



锻后热处理工艺对 3Cr13NiMoVN 塑料模具钢 组织和性能的影响

刘 明, 毕雨涵, 李 响, 王玺洋, 张伟英

(抚顺特殊钢股份有限公司技术中心, 抚顺 113001)

摘 要: 为了满足市场对高抛光、高耐腐蚀、高强韧钢材的要求, 通过优化化学成分和热处理工艺等方法, 获得综合性能更佳的高品质耐蚀塑料模具钢。试验采用“电弧炉+真空精炼+电渣重熔”的冶炼方法, 经过 35MN 快锻机制备了截面尺寸为 230 mm×710 mm 的大型扁钢。利用 JMatPro 软件、OM、SEM、冲击试验机研究了采用不同锻后热处理工艺对新型耐蚀塑料模具钢 3Cr13NiMoVN 的组织 and 性能的影响。结果表明, 锻后采用 1 050 °C 正火+等温退火工艺能获得更均匀的球状珠光体组织。1 000 °C 正火+等温退火工艺与常规的退火工艺获得组织状态相同, 即组织中存在碳化物空白区和沿孪晶界析出的链状碳化物, 并遗传到回火组织中。不均匀的退火组织对钢材冲击韧性有较大影响, 1 050 °C 正火+等温退火+淬回火工艺冲击值比 1 000 °C 正火+等温退火+淬回火工艺高出 77%~80%。

关键词: 塑料模具钢; 热处理工艺; 组织; 性能

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N260096 **中图分类号:** TG156. 4

Effect of Post-Forging Heat Treatment Process on Microstructure and Properties of 3Cr13NiMoVN Plastic Die Steel

Liu Ming, Bi Yuhan, Li Xiang, Wang Xiyang, Zhang Weiying

(Technology Center of Fushun Special Steel Co., Ltd., Fushun 113001, China)

Abstract: To meet market demands for steel materials featuring high polishability, superior corrosion resistance and excellent strength-toughness balance, a high-quality corrosion-resistant plastic die steel with improved comprehensive properties is developed via optimizing chemical composition and heat treatment processes. The steel was smelted by the process route of "electric arc furnace + vacuum refining + electroslag remelting", and large flat steel with a cross-sectional dimension of 230 mm×710 mm was manufactured using a 35MN rapid forging press. The effect of different post-forging heat treatment processes on the microstructure and properties of a novel corrosion-resistant plastic die steel 3Cr13NiMoVN was studied using JMatPro software, OM, SEM, hardness tester and impact testing machine. The results show that the post-forging process of 1 050 °C normalizing + isothermal annealing yields a more uniform spheroidal pearlite microstructure. The microstructure obtained by 1 000 °C normalizing + isothermal annealing is identical to that of the conventional annealing process, namely carbide-depleted zones exist in the microstructure, and chain-like carbides precipitate along twin boundaries, and these features are inherited by the tempered microstructure. The non-uniform annealed microstructure has a significant effect on the impact toughness of the steel. The impact toughness of the steel treated by 1 050 °C normalizing + isothermal annealing + quenching and tempering is 77%~80% higher than that of the steel treated by 1 000 °C normalizing + isothermal annealing + quenching and tempering process.

Key Words: Plastic Die Steel; Heat Treatment Process; Microstructure; Properties

随着我国塑料产业的蓬勃发展, 高性能的塑料制品越来越多, 对于塑料模具钢的需求量越来越大, 近年来国产塑料模具钢产量几乎占据了模具钢总产量的 50% 以上^[1]。我国科研院校和特殊钢企业通过模具性能的影响因素的研究和细分市场需求, 开发了优秀的模具钢产品, 质量达到了进口材料水平, 相继制定国家标准、行业标准、企业标准, 引领

模具钢产品的高质量发展^[2-4]。随着耐蚀塑料模具设计的复杂化、服役环境的苛刻化, 大量需求高抛光、高韧性、高耐腐蚀同时兼备的高性能材料。在利用 C-N-Cr-Mo-V 合金元素的协同作用机制设计开发新材料的同时, 需要重点关注物理冶金技术, 其中, 热处理是发挥合金元素的潜在作用, 决定钢材的综合性能的重要环节。从合金元素的角度, 国内

