

doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2018.01.013

16Cr3NiWMoVNbE 渗碳淬火组织与 热物理力学性能数值模拟

谢成^{1*}, 朱戈阳², 寻丹¹, 肖政兵³, 丁志敏¹

(1. 中国航发南方工业有限公司, 湖南 株洲 412002; 2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001;
3. 中南大学 轻合金研究院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 基于 JMatPro 软件, 模拟计算了 4 种不同含碳量的 16Cr3NiWMoVNbE 钢的渗碳淬火组织演变, 研究分析了合金的平衡相组成, 热物理、力学性能参数, 连续转变曲线 (CCT) 以及 Jominy 淬透性曲线. 研究表明, 随着碳含量逐渐增加至 0.76%, 合金 A1 和 A3 温度降低 715.97 和 760.00 °C, 而淬火组织中的渗碳体含量增多至 4.67%, 合金淬火末端的抗拉强度、屈服强度与洛氏硬度分别强化为 2 350.12 MPa, 2 193.62 MPa, 61.87, 这 3 种力学性能在距离淬火端面 4~9 cm 有最大降幅. 合金中铁素体 (F)、珠光体 (P)、贝氏体 (B)、马氏体 (M) 的转变温度均随着碳含量的增加分别从 850.0, 779.4, 469.2, 361.9 °C 降至 727.4, 760.4, 431.4, 193.9 °C.

关键词: 16Cr3NiWMoVNbE 钢; 热物理性能; CCT 曲线; JMatPro

中图分类号: TG156.3; TG161

文献标志码: A

文章编号: 1672-9102(2018)01-0078-06

Simulation of Carburizing Quenched Microstructure and Thermo-physical Mechanical Properties for 16Cr3NiWMoVNbE Steel

Xie Cheng¹, Zhu Geyang², Xun Dan¹, Xiao Zhengbing³, Ding Zhimin¹

(1. China National South Aviation Industry Co., Ltd, Zhuzhou 412002, China;

2. Zhuzhou CRRC times electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China;

3. Light Alloy Research Institute, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The thermo-physical and mechanical properties, phase composition, CCT curves and hardenability curves for four carbon levels 16Cr3NiWMoVNbE Steel were simulated and researched by the JMatPro. The results show that the temperature of A1 and A3 drops to 715.97 °C and 760 °C with the carbon levels reduce to 0.76%, and the cementite levels in the quenched microstructure improve to 4.67%, the tensile strength, yield strength and Rockwell hardness of the quenching end are 2 350.12 MPa, 2 193.62 MPa and 61.87, the three kinds of mechanical properties in the 4~9 cm to the quenching end has the largest decline. In addition, the phase transition temperature of ferrite, pearlite, bainite, martensite respectively decrease from 850.0 m, 779.4, 469.2, 361.9 °C to 727.4, 760.4, 431.4, 193.9 °C with the improvement of carbon levels.

Keywords: 16Cr3NiWMoVNbE steel; thermo-physical properties; CCT curves; JMatPro

最近几年, 随着我国航空工业的快速发展, 航空发动机金属零部件材料成为材料科学领域研究的热点

收稿日期: 2015-05-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2014CB046702)

*通信作者, E-mail: 591392073@qq.com

之一^[1-5].应用现代材料计算科学理论对钢的组织 and 热力学性能进行研究是现代材料科学研究的发展趋势^[6-11].16Cr3NiWMoVNbE 钢属于特级优质渗碳结构钢,具有良好的淬透性、高抗拉强度和高韧塑性.由于其优异的性能,使其在航空发动机方面得到了广泛的应用^[12-16].渗碳作为非匀质材料的常用加工方法之一,通过向零件表层渗入碳元素,提高零部件表面碳含量,再经过淬火、回火等热处理后,使得零部件表层和心部具有不同的组织和性能,以满足航空发动机对零部件的使用要求^[12,17-18].本文基于现代材料计算科学理论基础^[19-20]开发建立的材料相图和性能计算软件 JMatPro,以 16Cr3NiWMoVNbE 钢的渗碳淬火冷却过程为研究对象,模拟计算了不同碳含量情况下 16Cr3NiWMoVNbE 钢的几组常用力学性能参数随温度的变化,淬火平衡组织的相组成,以及过冷奥氏体连续转变曲线(CCT),为 16Cr3NiWMoVNbE 钢的渗碳与淬火工艺制定提供理论指导和必要的技术支持.

