

超大型矿用磨机高性能铸造齿轮钢的研究开发

瞿铁^{1, 2}, 庞庆海^{1, 3}, 贾冠飞^{1, 3}, 殷立涛^{1, 3}, 王文焱⁴, 田磊^{1, 3}

(1. 中信重工机械股份有限公司, 河南洛阳 471039; 2. 智能矿山重型装备全国重点实验室, 河南洛阳 471000;

3. 洛阳中重铸锻有限责任公司, 河南洛阳 471039; 4. 河南科技大学, 河南洛阳 471000)

摘要: 通过成分设计、铸造试块制备及热处理试验, 研究了热处理参数对ZG42Cr2Ni2Mo齿轮钢的硬度、组织和性能的影响。结果表明, 经870 °C油淬和560 °C回火后, ZG42Cr2Ni2Mo钢试块硬度可达到HB 350以上, 满足HB 340~380硬度要求; 试块淬火及回火后为均匀回火索氏体组织, 晶粒细小均匀; 试块热处理后, 屈服强度和抗拉强度分别可达到900 MPa和1 000 MPa以上, 且韧性优良。

关键词: 铸造齿轮; 材料设计; 高硬度; 热处理

随着国内外矿业市场对大型矿用磨机需求的增加和研制技术水平的不断提高, 矿用磨机的规格日益向着大型化方向发展^[1-2]。目前由中信重工机械股份有限公司设计制造并投入运行的 $\Phi 7.9$ m \times 13.6 m球磨机和 $\Phi 11.0$ m \times 6.4 m半自磨机, 均采用大型齿轮传动, 大齿轮材料硬度为HB300~340。为突破现有磨机规格, 需要更大模数、更大尺寸和更高综合力学性能的大型齿轮, 这对齿轮材料提出了更高的要求, 材料升级也成为迫切需求。本文从材料成分及热处理工艺角度考虑^[3-4], 在传统ZG40CrNi2Mo钢的基础上进行优化^[5], 拟开发出硬度在HB340~380, 且具有较好综合性能的铸造大齿轮用钢, 为矿用磨机突破现有规格极限提供材料支撑。

1 材料制备

以ZG40CrNi2Mo钢为基础, 适当调整Cr、Ni合金元素含量, 以提高钢的强度、淬透性及回火稳定性, 从而设计出一种新型齿轮钢材料, 钢种命名为ZG42Cr2Ni2Mo。后续通过制备试验试块, 开展热处理工艺试验, 对比力学性能及微观组织, 确定最终成分和热处理工艺参数。

在实验室制备两种材料的试块, 分别命名为1#材料试块和2#材料试块, 试块尺寸均为200 mm (长) \times 200 mm (宽) \times 400 mm (高)。采用中频感应炉熔炼钢液, 砂型铸造, 冒口上注直浇的方式浇注试块。成分设计范围及实际检测结果见表1, 其中2#材料的Mn、Cr、Ni元素含量高于1#材料, 其余元素含量基本一致。

表1 ZG42Cr2Ni2Mo 钢成分设计方案及熔炼成分

Table 1 Composition design and melting compositions of the ZG42Cr2Ni2Mo steel w_B /%

项目	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
设计范围	0.40~0.45	0.30~0.50	0.50~0.80	≤ 0.010	≤ 0.010	1.50~1.90	1.70~2.00	0.40~0.50
1#材料	0.42	0.38	0.60	0.006	0.002	1.71	1.76	0.45
2#材料	0.42	0.39	0.76	0.006	0.002	1.82	1.90	0.45

作者简介:

瞿铁 (1963-), 男, 硕士, 正高级工程师, 主要从事智能矿山重型装备设计、制造及研发工作。

通讯作者:

贾冠飞, 男, 硕士, 高级工程师。电话: 18638369056, E-mail: jgf214@163.com

中图分类号: TG142

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

01-0028-05

基金项目:

国家重点研发计划资助 (2020YFB2008400)。

收稿日期:

2022-11-29 收到初稿,

2022-12-26 收到修订稿。

2 试验方法

打箱清理切除冒口后,首先对ZG42Cr2Ni2Mo铸态试块进行完全退火处理,加热温度880℃,保温时间10 h。通过完全退火可以达到细化晶粒、均匀组织、消除铸造应力的目的,同时为后续热处理提供组织准备^[6]。

