DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3126

深冷处理温度对 Cr12MoV 合金钢表面硬度与耐磨性的影响

房一帆[1,2],宁新龙[3],赵　静[3],闫华伟[3],贺正泽[2],刘建喜[1,2]

(1. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072; 2. 西北工业大学 先进润滑与密封材料研究中心,陕西 西安 710072; 3. 国营四达机械制造公司,陕西 咸阳 712203)

摘　要:淬硬模具钢 Cr12MoV 因硬度、强度高以及淬透性好等特点在大尺寸模具制造中被广泛应用,但在高循环应力和大冲击载荷的服役工况下,其耐磨性有待进一步提高。热处理可以在不改变材料成分的基础上通过改变内部组织来改善材料的强度、硬度和耐磨性,进而提升其使用性能。本论文研究了深冷处理温度对 Cr12MoV 合金硬度和摩擦学性能的影响。结果表明,Cr12MoV 合金经过深冷处理之后,表面硬度较未深冷处理试样高 1~2 个 HRC,并且 -65 ℃深冷处理之后摩擦系数从 0.7 下降至 0.59,-196 ℃深冷处理之后摩擦系数进一步下降至 0.54, 磨损体积降低了五倍,而合金在不同温度下深冷处理之后表面硬度和磨损体积变化不大,从原子力显微镜观察到 -196 ℃深冷处理的样品表面有更细小、弥散的物相析出。结合相关理论阐述了深冷处理的作用机制,为 Cr12MoV 合金的生产和应用提供理论指导。

关键词:深冷处理;摩擦;磨损;硬度;碳化物

中图分类号: TG142.33　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)10-0917-06

Effect of Heat Treatment of Cr12MoV Alloy Steel on Hardness and Anti-Wear Performance

FANG Yifan[1,2], NING Xinlong[3], ZHAO Jing[3], YAN Huawei[3], HE Zhengze[2], LIU Jianxi[1,2]

(1. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Center of Advanced Lubrication and Seal Materials, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 3. State Sida Machinery Manufacturing Company, Xianyang 712203, China)

Abstract: Hardened die steel Cr12MoV is widely used in the manufacture of large dies and molds because of its high hardness and strength as well as good hardenability, but its wear resistance needs to be further improved under service conditions of high cyclic stress and large impact load. Heat treatment can improve the strength, hardness, and anti-wear performance of the material by changing the internal organization without changing the material composition. A suitable heat treatment process is of great importance for improving its performance. In this paper, the effect of cryogenic treatment temperature on the mechanical and tribological properties of Cr12MoV alloy is investigated. The results show that the surface hardness of the Cr12MoV alloy is 1~2 HRC higher than that the original alloy after cryogenic treatment. The friction coefficient of the Cr12MoV alloy decreases from 0.7 to 0.59 after treatment at -65 ℃, and then decreases 0.54 after cryogenic treatment at -196 ℃. In addition, the wear volume decreases five times after cryogenic treatment, while the surface hardness and wear volume of the alloy remain almost constant after cryogenic treatment at different temperatures. Atomic force microscopy measurements show that finer precipates are dispersed on the surface of the sample treated with -196 ℃. The mechanism of cryogenic treatment is explained in combination with relevant theories to provide theoretical guidance for production and application.

Key words: cryogenic treatment; friction; wear; hardness; carbide

收稿日期:2023-05-29

基金项目:凝固技术国家重点实验室自主研究课题(2022-QZ-04);陕西省重点研发计划(2021GY-232)

作者简介:房一帆,1999 年生,硕士生.研究方向为金属表面处理以及智能涂层. Email: fangyifan@mail.nwpu.edu.cn

通讯作者:刘建喜,1983 年生,博士,副教授.研究方向为摩擦磨损及特殊工况下多功能涂层. Email: jianxiliu@nwpu.edu.cn

引用格式:房一帆,宁新龙,赵静,等.深冷处理温度对 Cr12MoV 合金钢表面硬度与耐磨性的影响[J].铸造技术,2023,44(10): 917-922.
FANG Y F, NING X L, ZHAO J, et al. Effect of heat treatment of Cr12MoV alloy steel on hardness and anti-wear performance [J]. Foundry Technology, 2023, 44(10): 917-922.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

