研究与开发

热处理工艺对塑料模具钢3Cr2NiMo组织性能的影响

冯丹竹[1,2],杨志强[3],胡筱旋[1,2],黄健[1,2]
(1.海洋装备金属材料及其应用全国重点实验室,辽宁 鞍山 114009;
2.鞍钢集团钢铁研究院,辽宁 鞍山 114009;3.鞍钢股份有限公司冷轧厂,辽宁 鞍山 114021)

摘要:研究了不同正火、回火温度对塑料模具用钢3Cr2NiMo组织及力学性能的影响。结果表明,试验钢经810 ℃和840 ℃正火,马氏体板条呈短小的细针状,组织均匀,原始奥氏体晶粒度均为11级;经900 ℃正火后,组织变得粗大,原始奥氏体晶粒度为9级。正火硬度随温度的升高呈先增后减的趋势,通过分析并确定试验钢适宜的正火温度为840 ℃。回火温度为450~500 ℃时,组织为回火屈氏体,板条组织保持原马氏体位向;回火温度升高至650 ℃时,组织为回火索氏体,无明显位向,碳化物呈球状,聚集长大,均匀弥散分布,板条合并边界模糊。试验钢随回火温度升高硬度不断下降。

关键词:正火工艺;回火工艺;显微组织;力学性能
中图分类号:TG142 **文献标志码**:A **文章编号**:1006-4613(2026)03-0033-05
DOI:10.3969/j.issn.1006-4613.2026.03.006

Effect of Heat Treatment Process on Microstructure and Properties of Plastic Mold Steel 3Cr2NiMo

FENG Danzhu[1,2], YANG Zhiqiang[3], HU Xiaoxuan[1,2], HUANG Jian[1,2]
(1. State Key Laboratory of Metallic Materials for Marine Equipment and Applications, Anshan 114009, Liaoning, China; 2. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China; 3. Cold Rolled Strip Steel Mill of Angang Steel Co., Ltd., Anshan 114021, Liaoning, China)

Abstract: The effect of different normalizing and tempering temperatures on the microstructure and mechanical properties of plastic mold steel 3Cr2NiMo was studied. The results showed that after normalizing at 810 ℃ and 840 ℃, the martensite lath was short and fine needle shaped with uniform structure, and the original austenite grain size was Grade 11. After normalizing at 900 ℃, the microstructure became coarse, and the original austenite grain size was Grade 9. The normalizing hardness increased first and then decreased with the increase of temperature. It was determined that the appropriate normalizing temperature of the test steel was 840 ℃. When the tempering temperature ranged from 450 ℃ to 500 ℃, the microstructure was tempered troostite, and the lath structure maintained the original martensite orientation. When the tempering temperature was increased to 650 ℃, the microstructure was tempered sorbate without obvious orientation. Subsequently, the carbides became spherical, aggregate and grow, while remaining uniformly dispersed. Moreover, the lath boundaries appeared blurred. The hardness of the test steel decreased with the increase of tempering temperature.

Key words: normalizing process; tempering process; microstructure; mechanical properties

中国模具行业近年来发展迅速,制造汽车、飞机、高铁等领域的精密零部件均需要模具,制造业对于模具的需求量不断增加,对其综合性能的要求也不断提高[1]。其中,塑料模具产值已居许多国家榜首,塑料模具钢也被广泛应用[2],尤其是预硬型塑料模具钢,在模具制造时无需热处理