外对大量的关于Cr13型耐蚀塑料模具钢添加N、Ni、Mo、V元素的研究,主要结论是合金元素对钢的组织均匀性、力学性能和耐腐蚀性能均有提高作用^[5-8]。从产业化冶金生产的角度,通过热加工变形方式、热处理工艺的设计和优化使Cr13型耐蚀塑料模具钢获得高的综合性能的研究较少。Cr13型耐蚀塑料模具钢通过Ni、Mo、V、N等元素合金化后,降低C原子在奥氏体中的扩散速度、推迟珠光体转变、降低Ms和Mf点,使钢中易形成网带状二次碳化物偏析、链状球状珠光体和数量较多的残余奥氏体等形态。因此,通过调整热处理工艺消除或改善钢中存在的网、带、链状碳化物,提高组织均匀性,是Cr13型耐蚀塑料模具钢合金化后的重要研究方向。通过研究抚顺特钢生产的新型耐蚀塑料模具钢锻后热处理工艺对组织均匀性和力学性能影响,对模具钢的热处理和模具选材应用提供一定的依据。

1 材料的制备和试验方法

1.1 试验钢成分及JMatPro热力学分析

试验钢是在4Cr13钢的基础上调整Ni-Mo-V-N的含量而设计的成分配比,见表1。

表1 3Cr13NiMoVN试验钢的合金成分(质量分数)

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	N	Fe
0.31	0.28	0.39	13.02	0.43	0.32	0.30	0.093	Bal.

利用JMatPro热力学软件绘制了试验钢的凝固相图,分析试验钢凝固冷却过程中析出相的组成和含量的变化,如图1(a)所示。从图1中可看出,试验钢中存在 $M_{23}C_6$ 、MN、 $M_2(CN)$ 三种类型的碳、氮化物析出,析出温度分别为1 032、1 155、609 °C。 $M_{23}C_6$

主要成分为Cr、Fe、C, MN主要成分为V、N, $M_2(CN)$ 主要成分为V、Mo、C、N。由于试验钢中氮和合金元素的调控,析出相中未见易形成网状的 M_7C_3 类型。如图1(b)为试验钢在1 000、1 030、1 050、1 080 °C温度下的未固溶碳(氮)化物类型及其质量分数,1 000 °C温度存在1.06%的 $M_{23}C_6$ 和0.28%的MN;1 030 °C温度时 $M_{23}C_6$ 几乎完全固溶到基体中,只剩余0.08%含量;1 050 °C温度时 $M_{23}C_6$ 已完全固溶到基体中,含有0.21%的MN;从1 000 °C升高至1 080 °C温度时MN的含量从0.28%降低至0.16%。依据上述计算得出的析出相类型、析出温度和析出相含量等结果,并结合工厂实际生产情况,制定热处理工艺。

1.2 试验材料制备方法

冶炼采用60 t EAF+LF+VD+电渣重熔的工艺,电渣重熔直径750 mm的钢锭。钢锭经35MN快锻机锻制成扁钢,横截面尺寸为230 mm×710 mm。根据JMatPro热力学软件计算的结果,结合实际生产情况,设计采用低温和高温两种正火工艺进行对比,如图2(a)、(b)给出的两种热处理工艺分别进行处理,处理后在扁钢横截面对角线1/4处取样进行分析,如图2(c)所示。

1.3 试验方法

在Axiovert 40MAT型光学显微镜(OM)上观察金相试样,金相腐蚀剂采用1.5 g硫酸铜+20 mL盐酸+20 mL酒精溶液,使用Apreo 2C型扫描电子显微镜(SEM)观察试样的冲击断口形貌。

按照ASTM A370—2009测试标准,冲击性能测试试样尺寸为7 mm×10 mm×55 mm(无缺口)和10 mm×10 mm×55 mm(U型口),在NI500C型冲击试验机上测定Ak值。每组冲击平行试样数量为5支,

