

## 深冷处理对 W6Mo5Cr4V2 高速钢性能的影响

艾峥嵘<sup>1,2</sup> 吴红艳<sup>3</sup> 于 凯<sup>4</sup> 李建中<sup>4</sup>

(东北大学 1 材料科学与工程学院, 2 材料各向异性与织构教育部重点实验室,  
3 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 4 冶金学院, 沈阳 110819)

**摘 要** 对经 -120 ℃ 和 -150 ℃ 深冷工艺处理的 W6Mo5Cr4V2 高速钢进行了硬度及摩擦磨损性能测试, 并用扫描电镜分析了其显微组织与磨损形貌。深冷处理使高速钢硬度和耐磨性能得到提高。随深冷温度的降低, 性能改善明显, 经循环深冷处理试样的性能均好于一次长时间深冷处理试样, -150 ℃ 温度下经 3 次 1 h 深冷处理试样的性能最优。结果表明, 高速钢性能改善的主要原因是深冷处理可促进试样中残余奥氏体向马氏体转变, 同时, 高速钢组织中析出的大量碳化物在摩擦磨损过程中作为硬质颗粒可提高耐磨性能。循环深冷处理过程中过冷度一直存在, 每次循环过程都可促进残余奥氏体转变为马氏体, 促进基体马氏体上析出细小的碳化物, 从而提高高速钢的性能。

**关键词** 深冷工艺 高速钢 循环深冷处理 硬度 耐磨性能

## Effect of Sub-Zero Treatment on Performance of High Speed Steel W6Mo5Cr4V2

Ai Zhengrong<sup>1, 2</sup>, Wu Hongyan<sup>3</sup>, Yu Kai<sup>4</sup> and Li Jianzhong<sup>4</sup>

(1 School of Material Science and Engineering, 2 Key Laboratory for Anisotropy and Texture of Materials (Ministry of Education), 3 State Key Laboratory of Rolling and Automation, 4 School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819)

**Abstract** Effect of sub-zero treatment at -120 ℃ and -150 ℃ on properties of high speed steel W6Mo5Cr4V2 is studied by means of hardness and wear resistance tests. The microstructure and wear morphology are analyzed by means of scanning electron microscope (SEM). It is concluded that the hardness and wear resistance of the high speed steel increase by sub-zero treatment. With the sub-zero temperature decrease, the performance of high speed steel improves significantly. The performance of cycle sub-zero treatment sample is better than a long time sub-zero treatment sample. After sub-zero treatment for 3 times 1 h at -150 ℃, the high speed steel can obtain the optimal comprehensive performance. The results show that the significant performance improvement of high speed steel is attributed to the transformation of retained austenite to martensite in the samples after sub-zero treatment. At the same time, the wear resistance performance improved is attributed to that a large amount of carbides precipitate from high speed steel work as the rigid particles during the friction and wear process. There is super-cooling degree that continuously exists during the cycle cryogenic treatment process. The transformation of retained austenite to martensite and the tiny carbides precipitated from matrix martensite can be promoted by super-cooling each cycle to improve the performance of the high speed steel.

**Material Index** Sub-Zero Treatment Process, High Speed Steel, Cycle Sub-Zero Treatment, Hardness, Wear Resistance Performance

深冷处理是将被处理材料置于特定的或可控的低温环境中(通常为 -125 ~ -196 ℃), 通过液氮相变(气化)吸热获得的低温, 使材料的微观组织结构发生改变, 从而提高或改善材料性能的一种超低温处理技术<sup>[1-3]</sup>。深冷处理技术可增强材料的尺寸稳定性, 减少残余应力, 改善材料的性能, 同时具有操作简便、清洁、无污染的优点, 因而在诸多领域都得到了广泛的应用<sup>[4-5]</sup>。

深冷处理工艺参数对材料的性能会有显著影响<sup>[6]</sup>。目前常采用的深冷处理工艺有淬火后直接进行深冷处理和淬火后先回火再进行深冷处理两

种。吕雁文等<sup>[7-9]</sup>采用淬火后直接进行深冷处理的方式研究了深冷保温时间、冷却速度和深冷温度对 W6Mo5Cr4V2 高速钢组织、硬度及残余应力的影响, 得到的结论是深冷保温时间对高速钢性能的影响最大, 然后依次是冷却速度和深冷温度。谢尘等<sup>[10]</sup>研究了淬火后直接深冷与淬火后先回火再深冷对 SDC99 钢微观组织和力学性能的影响, 得到的结论是淬火后先回火再进行深冷处理的试样可获得最优的综合使用性能。深冷处理能提高材料性能, 主要归因于残余奥氏体转变为马氏体以及基体马氏体上析出超细碳化物, 使材料的硬度和耐磨性能提

