

一种低合金低温铸钢及其组织与性能

陈威, 高义民, 邢建东, 王必辉, 汪勇, 梁龙

(西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对极地石油钻机用大钩对材料的性能要求, 设计了一种含 Cr、Ni 低合金低温铸钢, 考察了不同热处理工艺对材料组织、室温力学性能以及低温冲击韧性的影响。采用扫描电镜、X 射线衍射和透射电镜等手段分析了低温铸钢试样的微观结构、相组成及断口形貌。结果表明: 该低温铸钢经 930 °C 炉冷+920 °C 油冷+680 °C 空冷热处理后, 其显微组织为回火索氏体, 其中铁素体呈等轴状, 渗碳体已趋于团球化; -20 °C 冲击功达到 57 J, 冲击断裂机制为韧性断裂, -45 °C 冲击功为 32 J, 冲击断裂机制为不完全脆性断裂。在此热处理条件下, 低温铸钢试样表现出优良的室温综合力学性能和较高的低温冲击韧性, 达到了石油钻机用大钩所要求的材质性能。

关键词: 低温铸钢; 回火索氏体; 低温冲击韧性; 石油钻机

中图分类号: TG142 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)07-0875-05

Composition Design of Low Alloy Cryogenic Cast Steel with Analysis of Microstructure and Mechanical Properties

CHEN Wei, GAO Yimin, XING Jiandong, WANG Bihui, WANG Yong, LIANG Long

(State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: According to the performance requirements of polar oil-drilling rig, a nickel and chromium-containing low alloy cryogenic cast steel (NCCS) was designed. The influences of heat treatment on microstructure, room-temperature mechanical properties and cryogenic impact toughness were studied. Scanning electron microscopy, X-ray diffraction and transmission electron microscopy were utilized respectively to analyze the microstructure, phase composition and impact fracture. The NCCS undergone the heat treatment of annealing (930 °C), quenching (920 °C) and tempering (680 °C) belongs to sorbitic cast steel with excellent mechanical properties and cryogenic impact toughness to meet the design requirements of oil-drilling rig.

Keywords: cryogenic cast steel; tempered sorbite; cryogenic impact toughness; oil-drilling rig

目前国内外对低温钢研究较多的是轧材, 对铸造低温钢研究得较少^[1]。但是, 石油、化工、冶金等工业部门的许多具有特殊形状的低温机械零部件, 只能通过铸造的方法才能获得。例如在严寒或北极地区工作的石油钻机的提升与旋转系统(大钩、水龙头、转盘等), 由于结构与壁厚的原因, 如采用轧材加工成形, 不仅工艺复杂, 且制作成本昂贵, 因此均采用铸造成形。为确保低温工作的安全可靠, 要求提升与旋转系统所用材料除具有常温的机械性能($\sigma_b \geq 576$ MPa, $\sigma_s \geq 490$ MPa, $\delta_5 \geq 18\%$, $\psi \geq 35\%$)之

外, 还要求在一20 °C时的低温冲击功(夏比试验)不低于 42 J, 在一45 °C时不低于 27 J^[2]。当前国内外普遍采用的铸造低温钢为铬镍奥氏体不锈钢, 这类钢种具有良好的低温韧度, 但屈服强度低(σ_s 约为 200 MPa), 远不能满足石油钻机大钩等结构件的强度指标要求。奥氏体不锈钢的另一缺点是合金中含有大量 Cr、Ni 等贵重元素, 成本较高。魏广升等人^[3]研制的低碳高锰双相铸造低温钢与奥氏体不锈钢相比, 含 Ni 量大幅度降低, 低温韧性相当, 但其屈服强度仍然较低(σ_s 约为 250 MPa), 且合金中含有质量

分数约为5%左右的Al,控制不当将会导致钢液严重氧化,不仅恶化铸造性能,而且易使钢中产生氧化夹杂。黄岩等人^[4]研制的无碳化物贝氏体低温铸钢具有较高的强度、韧性指标,且合金中Ni的质量分数仅为5.5%,材料成本显著降低,但是该钢种的低温冲击韧性较差,-25℃冲击功仅为10J左右,-50℃冲击功只有7J左右。