作为目前冷作磨具用量最大的钢种之一，Cr12MoV 合金钢具有较高的淬透性、硬度和耐磨性，可用来制造高耐磨性的冷冲模和冲头等重要工件[1]。该类工件常处于较高的循环应力和冲击力的服役环境，材料表面易发生磨损失效与疲劳断裂失效，对设备的尺寸精度及机械性能产生破坏，进而引起设备局部故障或整体报废。Cr12MoV 合金因其高碳高铬含量，凝固后组织中存在大量的碳化物[2]。无规则分布的大块碳化物会破坏基体的连续性，易造成应力集中，并且在冲击载荷作用下发生脆断。使用合理的处理工艺有助于碳化物的球化和均匀分布[3]。高雅丽等[4]采用激光熔覆技术处理 Cr12MoV 表面，显著提升合金表面硬度和耐磨性。通常认为，材料整体的强度和表面硬度与其耐磨性成正相关，因此大量研究聚焦于改变热处理工艺来调控材料表面的硬度从而提高材料的耐磨性[5-7]。

深冷处理[8-10]是一种常见的合金钢热处理工艺，具有无污染、不破坏工件、改善工件冲击韧性等特点，并且可以起到稳定工件尺寸和减少变形的作用。使用液氮的汽化潜热来制冷，低温下合金钢完成残余奥氏体向马氏体的转变，显著降低组织中残余奥氏体的含量，促进细小碳化物的析出，表面硬度和耐磨性较常温淬火处理的样品有一定改善[1,8,10-12]。张璨等[13]通过控制淬火回火温度研究 Cr12MoV 钢耐磨性变化，为材料的淬火回火工艺设计提供了理论指导。王志新等[14]研究了 -78 ℃下冷处理后工件耐磨性变化，结果表明冷处理可提升工件的耐磨性和显微硬度。刘勇等[8]研究了不同深冷处理工艺后 Cr12MoV 钢的力学性能与摩擦磨损性能，结果表明冷处理后的工件马氏体转变率提高，微小碳化物析出，工件表面硬度和耐磨性也得到了提高。然而目前的研究主要聚焦于对比是否进行深冷处理的试样表面组织与性能变化，对于不同的深冷温度处理下工件表面的组织变化和性能变化尚未进行系统研究，并且以往的耐磨实验聚焦于摩擦实验之后的体积变化，对材料在摩擦过程中摩擦系数的变化缺乏记录与分析。本工作通过控制不同的深冷处理温度来研究 Cr12MoV 合金钢在特定载荷下的硬度和摩擦学性能，通过微观组织的转变和表面硬度的变化提出深冷处理温度与耐磨性的关系，为 Cr12MoV 合金钢的热处理工艺设计提供理论指导。

1 实验方法

热处理实验样品材料牌号为 Cr12MoV，制造标准 YB675-73，合金化学成分见表 1。Cr12MoV 合金经锻造成棒料，经线切割形成圆柱块体。为了保证试样热处理之后的硬度均匀性，采用真空炉进行热处理淬火。将直径为 20 mm 的圆柱试样分为 3 组，在 (1 050±10) ℃高温真空加热保温 90 min 后，油冷至室温，再进行不同温度的深冷处理，具体热处理工艺见表 2。1# 试样加热后在油中淬火至室温，不进行深冷处理。2# 试样淬火后在高低温试验箱进行 -65 ℃深冷处理 2 h，然后恢复至室温；3# 试样采用液氮 -196 ℃深冷处理 2 h，之后恢复至室温；最后，3 种样品在电阻炉内进行回火处理，回火工艺为 260 ℃保温 3 h，回火结束后空冷至室温。

表 1 Cr12MoV的化学成分

Tab.1 Chemical composition of Cr12MoV

(mass fraction/%)

C	Mn	Si	Cr	Mo	V	S	P
1.60	0.20	0.19	11.87	0.49	0.24	0.012	0.024

表 2 Cr12MoV热处理工艺

Tab. 2 Heat treatment technique of Cr12MoV

试样	淬火温度 /℃	保温时间 /min	冷却方式	深冷处理	回火工艺
1	1 050	90	油冷	不处理	260 ℃, 3 h
2	1 050	90	油冷	-65 ℃	260 ℃, 3 h
3	1 050	90	油冷	-196 ℃	260 ℃, 3 h