高<sup>[11-12]</sup>。

目前深冷处理高速钢的研究多集中于一次长时间深冷处理对材料性能的影响,循环深冷处理对微观组织和性能影响的研究并不多。本文采用淬火后直接深冷处理的方式研究了一次长时间深冷处理、循环深冷处理与传统热处理工艺对 W6Mo5Cr4V2 高速钢性能的影响,确定了循环深冷处理的微观机理,为优化 W6Mo5Cr4V2 高速钢深冷处理工艺提供参考。

### 1 试验材料及方法

试验材料为国内钢厂生产的 W6Mo5Cr4V2 牌号高速钢棒材,化学成分如表 1 所示。

将试样在箱式电阻炉中经 1 150 °C,保温 40 min 奥氏体化处理后水淬至室温。利用程序控制深冷箱对试样分别进行 -120 °C 及 -150 °C 温度下的深冷处理,深冷处理的降温 and 升温过程均保持 5 °C/min 的升降温速率。深冷处理后将试样在 560 °C 进行 1 次 1 h 的回火处理,深冷处理的工艺路线如图 1 所示。在本实验中,为了对比不同工艺的效果,制备了奥氏体化后淬火 + 3 次 1 h 回火传统工艺处理的试样,对淬火后直接进行深冷处理的试样又分别设计了 1 次 2 h 深冷处理和多次 1 h 深冷处理(即循环深冷处理)的试样,高速钢深冷处理工艺试样分组情况如表 2 所示。

经深冷处理后的高速钢试样,其宏观硬度采用洛氏硬度 C 标度 HRC,利用实验室 KB3000BVRZ-SA 型号万能硬度计来测定,施加载荷 150 kg,加载

表 1 高速钢 W6Mo5Cr4V2 的化学成分/%  
Table 1 Chemical compositions of high speed steel W6Mo5Cr4V2 / %

C	Si	Mn	S	P	Cr	W	Mo	V	Cu
0.84	0.31	0.30	0.008	0.025	4.11	5.66	4.63	1.83	0.06

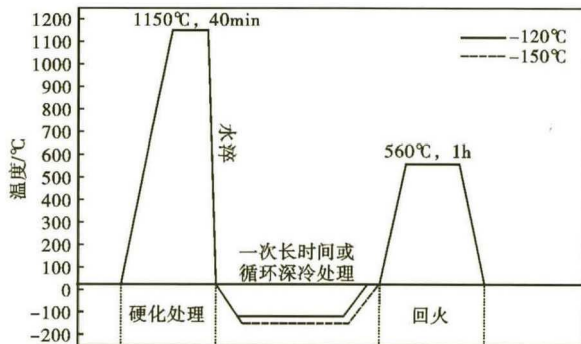


图 1 高速钢 W6Mo5Cr4V2 深冷处理工艺路线图

Fig. 1 Schematic of sub-zero treatment process of high speed steel W6Mo5Cr4V2

表 2 高速钢 W6Mo5Cr4V2 深冷处理工艺参数  
Table 2 Parameters of high speed steel W6Mo5Cr4V2 sub-zero treatment process

样品编号	深冷温度/°C	深冷时间/h	回火温度/°C
No. 0	-	-	560
No. 2	-120	2	560
No. 2-1	-120	1+1	560
No. 5	-150	2	560
No. 5-1	-150	1+1	560
No. 5-2	-150	1+1+1	560

时间 30 s。每个试样上均匀选取 10 个点进行硬度测定,并取平均值作为某一工艺下试样的硬度值。

本实验中高速钢的耐磨性能在 MMU-10G 材料端面摩擦磨损试验机上进行测定。采用销-盘对磨实验方法,对磨材料为 40Cr 钢制圆环,HRC 硬度值在 55 ~ 60。耐磨实验施加载荷 50 N,加载时间 20 min,转速 620 r/min。每组实验前都将对磨盘在同一号砂纸上进行打磨,以保证每组实验之间对磨盘都具有一致的粗糙度。耐磨实验的试样在磨损前后都要在超声清洗装置中用酒精进行清洗,并使用分析天平进行称重(其精确度可达 0.1 mg)。实验前将销试样进行机械抛光,清洗后进行称重,记为  $W_1$ ,经 20 min 磨损并清洗后称重,记为  $W_{20}$ ,则摩擦磨损失重记为  $\Delta W = W_1 - W_{20}$ 。本实验中耐磨性能的好坏用相对磨损率(%)来表示,即如下式所示:

$$\text{相对磨损率} = \frac{\text{经深冷处理试样磨损失重}}{\text{未深冷处理试样磨损失重}} \times 100\%$$

定义传统工艺处理试样的相对磨损率为 100%,则可得到不同深冷工艺处理试样的相对磨损率<sup>[5-13]</sup>。摩擦磨损实验后利用 ZEISS ULTRA 55 场发射扫描电子显微镜对试样的磨损形貌进行观察分析。

### 2 试验结果

#### 2.1 深冷工艺对微观组织的影响

不同深冷处理工艺对高速钢微观组织的影响如图 2 所示,高速钢的显微组织由基体马氏体和碳化物组成。对比分析可知,经深冷处理试样中基体马氏体的板条形貌特征明显,基体上析出碳化物的含量高于传统工艺处理试样<sup>[14]</sup>。经循环深冷处理试样中基体上析出细小碳化物的含量增加,基体马氏体组织细化。随着循环深冷次数的增加,组织中的碳元素会在马氏体板条间形成碳偏聚,从而在基体上析出大量细小且分布均匀的碳化物,使马氏体板条间距减小,发生碎化。

#### 2.2 深冷工艺对硬度的影响

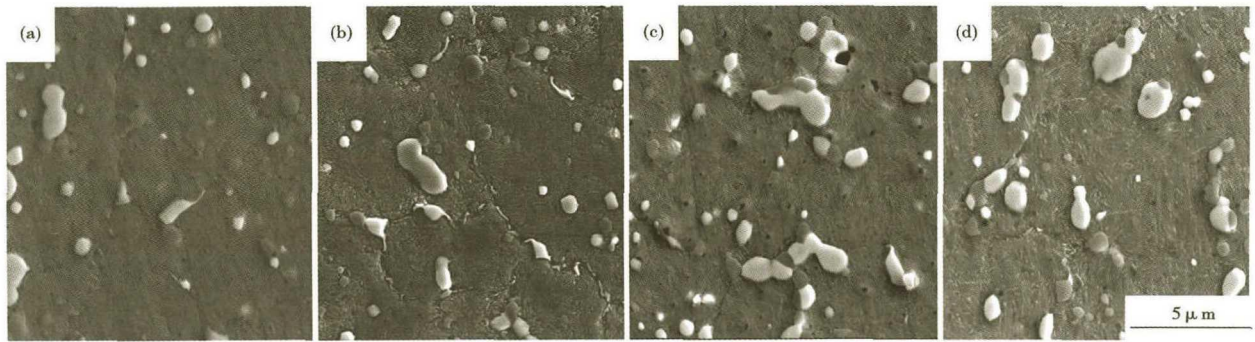


图 2 W6Mo5Cr4V2 钢 No. 0, 未深冷处理, 560 °C 1 h 回火 (a); No. 5, -150 °C 2 h 深冷处理 (b); No. 5-1, -150 °C 1 + 1 h 两次深冷处理 (c) 和 No. 5-2, -150 °C 1 + 1 + 1 h 3 次深冷处理 (d), 560 °C 1 h 回火的组织形貌

Fig. 2 Morphology of structure of steel W6Mo5Cr4V2: No. 0, without sub-zero treatment, 560 °C 1 h tempering (a); No. 5 with -150 °C 2 h sub-zero treatment, (b), No. 5-1 -150 °C 1 + 1 h double sub-zero treatment, (c) and No. 5-2, -150 °C 1 + 1 + 1 h tri-sub-zero treatment (d), 560 °C 1 h tempering