对退火后的铸造试块进行剖分,1#材料试块沿高度方向中间剖分为A、B两个小试块,2#材料试块沿高度方向中间剖分为C、D两个小试块,四个小试块尺寸均为200 mm×200 mm×200 mm。参考已有的经验,对四个试块分别进行淬火及回火试验。试块A、B、C、D加热至870℃保温5 h,在油中冷却;其中A、C试块回火工艺为:加热至560℃保温9 h,空冷至室温;B、D试块回火工艺为:加热至580℃保温9 h,空冷至室温,工艺过程见图1。

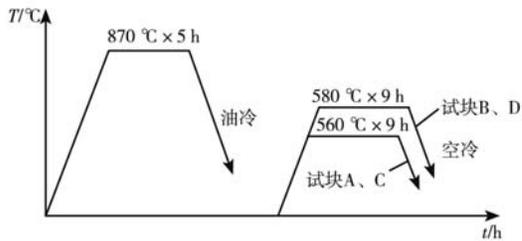


图1 试块的热处理工艺

Fig. 1 Heat treatment process of the test block

热处理完成后,对试块进行加工,采用HB-3000B型号布氏硬度计检测不同热处理状态下的试块表面到心部的硬度变化情况;参考GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》和GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》标准开展材料常温状态的拉伸和冲击试验,拉伸试验采用标准直径为 $\Phi 10$ mm、标距为50 mm的圆柱试样,冲击试样规格为10 mm×10 mm×55 mm,采用U型和V型缺口形式,其中每个冲击试验重复3次并取平均值,试验设备为CHT4605号微机液压万能试验机和NI750号金属摆锤式冲击试验机。切取10 mm×10 mm×10 mm的金相试样,经磨制、抛光处理后,采用4%的硝酸酒精进行腐蚀,使用型号为Axio Observer D1M蔡司金相显微镜进行微观组织对比观察。

3 结果与分析

3.1 材料硬度

表2为两种材料试块经淬火及回火后的硬度变化情况,检测位置距离表面分别为20 mm、60 mm、100 mm三个深度,每个位置检测三点取平均值。

根据测试结果,1#和2#两种材料(试块A和试块C)通过870℃油淬+560℃回火均可以满足HB340~380

表2 试块淬火及回火后的硬度

Table 2 Hardnesses of the test block after quenching and tempering

材料	试块	热处理工艺	表面至心部硬度HB	平均硬度HB
1#	A	870℃×5 h油淬	371、361、354	362
		560℃×9 h回火		
1#	B	870℃×5 h油淬	346、335、331	337
		580℃×9 h回火		
2#	C	870℃×5 h油淬	378、372、365	372
		560℃×9 h回火		
2#	D	870℃×5 h油淬	347、343、338	343
		580℃×9 h回火		

的要求,且2#材料(试块C)更接近硬度要求的中上限。对比A、B、C、D试块由表层到心部硬度情况,硬度衰减分别分别为HB 17、15、13、9,即试块在80 mm深度范围内硬度衰减在HB 20以内,为齿轮设计者计算校核齿根部位强度提供了参考。

对比试块A与B、试块C与D,回火温度从560℃提高至580℃以后,平均硬度由HB362和HB372降低至HB337和HB343,降低幅度为HB25和HB29,说明该材料对回火温度较为敏感。ZG42Cr2Ni2Mo钢中的Cr、Ni、Mo等元素可显著提高材料的淬透性,增加淬硬层深度,但抗回火稳定性较弱,高温回火时,易使合金元素及其形成的碳化物从基体中析出长大,使碳化物聚集,导致基体发生软化。通过试块A与C、B与D可以看出,C试块平均硬度比A试块高HB10;D试块平均硬度比B试块高HB6,说明提高Mn、Cr、Ni元素含量,对材料硬度的提高有一定的促进作用。

3.2 性能与组织

ZG42Cr2Ni2Mo试块在不同热处理工艺条件下表层(距表面20 mm)及心部(距表面100 mm)力学性能见表3所示。可以看到,两种材料经870℃淬火、560℃和580℃回火后,屈服强度均保持在900 MPa以上,抗拉强度均保持在1 000 MPa以上,最高抗拉强度达到了1 250 MPa。对于每个试块,其表层和心部的屈服强度差值在30 MPa以内,抗拉强度差值在130 MPa以内,说明两种材料在200 mm×200 mm的断面范围内,组织状态相近,强度衰减较小。