综上所述,我国目前实际应用于低温条件下的特殊铸钢很少,研制既有良好的综合低温力学性能,又节省Cr、Ni等贵重原材料的低温钢种,对扩大低温钢的生产和使用有重要的意义。本文从我国的资源实际出发,针对极地条件下工作的石油钻机对提升与旋转系统部件的性能要求,设计了一种含Cr、Ni低合金低温铸钢,并重点研究了热处理工艺对材料组织与性能的影响。

1 化学成分设计

为了尽量节约贵重合金元素,又使铸钢具有优良的综合室温力学性能和低温冲击韧性,本研究的化学成分设计原则是:通过合金元素的合理配合,确保材质经淬火+高温回火(调质)处理后能够得到回火索氏体。有研究表明,在强度和硬度相同的条件下,具有回火索氏体组织的钢的低温冲击韧性最好^[5]。在此基础上,严格控制易使钢韧脆转变温度升高的C、P、Si等元素,并在兼顾制造成本的同时,适当添加能够显著降低钢的韧脆转变温度、细化晶粒的合金元素,如Ni、Cr等^[6]。表1为该低温铸钢的设计成分和经中频感应炉熔炼后的化学分析结果。

元素C可显著提高钢的韧脆转变温度,但考虑到石油钻机提升和旋转系统零部件对材质的强度要求,表1中的C含量较传统低温铸钢有所提高。Ni和Mn不仅可以改善铸钢的低温韧性^[7-8],同时能够提高钢的淬透性,但考虑到成本问题,将Ni含量控制在较低的水平。钢中适当添加合金元素Cr具有强化基体、细化晶粒和提高淬透性的作用,但过高的Cr含量会导致钢的韧性显著降低,故对Cr含量进行了适当控制。Mo的主要作用是提高淬透性,同时

也会提高韧脆转变温度,降低钢的低温韧性^[5],因此将Mo的质量分数控制为0.15%~0.20%。

2 试验方法

2.1 熔炼与浇铸

在容量为150kg的中频感应电炉中,采用不氧化法熔炼工艺熔化钢水。为了严格控制钢中的C、Si、P、S含量,炉料采用工业纯铁、20钢圆棒、微碳铬铁、电解镍等根据化学成分进行配料,熔化后的化学成分分析结果如表1所示。考虑到石油钻机大钩的壁厚要求,熔化后浇铸 $\varnothing 100\text{ mm}\times 250\text{ mm}$ 的基尔试块,经热处理后取标准拉伸试样($l_0=5d_0$, $d_0=10\text{ mm}$)和夏比V型冲击试样($10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 55\text{ mm}$),基尔试块的形状与尺寸以及试样的取样位置如图1所示。

2.2 热处理工艺

热处理工艺采用高温退火+油淬+高温回火。高温退火的目的是为了使成分均匀化^[9],回火温度分别选取620℃和680℃,前者接近于该铸钢的再结晶温度。具体的热处理工艺与试样编号如下:Ⅰ号试样为(930℃-3h,炉冷)+(920℃-3h,油冷)+(680℃-5h,空冷);Ⅱ号试样为(930℃-3h,炉冷)+(920℃-3h,油冷)+(620℃-5h,空冷)。

2.3 试验方法

拉伸试验按照GB 228-87标准,在Instron 1195电子拉伸试验机上进行。按照GB 4159-84标准,在液氮冷却的低温条件下,采用GB30B冲击试验机进行-20℃和-45℃低温冲击试验。试验结果均取4个试样试验数据的平均值。在CSM950型扫描电子显微镜下观察拉伸、低温冲击试样的断口形貌;采用X射线衍射仪分析低温铸钢试样的组织结构;采用NEOPHOT-21光学显微镜和JEM-200CX透射电子显微镜分析低温铸钢试样的微观组织。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

试验结果如图2和图3所示,图中的Ⅲ号试样

表1 低温铸钢的设计成分与化学分析结果

项目	w/%							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
设计	0.25~0.30	0.10~0.20	0.60~0.70	≤0.025	≤0.025	1.10~1.20	0.15~0.20	1.30~1.40
分析	0.28	0.18	0.64	0.014	0.011	1.17	0.18	1.39