热处理后的试样经不同粒度(150、74、38、19、10 μm)100、200、400、800、1 500 目的砂纸打磨其截面，抛光。摩擦学性能表征前，用乙醇清洗擦拭样品表面并使用氮气吹干，保证样品表面的光洁。摩擦实验采用球盘摩擦对偶往复模式(氮化硅钢球对热处理样品)，施加载荷为 5 N，往复模式行程为 1 mm，持续时间为 30 min，摩擦实验结束后，将样品置于乙醇溶液中，用超声波清洗仪超声 10 min，清洗掉样品磨坑表面的磨屑，随即使用白光干涉三维轮廓仪观察样品表面的状态，计算磨坑体积，对比不同样品的磨损量。试样经过超声清洗后，用质量分数为 36% 的浓盐酸腐蚀 10 s，无水乙醇迅速冲洗，使用氮气吹干样片表面，通过光学显微镜和原子力显微镜观察表面组织结构和形貌特征。

硬度实验在山东掖县材料试验机厂出产的 HR-150A 型洛氏硬度计上进行，合金试样的显微组织及表面形貌分别由 Olympus BX53 型金相显微镜、英国牛津仪器公司 19056765 型原子力显微镜观察，-65 ℃深冷处理由 GDJW-810 型高低温试验箱处理，采用机械压缩机和翅片管式换热器进行制冷。-196 ℃液氮处理是将试样放入容器(不锈钢保温桶)后加入液氮，并随时补充液氮，保证液面覆盖试样。试样的摩擦实验在布鲁克公司的通用摩擦试验机 UMT Tribo 上进行，磨屑由 KQ3200E 型超声波清洗

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

仪清洗，磨坑的形貌与磨损体积由 BrukerGTK-18-0433 型三维轮廓仪观测。

2　实验结果与讨论

2.1　显微组织

Cr12MoV 合金碳含量的质量分数约为 1.5%，A_{c1} 温度为 810 ℃，属于高碳钢。经 1 050 ℃加热保温后，部分碳化物会溶入奥氏体中，在随后的保温、冷却、冷处理、回火过程中转化为马氏体、碳化物和残余奥氏体[15]。图 1 是经过不同热处理工艺处理过后的试样表面显微组织，图 1a 为原始退火态组织，可以发现存在大块状的碳化物及一些退火后的球化珠光体和渗碳体，经淬火处理后，珠光体先奥氏体化，之后快速冷却转变为马氏体组织。如图 1b 所示，马氏体基体上分布着大块状的碳化物，并且部分碳化物存在尖角，影响基体连续性。经深冷处理之后(图 1c)在大块碳化物周围发现一些较细小的碳化物析出。图 1d 中也可以观察到细小的物相，碳化物的形貌。

为了更进一步研究不同温度淬火后样品的微观形貌，使用原子力显微镜观察样品表面微观形貌。淬火处理后油冷至室温，未进行深冷处理直接回火的试样如图 2a 所示，可以发现表面存在尺寸较大的颗粒。图 2b 为淬火之后进行 -60 ℃处理的样品，可以发现在大块状碳化物周围存在一些细小的弥散颗粒。图 2c 为淬火后 -196 ℃冷处理的样品，可以看出碳化物的尺寸有所减小，分布更加均匀、细小、弥散，在球状碳化物周围分布着更细小的碳化物颗粒。上述结构特征可归因为低温下碳原子析出，由于温度过低导致碳原子扩散距离短，因此细小碳化物保持与基体共格。回火后球化的碳化物分散较为均匀，分散在马氏体基体上[16]。

2.2　残余奥氏体与碳化物分析

图 3 为 Cr12MoV 合金钢经过不同热处理工艺处理之后 X 射线衍射图，如图所示原始淬火态样品中出现了奥氏体 γ 的峰位，由左至右分别是(111)、(200)和(220)晶面。在 -65 ℃和 -196 ℃深冷处理之后并未发现明显的奥氏体吸收峰，这可以证明经过深冷处理后残余奥氏体的含量明显减少。对于不同深冷

