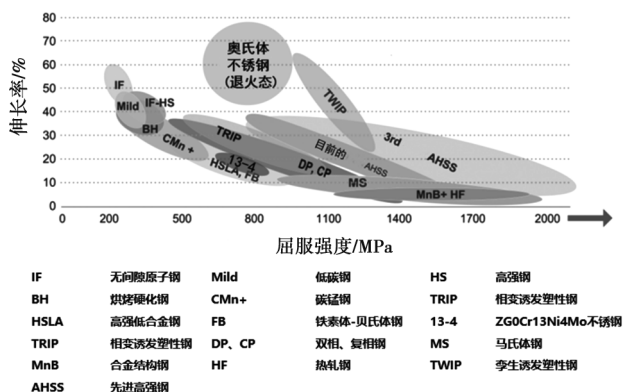


图2 ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢与高强钢的性能

Fig. 2 Properties of the ZG06Cr13Ni4Mo stainless steel and high-strength steel

表2 ZG06Cr13Ni4Mo与ZG1Cr13不锈钢的力学性能^[4]
Table 2 Mechanical properties of the ZG06Cr13Ni4Mo and ZG1Cr13 stainless steels^[4]

R_m /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	Z /%	HBW
780	580	20	50	253.5

变应力控制技术,得到了具有超低碳、高纯净、高强度(1 000 MPa以上)、高硬度且兼有高韧塑性和冲击韧度的ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢^[11]。此外,宁夏共享铸钢公司也通过高纯净化获得了性能良好的低碳马氏体不锈钢。

2.2 镍、铬当量调整

镍、铬当量比(Ni_{eq}/Cr_{eq})对低碳马氏体不锈钢的力学性能有一定影响。根据某公司生产低碳马氏体不锈钢的力学性能数据(取平均值,如表3所示),发现 Ni_{eq}/Cr_{eq} 当量对低碳马氏体不锈钢的抗拉强度影响较为显著。

Ni_{eq}/Cr_{eq} 还会影响 δ -铁素体和逆变奥氏体的含量。研究表明^[12]:当 $Ni_{eq}/Cr_{eq} \geq 0.42$ 时,可以消除铸件中的 δ -铁素体,同时形成一定量的逆变奥氏体。

根据舍费勒相图,结合相组成确定镍、铬当量,以改善材料性能。Potak和Sagalevich^[13]根据110种成分不同的不锈钢及大量文献数据,计算并绘出了铬当量(Cr_{eq})对铁素体和马氏体形成量的影响,通过对已设计的合金成分对应的元素计算铬当量(Cr_{eq}),对照结果可初步判定该合金成分的室温组织,大大地减少了科研工作量。

2.3 合金化

2.3.1 氮微合金化

氮改善材料性能是在固溶强化、减少 δ -铁素体、促进逆变奥氏体生成、细化原奥氏体晶粒、“短化”回火马氏体的多重因素的作用。有研究表明^[14]:在短时间退火(20 min)和低温淬火($< 900\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,氮能细化组织,提高材料的强硬度与韧性,长时间退火(120 min)使得晶粒长大作用超过氮钉扎位错的作用,导致材料性能下降。控制 $w(N)=0.065\%$,采用650 $^{\circ}\text{C}$ 回火工艺,材料强度与韧性取得最佳搭配($R_m=939\text{ MPa}$, $R_{p0.2}=820\text{ MPa}$, $A=19.2\%$)^[15]。当氮以固溶状态或细小析出物形式存在时,在一定含量范围内,能有效提高钢的耐点蚀性能^[16-17]。还有研究表明,氮微合金化技术有利于提高马氏体钢的耐磨性^[18]。

综上,退火采用760 $^{\circ}\text{C} \times 20\text{ min}$ 工艺,淬火温度控制在900 $^{\circ}\text{C}$ 以下,回火温度控制在650 $^{\circ}\text{C}$ 左右,氮含量保持在0.065%时,氮可起到节镍稳定奥氏体,提高材料强度、耐腐蚀性和耐磨性的作用。

表3 低碳马氏体不锈钢力学性能
Table 3 Mechanical properties of the low-carbon martensite stainless steel

牌号	R_m/MPa	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$A/\%$	$Z/\%$
ZG06Cr13Ni4Mo	799	670	19.5	66
ZG06Cr13Ni5Mo	868	680	19	66
ZG06Cr16Ni5Mo	894	717	19	61

