

冷却速率对新型 C61 齿轮钢力学性能和微观组织的影响

齐明¹, 梁晓东^{1,2}, 韩大虹³, 任建民¹, 张智超¹, 王旭¹

(1 辽宁石油化工大学机械工程学院, 抚顺 113001; 2 抚顺特殊钢股份有限公司技术中心, 抚顺 113001; 3 中国石油天然气第八建设有限公司, 抚顺 113000)

摘要: 借助光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)、X射线衍射仪(XRD)等设备,通过力学性能测试和显微组织观察,探究炉冷、水冷、石棉缓冷三种不同冷却方式对 C61 钢热轧态组织和性能的影响,对比不同状态下试验钢的性能。试验结果表明:冷却速度对试验钢的性能影响较大,由于冷却速率 $V_{\text{水冷}} > V_{\text{石棉缓冷}} > V_{\text{炉冷}}$,导致试验钢在水冷条件下强度、硬度均高于炉冷和石棉缓冷处理时的性能;热轧后经水冷,试验钢的抗拉强度(R_m)和断面收缩率($Z\%$)分别为 1 450 MPa 和 62.7%,XRD 分析得知,热轧后随冷却速率增加钢的残余奥氏体含量增多,面心立方的奥氏体有利于提升试验钢的韧性。可见,热轧水冷后的试验钢经过 950 °C 加热 1 h,水淬,经过 -73 °C 冷处理 1 h 后,恢复到室温,最后在 482 °C 回火 16 h,空冷至室温是最佳工艺方案。

关键词: 热处理工艺;热轧;显微组织;力学性能

Effect of Cooling Rate on Mechanical Properties and Microstructure of New C61 Gear Steel

Qi Ming¹, Liang Xiaodong^{1,2}, Han Dahong³, Ren Jianmin¹, Zhang Zhichao¹, Wang Xu¹

(1 School of Mechanical Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun 113001; 2 Technology Center, Fushun Special Steel Co., Ltd., Fushun 113001; 3 The Eighth Construction Company of CNPC Ltd., Fushun 113000)

Abstract: With the help of optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM), X-ray diffractometer (XRD) and other equipment, through mechanical performance testing and microstructure observation, we explored the effects of furnace cooling, water cooling, and asbestos slow cooling three different cooling methods on the structure and properties of the hot-rolled condition C61 steel, compared the performance of the test steel in different conditions. The experimental results show that the cooling rate has a great influence on the performance of the test steel. Due to $V_{\text{water cooling}} > V_{\text{asbestos slow cooling}} > V_{\text{furnace cooling}}$, the strength and hardness of the test steel under water cooling condition are higher than those of furnace cooling and asbestos slow cooling. After hot rolling and water cooling, the tensile strength (R_m) and reduction of area ($Z\%$) of the test steel are 1 450 MPa and 62.7%, XRD analysis shows that the residual austenite content of the steel increases with the increased cooling rate after hot rolling, and the surface-centered cubic austenite is conducive to improve the toughness of the test steel. It can be seen that the test steel after hot rolled + water cooling was heated at 950 °C for 1 h quenched by water, and cold treatment at -73 °C for 1 h, then returned to room temperature, finally tempering at 482 °C for 16 h, air cooling to room temperature is the best process scheme.

Key Words: Heat Treatment Process; Hot Rolled; Microstructure; Mechanical Property

齿轮在服役过程中需要承受较大的循环应力冲击载荷,这就要求其具有良好的力学性能,20CrMnTi 长时期以来是国内主要的渗碳齿轮钢种,由于 Ti 元素含量较多,容易形成 TiN 夹杂,产生疲劳裂纹源,造成齿轮的疲劳寿命缩短等问题^[1-3]。近年来,各国开始自主研发性能更为优良的齿轮钢体系,其中美国 Questek 公司研发的 C61 齿轮钢便是新一代齿轮钢的

代表。由于其中加入了大量的 Co、Ni 元素,使 C61 齿轮钢在保证高强度的同时兼顾高韧性,提高了使用寿命,国外已经将 C61 齿轮钢应用于直升机旋翼轴和汽车传动轴,但国内鲜有应用^[4-6]。

热轧工艺可以减少组织缺陷,提升合金的综合性能。马占福等^[7]在研究热轧工艺对 Q345B 钢组织和力学性能的影响时发现,当化学成分一定、变形

基金项目:国家自然科学基金(51574147),辽宁省自然科学基金(201602474)