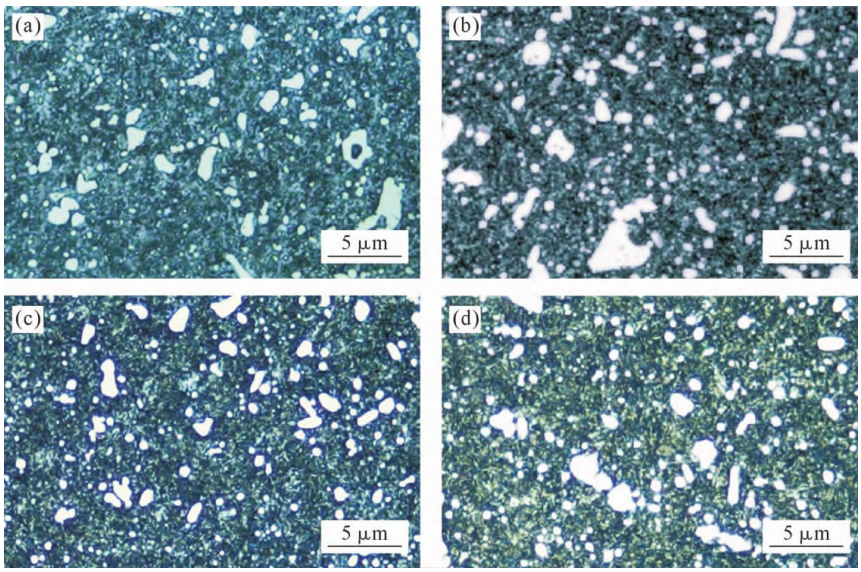

图 1　块材经过不同热处理工艺处理后的金相显微组织：(a) 退火态，(b) 淬火态油冷处理，(c) 淬火后 -60 ℃处理，(d) 淬火后 -196 ℃处理

Fig.1　Metallographic microstructure of the block after different heat treatment processes: (a) annealed state, (b) quenched state followed by oil cooling, (c) -60 ℃ treatment after quenching, (d) -196 ℃ treatment after quenching

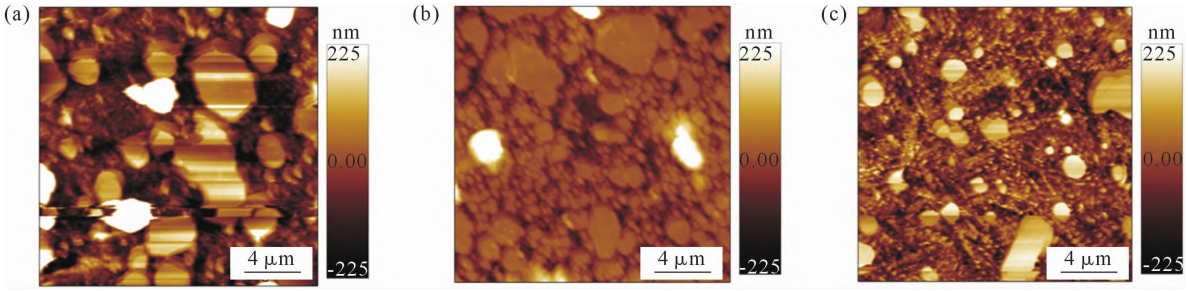

图 2　样品经过不同热处理工艺处理后的原子力显微镜图像：(a) 淬火后油冷，(b) 淬火后 -60 ℃处理，(c) 淬火后 -196 ℃处理

Fig.2　AFM images of the blocks after different heat treatment processes: (a) oil cooling after quenching, (b) -60 ℃ treatment after quenching, (c) -196 ℃ treatment after quenching

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

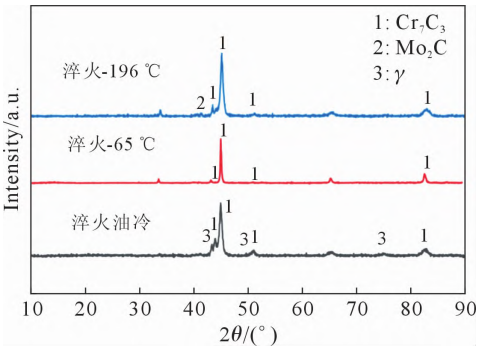

图 3 样品经过不同热处理工艺处理后的 XRD 图谱
Fig.3 XRD patterns of the samples after different heat treatment processes

处理温度的样品，其碳化物主要是 Cr_7C_3，其中大部分是共晶碳化物，少部分是回火过程中出现的二次碳化物，两者难以精确的区分开。此外在 -196 ℃低温处理下，样品出现了 Mo_2C 碳化物的吸收峰。Mo_2C[2]是一种特殊的合金碳化物，适量的该碳化物可以提升钢的强韧性，并且对于钢的耐磨性也有重要的意义。