冯丹竹,硕士,高级工程师,2015年毕业于东北大学材料学专业。E-mail:fengdanzhu@163.com

可直接加工，减小了模具变形和开裂的风险。国内外预硬型塑料模具钢的成分设计大部分源于美国P20钢[3]，我国在P20钢基础上自主研发了3Cr2Mo钢等系列钢种，并形成了国标。3Cr2NiMo钢在3Cr2Mo钢基础上添加适量Ni元素，旨在提高淬透性及耐蚀性，综合性能较好。科研院所及企业也对预硬型塑料模具钢的系列钢种进行了相关研究，李红英等人[3]对3Cr2Mo钢的淬火、回火工艺及机理进行分析探讨，得到了最佳预硬化热处理工艺；杨天亮等人[4]对V在3Cr2Mo钢中的作用进行研究，发现其可显著改善3Cr2Mo钢的淬透性和硬度，高华耀等人[5]设计了新型3Cr2MnNiMoV塑料模具钢并研究了回火工艺对其组织和性能的影响。目前，大部分研究人员在预硬型塑料模具钢退火、淬回火、元素作用等方面进行了大量细致研究，但涉及正火、回火工艺的研究较少，因此本文对3Cr2NiMo钢进行正火、回火处理，研究不同工艺对其组织和性能的影响，为实际生产提供理论基础。

1 试验材料与方法

试验材料在200 kg真空感应熔炼炉中冶炼，浇注成尺寸为130 mm×160 mm×500 mm的钢锭，试验钢的化学成分如表1所示。

表1 试验钢的化学成分（质量分数）

Table 1 Chemical Compositions of the Test Steel (Mass Fraction)　　%

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Fe
0.40	0.32	1.53	0.008	0.005	1.95	0.21	1.10	Bal.

熔炼所得钢锭在高温箱式电阻炉中加热，加热温度1 200 ℃，保温3 h后，在Φ550 mm二辊试验轧机上轧制至30 mm厚度，空冷至室温。采用JMatPro软件计算得到3Cr2NiMo钢的相图（见图1）。

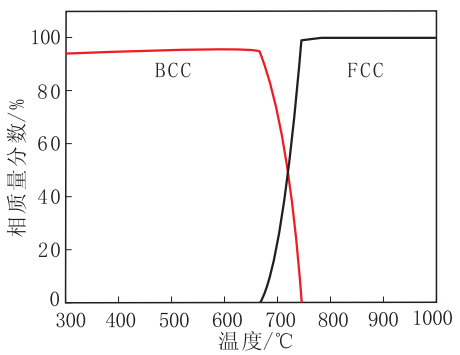


图1 3Cr2NiMo钢的相图

Fig. 1 Phase Diagram of 3Cr2NiMo Steel

由图1可知，试验钢的奥氏体化温度为745 ℃，奥氏体的形成需要有适宜的过热度作为驱动力，因此试验选择在不同温度下进行正火热处理。在轧态钢板上截取30 mm×200 mm×200 mm试样块进行正火热处理，随后确定适宜正火温度再进行回火热处理。试验钢的热处理工艺如表2所示。

取试样磨平后在厚度方向中心处进行洛氏硬度测试，测试点间隔5 mm，测试结果取5点平均值。对试样进行磨制、抛光、4%浓度硝酸酒精溶液侵蚀后，分别在ZEISS Axiovert 200 MAT光学显微镜和FEI QUSNTA 400扫描电镜（SEM）下观察其微观组织形貌。试验钢经正火后取试样研磨抛光，进行奥氏体晶界腐蚀，晶界腐蚀剂成分为过饱和苦味酸水溶液，使用水浴锅将盛有腐蚀剂的烧杯加热至75 ℃，将试样浸入到腐蚀剂中，腐蚀30~40 s直至奥氏体晶界显现，通过ZEISS Axiovert 200 MAT光学显微镜观察，并根据GB/T 6394—《金属平均晶粒度测定方法》对不同正火温度下的奥氏体晶粒大小进行评级。