2.3.2 铜合金化

铜改善材料性能是在沉淀硬化与逆变奥氏体软化的双重作用下发生的。在1 050 $^{\circ}\text{C}$ 淬火,铜进入马氏体基体,占据奥氏体的形核位置,通过溶质拖拽效应细化组织,且铜含量越多,组织细化程度越高^[19]。在650 $^{\circ}\text{C}$ 回火,铜呈球形或椭球形富集于位错和晶界处,促进镍元素扩散,进而加速逆变奥氏体形成, $w(\text{Cu})=2.94\%$ 时,逆变奥氏体含量最高,形成的 ε -Cu还可起到沉淀强化作用,此时ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的强度近900 MPa,强塑积达18 000 MPa%以上^[19]。

可见,ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢中加入2.94%铜,采用1 050 $^{\circ}\text{C}$ 淬火+600 $^{\circ}\text{C}$ 回火工艺,可获得优良性能。

2.3.3 ETM元素合金化

ETM元素主要包括铌、钒、钛,它们通过固溶于基体,形成第二相而细化组织,从而改善材料的性能。

有研究表明^[20]:0.11%的铌可促进纳米级(5~15 nm)沉淀相在马氏体基体中弥散析出;形成的Nb(C,N)还可阻碍原奥氏体晶粒长大,细化组织,在600 $^{\circ}\text{C}$ 回火强化效果最佳,强度提高25%以上,同时保持了较好的韧性;此外,铌优先与碳、氮结合,减少了 $M_{23}C_6$ 、 Cr_2N 等富铬相析出,从而提高了ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的耐腐蚀性。但铌的碳氮化物在高温回火(700 $^{\circ}\text{C}$)时易粗化,严重削弱ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的冲击韧性^[21]。

钒通过形成V(C,N)阻碍 Cr_2N 析出,提高材料的耐蚀性,同时促进棒状 Cr_2N 在回火过程转变为球状VN,细化马氏体板条,并能增加马氏体回火稳定性,提高材料回火后强度^[22]。但VN易粗化且热稳定性高,导致材料强化效果下降、冲击韧性降低^[16, 22]。综上,钒强化效果甚微,且强化时会造成材料塑性的损失。

不同钛含量在钢中会形成不同类型的第二相。有研究表明^[23]: $w(\text{Ti})=0.2\%$ 时,形成稳定的Ti(C,N)可细化原奥氏体晶粒,提高材料的强度,且不显著降低韧性,在550 $^{\circ}\text{C}$ 回火强化效果最佳,强度达900 MPa以上,同时室温下冲击功达180 J(10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 55 mm的V形冲击试样); $w(\text{Ti})=0.5\%$ 时,促进纳米级棒状 η - Ni_3Ti 析出,产生二次硬化。在氮含量高的钢中易生成大尺寸TiN,显著降低材料韧性,并提高脆性转变温度^[24]。所以,钛合金化过程中需要控制元素含量,并保持含氮量在较低水平。

由此可见,铌、钒、钛强化均存在一定局限性,实际生产中通常将它们一起加入到钢铁材料中,通过复合强化来提高材料的强度与韧性。含0.02%Nb和0.1%V的ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢在600 $^{\circ}\text{C}$ 回火后,逆变奥氏体含量达13%,材料强度与韧性取得了最佳搭配^[25]。

综上分析, ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的主要强化相及作用如图3所示。通过合金化获得的超细马氏体板条、纳米级逆变奥氏体以及细小的第二相, 可使ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢兼具高强度与高韧性, 在成分设计时应充分考虑合金元素对以上组成相的影响。

2.4 热处理强化

铸态ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的硬度高、塑性差, 需要进行热处理来改善其性能。通过调整热处理工艺参数(加热温度、保温时间、冷却速率等)可以改变组成相的形态、分布及大小, 进而影响材料的性能。ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢一般采用正火+两次回火的工艺。正火主要为了获得100%低碳板条马氏体, 回火主要为了软化马氏体, 产生逆变奥氏体, 并细化马氏体板条。

正火过程对原奥氏体晶粒度和马氏体转变量有直接影响。有研究表明^[26]: 奥氏体晶粒度随正火温度的升高而降低, 最佳正火温度为 $(1\ 040\pm 10)^{\circ}\text{C}$ 。1 040 $^{\circ}\text{C}$ 正火后, 再进行950 $^{\circ}\text{C}$ 正火, 可使奥氏体重复再结晶而细化组织, 在不显著降低韧塑性的情况下提高ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的屈服强度, 强度增量达200 MPa^[27]。正火终冷温度越低, 马氏体转变量越高, 正火终冷温度小于130 $^{\circ}\text{C}$ 时, 马氏体转变量可达100%, 但奥氏体与马氏体比体积相差较大, 正火终冷温度低于130 $^{\circ}\text{C}$ 时, 存在较大的相变应力, 因此正火终冷温度控制在190~200 $^{\circ}\text{C}$, 以避免应力集中和马氏体准变量过低^[28]。对于大型铸件, 还需严格控制正火升温过程, 避免出现较大相变应力和温差应力^[29]。