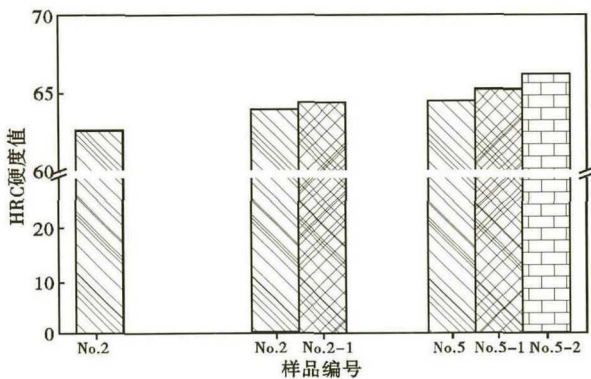


图 3 深冷工艺对 W6Mo5Cr4V2 钢硬度的影响

Fig. 3 Effect of sub-zero treatment process on hardness of steel W6Mo5Cr4V2

不同深冷处理工艺对高速钢硬度的影响如图 3 所示。对比分析可知, 经深冷处理试样的硬度均比传统工艺处理试样的高, 最高可提高 3.5 HRC。深冷处理温度越低, 试样的硬度进一步提高, 经 -150 °C 一次 2 h 深冷处理试样的 HRC 硬度可提高至 64.5。对比分析 -120 及 -150 °C 深冷温度下不同深冷方式的效果可知, 经循环深冷处理试样的硬度均高于一次长时间处理的试样。随着深冷循环次数的增加, 其硬度提高明显, 试样 No. 5-2 可获得最高的 HRC 硬度 66.1, 比试样 No. 5 HRC 硬度提高 1.6。

### 2.3 深冷工艺对摩擦磨损性能的影响

不同深冷处理工艺对高速钢摩擦磨损性能的影响如图 4 所示。对比分析可知, 经深冷处理后的试样均比传统工艺处理的试样耐磨, 深冷处理温度越低, 试样的耐磨性能越好。当试样分别在 -120 及 -150 °C 经一次 2 h 深冷处理后, 其相对磨损率分别为 92.1% 和 64.5%。对比分析循环深冷处理对摩

擦磨损性能的影响, 经循环深冷处理试样的耐磨性能均好于一次长时间深冷处理, 经 -120 及 -150 °C 两次 1 h 深冷处理试样的相对磨损率分别为 68.4% 和 43.4%。随着深冷处理循环次数的增加, 试样的耐磨性能进一步改善, 经 -150 °C 三次 1 h 深冷处理试样的相对磨损率为 36.8%, 耐磨性能最好。

图 5 所示为经不同深冷工艺处理试样的磨损形貌, 磨损形式主要为磨粒磨损和粘着磨损。经传统工艺处理试样的磨损形貌比较粗糙, 有较多氧化区域, 且在平行于摩擦方向上存在变形唇和断裂脊, 可观察到磨粒磨损和粘着磨损, 如图 5(a) 所示。变形唇的存在说明经传统工艺处理的试样在摩擦磨损过程中发生了剧烈的塑性变形。如图 5(b) ~ (d) 所示, 经深冷处理试样的磨损形貌表现得较为光滑, 可观察到斑块状的氧化区域。实验中经不同工艺处理试样的磨损条件一致, 经 -150 °C 一次 2 h (No. 5) 深冷处理试样的磨损形貌中磨粒磨损与粘着磨损仍较为严重, 有少部分区域发生了氧化。大量碳化物

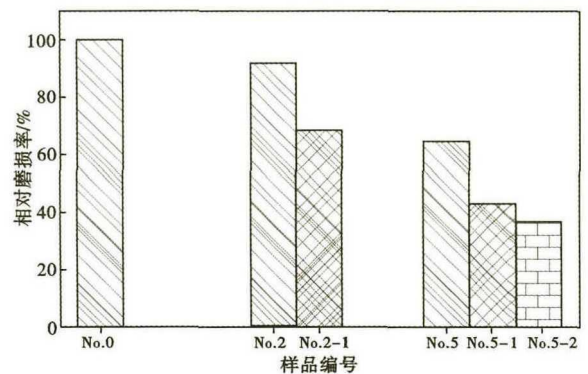


图 4 深冷工艺对 W6Mo5Cr4V2 钢耐磨性能的影响

Fig. 4 Effect of sub-zero treatment process on wear resistance performance of steel W6Mo5Cr4V2