表2 试验钢热处理工艺

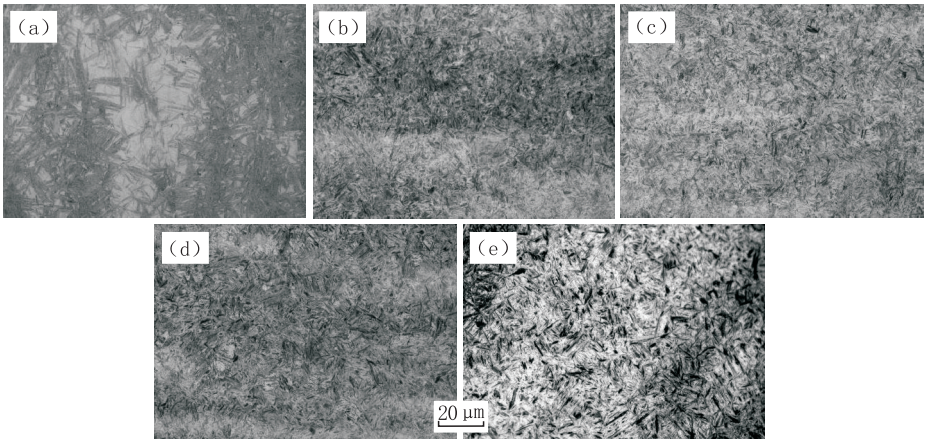
Table 2 Heat Treatment Process of the Test Steel

试样编号	正火温度/℃	保温时间/min	回火温度/℃	保温时间/min
1	810	120	—	—
2	840	120	—	—
3	870	120	—	—
4	900	120	—	—
5	840	120	450	120
6	840	120	500	120
7	840	120	550	120
8	840	120	650	120

2 结果与分析

2.1 正火组织及性能

试验钢轧态及不同正火温度下的光学显微组织如图2所示，通过图2可以观察到试验钢轧态光学显微组织为隐针马氏体和贝氏体，畸变的晶粒沿轧制方向被拉长，部分区域呈现黑白相间条带分布，颜色深的部位说明合金含量较高，存在成分偏析。试验钢经810 ℃和840 ℃正火后，可见马氏体呈短小细针状，组织细小、均匀分布；在870 ℃，马氏体有变粗大的趋势但不明显；经900 ℃正火后马氏体组织粗化。正火热处理有助于碳及合金元素扩散[6]，使组织成分均匀化，减轻元素偏析。



(a) 轧态组织；(b) 810 ℃；(c) 840 ℃；(d) 870 ℃；(e) 900 ℃

图2 试验钢轧态及不同正火温度下的光学显微组织

Fig. 2 Optical Microstructure of the Test Steel in Rolled State and at Different Normalizing Temperatures

试验钢经840 ℃正火处理的XRD衍射图谱如图3所示，通过图3可以观察到组织中只存在马氏体峰，无铁素体和奥氏体峰，说明组织中无残余奥氏体和铁素体，马氏体转化完全。

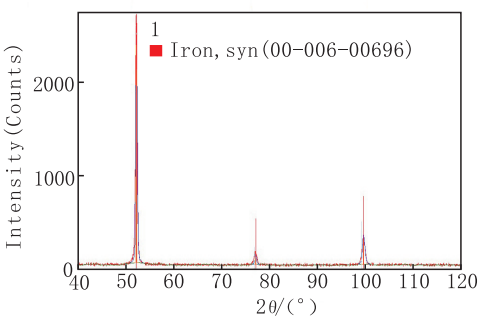
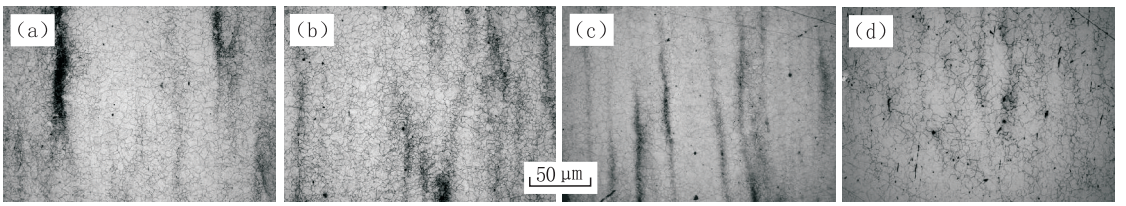