回火过程对逆变奥氏体的转变量及稳定性有重要影响。已有研究表明^[30]: 逆变奥氏体含量随回火温度的升高有极大值, 此时材料的强度、硬度最小、韧塑性最好。一次回火在 A_{c1} 温度以上, 二次回火在 A_{c1} 温度附近时, 可提高ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的强度, 且不降低韧性^[29]。采用“600~640 $^{\circ}\text{C}$ +580~600 $^{\circ}\text{C}$ ”的回火工艺, 可避免大型、异型铸钢件因应力集中而开

裂。回火保温时间对逆变奥氏体含量也有一定影响。逆变奥氏体含量随保温时间的延长而增加, 韧塑性也呈上升趋势, 硬度则随保温时间的延长而下降, 经3 h保温的ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢综合力学性能良好^[25]。

适当降低正火温度(加热及终冷温度)、增加正火次数可细化原奥氏体晶粒, 提高马氏体转变量, 改善材料的强韧性。通过控制两次回火的温度与保温时间, 获得适量的逆变奥氏体, 可使ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢兼具强度与韧性。

2.5 电渣重熔

电渣重熔是集熔炼和成形为一体的工艺。熔炼反应温度高、钢液和熔渣充分接触、渣池流动性强以及凝固速度快、顺序结晶是该工艺的主要冶金特点^[31]。因此, 电渣重熔工艺生产的铸件基体洁净、组织致密、成分均匀, 具有优异的性能。此外, 国内外研究者通过对电渣重熔技术的改进, 细化了晶粒, 改善了结晶组织, 从而提高了材料的力学性能。采用传统砂型铸造和电渣重熔工艺生产的ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢在泥砂环境下的耐磨试验结果如表4所示。

由此可见, 经电渣重熔工艺生产的ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢具有更加优良的强韧性, 在超长时间泥砂磨损、较低流速(35 m/s)及较小粒径($D_{50}=0.010\text{ m}$)条件下, 磨损量较传统砂型铸造工艺生产的ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢降低了40%。

3 展望

经历几十年的研究, ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的性能已逼近极限, 而截至目前, 在此材料基础上进行的合金化改良尚未有实际产业化应用。对此, 本文阐述了几种新的强化思路, 供界内专家学者参考。

(1) 定量控制成分。ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的强化依赖于成分的调节, 然而碳、镍及Ni/Cr当量对材料的影响具有双重性。在纯净化的基础上提高Ni/Cr当量可消除高温铁素体, 镍还可促进逆变奥氏体的形成, 但会抑制马氏体的产生。提高碳含量有利于在高温下获得成分均匀的奥氏体, 并能使材料具有较高的强度

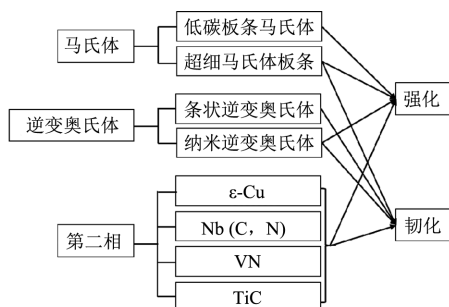


图3 ZG06Cr13Ni4Mo的主要强化相及其作用

Fig. 3 Major strengthening phases of the ZG06Cr13Ni4Mo stainless steel and their effect

表4 ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢在泥砂环境下的耐磨试验结果
Table 4 Experimental results of wear resistance of the ZG06Cr13Ni4Mo stainless steel in sediment environment

工艺	试验 时间	磨损量/mm			
		试样1 (流速45 m/s)		试样2 (流速35 m/s)	
		$D_{50}=0.024\text{ m}$	$D_{50}=0.010\text{ m}$	$D_{50}=0.024\text{ m}$	$D_{50}=0.010\text{ m}$
砂型铸造	4 617 h	0.51	0.35	0.22	0.15
电渣熔铸		0.47	0.30	0.15	0.09