作者简介:齐明(2000-),男,本科; E-mail:3052150254@qq.com; 收稿日期:2022-09-26

通讯作者:王旭(1979-),男,副教授,博士; E-mail:wangxu@lmpu.edu.cn

工艺一定时,冷却速度的加快和终轧温度及卷取温度的降低可以细化晶粒。余万华等^[8]在研究轧制温度对 GCr15 轴承钢组织性能的影响时发现,精轧温度为 800 ℃ 时,GCr15 钢试样的抗拉强度达到最大,此时可以获得珠光体团直径较小、Fe₃C 片层较细、网状碳化物较少的显微组织。杨跃辉等^[9]在研究中发现,当精轧终轧温度降低至 800 ℃、返红温度降低至 670 ℃ 时,可以细化组织并促进 TiC 析出,从而提高试验钢的性能。

由于 C61 齿轮钢在国内少有研究,因此,本文以热轧态不同冷却速率的 C61 齿轮钢为主体研究对象,探究不同热加工工艺对试验钢显微组织和性能的影响,为 C61 齿轮钢的热处理工艺研究提供依据。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验钢使用 50 kg 真空中频感应炉 + 真空自耗 (VIM + VAR) 工艺进行冶炼,铸锭后锻造成 55 mm × 53 mm 的棒材。具体化学成分见表 1。将经过锻造后的棒材进行热轧工艺处理,棒材在 450 热轧实验机炉膛中加热至 1 100 ℃ 后(氮气保护),等温 10 min,进行压缩变形。450 热轧实验机的轧辊尺寸为 Φ450 mm × 450 mm,轧制速度为 1 m/s。经过八道次轧制,总压下率约为 92.5%,终轧温度为 980 ~ 940 ℃,具体热轧工艺方案见表 2。热轧后选用炉冷、水冷、石棉缓冷三种冷却方式,三种冷却方式分别对应的冷却速率约为 0.5 ℃/s、100 ℃/s、2 ~ 5 ℃/s。

1.2 热处理工艺

将热轧后三种冷却方式的试验钢经过 950 ℃ 加热 1 h,水淬,经过 -73 ℃ 冷处理 1 h 后,恢复到室温,最后在 482 ℃ 回火 16 h,空冷至室温,对比不同

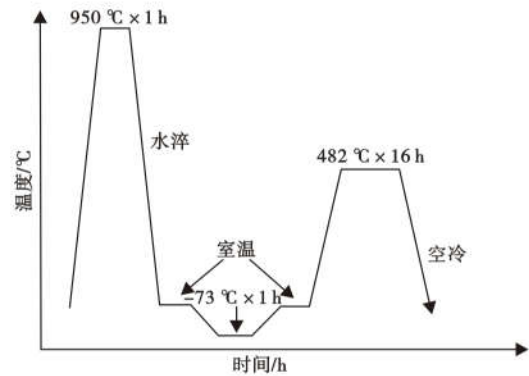


图 1 热处理工艺流程图

Fig. 1 Flow chart of the heat treatment process

冷却方式的试样进行显微组织和力学性能分析。热处理工艺流程如图 1。

1.3 试验方法

显微组织观察:金相试样尺寸为 15 mm × 15 mm × 4 mm,经磨抛后在 Olympus 光学显微镜下进行显微组织观察,其中腐蚀液为 4% 的硝酸酒精溶液。

硬度测试:硬度试样尺寸为 15 mm × 15 mm × 4 mm,将磨抛后的试样在 HR-150 A 型洛氏硬度计进行硬度测试,每组试样测试 3 个点,取其平均值作为该热处理状态硬度的最终值。

拉伸试验:试样尺寸为 $d = 5$ mm, $L = 25$ mm,室温条件下在 INSTRON5500 测试机上进行试验,拉伸速率为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$;然后在 TESCAN VEGA II LMU 扫描电镜下观察拉伸断口。

物相分析:采用 D8 advance X 射线衍射仪对不同状态的试样进行物相分析,扫描角度为 $20^\circ \sim 90^\circ$,选择 Cu 靶作为靶材。

透射组织观察:TEM 样品从热处理后的试样上切取,将热处理的试样经线切割后获得 0.6 mm 的薄片,在砂纸上研磨至 40 μm 以下,冲孔后获得 Φ3 mm 的小圆片,然后在 -20 ℃、8% HClO₄ 的电解液环境中进行双喷减薄,最后在 JEM-2100 透射电镜上进行组织观察,操作电压为 200 kV。

2 试验结果及分析

2.1 不同冷却方式对热处理后 C61 钢力学性能的影响

2.1.1 硬度

图 2 为热轧后三种冷却方式 C61 齿轮钢的硬度测试结果。从图中可以看出,水冷条件下试验钢的硬度最高,可达到 43.8HRC;石棉缓冷条件下硬度次之,达到 39.8HRC;炉冷条件下硬度最低为 38.8HRC。随冷却速率的加快,硬度逐渐增加(水

表 1 C61 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of C61 steel/%

C	Cr	Ni	Co	Mo	V	Fe
0.16	3.58	7.60	12.19	0.96	0.23	Bal.