图3 840 ℃正火处理后的XRD衍射图谱

Fig. 3 XRD Diffraction Pattern after 840 ℃ Normalizing Treatment

试验钢不同正火温度下的晶粒度如图4所示，由图4可见试验钢经810 ℃和840 ℃正火后，晶粒均为等轴晶，这是由于材料在正火保温过程中不断吸收能量，当达到相变及晶界迁移条件时晶粒发生回复和再结晶，畸变的晶粒转变为等轴晶[7]。在810 ℃和840 ℃晶粒较细小，晶粒度为11级；正火温度为870 ℃，晶粒有粗化趋势，晶粒度为10.5级，大晶粒比例升高；正火温度升至900 ℃时，晶粒度为9级，晶粒明显粗化，由于正火温度较高增加了再结晶驱动力，使大尺寸晶粒附近出现细小的再结晶晶粒。随着正火温度的升高，晶粒度与组织的变化趋势相对应，马氏体一般在晶粒内部长大，810 ℃和840 ℃正火时马氏体的生长受限于晶界，因此晶粒较细小；当900 ℃正火时，晶粒粗化，马氏体组织也相应粗大[8]。



(a) 810 ℃；(b) 840 ℃；(c) 870 ℃；(d) 900 ℃

图4 试验钢不同正火温度下的晶粒度

Fig. 4 Grain Size of the Test Steel at Different Normalizing Temperatures

试验钢不同正火温度下的硬度如图5所示，通过图5可知试验钢硬度随正火温度的升高呈先稍有增加后减小的趋势。

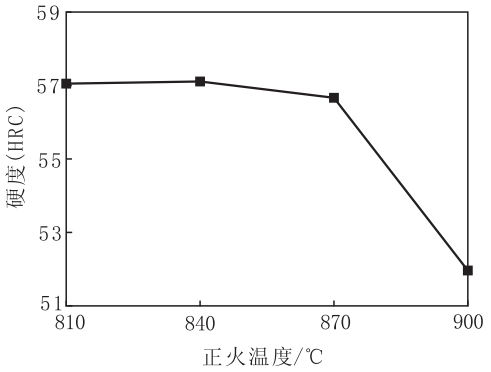


图5 试验钢不同正火温度下的硬度

Fig. 5 Hardness of the Test Steel after Normalization at Different Temperatures

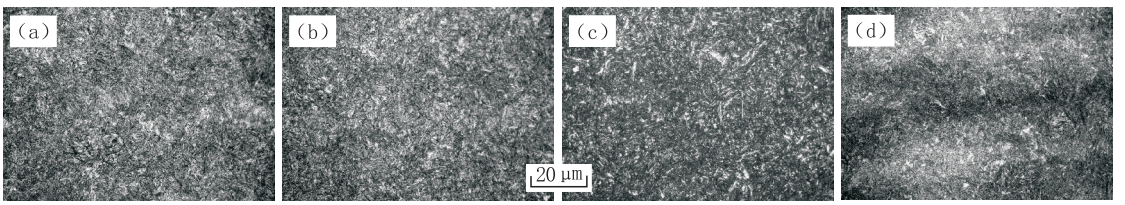
在810 ℃和840 ℃，随正火温度的升高，组织中未溶的碳化物和合金元素进一步溶入基体，产生的固溶强化作用使试验钢硬度稍有提高。在840~900 ℃，正火温度较高使晶粒粗化，固溶强化作用被晶粒尺寸长大带来的软化作用抵消，硬度呈下降趋势。由于900 ℃正火温度较高，一方面使晶粒长大，另一方面使组织内应力增加，从而导致马氏体组织粗化，硬度显著降低。此外，试验钢合金元素的活性在900 ℃下显著增加，可大量固溶于组织中使奥氏体稳定性提高[9]，经正火处理后仍然保留了一定量奥氏体，导致试验钢900 ℃正火硬度显著降低。