和硬度,但碳对材料韧性与焊接性有不利影响。量化成分设计,找到一种拟合成分与组成相间的关系模型,可能是发挥它们积极作用的有效方法。

(2) 调控逆变奥氏体含量。逆变奥氏体的含量、尺寸、形态与分布对ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的性能有重要影响,适量逆变奥氏体可以改善材料韧性,强化马氏体基体,但过多的逆变奥氏体会降低材料强度。然而,逆变奥氏体极易受铸态组织和成分的影响,在实际生产中难以定量控制。采用材料计算模拟技术定量控制逆变奥氏体含量,定量描述逆变奥氏体就能避免因逆变奥氏体含量过多而导致材料强度损失的问题。

(3) 稀土强化。稀土已在模具钢、军工钢等30多个钢种应用并取得成果,但在ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢上的应用尚属空白。我国稀土资源丰富,且微量稀土就能使钢中 Al_2O_3 、MnS、TiN和复合氧化物等夹杂物改性,通过深度净化、强烈微合金化和变质作用影响钢的凝固组织,从而大大提高钢的韧性^[31-32]。所以通过稀土强化ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的方法在今后发展中应得到重视。

(4) 复合合金化。高强不锈钢碳含量较低,含有多种合金元素(Ni、Al、Ti、Co、Cu、Nb),室温组织通常为细小的板条马氏体,可通过适量的逆转变奥氏体以及弥散分布的沉淀强化相、金属间化合物、元素富集相,借助多相复合强化使ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢具有高强度和良好的韧塑性。ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢中合金元素种类少,沉淀相单一,性能与高强钢相差较多。因而,可以借助多种合金复合强化ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢,例如采用稀土与钒、钛、铜等合金复合强化,探究强化合金元素之间的相互作用机理,选取最优的复合强化方式。

(5) 电渣重熔。电渣重熔工艺生产灵活、过程稳定,所生产的铸件性能优越,但电渣重熔细化晶粒和消除偏析的效果与传统工艺相比,优势并不明显,对于大型铸锭的中心区域组织的优化效果欠佳。因而,应深入探究电渣重熔工艺参数(电流、电压、电极插入深度等)、凝固速度、结晶器的结构等对铸件微观组织和性能的影响,研究重熔过程中材料的凝固规律;开发电渣重熔新技术,拓宽其适用范围。

参考文献:

- [1] 沈阳铸造研究所,宁夏共享集团有限责任公司. GB/T 6967-2009 工程结构用中、高强度不锈钢铸件[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [2] 王胜利. 超级马氏体不锈钢成分、工艺和腐蚀性能的研究进展[J]. 铸造, 2019, 44(3): 23-8.
- [3] 孙霞, 刘春明. 铸造低碳马氏体不锈钢的现状与发展趋势[J]. 铸造, 2007, 56(1): 1-5.
- [4] 梁唯燕. 中国重大技术装备史话: 三峡水轮机转轮制造[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 282-284.
- [5] SONG Y Y, LI X Y, RONG L J, et al. Reversed austenite in 0Cr13Ni4Mo martensitic stainless steels[J]. Materials Chemistry & Physics, 2014, 143(2): 728-734.
- [6] DARREL, FREARJ W. A study of the effect of precipitated austenite on the fracture of a ferritic cryogenic steel[J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 1986, 17(2): 243-252.
- [7] 张盛华, 王培, 李殿中, 等. ZG06Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢中TRIP效应的同步辐射高能X射线原位研究[J]. 金属学报, 2015(11): 1306-1314.
- [8] NAKAGAWA H, MIYAZAKI T. Effect of retained austenite on the microstructure and mechanical properties of martensitic precipitation hardening stainless steel[J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(16): 3901-3908.
- [9] World Auto Steel. Steel strength, the backbone of the Automotive industry [EB/OL]. China: Steel Your World, 2020 [2021]. www.worldautosteel.org.
- [10] 董瀚, 廉心桐, 胡春东, 等. 钢的高性能化理论与技术进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 180-204.
- [11] 姜延春, 张仲秋, 熊云龙. 大型纯净超低碳马氏体不锈钢铸件先进制造技术[J]. 铸造, 2010, 59(11): 1148-1154.
- [12] 王培. 13Cr4Ni不锈钢组织性能控制及其在三峡水轮机转轮上的应用[D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2011.
- [13] POTAK Y M, SAGALEVICH E A. Phase diagram of wrought stainless steels[J]. Metal ence and Heat Treatment, 1971, 13(9): 722-725.
- [14] 翟瑞银, 吴狄峰, 常鐸. 氮对低碳马氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. 宝钢技术, 2013, 1(5): 32-36.
- [15] 南海, 常瑞津, 李静媛, 等. 氮元素对Cr13超级马氏体不锈钢组织及性能的影响[J]. 钢铁研究学报, 2020, 32(12): 132-140.
- [16] 马小平. 0Cr(13~16)Ni(4,5)Mo(1,2)系超级马氏体不锈钢微合金化理论与技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [17] TORO A, MISIOLEK W Z, TSCHIPTSCHIN A P. Correlations between microstructure and surface properties in a high nitrogen martensitic stainless steel[J]. Acta Materialia, 2003, 51(12): 3363-3374.
- [18] KIM S K, YOO J S, PRIEST J M, et al. Characteristics of martensitic stainless steel nitrided in a low-pressure RF plasma[J]. Surface & Coatings Technology, 2003, 163(2): 380-385.
- [19] DONG Y, LI J, WEN J, ET al. Effect of Cu addition on microstructure and mechanical properties of 15%Cr super martensitic stainless

