

深冷处理工艺对 W6Mo5Cr4V2 钢力学性能和微观组织的影响

Effect of Process Variables of Cryogenic Treatment on Mechanical Properties and Microstructure of W6Mo5Cr4V2 Steel

段春争¹, 王敏杰¹, 李士燕²

(1 大连理工大学 机械工程学院 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116023; 2 兰州理工大学 材料科学与工程学院, 兰州 730050)

DUAN Chun-zheng¹, WANG Min-jie¹, LI Shi-yan²

(1 Key Laboratory of Ministry of Education for Precision and Non-traditional Machining,

School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, Liaoning, China;

2 School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

摘要: 采用正交实验设计的方法对 W6Mo5Cr4V2 高速钢循环深冷处理工艺进行了实验研究, 分析不同深冷工艺参数对宏观力学性能的影响, 使用 SEM 和 TEM 观察循环深冷处理断口形貌和微观组织。结果表明, 采用循环深冷处理工艺后, 随着深冷次数的增加, 力学性能明显提高, 沿马氏体位错网析出大量超细弥散分布的碳化物数量增多, 尺寸和间距减小, 与一次长时间深冷处理相比, 循环深冷处理效果更好。

关键词: 深冷处理; 高速钢; 力学性能; 微观组织

中图分类号: TG156.91 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)06-0040-04

Abstract: The repeated cryogenic treatment technique of W6Mo5Cr4V2 high speed steel was experimentally investigated using orthogonal experiment design, the effect of cryogenic treatment process variables on microstructure and macroscopic mechanical properties were analyzed, the fracture pattern and microstructure after repeated cryogenic treatment were studied. The results showed that after repeated cryogenic treatment, the mechanical properties were significantly improved, and the amount of fine dispersed carbide particles precipitated on martensitic dislocation meshworks was increased and their size and spacing got smaller. The effect of repeated cryogenic treatment is much better than that of single and long time cryogenic treatment.

Key words: cryogenic treatment; high speed steel; mechanical property; microstructure

深冷处理作为一种改善金属材料综合力学性能的手段, 由于其成本低、设备简单、耗能少且无污染, 而越来越受到人们的重视。研究表明, 通过合理制定深冷处理工艺明显提高合金工具钢和碳素工具钢等钢材的力学性能, 零件硬度 HRC 可提高 1~3, 使用寿命提高 1~10 倍^[1-3]。对于深冷处理机理方面, 普遍认为残余奥氏体转化为马氏体以及析出弥散碳化物是深冷处理后钢铁材料综合力学性能明显改善的主要原因^[4-6]。

高速钢常用于制作切削刀具和精密冷作模具。研究表明, 高速钢刀具深冷处理后红硬性和刀具寿命大幅度提高^[7]。但与一次长时间深冷处理相比, 循环深冷处理工艺参数对其力学性能和微观组织的影响还缺乏深

入研究, 多次循环深冷处理效果是否更好尚不能确定。

本工作采用了正交实验设计的方法对 W6Mo5Cr4V2 高速钢循环深冷处理工艺进行了实验研究, 分析了不同深冷工艺参数对宏观力学性能的影响, 观察并分析了循环深冷处理断口形貌和微观组织的影响, 为进一步优化高速钢深冷处理工艺提供了依据。

1 实验方法及过程

1.1 实验材料

实验材料为 W6Mo5Cr4V2 高速钢, 其化学成分见表 1, 热处理工艺曲线见图 1。

表 1 W6Mo5Cr4V2 高速钢的化学成分 (质量分数/ %)

Table 1 Composition of W6Mo5Cr4V2 high speed steel (mass fraction / %)

C	W	Mo	Cr	V	Si	Mn	P	S
0. 87	5. 56	4. 60	3. 86	1. 78	0. 18	0. 37	0. 028	0. 028

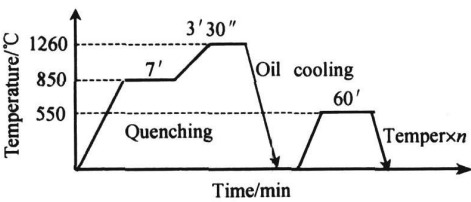


图 1 热处理工艺曲线

Fig. 1 Heat treatment cycle curve

1. 2 实验过程

1. 2. 1 深冷处理和宏观力学性能实验

影响深冷处理效果的因素很多, 深冷处理工艺参数中回火次数、深冷保持时间以及深冷处理循环次数

是主要因素。为了确定各因素对深冷处理后力学性能影响的主次关系, 以冲击韧性 A_K 、抗弯强度 σ_{bb} 、挠度 f 以及洛氏硬度 HRC 等宏观力学性能数据作为考查指标, 采用多指标多因素的正交实验设计法, 在不考虑交互作用的情况下分析实验结果。本实验采用 3 因素 4 水平正交设计, 选用 $L_{16}(4^5)$ 型正交表安排实验, 因素水平表如表 2 所示, 表中影响因素 A , B 和 C 分别为回火次数、深冷时间和深冷次数, D 和 E 为误差列。将材料毛坯加工成标准力学性能试样, 采用直浸式深冷处理, 介质为液氮, 每次深冷处理后试样放在空气中升至室温。力学性能实验重复三次, 取平均值。