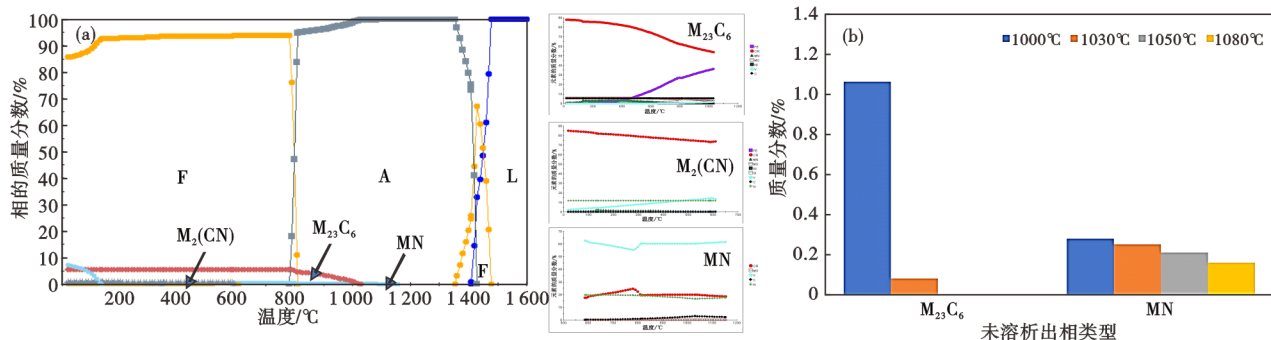


图1 试验钢的凝固相图 and 不同温度的相组成: (a)凝固平衡相图, (b)不同温度下的未固溶的析出相类型

Fig. 1 Solidification phase diagram and phase constituents at different temperatures of the experimental steel: (a) equilibrium solidification phase diagram, (b) types of undissolved precipitates at different temperatures

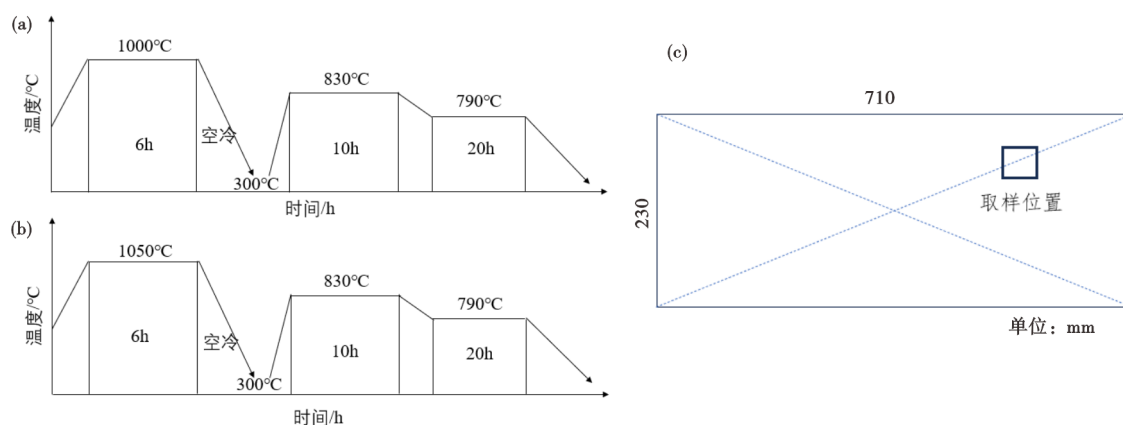


图2 锻后热处理工艺及取样位置:(a)工艺一(1 000 °C正火),(b)工艺二(1 050 °C正火),(c)取样位置

Fig. 2 Post-forging heat treatment process and specimen sampling location: (a) Process 1 (normalizing at 1 000 °C), (b) Process 2 (normalizing at 1 050 °C), (c) Sampling location

取测试平均值。在冲击测试前先对试样进行洛氏硬度(HRC)检测。

冲击试样的热处理:淬火温度 1 030 °C,油冷处理;回火温度 530 °C,回火处理 2 次,空冷。

2 试验结果及讨论

对于 Ni-Mo-V-N 等合金元素成分优化后的 Cr13 型耐蚀塑料模具钢,锻后采用常规的退火热处理方式已经不能满足高的组织均匀性的要求。试验钢锻后采用 870 °C 退火后组织中存在大面积的空白区域,晶粒粗大,晶粒内存在孪晶界,按照 GB/T 6394—2017 标准图谱评级可达到 4 级,平均晶粒尺寸为 122 μm ,如图 3(a)所示。采用塑料模具常用的 1 030 °C 淬火热处理后,原空白区位置的马氏体组织与正常区域仍然存在较大的区别,且存在较多在孪晶界析出的链状碳化物链状,如图 3(b)所示。这种组织使模具在抛光过程中易出现局部亮