两种材料冲击韧性指标较高且较为稳定, KU_2 可以稳定达到35 J以上, KV_2 可以稳定达到27 J以上。整体来看,两种材料经相同热处理工艺处理后,冲击韧性指标相近。同一材料经不同热处理工艺处理后,580℃回火后的冲击韧性均优于560℃回火的冲击韧性,这是由于高温回火促进了淬火组织的回复和再结晶,促使硬度降低,韧性提高。同时,试块表层的冲击韧性优

表3 试验试块的力学性能
Table 3 Mechanical properties of the test blocks

材料	试块	热处理工艺	取样位置	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	A4/%	Z/%	KU_2/J (室温)	KV_2/J (室温)
1 [#]	A	870 °C × 5 h油淬	表层	1 042	1 187	7	15	46.1	35.5
		560 °C × 9 h回火	心部	1 046	1 117	3	8	44.8	32.9
	B	870 °C × 5 h油淬	表层	960	1 120	8	14	59.5	50.2
		580 °C × 9 h回火	心部	950	1 000	4	7	53.3	42.7
2 [#]	C	870 °C × 5 h油淬	表层	1 110	1 250	6	10	43.7	32.8
		560 °C × 9 h回火	心部	1 080	1 120	1	4	37.2	31.7
	D	870 °C × 5 h油淬	表层	1 010	1 160	13	30	55.1	44.2
		580 °C × 9 h回火	心部	990	1 140	8	15	50.5	43.7

于心部，因为试块表层材料较为致密、热处理中组织转变更为充分。

试块热处理后的表面和心部的微观组织如图2所示。可以看出，试块回火后，为均匀细小的回火索氏体组织，说明ZG42Cr2Ni2Mo整个试块在淬火冷却过程中发生了较完全的组织转变，这也是试块表层和心部冲击韧性指标差别不大的原因。

对试块晶粒度进行评级，试块A表面晶粒度为7级，心部晶粒度为6级；试块B表面和中心晶粒度均为7

级；试块C和试块D的表面和心部晶粒度均为6.5级。试块其表面和心部材料晶粒度相近，且晶粒细小，分布均匀，说明制定的整个工艺过程是合理的。

3.3 夹杂物

图3分别为试块A、B、C、D中心部位夹杂物分布情况。图3a为A试块的夹杂物照片，视场中存在较多的夹杂物，夹杂物最大尺寸为63 μm，由于A试块为1[#]试块接近冒口一侧，距离夹杂物聚集区近，夹杂物颗粒