表 2 因素水平表

Table 2 Levels table of factors

Level	Factor				
	A	B	C	D	E
	(temper frequency)	(cryogenic time/ h)	(cryogenic frequency)	(error column)	(error column)
1	0	1	1		
2	1	2	2		
3	2	3	3		
4	3	4	4		

1. 2. 2 显微观察

使用 JSM-5600LV 型扫描电子显微镜观察冲击断口, 分析断裂的微观机理。使用 H-800 型透射电子显微镜观察深冷处理前后的微观组织, 电压 100kV。

冷工艺即回火 2 次+ 3 次 1h 深冷处理后, $\sigma_{bb} = 4042\text{MPa}$, $A_K = 0.320\text{MJ/m}^2$, 力学性能提高超过 10%。通过计算级差 R_i 研究深冷工艺参数对实验结果的影响, 得到 $R_1 > R_3 > R_2$, 即回火次数对力学性能影响最大, 其次是深冷次数, 最后是深冷时间。由此可见, 在对材料使用性能要求较高的情况下, 回火次数不应减少, 相对于一次长时间深冷处理, 在深冷时间足够的情况下, 采用多次循环深冷处理工艺效果更好。

2 实验结果及讨论

2. 1 循环深冷处理后的力学性能

将深冷处理后力学性能的实验结果填入正交实验表中, 并进行级差分析, 如表 3 所示。此外, 为了对比研究, 将每组未深冷试样的实验数据也填入表 3 中。从表中的数据中看到, 深冷处理后 σ_{bb} 普遍提高 5% ~ 10%, A_K 提高 10% ~ 25%, HRC 提高 1 ~ 2, f 提高 0.1 ~ 0.3, 可见深冷处理可以提高高速钢的综合力学性能, 进而改善其使用性能如耐磨性、耐冲击性和红硬性。分析实验数据发现, 在回火次数和总深冷时间相同的情况下, 增加深冷次数, 力学性能明显改善, 例如采用 11 号工艺即回火 2 次+ 1 次 3h 深冷处理后, $\sigma_{bb} = 3772\text{MPa}$, $A_K = 0.277\text{MJ/m}^2$, 而采用 9 号循环深

2. 2 冲击断口的 SEM 观察

深冷处理前后 W6Mo5Cr4V2 高速钢冲击断口的 SEM 照片如图 2 所示。观察断口照片发现, 断口上有许多短而弯曲的撕裂棱线条, 断口上有二次裂纹, 属准解理断口。第二相质点是断裂过程中微裂纹产生的根源, 因此它的分布和形态对断口形貌特征会产生决定性的影响。图 2a 中所示, 深冷处理前凹陷的数量较少, 较深且形状不规则, 分布也不均匀, 说明引起裂纹的第二相质点即淬火未溶碳化物的尺寸较大, 分布不均匀。图 2b- d 所示, 深冷处理后断口凹陷的数量增

表 3 力学性能正交实验结果及极差分析

Table 3 Orthogonal experiment results of mechanical properties and range analysis

Experiment No	Factor					Experiment index			
	A	B	C	D	E	σ_{bb}/MPa	$A_K/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2})$	f/mm	HRC
1	1(0)	1(1)	1(1)	1	1	1936	0.116	1.5	63.5
2	1	2(2)	2(2)	2	2	2034	0.105	1.4	63.9
3	1	3(3)	3(3)	3	3	2048	0.167	1.5	64.5
4	1	4(4)	4(4)	4	4	2173	0.205	1.4	64.6
Before cryogenic treatment						1896	0.095	1.3	63.1
5	2(1)	1	2	3	4	3423	0.256	1.8	62.2
6	2	2	1	4	3	3493	0.274	1.8	62.4
7	2	3	4	1	2	3548	0.289	1.9	62.6
8	2	4	3	2	1	3558	0.290	1.9	62.7
Before cryogenic treatment						3245	0.234	1.7	61.6
9	3(2)	1	3	4	2	4042	0.320	2.1	62.3
10	3	2	4	4	1	4078	0.294	2.1	62.4
11	3	3	1	2	4	3772	0.277	2.0	62.0
12	3	4	2	1	3	4050	0.325	2.1	62.2
Before cryogenic treatment						3656	0.266	1.9	61.2
13	4(3)	1	4	2	3	4236	0.328	2.0	61.2
14	4	2	3	1	4	3965	0.325	2.0	61.5
15	4	3	2	4	1	3924	0.296	2.0	61.4
16	4	4	1	3	2	3642	0.275	2.0	61.9
Before cryogenic treatment						3608	0.255	1.9	60.8
$R_j(\sigma_{bb})$	7751	549	1192						
$R_j(A_K)$	0.631	0.097	0.174						
$R_j(f)$	2.5	0.1	0.2						
$R_j(\text{HRC})$	10.5	1.3	2.2						