斑,在制作要求具有极高的微观结构精度和均匀性的导光板上,模具的合格率极低^[9]。另外,在使用过程中易产生裂纹影响模具力学性能,进而降低使用寿命。

2.1 试验钢热处理后的组织演变

根据 JMatPro 软件计算试验钢珠光体向奥氏体转变的开始温度 $A_{c1}=803\text{ }^{\circ}\text{C}$,先共析铁素体全部转变奥氏体的温度 $A_{c3}=917\text{ }^{\circ}\text{C}$,以上述转变温度点作为参考,制定淬火、等温退火工艺。对比锻后钢材在 1 000 °C(工艺一)和 1 050 °C(工艺二)两种正火温度下保温,再经过相同的 830 °C+790 °C 等温退火的热处理工艺,观察退火组织的均匀性,如图 4(a)(b)所示。从图 4 中可以看到,经过 1 000 °C 正火后组织中仍存在不均匀区,提高正火温度至 1 050 °C,球状珠光体弥散分布,组织变得更均匀。按照 GB/T 35840.3—2018 标准图谱评级,图 4(a)评为 E3 级,图 4(b)评为 A2 级,因此采用工

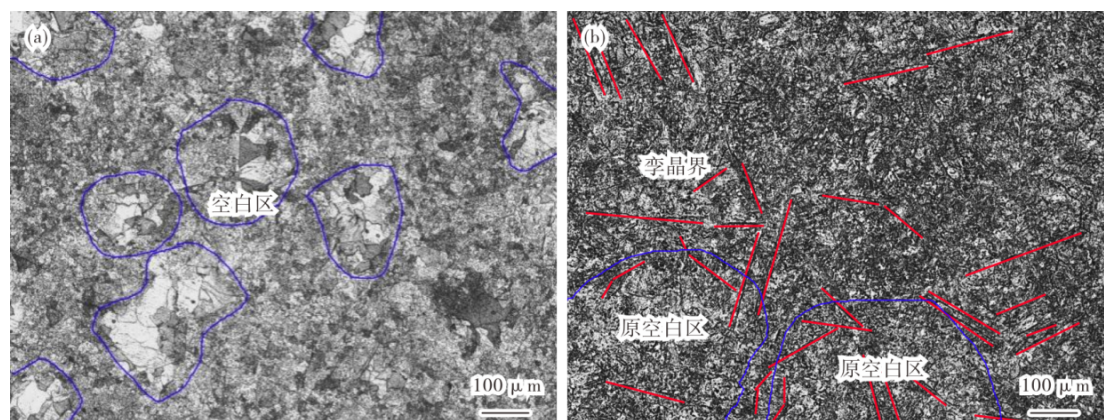


图3 常规热处理后的组织形貌:(a)退火组织,(b)淬火组织

Fig. 3 Microstructure morphology after conventional heat treatment: (a) annealed structure, (b) quenched structure

艺二 1 050 °C 正火后球状珠光体均匀程度要优于 1 000 °C 正火工艺。

退火组织的均匀性对模具热处理后的组织有较大的影响^[10],图4(c)和图4(d)分别为工艺一和工艺二处理后再经过塑料模具常用的淬回火工艺(淬火 1 030 °C+回火 530 °C)处理后的组织形貌。从图4(c)看到,回火组织存在沿原始孪晶界析出的链状碳化物,可知退火状态下不均匀组织遗传到回火态,与图3(b)的淬火组织出现的不均匀情况类似。说明退火后不均匀组织经过 1 030 °C 淬火不能消除或改善,所以要通过锻后合适的热处理工艺进行均匀化。图4(d)回火状态的组织均匀性良好。

结合 JMatPro 热力学计算结果分析,1 000 °C 正火后冷却过程中存在未溶碳化物作为碳化物形核的核心,且在孪晶界的优先形核位置,形成了链状碳化物的遗传效果。而 1 050 °C 正火使 $M_{23}C_6$ 完全溶解后,重新析出的碳化物不以未熔碳化物为形核核心,1 050 °C 使合金元素扩散得更加均匀,改变了原链状优先形核位点,碳化物倾向于在基体中均匀形核。