表 2 热轧试验方案

Table 2 Experimental scheme of hot rolling

道次	板宽/mm	板厚/mm	压下率%	轧制温度/℃
原始尺寸	55	53		
第一道次		47.00	32.86	1 100
第二道次		35.00	25.53	
第三道次		24.00	31.43	
第四道次		17.00	29.17	
第五道次		12.00	29.41	
第六到次		8.50	29.17	
第七道次		5.80	31.76	
第八道次		4.00	31.03	980 ~ 940

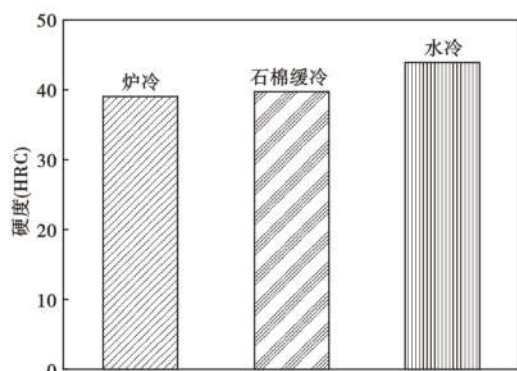


图 2 不同冷却方式热处理后 C61 齿轮钢的硬度

Fig. 2 Hardness of C61 gear steel after heat treatment in different cooling methods

冷 > 石棉缓冷 > 炉冷), 相较于炉冷, 水冷条件下硬度值提升了约 5%。

2.1.2 拉伸性能

图 3 为热轧后三种冷却方式 C61 齿轮钢的拉伸性能。从图中可以看出, 试验钢经不同冷却方式处理后, 其拉伸性能有一定差距。在炉冷条件下, 试验钢的抗拉强度 (R_m) 最低, 数值为 1 250 MPa; 在水冷条件下, 试验钢的抗拉强度 (R_m) 最高, 达到 1 450 MPa; 而石棉缓冷条件下, 其抗拉强度 (R_m) 介于两者之间, 数值为 1 376 MPa。对于屈服强度 ($R_{0.2}$) 来说, 其表现趋势有所不同, 在炉冷条件下, 屈服强度 ($R_{0.2}$) 最高, 可达到 1 071 MPa; 水冷条件下, 试验钢的屈服强度 ($R_{0.2}$) 最低, 为 934 MPa; 同样, 石棉缓冷条件下, 试验钢的屈服强度 ($R_{0.2}$) 介于二者之间, 数值为 997 MPa。对于伸长率和断面收缩率而言, 由于冷却速度的影响, 随炉冷却时, 试验钢的韧性较好, 伸长率和断面收缩率较高, 分别为 16.2% 和 65%; 而水冷条件下, 伸长率和断面收缩率不及炉冷的数值高, 但是相差不大, 差值约为

1.8% 和 2.3%。可见, 试验钢经热轧后其强度和韧性都有所提高, 这是因为热轧温度越高, 使得 M(C, N) 粒子在加热时能够溶解得越充分, 在之后的水冷过程中, 弥散析出碳、氮化物, 从而起到沉淀强化的作用。另外结合试验钢原始晶粒由于控制轧制的作用得到了细化, 因而提高了试验钢的强度和韧性, 发挥了微合金元素的强化作用^[10]。

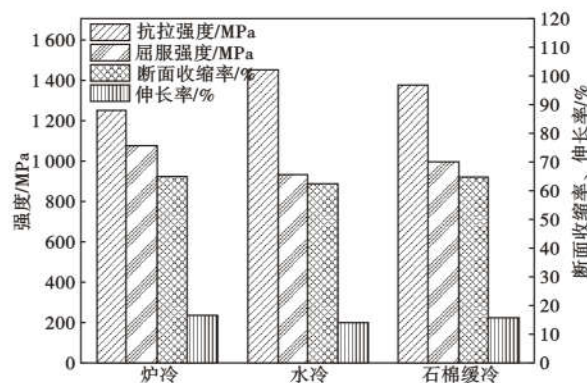


图 3 不同冷却方式热处理后 C61 齿轮钢的拉伸性能

Fig. 3 Tensile properties of C61 gear steel after heat treatment in different cooling methods