塑料模具钢具有良好的耐磨性、抗疲劳性及长寿命的基础是具有优异的显微组织和较高的硬度，综合上述分析结果，确定试验钢适宜的正火温度为840 ℃。

2.2 回火组织及力学性能

试验钢不同回火温度下的光学显微组织如图6所示。通过图6可以看出当回火温度为450 ℃、500 ℃时，试验钢的显微组织为回火屈氏体，并保持原有马氏体位向。回火温度升高至550 ℃，其显微组织较为均匀，有些板条发生合并导致宽度增加。回火温度为650 ℃，其显微组织为回火索氏体，无明显位向。

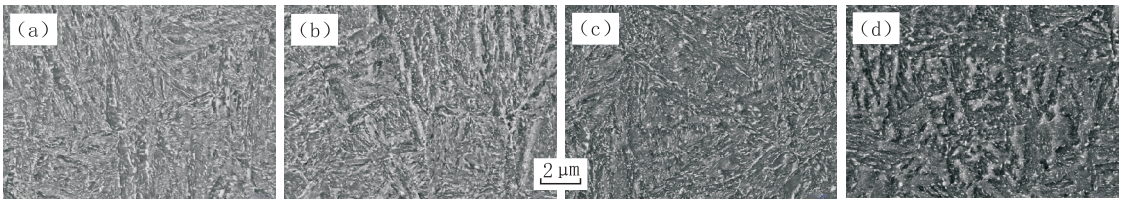
由于碳化物的尺寸和分布能够随回火温度变化影响钢的强化程度，采用扫描电镜观察碳化物的变化规律来进一步分析碳化物析出受回火温度变化的影响，试验钢不同回火温度下的SEM组织如图7所示。当回火温度为450 ℃和500 ℃时，组织呈成束的板条状，不同板条束间呈现约60°、90°、120°、180°等的位向分布，碳化物呈条状分布在板条边界处；当回火温度为550 ℃时，析出的碳化物增多，并有球化、长大的趋势；随回火温度升高至650 ℃时，碳化物呈球状，聚集长大，均匀弥散分布，板条合并且边界模糊。



(a) 450 ℃; (b) 500 ℃; (c) 550 ℃; (d) 650 ℃

图6 试验钢不同回火温度下的光学显微组织

Fig. 6 Optical Microstructure of the Test Steel at Different Tempering Temperatures