2.3 硬度分析

如图 4a 所示，试样未经深冷处理时的硬度为 58~59 HRC，试样经过 -65 ℃深冷处理之后表面硬度为 60~61.1 HRC(图 4b)，试样经过 -192 ℃深冷处理之后硬度约为 60~61.7 HRC(图 4c)。可以发现，经过冷处理后合金表面硬度从 58 HRC 增加到 61 HRC。一方面归因于残余奥氏体的转变，更低的淬火温度可以提供马氏体转变驱动力，促进残余奥氏体向马氏体的转变，材料强度和表面硬度升高；另一方面可以认为是深冷处理后表面碳化物周围析出了高度弥散的超细碳化物[17]，与基体保持共格关系，这些碳化物后续回火过程中可转化为 Mo_2C 碳化物，提高表面硬度。经过不同温度的深冷处理之后，样品表面的硬度没有明显的区别，说明深冷处理的时间对于材料表面的硬度影响不大，可以认为 -65 ℃下，奥氏体基本已经完成马氏体转变，仅存在极少量的残余奥氏体[18-19]。

2.4 摩擦学性能分析

图 5 是试样经过不同深冷处理工艺处理之后的摩擦测试结果，摩擦实验的参数如下：球盘摩擦对偶，使用直径为 10 mm 的氮化硅球和试样干摩擦，采用通用摩擦实验机的往复模式，行程为 1 mm，载荷为 5 N。图 5a 为摩擦系数曲线，摩擦系数被定义为作用在两物体表面的切向摩擦力与垂直载荷的比值，摩擦系数的大小可以直观的表明摩擦力的大小。由图可知，未经过深冷处理的试样表现出最高的摩擦系数，试样在实验开始的 200 s 内，摩擦系数快速升至 0.68，在 1 800 s 内逐步提升至 0.71。经过 -65 ℃深冷处理的试样在实验最初的 400 s 内摩擦系数约为 0.55，在 400 s 之后摩擦系数很快升高至 0.6，随后在 1 800 s 内保持 0.6 的摩擦系数。经 -192 ℃液氮深冷处理的试样在 1 800 s 之内一直保持 0.55 的摩擦系数。未深冷处理、-65 ℃深冷处理、-195 ℃深冷处理试样的平均摩擦系数分别为 0.69、0.59、0.54。经

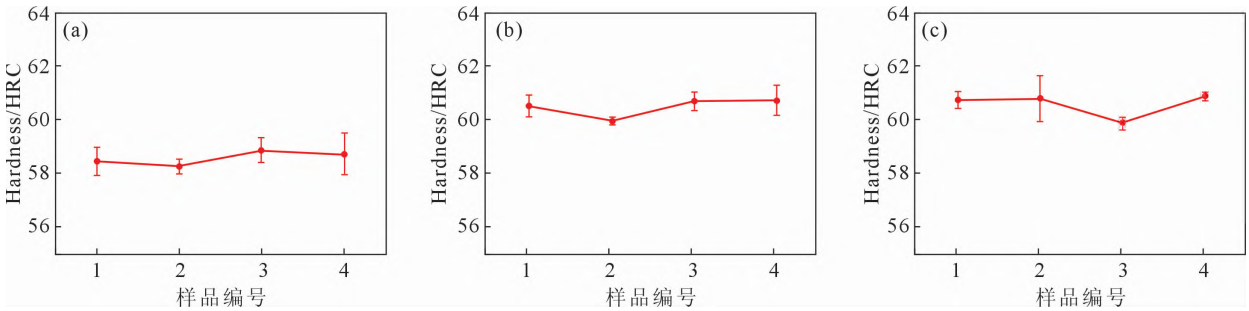

图 4 试样经过不同热处理工艺处理后的表面硬度：(a) 淬火后油冷处理，(b) 淬火后 -60 ℃处理，(c) 淬火后 -196 ℃处理
Fig.4 Surface hardness of the samples after different heat treatment processes: (a) quenched state followed by oil cooling, (b) -60 ℃ treatment after quenching, (c) -196 ℃ treatment after quenching