图 4 为试验钢经拉伸试验后, 截取的拉伸断口 SEM 形貌。可以看出, 试验钢在不同工艺处理下, 拉伸断口形貌都为韧窝聚集型 + 少量准解理断裂。不同的是在冷速最慢的炉冷条件下, 韧窝大且深, 在大韧窝周围密集分布小韧窝, 准解理面积相对较小; 而水冷条件下, 准解理面积增多, 韧窝数量相对较少, 导致了在韧性方面的差异。另外图 4(b) 中, 韧窝数量多且密集, 而图 4(c) 中韧窝数量相对较少, 同时还存在一些第二相颗粒, 弥散分布于基体之中, 起到了沉淀强化的作用^[11-12], 因而试验钢经过炉冷

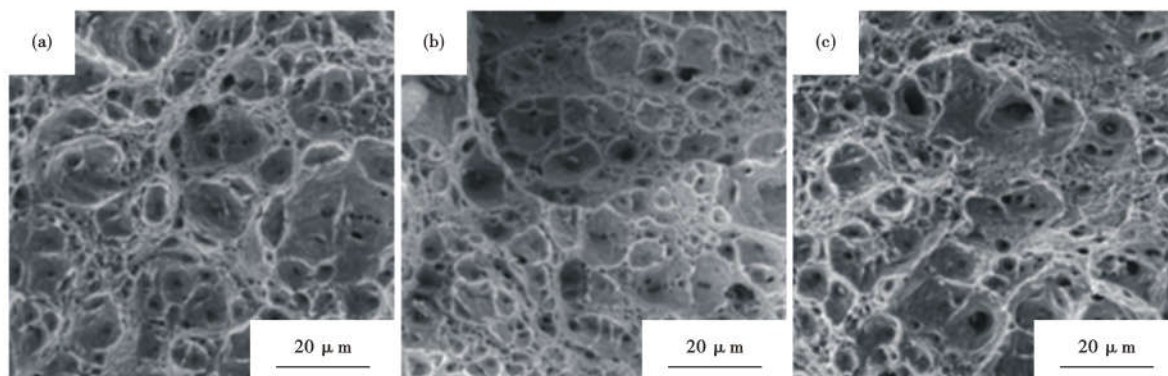


图 4 不同冷却方式热处理后 C61 齿轮钢拉伸断口形貌: (a) 炉冷; (b) 水冷; (c) 石棉缓冷

Fig. 4 Tensile fracture morphology of C61 gear steel after heat treatment in different cooling methods: (a) furnace cooling; (b) water cooling; (c) asbestos slow cooling

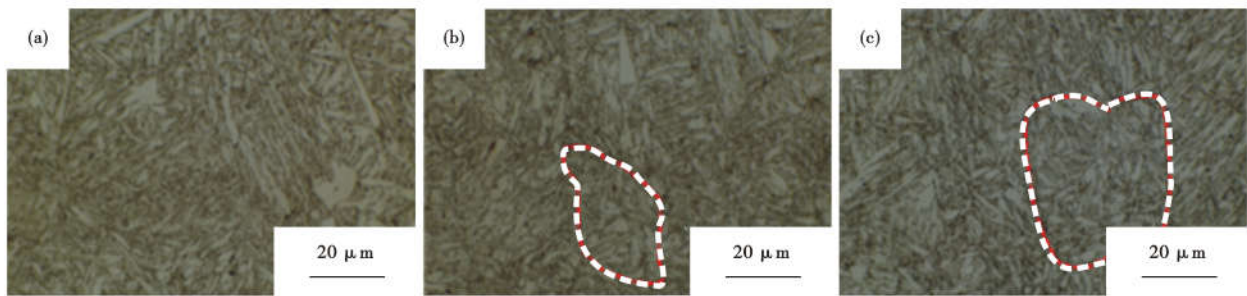


图5 不同冷却方式热处理后 C61 齿轮钢显微组织:(a) 炉冷;(b) 水冷;(c) 石棉缓冷

Fig. 5 Microstructure of C61 gear steel after heat treatment in different cooling methods:(a) furnace cooling;(b) water cooling;(c) asbestos slow cooling