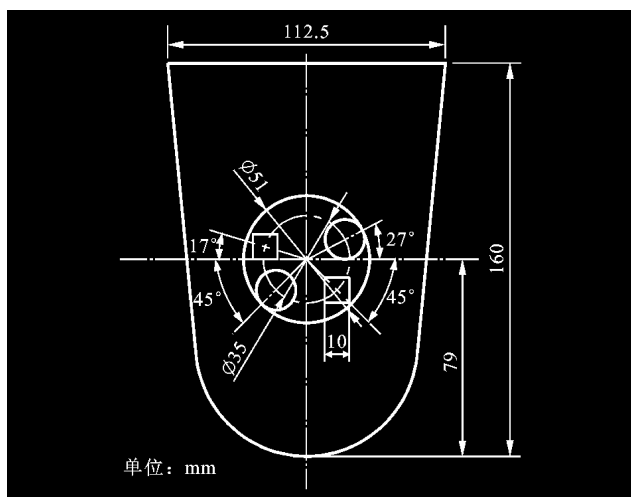
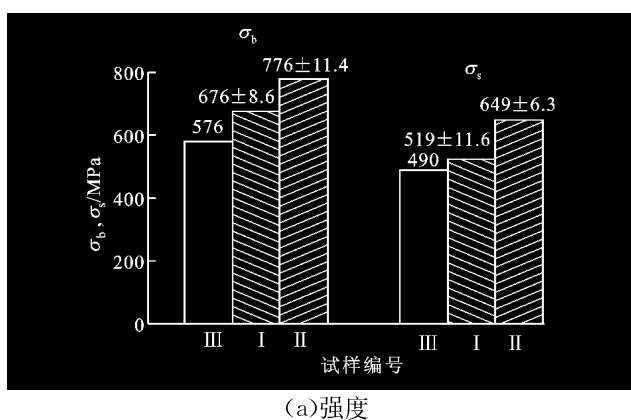
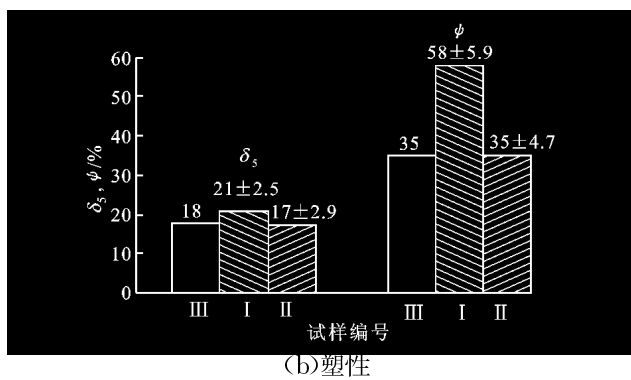