在晶粒尺寸变化方面,对比工艺一和工艺二的实际晶粒度时,如图4(e)(f)所示,发现

1 000、1 050 °C 的晶粒度并没有大的区别,按照 GB/T6394—2017 标准都可评为 8 级,平均晶粒尺寸分别为 21.4、22.5 μm 。虽然在 1 050 °C 较高温度下保温,未固溶的 MN 氮化物颗粒起到钉扎作用,抑制晶界移动,可以减少晶粒长大的倾向^[11]。同时也可以说明 Cr13 型耐蚀塑料模具钢添加 Mo-V-N 等碳氮化物形成元素在细晶强化方面起到了有益的作用^[12]。结合热处理全程的组织演变情况看,锻后采用 1 050 °C 正火+850 °C+790 °C 等温退火工艺可使试验钢获得最佳的组织均匀性。

2.2 试验钢经热处理后的力学性能

高档耐蚀塑料模具钢的热处理后硬度一般在 48~52HRC,模具寿命达到百万次以上,应用端往往采取高温回火,在大量消除残余奥氏体的同时使材料可呈现出良好的耐磨性和韧性^[13]。试验钢在工艺一和工艺二两种锻后热处理方式,经过 1 030 °C 淬火+530 °C 回火处理后进行冲击韧性测试,硬度值和冲击值如图5所示。在相同的硬度状态下,采用了两种形式的冲击试样测试:U 型缺口和无缺口,从结果看出,无论在对于应力集中的响应方面还是抵抗冲击能力方面,工艺二处理后的冲击值都比工艺一的高,U 口冲击值高 10 J,无缺口冲击值高 101 J,比例约为 77%~80%。

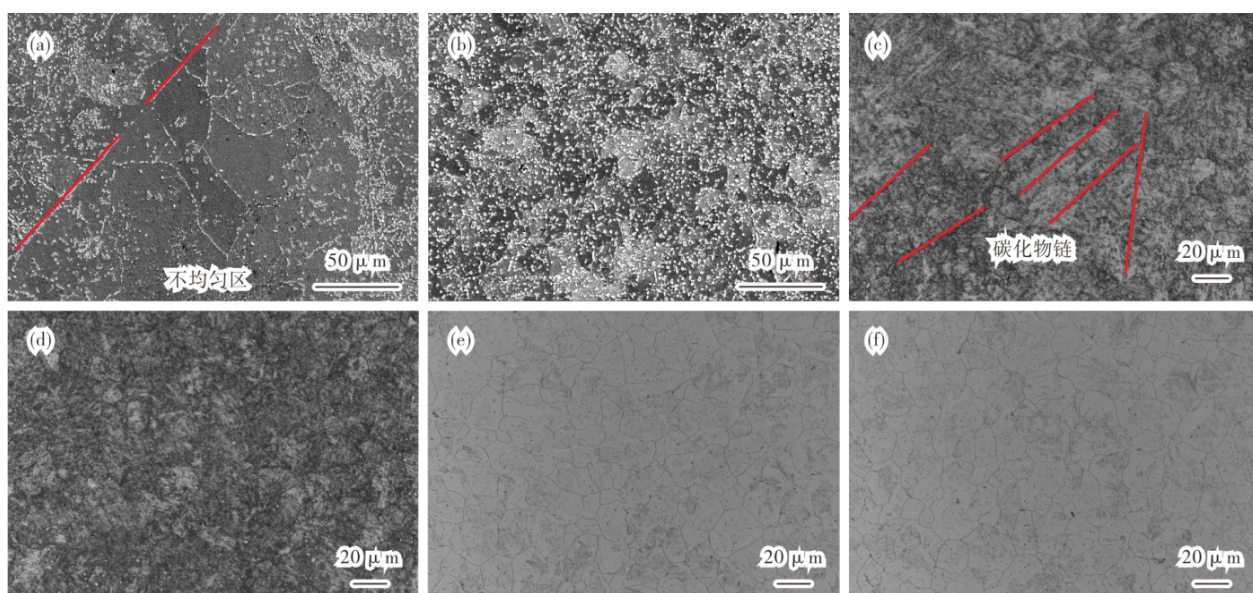


图4 试验钢不同工艺处理后的组织演变情况:(a)工艺一退火组织SEM照片,(b)工艺二退火组织SEM照片,(c)工艺一+淬回火组织,(d)工艺二+淬回火组织,(e)工艺一实际晶粒度,(f)工艺二实际晶粒度