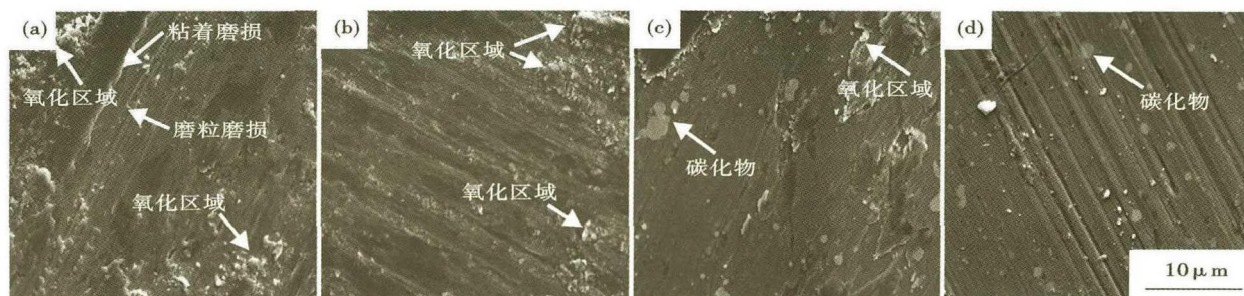


图5 W6Mo5Cr4V2 钢 No. 0, 未深冷处理, 560 °C 1 h 回火(a); No. 5, -150 °C 2 h 深冷处理(b); No. 5-1, -150 °C 1 + 1 h 两次深冷处理(c)和 No. 5-2, -150 °C 1 + 1 + 1 h 3 次深冷处理(d), 560 °C 1 h 回火的磨损形貌图像

Fig. 5 Images of wear morphology of steel W6Mo5Cr4V2: No. 0, without sub-zero treatment, 560 °C 1 h tempering (a); No. 5 with -150 °C 2 h sub-zero treatment, (b), No. 5-1 -150 °C 1 + 1 h double sub-zero treatment, (c) and No. 5-2, -150 °C 1 + 1 + 1 h tri-sub-zero treatment (d), 560 °C 1 h tempering

存在且尺寸分布均匀。在 No. 5-1 (-150 °C 经 2 次 1 h 深冷处理) 试样的磨损形貌中主要以粘着磨损为主, 且区域小于一次 2 h 深冷处理的试样, 在磨损形貌中可观察到大量未剥落的碳化物及少量氧化区域, 犁沟较浅, 这些碳化物的存在使得试样的耐磨性能提高。在 No. 5-2 (-150 °C 经 3 次 1 h 深冷处理) 试样的磨损形貌中, 仅有极少区域的粘着磨损, 主要为磨粒磨损形貌, 可观察到大量碳化物存在且尺寸分布均匀。

由于试验中高速钢试样与摩擦副是在空气中干摩擦, 二者相对运动过程中会发生“材料转移”, 形成粘着, 随着摩擦过程的进行, 转移(粘着)物会从材料表面剥落, 剥落是粘着磨损的主要表现形式。此外, 磨粒磨损的表现形式为直线状的犁沟。

### 3 分析与讨论

本实验中高速钢经深冷处理后硬度提升主要是由于深冷处理可促进试样中残余奥氏体向马氏体转变。由于深冷处理的温度远低于实验材料的马氏体转变终了温度, 淬火态组织中保留着的亚稳态残余奥氏体随深冷温度的降低转变为硬度较高的马氏体。

与传统处理工艺相比, 经深冷处理试样的耐磨性能提高, 高速钢组织中析出的大量碳化物在摩擦磨损过程中作为硬质颗粒可提高高速钢的耐磨性能。随深冷处理温度的降低试样的耐磨性能提高, 主要是因为试样组织中碳化物含量的增加<sup>[14]</sup>。通常认为碳原子在零下的低温下迁移扩散的能力比较弱<sup>[15-16]</sup>, 由于淬火马氏体处于热力学不稳定状态, 深冷处理过程中马氏体会产生晶格畸变, 导致体积收缩, 因而增强了过饱和马氏体中碳原子的析出动力, 使得碳原子在晶体缺陷附近形成碳偏聚, 这些碳

原子在回温至室温及随后的回火过程中作为形核质点形成碳化物析出。

在不同的深冷处理温度下, 经循环深冷处理试样的硬度和耐磨性均好于一次长时间深冷处理。深冷处理时在连续降温的过程中会形成过冷度, 过冷度的存在一方面可使残余奥氏体转变为马氏体提高硬度, 一方面促使淬火马氏体产生晶格畸变增强马氏体中碳原子的析出动力, 从而形成大量细小碳化物提高耐磨性。与一次长时间深冷处理相比, 循环深冷处理过程中过冷度一直存在, 每次循环过程都会有残余奥氏体转变为马氏体, 都会促使碳化物析出, 随着循环次数的增多, 残余奥氏体的含量减少, 硬度提高, 同时碳化物形核位置增加, 析出大量超细碳化物提高耐磨性能。