处理后性能更佳。

2.2 不同冷却方式对热处理后 C61 钢显微组织的影响

图5为热轧后三种冷却方式 C61 齿轮钢经 950 ℃保温 1 h,水淬, -73 ℃冷处理 1 h,恢复至室温,482 ℃回火 16 h 后的显微组织。从图中可以看出,三种冷却方式下,基体组织均为板条马氏体+残余奥氏体+未溶碳化物。由于 $V_{\text{水冷}} > V_{\text{石棉缓冷}} > V_{\text{炉冷}}$,因此可以看出,图5(a)中残余奥氏体要多于图5(b)、(c);同时,由于冷却速度慢,原奥氏体晶界也已经看不清楚,炉冷的冷却速度慢,强度较低,但伸长率和断面收缩率比较高,这是因为,冷却速度慢,奥氏体发生转变时,生成的马氏体量相对少,同时奥氏体晶粒粗化,沿晶界会析出较多的碳化物以及铁素体,导致试验钢强度硬度下降^[13]。随着冷却速度的加快,试验钢组织中,原奥氏体晶粒开始减小(如图5中圆圈所示),淬火时形成的马氏体数量多且尺寸较小,对晶界和晶粒内部的钉扎作用较强,因此其强度硬度较高。如前所述,试验钢原始晶粒由于控制轧制的作用得到了细化,即在未再结晶区进行轧制,奥氏体晶粒内产生形变带,形变储能高,而

后经过水冷处理,冷却速度的加快,导致晶粒来不及长大,因此晶粒得到细化。此外变形量可以影响晶粒的细化,当终轧温度一定时,变形量的增大,导致晶粒被压扁,容易形成变形带,形核点增多,进而导致了晶粒细化^[14]。

3 结论

(1)冷却速度对试验钢的性能影响较大,由于 $V_{\text{水冷}} > V_{\text{石棉缓冷}} > V_{\text{炉冷}}$,导致试验钢在水冷条件下强度、硬度均高于炉冷和石棉缓冷处理时的性能,在韧性方面,虽然不及炉冷和石棉缓冷处理韧性高,但差距并不明显,因此水冷条件下试验钢力学性能最佳。

(2)热轧后经水冷,试验钢的抗拉强度(R_m)和断面收缩率($Z\%$)分别为 1 450 MPa 和 62.7%,有利于提升试验钢的韧性。

(3)热轧温度较高,使得第二相粒子在加热时能够溶解充分,在之后的水冷过程中,弥散析出碳、氮化物,从而起到沉淀强化的作用。另外结合试验钢原始晶粒由于控制轧制的作用得到了细化,因而提高了试验钢的强度和韧性,发挥了微合金元素的强化作用。

参考文献

- [1] 罗成. 高强度汽车齿轮渗碳钢的发展及应用[J]. 炼钢, 2006, 22(5): 56-59.
- [2] 肖广林. 齿轮渗碳钢 18CrNiMo7-6 的制备及组织性能分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2014.
- [3] 吴树漂, 刘占江, 武云峰, 等. 我国齿轮钢的生产与应用[J]. 特殊钢, 2003, 24(5): 30-33.
- [4] 周敏, 厉勇, 黄顺喆, 等. 奥氏体化温度对二次硬化渗碳钢组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(2): 108-112.
- [5] 周敏, 厉勇, 刘荣佩, 等. 新型二次硬化渗碳钢的高温塑性及热加工图[J]. 钢铁, 2016, 51(6): 76-81.
- [6] 王馨缘, 李亮, 吴启迪, 等. 奥氏体化温度对轧态 C61 钢显微组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(7): 72-78.
- [7] 马占福, 赵西成. 热轧工艺对 Q345B 钢组织和力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(5): 120-124.
- [8] 余万华, 石素锦, 刘玉坤, 等. 轧制温度对 GCr15 轴承钢组织性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2020, 41(1): 80-85.
- [9] 杨跃辉, 苑少强, 吴迪, 等. 轧制工艺对低锰型 Q355 钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(12): 132-135.
- [10] 毛卫民, 刘恒三, 杨平, 等. 终轧温度对 Q235 热轧钢板晶粒组织的非常规影响[J]. 金属热处理, 2004, 29(4): 20-24.
- [11] 崔辰硕, 高彩茹, 苏冠侨, 等. 热轧低碳钒钢强韧化机制的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(3): 341-344.
- [12] 侯晓英, 毕永杰, 郝亮. 热轧 TRIP980 钢微观组织及强化机制分析[J]. 钢铁, 2019, 54(4): 63-67.
- [13] 尚延涛, 李凯驰, 许小虎, 等. 冷却方式对 1Cr13Ni 马氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. 热加工工艺, 2019, 48(8): 232-235.
- [14] Lai J, Huang H, Buising W. Effects of microstructure and surface roughness on the fatigue strength of high-strength steels[J]. Procedia Structural Integrity, 2016, Volume 2: 1213-1220.