Fig. 4 Microstructural evolution of the experimental steel after different processing treatments: (a) SEM image of annealed microstructure after Process 1, (b) SEM image of annealed microstructure after Process 2, (c) quenched and tempered microstructure after Process 1, (d) quenched and tempered microstructure after Process 2, (e) actual grain size for Process 1, (f) actual grain size for Process 2

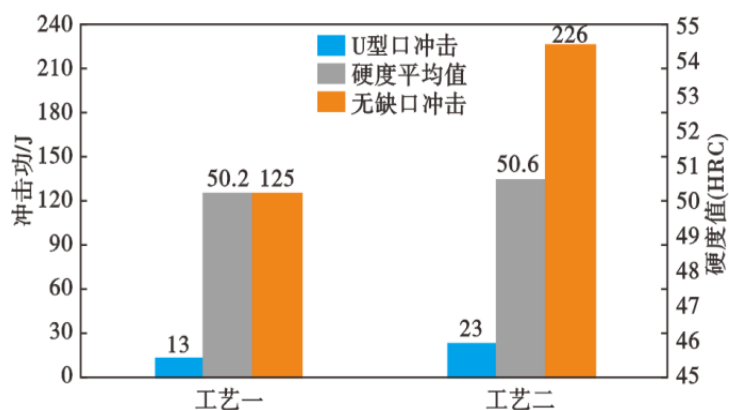


图5 试验钢不同热处理工艺后的冲击值和硬度值

Fig. 5 Impact values and hardness values of the experimental steel after different heat treatment processes

观察冲击试样断口,发现工艺一+淬回火热处理后(图6(a))断口表面有拉开的沟壑,沟壑内部存在排列整齐呈链状分布的碳化物颗粒,结合能谱分析(图6(c))主要是富Cr的碳化物,说明碳化物链状是沟壑产生的主要原因,并导致冲击值的降低。图

6(a)中虽然存在一定数量的韧窝,但撕裂开的沟壑是导致脆性断裂最危险的因素。图6(b)为工艺二+淬回火热处理后的断口,以大面积的河流花样为主+少量的韧窝的解理断裂形貌,没有出现有破坏性的裂口,保持一定的抗冲击能力。