(a) 450 ℃; (b) 500 ℃; (c) 550 ℃; (d) 650 ℃

图7 试验钢不同回火温度下的SEM组织

Fig. 7 SEM Microstructure of the Test Steel at Different Tempering Temperatures

试验钢不同回火温度下的硬度如图8所示，通过图8可见试验钢硬度随回火温度升高不断下降。

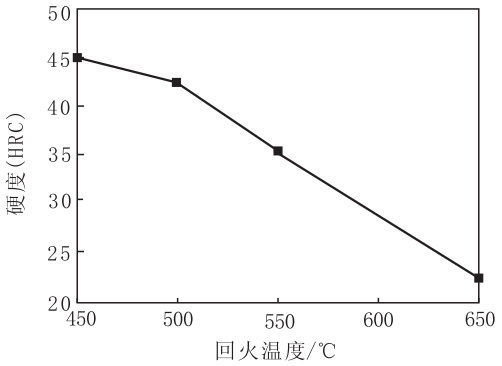


图8 试验钢不同回火温度下的硬度

Fig. 8 Hardness of the Test Steel at Different Tempering Temperatures

导致试验钢在回火过程中硬度变化的原因主要有两方面，一是马氏体在回火过程中分解、回复以及再结晶，降低位错密度，试验钢硬度降低；另一方面是试验钢组织中析出碳化物，可提高试验钢硬度。在试验钢450~650 ℃的回火过程中，马氏体的分解和回复以及位错降低起到的软化作用始终占主导地位，碳化物析出强化作用小于软化作用，导致试验钢硬度不断降低。随回火温度升高，试验钢组织中析出的碳化物形貌由条状或短棒状转变为细粒状或球状，数量逐渐增多，回火温度达到650 ℃，碳化物聚集长大而球化[10]。试验钢中析出的碳化物可显著降低马氏体晶格畸变程度[9]，降低组织中残余应力，使组织稳定化，延长试验钢的服役周期。试验钢的回火过程实际是过饱和的α′固溶体的脱溶过程[11]，该过程受控于试验钢中Cr、Mn、Ni、Mo等合金元素的扩散。在较低温度回火时，马氏体中碳原子由于活性增加迁移至缺陷处，但马氏体此时分解程度低导致组织仍保持原有形貌。碳原子的活性随回火温度的升高而增大，马氏体分解程度也逐渐增大。当回火温度升高至650 ℃，马氏体分解彻底，原有位向消失，通过回复再结晶使晶粒转变为等轴晶，此时位错密度显著降低，造成该温度下回火后的试验钢硬度最低。

3 结论

（1）试验钢的晶粒度与组织随正火温度升高变化趋势一致。经810 ℃和840 ℃正火，针状马氏体组织及晶粒细小、均匀分布，原始奥氏体晶粒度均为11级；正火温度为870 ℃，晶粒有粗化趋势，晶粒度为10.5级；900 ℃正火后组织变得粗大，原始奥氏体晶粒度为9级。试验钢硬度随正火温度的升高呈先稍有增加后减小的趋势。在810~840 ℃，随正火温度的升高，试验钢硬度稍有提高，在840~900 ℃，试验钢硬度随之下降，因此，确定试验钢适宜的正火温度为840 ℃。

（2）试验钢回火温度为450~500 ℃，组织为回火屈氏体，碳化物呈条状分布在板条边界处；随着回火温度升高至650 ℃，组织为回火索氏体，碳化物呈球状均匀弥散分布，板条合并且边界模糊。试验钢硬度随回火温度升高不断下降。在试验钢450~650 ℃的回火过程中，马氏体的分解和回复，位错的降低起到的软化作用始终占主导地位，碳化物析出强化作用小于软化作用使试验钢硬度不断降低。

参考文献

[1] 马党参，陈再枝. 国内外模具钢的现状及发展趋势[J]. 模具工程，2006(8)：78-85.
[2] 宋鸣，倪亚辉. 塑料模具钢的性能和选用[J]. 塑料工业，2004，32(10)：37-40.
[3] 李红英，曾翠婷，王法云，等. 调质工艺对3Cr2Mo钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报，2011，32(3)：120-126.
[4] 杨天亮，王琳，刘玉芬. 钒微合金化对3Cr2Mo钢性能的影[J]. 机械工程材料，2011，35(1)：37-38.
[5] 高华耀，金青林，迟宏宵，等. 回火温度对3Cr2MnNiMoV钢组织与力学性能的影响[J]. 材料热处理学报，2017，38(5)：118-123.
[6] 韩亚辉，李长生，任津毅，等. 正火温度对H13热作模具钢组织性能的影响[J]. 机械工程材料，2020，44(2)：42-45.
[7] 顾佳羽，李欢. 高温正火对H13钢锻后组织的影响[J]. 金属热处理，2012，37(6)：70-72.
[8] 苏德达，李家俊. 钢的高温金相学[M]. 天津：天津大学出版社，2007：164-168.
[9] 李东辉. 深冷处理对H13热作模具钢组织和性能的影响[D]. 昆明：昆明理工大学，2020.
[10] 李继红，李岩，张海存，等. 回火温度对40CrNiMo7钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理，2011，36(7)：28-31.
[11] 惠卫军，董瀚，翁宇庆，等. 回火温度对Cr-Mo-V系高强度钢力学性能的影响[J]. 金属学报，2002，38(10)：1009-1014.

（编辑 白璐）
修回日期：2025-04-12