加,而且变得较浅,分布更为均匀,裂纹变窄,断口趋于平坦。观察图 2c 和图 2d 发现,多次循环深冷处理后效果更为明显。根据 SEM 的观察结果可以推断,深冷处理后碳化物粒子的数量增加,且尺寸细小,多次循

环深冷处理有利于碳化物析出和均匀分布,造成微裂纹源尺寸减小及扩展阻力增加,并最终导致了综合力学性能的大幅度提高。下面的 TEM 观察为此结论提供了进一步的证据。

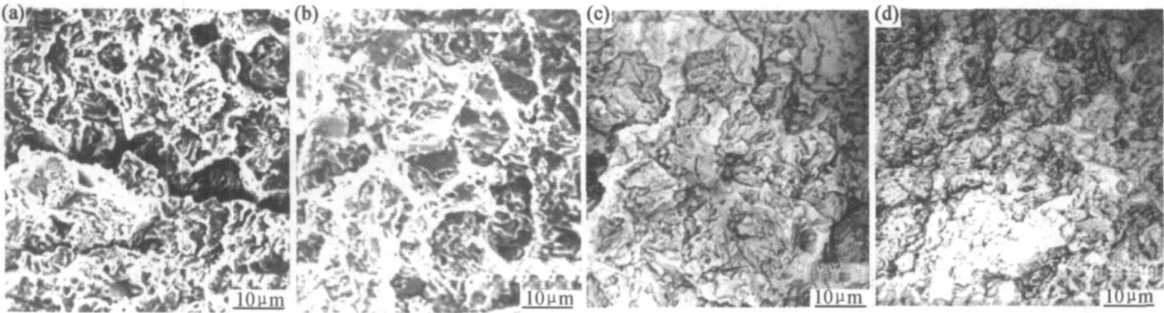


图 2 深冷处理前后冲击断口的 SEM 照片

(a) 回火 3 次(未深冷); (b) 回火 3 次+ 1 次 4h 深冷处理; (c) 回火 3 次+ 3 次 2h 深冷处理; (d) 回火 3 次+ 4 次 1h 深冷处理

Fig. 2 SEM micrographs of impact fracture before and after cryogenic treatment

(a) temper× 3(before cryogenic treatment); (b) temper× 3+ 4h cryogenic treatment ;

(c) temper× 3+ 2h cryogenic treatment× 3 ; (d) temper× 3+ 1h cryogenic treatment× 4

2.3 循环深冷前后显微组织的 TEM 观察

图 3 为循环深冷处理前后显微组织的 TEM 照片。图 3a 所示为回火后未深冷处理的马氏体孪晶带的暗场照片, 孪晶带连续, 没有弥散析出物。图 3b 显示深冷处理 4h 后, 在马氏体孪晶带已经有弥散碳化物析出, 但尺寸和间距较大, 分布也不均匀, 由此可见延

长深冷时间对析出碳化物的数量影响不大。图 3c 和图 3d 分别显示了 3 次和 4 次循环深冷后沿马氏体位错网析出了大量超细弥散分布的碳化物, 与图 3b 中的一次长时间深冷相比, 随着深冷次数的增加, 多次循环深冷处理后析出的碳化物数量更多, 尺寸和间距更小, 这一结论与冲击断口的观察结果是一致的。