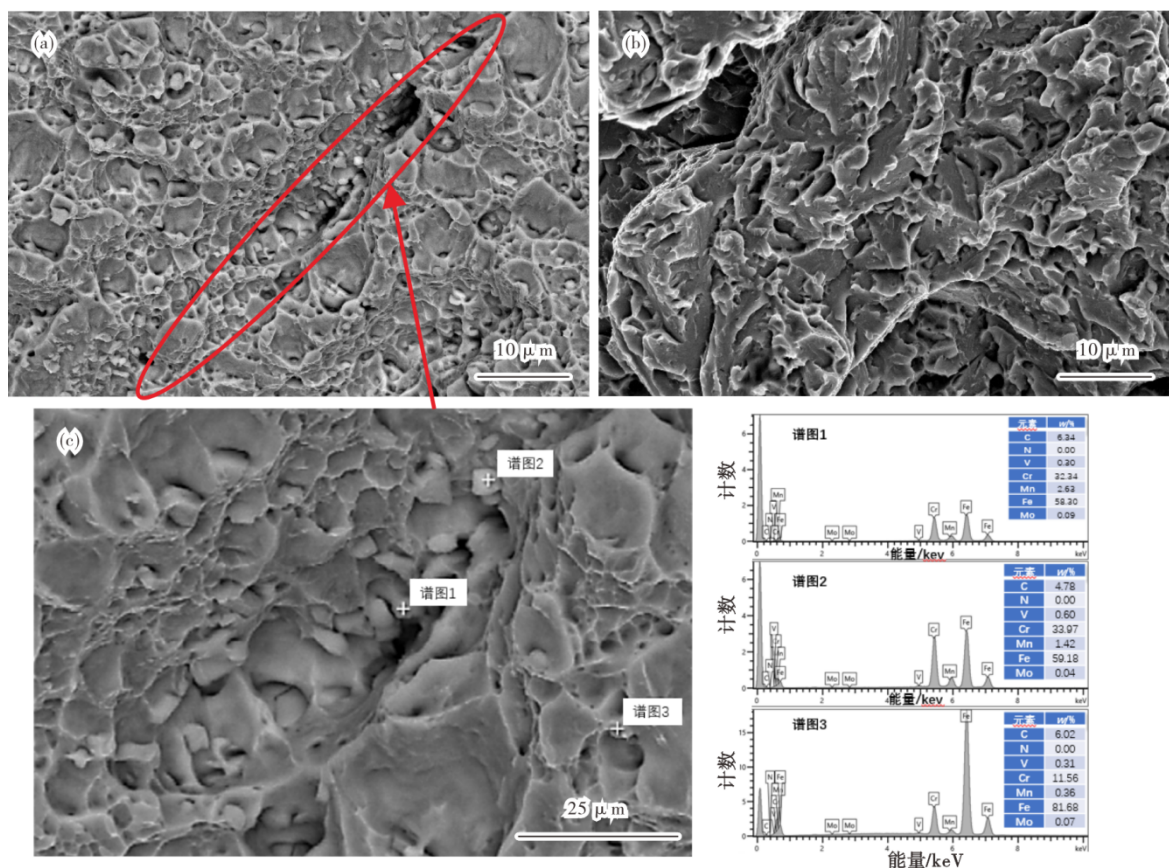


图6 试验钢冲击断口形貌和能谱分析:(a)工艺一+淬回火后的冲击断口形貌图,(b)工艺二+淬回火后的冲击断口形貌图,(c)工艺一+淬回火后的冲击断口中碳化物的能谱分析图

Fig. 6 Impact fracture morphology and EDS analysis of the experimental steel: (a) impact fracture morphology after Process 1 + quenched and tempered, (b) impact fracture morphology after Process 2 + quenched and tempered, (c) EDS analysis of carbides in the impact fracture after Process 1 + quenched and tempered

3 结论

1) 试验钢锻后采用1 050 °C正火+等温退火工艺的组织均匀性评为A2级,比1 000 °C正火+等温退火获得的球状珠光体组织更加均匀,采用1 050 °C正火+830 °C+790 °C等温退火是试验钢的最

佳的锻后热处理工艺。

2) 试验钢采用工艺二+淬回火处理后的冲击值比工艺一+淬回火处理高,高出比例约为77%~80%。

3) 热处理不当会使不均匀的链状碳化物产生组织遗传效应,1 000 °C正火处理后在孪晶界析出的链状碳化物是冲击值降低的主要因素。

参考文献

- [1] 韩永强, 吴晓春. 国内外塑料模具钢研究现状与发展趋势[J]. 模具工业, 2018, 44(9): 1-7.
- [2] 刘道献, 王建华, 曹立军, 等. 塑料模具钢发展及性能影响因素[J]. 模具制造, 2025, 25(8): 62-64.
- [3] 袁志钟, 陈露, 张伯承, 等. LB/M复相热处理工艺对冷作模具钢DC53组织和力学性能的影响[J]. 特殊钢, 2024, 45(4): 153-160.
- [4] 赵健, 杨仁强, 王立青, 等. PMO作用下高品质H13热作模具钢生产实践[J]. 特殊钢, 2026, 47(2): 27-31.
- [5] 张浩, 迟宏宵, 王成蹊, 等. 新型N合金化Cr13型耐蚀塑料模具钢的组织性能[J]. 金属热处理, 2023, 48(5): 110-115.
- [6] Leda H. Nitrogen in martensitic stainless steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 53(1-2): 263-272.
- [7] 郑善举, 杨卯生, 张启富, 等. 氮元素对马氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2017, 38(1): 100-105.
- [8] 樊译. 4Cr13型耐蚀塑料模具钢组织均匀性调控与腐蚀磨损机理研究[D]. 北京: 钢铁研究总院有限公司, 2024.
- [9] 王海雄, 李积彬. LCD导光板微结构成型技术及发展趋势[J]. 液晶与显示, 2012, 27(4): 486-492.
- [10] Liu H H, Fu P X, Liu H W, et al. Simultaneously enhancing strength and toughness of medium-carbon martensitic steel via nano precipitates and fine-grained structure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2022, 842: 143030.
- [11] 李照国, 潘吉祥, 纪显彬, 等. 淬火工艺对6Cr13马氏体不锈钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(5): 226-229.
- [12] 谢官利, 迟宏宵, 李祖来, 等. 回火温度对N合金化耐蚀塑料模具钢组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(3): 99-107.
- [13] 杨少辉, 李照国, 魏海霞, 等. 20Cr13HN马氏体不锈钢退火时间对材料组织及性能的影响[J]. 甘肃冶金, 2025, 47(3): 106-109.