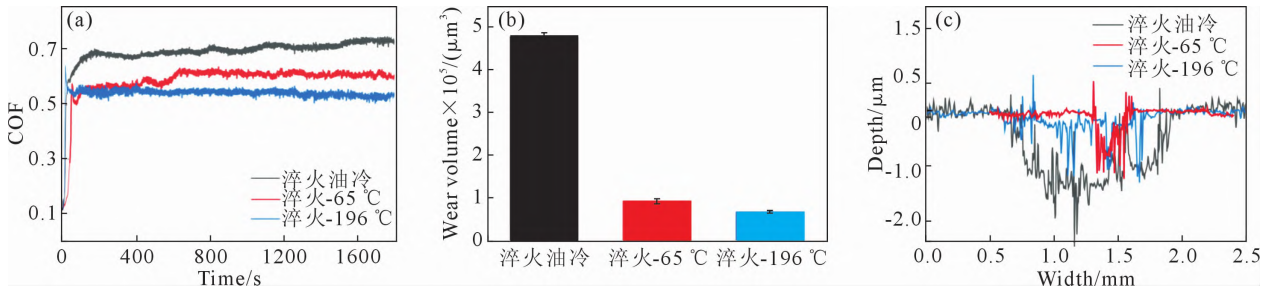

图 5 样品经过不同热处理工艺处理后的摩擦学性能：(a) 摩擦系数，(b) 磨损体积，(c) 磨坑剖面轮廓
Fig.5 Tribological properties of the samples after different heat treatment processes: (a) friction coefficient, (b) wear volume, (c) profile of the wear pit

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

过深冷处理之后合金摩擦系数变小，这归因为未经过深冷处理样品表现出较低的硬度，发生更严重的磨粒磨损。图 5b 是样品的磨坑体积参数，未经过深冷处理的样品磨损体积为 478 066 μm³，经过 -65、-192 ℃深冷处理的样品磨损体积分别为 92 693、67 455 μm³。图 5c 是磨坑剖面曲线，可以直观表现出磨坑的形貌变化，未进行深冷处理的试样表现出最深的磨坑轮廓，经过深冷处理的样品表现出较浅的磨坑轮廓。深冷处理之后磨损体积下降了 5 倍，试样的耐磨性增加，并且深冷处理温度降低，磨损体积也会有一定改善。这归因于深冷处理之后奥氏体充分转变为马氏体，残余奥氏体含量减少，经回火之后，均匀球化的碳化物分布在马氏体基体上，试样的耐磨性和硬度均有所改善[20-21]。

进一步通过白光干涉三维轮廓仪和金相显微镜研究了经不同热处理工艺处理后的样品磨斑表面形貌的变化。研究发现，未经过深冷处理的试样磨坑较均匀(图 6a)，经过深冷处理的样品表面发现磨坑表面的不均匀变形(图 6c)和塑性的剥片(图 6e)，并且磨坑边缘产生不规则的磨损痕迹。由于冷处理的样品表面硬度和耐磨性更高，导致样品表面表现出平整的磨坑表面和更浅磨痕深度，上述结果与磨坑剖面轮廓结论一致(图 5c)。未进行深冷处理的试样纵向磨坑较宽，平均约为 300 μm(图 6b)，经深冷处理的两个样品纵向磨坑宽度为 230 μm(图 6d~f)，这也证明了深冷处理后的试样具有更好的耐磨性。