图1 基尔试块尺寸及取样位置



(a) 强度



(b) 塑性

图2 不同回火温度下低温铸钢试样的室温力学性能

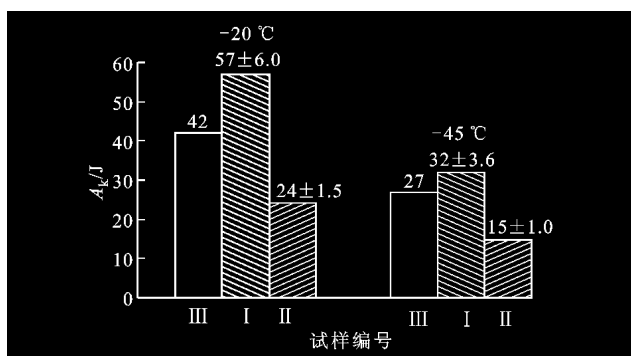


图3 不同回火温度下低温铸钢试样的低温冲击韧性

表示石油钻机用大钩的性能指标。由图可见,在680℃回火条件下,I号试样的室温力学性能以及低温冲击韧性均达到了石油钻机用大钩的性能要求,而

在620℃回火条件下,尽管Ⅱ号试样的室温强度能够满足性能要求(见图2a),但室温塑性略低于性能要求(见图2b),且其低温冲击韧性远低于性能指标(见图3)。

3.2 结果分析

不同回火温度条件下低温铸钢试样的X射线衍射分析结果如图4所示,由图可见本文所设计的低温铸钢材料经调质处理后,基体组织均为体心立方结构的铁素体。图5和图6分别为不同回火温度下低温铸钢试样的光学显微照片与透射电镜照片。由图可见:经680℃回火后试样(I号)的显微组织为典型的回火索氏体组织,即等轴状铁素体+球状渗碳体(见图5a),从高倍透射电镜照片可以清楚地观察到铁素体基体上均匀分布的球状和团块状渗碳体(见图5b中箭头所指的黑色颗粒);经620℃回火后试样(Ⅱ号)的显微组织为回火托氏体,此时铁素体只发生了回复过程而未再结晶,仍保持针叶状(见图6a),透射电镜分析表明,在此回火温度下尽管有少量渗碳体已趋于团球化,但是大部分渗碳体仍然呈片状分布(见图6b中箭头所指的黑色物相)。

由图7可见:I号试样的拉伸断口形貌以韧窝为主(见图7a),为韧性断口;Ⅱ号试样的拉伸断口形貌以准解理为主,主裂纹的走向不太清晰,内部有撕裂棱(见图7b)。

由图8可以看出,在-20℃下,I号试样的冲击断口形貌是微孔聚合的韧窝状,Ⅱ号试样的冲击断口形貌则是以解理为主,同时有少量的准解理,断裂沿着一定的结晶学平面发生,形成解理面,内部有撕裂棱,裂纹的扩展从解理台阶逐渐过渡到撕裂棱。由图9可以看出,在-45℃下,I号试样的冲击断口形貌为解理加少量准解理,Ⅱ号试样的冲击断口形貌以解理为主,并有较多的沿晶二次裂纹,河流状的流向为裂纹扩展方向,在主裂纹方向上又横生了一些错综复杂的二次裂纹。

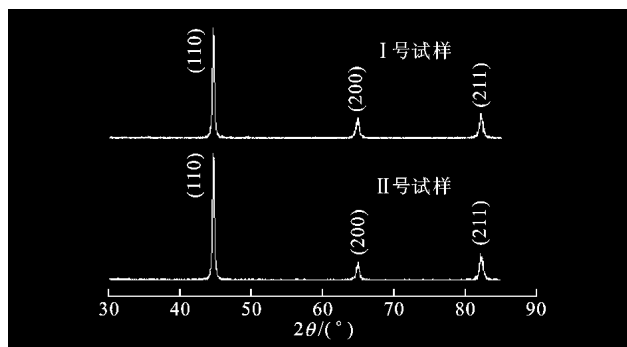
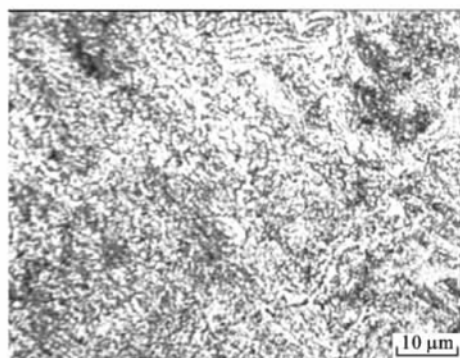
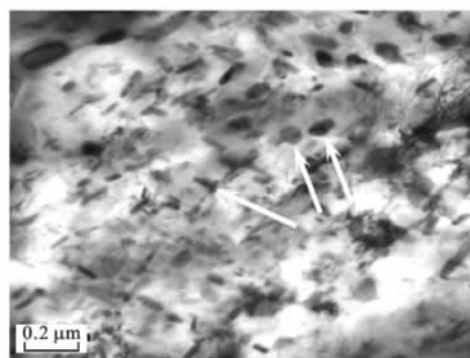