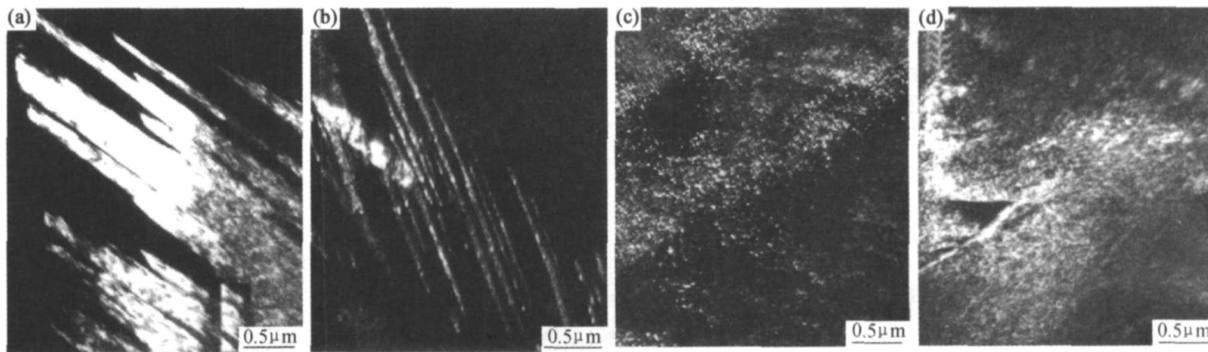


图 3 W6Mo5Cr4V2 钢循环深冷处理前后显微组织的 TEM 照片(暗场相)

(a) 回火 3 次(未深冷); (b) 回火 3 次+ 1 次 4h 深冷处理; (c) 回火 3 次+ 3 次 2h 深冷处理; (d) 回火 3 次+ 4 次 1h 深冷处理

Fig. 3 TEM microstructure micrographs of W6Mo5Cr4V2 steel before and after cryogenic treatment(DF image)

(a) temper \times 3(before cryogenic treatment); (b) temper \times 3+ 4h cryogenic treatment ;

(c) temper \times 3+ 2h cryogenic treatment \times 3; (d) temper \times 3+ 1h cryogenic treatment \times 4

2.4 讨论

关于高速钢深冷处理后马氏体位错线和孪晶带上析出超细碳化物的原因, 目前尚无很好的理论解释。一般认为, 每个回火+ 深冷循环都会有一部分残余奥氏体转变为马氏体, 越是后来的循环参与相变的组分含碳量越高, 在下一次回火时就会析出更多的碳化物; 也是由于碳量高应变大, 晶核成核位置多, 故碳化物越细小, 所以经多次循环后碳化物数量明显增加。

通过本实验观察和分析表明, 经多次循环深冷处理后高速钢的综合力学性能大幅度提高, 显微组织明显细化, 深冷处理效果好于一次长时间深冷。因此实际生产中为优化深冷处理工艺, 应该适当增加深冷处理次数。

3 结论

(1) 使用正交实验设计方法研究了循环深冷处理工艺参数对 W6Mo5Cr4V2 高速钢宏观力学性能的影响, 结果表明, 回火次数对力学性能影响最大, 其次是深冷次数, 最后是深冷时间。增加深冷次数, 力学性能明显改善。

(2) 深冷处理后冲击断口和微观组织的显微观察表明, 采用多次循环深冷处理后, 沿马氏体位错网析出了大量细小弥散分布的碳化物, 随着深冷次数的增加, 析出的碳化物数量增多, 尺寸和间距减小。

(3) 多次循环深冷处理效果好于一次长时间深冷, 实际生产中为优化深冷处理工艺, 应适当增加深冷处理次数。

参考文献

- [1] 陈鹰, 陈再枝, 董瀚, 等. 经深冷处理的 4Cr5MoSiV1 钢的回火组织和力学性能[J]. 钢铁研究学报, 2006, 18(5): 29- 32.
- [2] 李士燕, 陈长风, 李雄, 等. 深冷处理对高碳钢抗磨粒磨损性能影响的研究[J]. 摩擦学学报, 2000, 20(4): 276- 279.
- [3] 丁剑, 张狄, 阎挺, 等. 深冷处理工艺参数对 Gr15 钢相对耐磨性的影响[J]. 热加工工艺, 2002, (6): 3- 7.
- [4] 林晓娉, 董允, 王亚红. 高速钢深冷处理及其机理研究[J]. 金属热处理学报, 1998, 19(2): 21- 25.
- [5] MENG F J, TAGASHIRA K, AZUMA R, et al. Role of ϵ -carbide precipitations in the wear resistance improvements of Fe-12Cr-Mo-V-1.4C tool steel by cryogenic treatment[J]. ISI International, 1994, 34(2): 205- 210.
- [6] YEN P L, KAMODY D J. Formation of fine ϵ -carbides in special cryogenic and tempering process key to improved properties of alloy steels[J]. Industrial Heating, 1997, (1): 40- 44.
- [7] 曾志新, 李勇, 周志斌, 等. 深冷处理对 W9Mo3Cr4V 刀具耐磨性能影响的研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(9): 794- 796.

收稿日期: 2007-05-30; 修订日期: 2007-11-15

作者简介: 段春争(1970—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为金属材料的深冷处理工艺及机理, 金属切削理论, 联系地址: 大连理工大学机械工程学院模具研究所(116023)。E-mail: dbf71@163.com