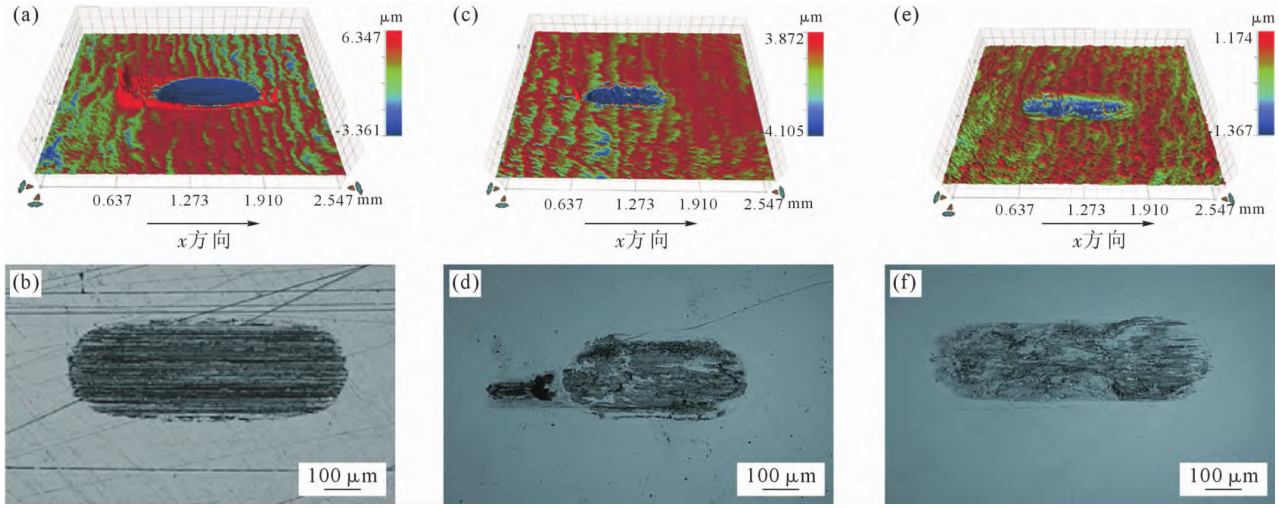

图 6 块材经过不同热处理工艺处理后磨坑的三维轮廓与金相显微图：(a~b) 淬火后油冷处理，(c~d) 淬火后 -60 ℃处理，(e~f) 淬火后 -196 ℃处理

Fig.6 Three-dimensional profile and metallographic microstructure of the grinding pit of the blocks after different heat treatment processes: (a~b) quenched state followed by oil cooling, (c~d) -60 ℃ treatment after quenching, (e~f) -196 ℃ treatment after quenching

3 结论

(1)经过深冷处理的 Cr12MoV 合金表面硬度比未处理的试样提高约 1~2 HRC，表明深冷处理促进了马氏体的转变和碳化物的析出，从而提高了表面硬度。

(2)样品分别在 -65、-196 ℃下进行深冷处理之后表面硬度无明显变化，表明合金在 -65 ℃基本已经完成马氏体转变，但 -192 ℃深冷处理之后会析出新的物相，并在回火过程中转换为 Mo_2C 碳化物。

(3)深冷处理后，合金表面的摩擦系数从 0.7 下降至 0.69(-65 ℃深冷处理)和 0.64(-196 ℃深冷处理)，磨损体积是未深冷处理试样的 1/5，耐磨性得到了显著提高。

参考文献：

[1] 孙秀华，刘明，马野，等. Cr12MoV 冷作模具钢热处理工艺及性能分析[J]. 模具制造，2022, 22(6): 86-88.
SUN X H, LIU M, MA Y, et al. Analysis of heat treatment process and property of Cr12MoV cold work die steel[J]. Die & Mould Manufacture, 2022, 22(6): 86-88.

[2] 章昊，周敏，唐季平，等. Cr12MoV 钢的耐磨性与其碳化物相关性研究[J]. 上海金属，2021, 43(1): 42-49.
ZHANG H, ZHOU M, TANG J P, et al. Correlation of wear resistance with carbides for Cr12MoV steel[J]. Shanghai Metals, 2021, 43(1): 42-49.

[3] 迟宏宵，刘继浩，殷军伟，等. Cr12Mo1V1 模具钢碳化物分断细化热处理技术[J]. 材料热处理学报，2023, 44(1): 87-94.
CHI H X, LIU J H, YIN J W, et al. Heat treatment technology of carbide breaking and refining of Cr12Mo1V1 die steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(1): 87-94.

[4] GAO Y L, TONG Y, LI G H, et al. Microstructure and mechanical properties of Ni-based alloy composite coating on Cr12MoV by laser cladding[J]. Coatings, 2022, 12(11): 1632.

[5] WANG J, ZHOU J, ZHU S S, et al. Friction properties of groove texture on Cr12MoV surface[J]. Journal of Central South University, 2017, 24(2): 303-310.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[6] 石江龙. GCr15 和 Cr12MoV 深冷处理工艺的研究[D]. 上海：上海交通大学，2012.
SHI J L. Study of cryogenic treatment for GCr15 & Cr12MoV[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.

[7] 姜银焕. WC/Cr12MoV 复合材料抗磨性能的实验研究[J]. 铸造技术，2010, 31(6): 717-719.
JIANG Y H. Research on the abrasive wear resistant property of WC/Cr12MoV composite[J]. Foundry Technology, 2010, 31(6): 717-719.

[8] 刘勇，刘新龙，张金东. 深冷处理对 Cr12MoV 钢力学性能的影响[J]. 金属热处理，2011, 36(8): 38-41.
LIU Y, LIU X L, ZHANG J D. Effect of deep cooling treatment on the mechanical properties of Cr12MoV steel[J]. Metal Heat Treatment, 2011, 36(8): 38-41.