图4 X射线衍射分析结果



(a) 光学显微照片

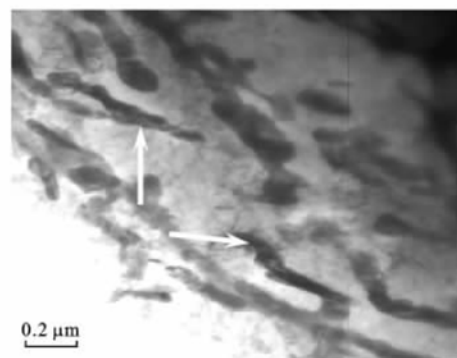


(b) 透射电镜明场像

图5 I号试样的微观组织

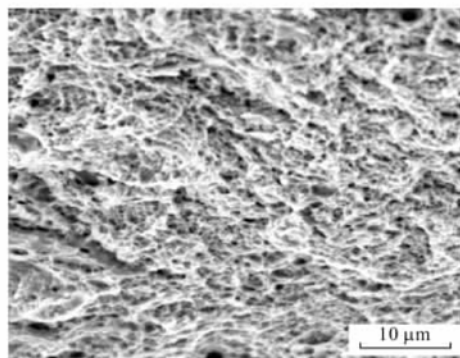


(a) 光学显微照片

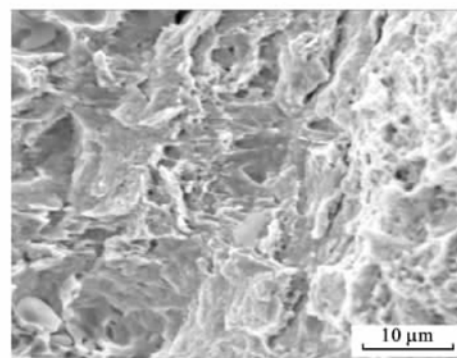


(b) 透射电镜明场像

图6 II号试样的微观组织

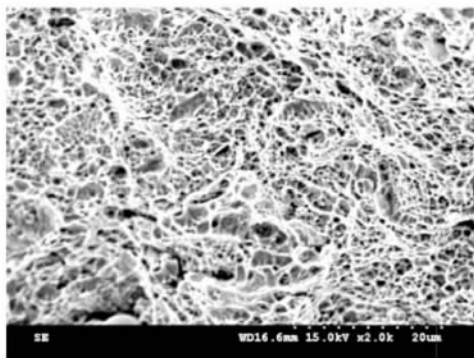


(a) I号试样

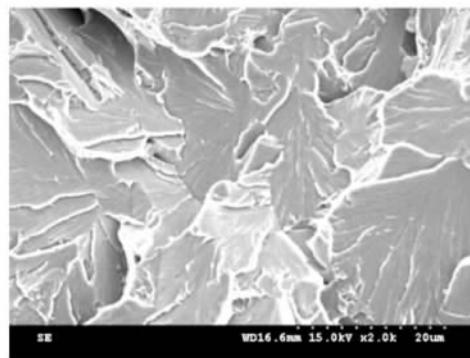


(b) II号试样

图7 拉伸试验后试样的断口形貌

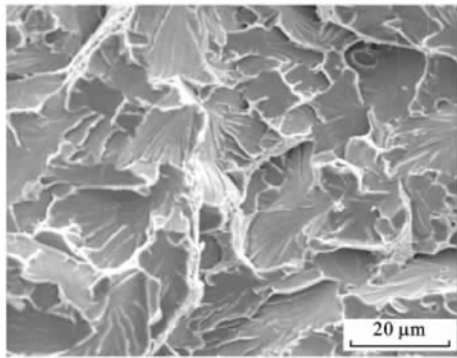


(a) I号试样

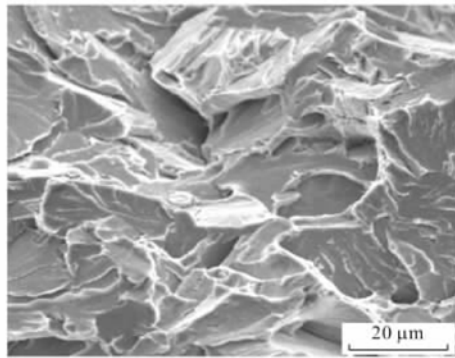


(b) II号试样

图8 -20 °C下低温铸钢试样的冲击断口形貌



(a) I号试样



(b) II号试样

图9 -45 °C下低温铸钢试样的冲击断口形貌

综合上述分析可见,本文所设计的低温铸钢材料经油淬和 680 °C 回火处理后,试样的显微组织为回火索氏体,铁素体呈等轴状且渗碳体已趋于团球化,试样的室温拉伸断口形貌以及 -20 °C 冲击断口形貌均表现为明显的韧性断口,即使在 -45 °C 下,其冲击断口形貌亦显示出部分韧性断裂的特点,因此试样表现出优良的室温综合力学性能以及较高的低温冲击韧性,达到了石油钻机用大钩的性能要求。试样经油淬和 620 °C 回火处理后,显微组织为回火托氏体,铁素体呈针叶状,大部分渗碳体未团球化,从而导致试样的室温拉伸断口形貌和 -20 °C 冲击断口形貌显示出部分脆性断裂的特点,-45 °C 冲击断口形貌则为脆性断口,因此试样表现出较低的室温塑性和低温冲击韧性。

4 结 论

本文设计了一种含 Cr、Ni 低合金低温铸钢,经 930 °C 炉冷+920 °C 油冷+680 °C 空冷热处理后,其室温力学性能为 $\sigma_b=676$ MPa, $\sigma_s=519$ MPa, $\delta_5=21\%$, $\psi=58\%$, -20 °C 时 $A_k=57$ J, -45 °C 时 $A_k=32$ J, 达到石油钻机用大钩对材料的性能要求。

该低合金低温铸钢经 930 °C 炉冷+920 °C 油冷+680 °C 空冷热处理后,其显微组织为回火索氏体,铁素体呈等轴状且渗碳体已趋于团球化,-20 °C 下的冲击断裂机制为韧性断裂,-45 °C 下的冲击断裂机制为不完全的脆性断裂;经 930 °C 炉冷+920 °C 油冷+620 °C 空冷热处理后,其显微组织为回火托氏体,铁素体呈针叶状,大部分渗碳体呈条状或片状分布,-20 °C 和 -45 °C 下的冲击断裂机制均为脆性断裂。

参考文献:

- [1] 黄岩. 低温铸钢 Ni5.5 的研究[J]. 铸造技术, 2003, 24(4): 316-319.

HUANG Yan. Study on cryogenic cast steel Ni5.5 [J]. Foundry Technology, 2003, 24(4): 316-319.