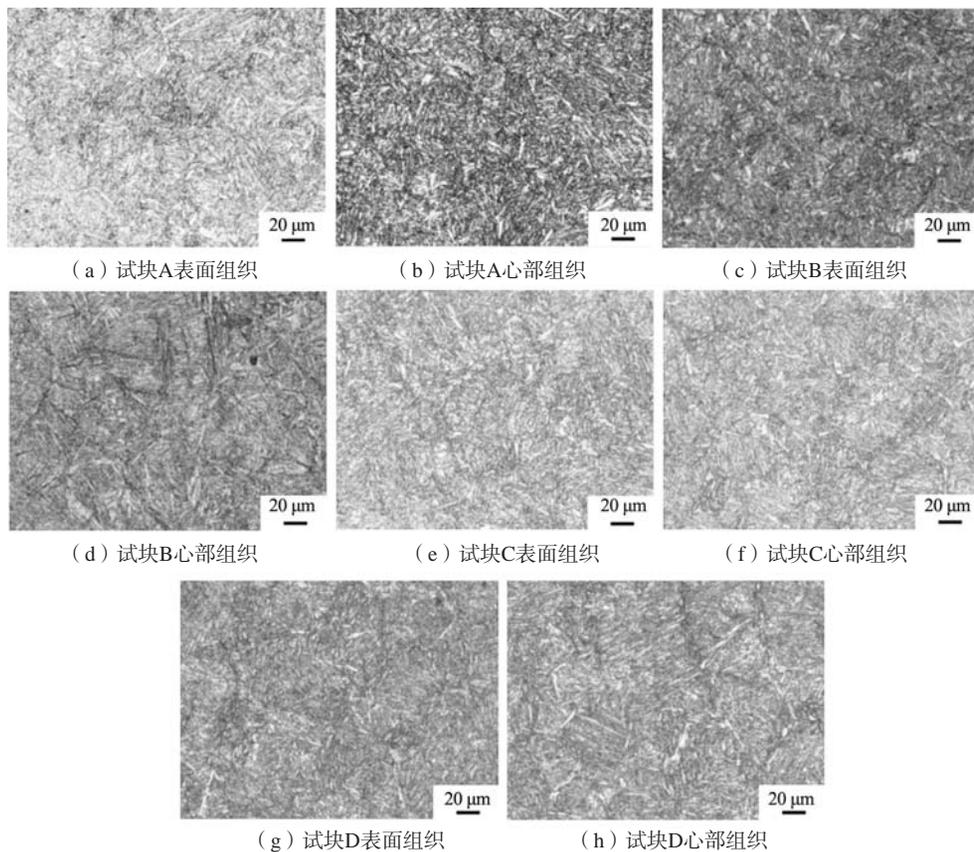


图2 试块表面及心部的金相组织

Fig. 2 Metallographic microstructures of the surface and heart of the test blocks

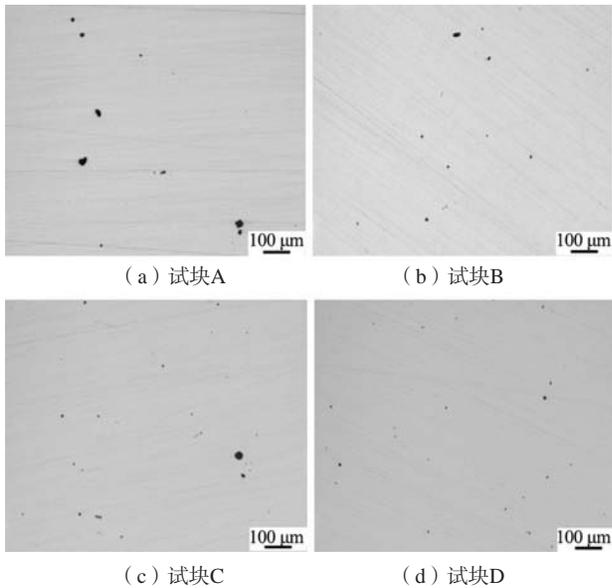


图3 试块中夹杂物的分布

Fig. 3 Distributions of the inclusions in the test blocks

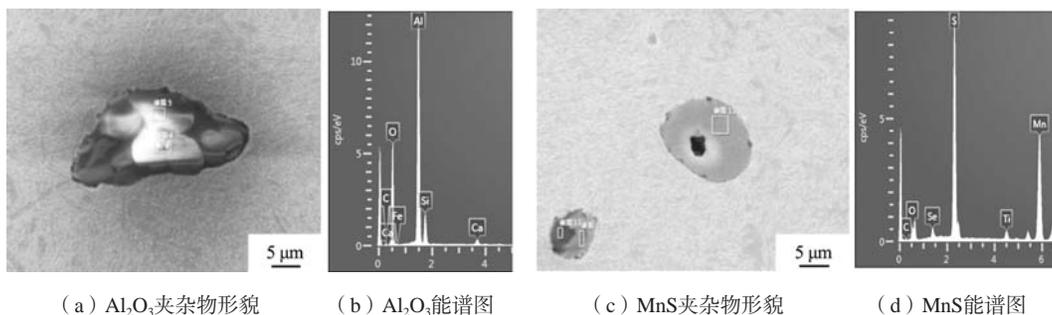
较大；图3b为B试块的夹杂物照片，夹杂物尺寸较小，视场内最大夹杂物尺寸约21 μm 。图3c、d分别为C、D试块夹杂物照片，夹杂物最大颗粒尺寸分别为36.66 μm

和26.96 μm ，夹杂物均以球状分布在基体中，其中试块C接近2[#]试块冒口侧，因此最大夹杂物尺寸大于试块D。

图4为试块基体中夹杂物形态及能谱图，可以看出，试样中颗粒形态的夹杂物是 Al_2O_3 或 MnS ，其中 Al_2O_3 为脆性夹杂物， MnS 为塑性夹杂物，为炼钢过程产物和元素偏析的结果。

结合表3力学性能检测结果，ZG42Cr2Ni2Mo钢的伸长率和断面收缩率等塑性指标较低且波动大，这与钢中存在的夹杂物相关。当钢基体中存在较多的脆性或塑性夹杂物时，基体的连续性被割裂，由于夹杂物或铸造缺陷是裂纹生成的源点，其含量和分布对材料伸长率和断面收缩率等塑性指标影响较大，最终导致钢的塑性指标降低。试验中，两种材料试块采用中频感应炉熔炼，钢液未经过精炼工序，而浇注过程采用从冒口顶注工艺方案，不利于夹杂物的上浮，这增大了钢液中出现夹杂物的可能性。