### 4 结论

(1) 与传统处理工艺相比, 经深冷处理试样的硬度与耐磨性能均比传统工艺处理试样的好。在相同的处理温度下, 经循环深冷处理试样的硬度与耐磨性能均好于一次长时间处理的试样。随着深冷循环次数的增加, 硬度与耐磨性能均可得到进一步改善。-150 °C 温度下经 3 次 1 h 深冷处理试样的硬度最高, 比传统工艺处理试样 HRC 提高了 3.5, 其相对磨损率仅为 36.8%, 耐磨性能最好。

(2) 与传统处理工艺相比, 经深冷处理高速钢试样的磨损形貌表现得较为光滑, 只有少部分区域发生氧化。-150 °C 温度下经 3 次 1 h 深冷处理试样的磨损形貌中, 可观察到大量尺寸分布均匀的碳化物存在, 粘着磨损的现象改善明显, 耐磨性能最好。

(3) 高速钢性能提升的主要原因是深冷处理时在连续降温的过程中会形成过冷度, 过冷度的存在

一方面可使残余奥氏体转变为马氏体提高硬度,一方面促使基体马氏体中析出碳原子,从而形成大量细小碳化物提高耐磨性。循环深冷处理过程中过冷

度一直存在,每次循环过程都会有残余奥氏体转变为马氏体,基体马氏体上有碳化物析出,随着循环次数的增多,高速钢性能改善明显。

参考文献

[1] Gill S S, Singh H, Singh R, et al. Cryoprocessing of Cutting Tool Materials-a Review[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 48(1-4):175-192.

[2] Koneshlou M, Meshinchi Asl K, Khomamizadeh F. Effect of Cryogenic Treatment on Microstructure, Mechanical and Wear Behaviors of AISI H13 Hot Work Tool Steel [J]. Cryogenics, 2011, 51(1):55-61.

[3] 代威,刘勇,张金东,等.深冷处理对 Cr12 力学性能的影响[J].热加工工艺,2010,39(18):149-152.

[4] Marcos P, Francisco Javier, B. The Effect of Deep Cryogenic Treatments on the Mechanical Properties of an AISI H13 Steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 624:32-40.

[5] 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.

[6] Darwin J D, Mohan Lal D, Nagarajan G. Optimization of Cryogenic Treatment to Maximize the Wear Resistance of 18% Cr Martensitic Stainless Steel by Taguchi Method [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 195(1):241-247.

[7] 吕雁文,闫献国,韩晓君,等.深冷处理对 W6Mo5Cr4V2 高速钢硬度及组织的影响[J].热加工工艺,2015,44(8):174-178.

[8] 吕雁文,闫献国,韩晓君,等.深冷处理对 W6Mo5Cr4V2 高速钢红硬性的影响[J].金属热处理,2015,40(10):91-94.

[9] 吕雁文,闫献国,韩晓君,等.深冷处理对 W6Mo5Cr4V2 高速钢残余应力的影响[J].金属热处理,2015,40(12):89-92.

[10] 谢尘,王明,李虎,等.深冷处理对冷作模具钢 SDC99 组织及性能的影响[J].材料热处理学报,2016,37(2):153-158,178.

[11] 吴红艳,艾峥嵘,刘相华.钢铁材料深冷处理技术研究和应用进展[J].材料热处理学报,2013,34(12):1-6.

[12] 艾峥嵘,吴红艳,高海涛,等.高速钢深冷处理作用机理研究现状[J].金属热处理,2014,39(3):94-98.

[13] 赵国华,于文平,魏建勋.深冷处理对 GCr15 组织和力学性能的影响[J].材料开发与应用,2010,25(1):26-29.

[14] 艾峥嵘,于凯,吴红艳,等.深冷处理温度对 W6Mo5Cr4V2 高速钢组织及硬度的影响[J].金属热处理,2018,43(7):150-154.

[15] Tyshchenko A. I, Theisen W, Oppenkowski A, et al. Low-Temperature Martensitic Transformation and Deep Cryogenic Treatment of a Tool Steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(26):7027-7039.

[16] 谢尘,吴晓春,闵娜,等.3DAP 研究高碳高合金钢深冷处理过程的 C 偏聚行为[J].金属学报,2015,51(3):315-324.

艾峥嵘(1989-),女,硕士(2014年东北大学),实验师,2012年东北大学(本科)毕业,钢铁材料组织性能研究。  
E-mail: aizhengrong@ atm. neu. edu. cn

收稿日期:2019-05-07

“讲文明树新风”公益广告

绿化环境  
从我做起