- [2] 张连山. 国外石油钻机提升与旋转系统现状及发展[J]. 国外石油机械, 1997, 8(4): 1-8.

ZHANG Lianshan. Present status and development of overseas petroleum drilling rigs hoist and rotation system [J]. Petroleum Machinery Abroad, 1997, 8(4): 1-8.

- [3] 魏广升. $\gamma+\delta$ 双相低温铸钢断口形貌与力学性能的研究[J]. 低温与超导, 1998, 26(10): 58-63.

WEI Guangsheng. Research on the relationship between fracture mode and mechanical properties of $\gamma+\delta$ cryogenic cast steel [J]. Cryogenics and Superconductivity, 1998, 26(10): 58-63.

- [4] 黄岩, 黑祖昆. 无碳化物贝氏体钢低温韧性[J]. 大连海事大学学报, 2003, 29(2): 75-77.

HUANG Yan, HEI Zukun. Research on the cryogenic toughness of carbide-free Bainite steel [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2003, 29(2): 75-77.

- [5] 贺祖武, 胡小鹏. 试论低温钢低温韧性的改善[J]. 洪都科技, 2004(3): 33-35.

HE Zuwu, HU Xiaopeng. Brief discussion on the improvement of low temperature toughness of low temperature steel [J]. Hongdu Science and Technology, 2004(3): 33-35.

- [6] 布赖恩·皮克林 F. 钢的组织与性能[M]. 刘嘉禾, 等译. 北京: 科学出版社, 1999: 55-56.

- [7] LI Longsheng, YANG Dazhi, WEI Guangsheng, et al. Structure and properties of low-carbon high-manganese cast steels for cryogenic use [J]. Metallography, 1982, 15(4): 355-365.

- [8] 沈莲. 机械工程材料[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999: 128-130.

- [9] SMOLJAN B. Analysis of combined cyclic heat treatment performance [J]. Journal of Material Processing Technology, 2004, 155/156(4): 1704-1707.

(编辑 葛赵青)