- steel [J]. Materials and Design, 2012, 41 (2) : 16–22.
- [20] OLIVEIRA M D, CALDERÓN-HERNÁNDEZ J W, MAGNABOSCO R, et al. Effect of niobium on phase transformations, mechanical properties and corrosion of supermartensitic stainless steel [J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2017, 26 (4) : 1664–1672.
- [21] MA X, ZHOU C, WANG L, et al. Role of Nb in 13Cr super-martensitic stainless steel [J]. Rem: Revista Escola de Minas, 2013, 66 (2) : 179–185.
- [22] 杨东, 范翔宇, 黄艳宁, 等. V、C、N含量对02Cr13Ni4Mo钢组织和力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2021, 50 (4) : 115–120.
- [23] LIAN Yong, HUANG Jinfeng, ZHANG Jin, et al. Effect of 0.2 and 0.5% Ti on the microstructure and mechanical properties of 13Cr supermartensitic stainless steel [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24 (11) : 425–439.
- [24] 孙杰. 含Ti马氏体钢中析出相对有效晶粒尺寸的影响规律研究 [D]. 昆明: 云南大学, 2015.
- [25] ZOU De-ning, HAN Ying, ZHANG Wei, et al. Influence of Tempering Process on Mechanical Properties of 00Cr13Ni4Mo Supermartensitic Stainless Steel [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2010, 17 (8) : 50–54.
- [26] LIU Y R, DONG Y E, YONG Q L, et al. Effect of heat treatment on microstructure and property of Cr13 super martensitic stainless steel [J]. Journal of Iron & Steel Research, 2011, 18 (11) : 60–66.
- [27] 宋阳. 低碳马氏体不锈钢的热处理特性研究 [D]. 北京: 机械科学研究总院, 2020.
- [28] 耿承伟. ZG0Cr13Ni4Mo钢正火终冷温度的确定 [J]. 物理测试, 1992, (5) : 4–8.
- [29] 耿承伟, 何树生. ZG0Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢研制 [J]. 物理测试, 1992, (4) : 13–25.
- [30] 许荣君, 田伟光, 徐佳林, 等. 热处理对Fe-Cr-Ni低碳马氏体不锈钢组织及性能的影响 [J]. 金属热处理, 2020, 45 (10) : 120–124.
- [31] 富晓阳, 杨吉春, 赵莉萍, 等. 稀土元素在钢中作用机理与研究现状 [J]. 湖南有色金属, 2015, 31 (1) : 55–57, 63.
- [32] 王龙妹. 稀土元素在新一代高强韧钢中的作用和应用前景 [J]. 中国稀土学报, 2004 (1) : 48–54.
- [33] 李正邦. 电渣冶金理论与实践 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 13–14.

Research Status on Strengthening and Toughening of ZG06Cr13Ni4Mo Low Carbon Martensitic Stainless Steel

SONG Lei^{1,2}, ZHAO Ling^{1,2}, GAO Yun-bao², WANG Zeng-rui^{1,2}, SHI Tong-rui², CHEN Rui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Light Alloy Casting Technology for High-End Equipment, Shenyang 110022, Liaoning, China;

2. Shenyang Foundry Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China)

Abstract:

Low-carbon martensitic stainless steel ZG06Cr13Ni4Mo is a widely used martensitic chromium-nickel stainless steel. In this paper, the composition, microstructure, strength and toughness characteristics of the cast stainless steel ZG06Cr13Ni4Mo were introduced. The strengthening and toughening methods of the ZG06Cr13Ni4Mo stainless steel, such as purification, chromium/nickel equivalent adjustment, alloying and heat treatment were summarized, and the composition design method and electroslag remelting process for the strengthening and toughening of this steel were prospected.

Key words:

ZG06Cr13Ni4Mo; low-carbon martensite stainless steel; strengthening and toughing method; composition design; electroslag remelting