为避免铸件中出现较多的夹杂物，可以通过改进熔炼工艺和浇注工艺，如采用电弧炉初炼+炉外精炼技术^[7]，并通过改进浇注系统实现钢液平稳充型，以减少夹杂物及铸造缺陷，从而改善材料的综合性能。

图4 钢中 Al_2O_3 和 MnS 夹杂物形貌及能谱图Fig. 4 Morphologies and energy spectra of the Al_2O_3 and MnS inclusions in the steel

4 结论

(1) 设计的ZG42Cr2Ni2Mo两种成分通过870 $^{\circ}\text{C}$ 油淬和560 $^{\circ}\text{C}$ 回火后，硬度均可达到HB350以上，满足HB340~380的要求，且硬度值在80 mm深度范围内衰减量在HB20以内，为齿轮设计者计算校核齿根弯曲强度提供参考。

(2) 设计的ZG42Cr2Ni2Mo两种成分无论采用870 $^{\circ}\text{C}$ 油淬+560 $^{\circ}\text{C}$ 回火还是870 $^{\circ}\text{C}$ 油淬+580 $^{\circ}\text{C}$ 回火方案，材料屈服强度均可达到900 MPa以上，抗拉强度可

以达到1 000 MPa以上， KU_2 可以达到35 J以上， KV_2 可以达到27 J以上，且表面和心部材料的力学性能、晶粒度相近，是较为理想的高强高韧性铸造齿轮材料。综合考虑材料的力学性能和经济性，优先推荐1[#]材料成分。

(3) ZG42Cr2Ni2Mo两种成分的伸长率和断面收缩率相对较低且波动大，这与钢中存在夹杂物缺陷有关，在实际生产中可通过改进钢液冶炼方案和浇注工艺进行改善。

参考文献:

- [1] 姬建钢, 潘劲军, 王春红, 等. 国产矿用磨机大型化趋势、原因及展望 [J]. 矿山机械, 2015, 43 (8): 1-5.
- [2] 刘俊, 姬建钢, 陈松战. 磨矿装备技术发展趋势研究 [J]. 矿山机械, 2019, 47 (2): 1-6.
- [3] 李福林. 热处理对铸钢齿轮表面组织与硬度影响 [J]. 中国金属通报, 2018 (3): 61-62.
- [4] 贾庆雪. 常用铸造齿轮材料及其热处理工艺方法 [J]. 金属加工 (热加工), 2014 (15): 51-55.
- [5] 贾冠飞, 田磊, 梁敏, 等. 矿用磨机大型铸钢齿轮制造技术 [J]. 铸造, 2020, 69 (9): 986-990.
- [6] 崔忠圻. 金属学与热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [7] 魏子杰, 杜旋, 田丰, 等. ZG40CrNi2Mo大齿圈的分包熔炼及合浇技术 [J]. 金属加工 (热加工), 2013 (9): 43-44.

Research and Development of High Performance Casting Gear Steel for Super Large Mine Mill

QU Tie^{1,2}, PANG Qing-hai^{1,3}, JIA Guan-fei^{1,3}, YIN Li-tao^{1,3}, WANG Wen-yan⁴, TIAN Lei^{1,3}

(1. CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471003, Henan, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Mining Heavy Equipment, Luoyang 471000, Henan, China; 3. Luoyang CITIC HIC Casting and Forging Co., Ltd., Luoyang 471003, Henan, China; 4. Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract:

The influences of heat treatment parameters on the hardness, microstructure and properties of ZG42Cr2Ni2Mo gear steel were studied by means of composition design, preparation of cast blocks and heat treatment tests. The results showed that after oil quenching at 870 °C and tempering at 560 °C, the hardness of the ZG42Cr2Ni2Mo steel test block reached more than HB 350 and met the requirements of HB 340-380 hardness. After quenching and tempering, the test block had uniform tempered soxite microstructure with fine and uniform grain. After heat treatment, the yield strength and tensile strength of the test block reached 900 MPa and 1 000 MPa respectively, and the toughness was excellent.

Key words: cast gear; material design; high hardness; heat treatment