[9] 赵国华. 深冷处理对 Cr12MoV 钢组织和耐磨性能的影响[J]. 热处理，2010, 25(6): 59-62.
ZHAO G H. Effect of cryogenic treatment on microstructure and wear resistance of Cr12MoV steel[J]. Heat Treatment, 2010, 25(6): 59-62.

[10] 杨伟伟，宋广礼，徐磊. 深冷处理对三角材质 Cr12MoV 钢性能的影响[J]. 新技术新工艺，2014(12): 62-65.
YANG W W, SONG G L, XU L. Effects of cryogenic treatment on properties of triangle cam made of Cr12MoV steel[J]. New Technology & New Process, 2014(12): 62-65.

[11] 任威，杨肖肖，李誉之，等. 亚稳组织转变细化 TiAl 合金显微组织研究现状[J]. 铸造技术，2022, 43(7): 484-490.
REN W, YANG X X, LI Y Z, et al. Research status on refinement of TiAl alloys via transformation of metastable microstructure[J]. Foundry Technology, 2022, 43(7): 484-490.

[12] 孙荣耀，郝士明，茹红强. D2 冷作模具钢的回火转变研究[J]. 东北工学院学报，1993(2): 158-161.
SUN R Y, HAO S M, RU H Q. Investigation on tempering transformation of steel D2[J]. Journal of Northeast University of Technology, 1993(2): 158-161.

[13] 张璨，陈炜，谢珍勇，等. Cr12MoV 淬回火热处理对冷轧辊耐磨性影响的试验研究[J]. 特钢技术，2022, 28(4): 25-29.
ZHANG C, CHEN W, XIE Z Y, et al. Experimental study on the influence of quenching and tempering heat treatment of Cr12MoV on the wear resistance of cold roll[J]. Special Steel Technology, 2022, 28(4): 25-29.

[14] 王志新，施建军，林在滨. 冷处理对 Cr12MoV 钢高压气淬组织和性能的影响[J]. 热加工工艺，2015, 44(18): 200-202.
WANG Z X, SHI J J, LIN Z B. Effects of cold treatment on microstructure and properties of Cr12MoV steel after high pressure gas quenched[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(18): 200-202.

[15] 陈庚，苗景国，方琴，等. Cr12MoV 钢的淬火回火工艺[J]. 现代盐化工，2022, 49(3), 19-21.
CHEN G, MIAO J G, FANG Q, et al. Quenching and tempering process of Cr12MoV steel[J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2022, 49(3): 19-21.

[16] 廖晓明，王凌云，林浩波. 热处理工艺对 Cr12MoV 模具钢组织与性能的影响[J]. 铸造技术，2014, 35(8): 1715-1717.
LIAO X M, WANG L Y, LIN H B. Effect of heat treatment process on microstructure and properties of Cr12MoV die steel[J]. Foundry Technology, 2014, 35(8): 1715-1717.

[17] 余立林，冯晓曾. Cr12MoV 钢的深冷处理及其强化机制的研究[J]. 金属热处理，1991(1): 24-30.
YU L L, FENG X C. Cryogenic treatment of Cr12MoV steel and its strengthening mechanism[J]. Heat Treatment of Metals, 1991(1): 24-30.

[18] WEI Z, WANG J, LI Y. Microstructure, and micro-hardness of Ni-based surfacing coating on the Cr12MoV die steel[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2020, 235(3): 613-624.

[19] WANG T Q, CHEN X, XIA Y L, et al. Study on microstructure and mechanical properties of Cr12MoV alloy deposited by laser melting deposition[J]. Advanced Engineering Materials, 2022, 24(9): 2101669.

[20] 何晓荣，黎秋萍，刘少鹏，等. Cr12MoV 模具钢渗氮层服役过程中不同磨损阶段的摩擦学特性[J]. 表面技术，2022, 51(8): 243-251, 271.
HE X R, LI Q P, LIU S P, et al. Tribological properties of nitriding layer of Cr12MoV die steel in different wear stages during service[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 243-251, 271.

[21] 卢军. H13 和 Cr12MoV 模具钢的等温淬火[J]. 热处理，2020, 35(5): 42-45.
LU J. Austempering of H13 and Cr12MoV die steels[J]. Heat Treatment, 2020, 35(5): 42-45.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net