1 实验材料及计算方法

基于 JMatPro 软件对某型航空发动机 16Cr3NiWMoVNbE 钢零件渗碳淬火生产工艺进行模拟计算分析,模拟计算时淬火温度采用零件实际生产中的淬火温度 920 °C,设计 4 种冷却速度,分别为 100.0, 10.0, 1.0, 0.1 °C/s.

试验用 16Cr3NiWMoVNbE 钢的名义合金成分为(质量分数,%)0.14~0.19 C, 0.4~0.6 Mn, 0.6~0.9 Si, 1.0~1.5 Ni, 2.6~3.0 Cr, 1.0~1.4 W, 0.35~0.55 V, 0.4~0.6 Mo, 0.1~0.2 Nb, ≤0.01 S, ≤0.015 P, ≤0.2 Cu, Fe 余量.以 16Cr3NiWMoVNbE 钢名义成分为基础,设计 0.16%, 0.36%, 0.56%, 0.76% 共 4 种碳含量合金,成分如表 1 所示.

表 1 4 种碳含量的合金成分(质量分数)

元素	C	Mn	Si	Ni	Cr	W	V	Mo	Nb	S	P	Cu	Fe
I	0.16	0.500	0.750	1.250	2.800	1.200	0.450	0.500	0.150	0.005	0.009	0.050	Bal.
II	0.36	0.450	0.675	1.125	2.520	1.080	0.405	0.450	0.135	0.005	0.008	0.045	Bal.
III	0.56	0.405	0.608	1.013	2.268	0.972	0.365	0.405	0.122	0.004	0.007	0.041	Bal.
IV	0.76	0.365	0.547	0.911	2.041	0.875	0.328	0.365	0.109	0.004	0.007	0.036	Bal.

2 模拟计算结果分析

2.1 平衡相图计算与分析

平衡相图是合金成分在平衡状态时的组织组成图,是研究合金热处理工艺的基础.JMatPro 软件基于 CALPHAD 技术计算材料的平衡相图^[20].图 1 为 JMatPro 软件计算的含碳量不同的 16Cr3NiWMoVNbE 钢经淬火后的平衡相图.表 2 为相应不同含碳量的 16Cr3NiWMoVNbE 钢淬火组织的相组成.由图 1 和表 2 中可知随着碳含量的增加,平衡组织中 铁素体、G-phase, Laves, M2(C, N), M3P 含量减少其中铁素体由 92.5% 降至 89.94%,组织中 M7C3, 渗碳体逐渐,其中渗碳体随着碳含量的增加至 4.67%.

由图 1 可知,4 种不同含碳量水平的合金 A1 和 A3 温度分别为 740.83, 850.00 °C; 734.49, 793.53 °C; 720.11, 774.86 °C; 715.97, 760.00 °C.随着碳含量的增加,下转变温度和上转变温度均有所降低.

材料的比热容、泊松比、杨氏模量、热导率、密度等热物理和力学性能参数是材料应用性能表征,对材料加工过程优化和材料选用具有重要的参考意义.图 2 为不同碳含量水平的 16Cr3NiWMoVNbE 钢基于 JMatPro 软件计算得到的淬火冷却过程热物理性能参数以及部分力学性能参数变化情况.冷却过程相变阶段,合金比热和热导率增加,泊松比和密度减小.图 2a 表明,淬火冷却过程中在 A3 和 A1 温度之间由于相变的发生,16Cr3NiWMoVNbE 钢的比热变大,并且随着含碳量的越多而变化越大,低于 A1 温度后比热随温度降低而逐渐降低.由图 2b 可知,16Cr3NiWMoVNbE 钢的泊松比随温度降低而逐渐减少.图 2c~图 2e 显示,16Cr3NiWMoVNbE 钢的杨氏模量、热导率、密度随着淬火过程中温度的降低而增大,淬火结束时能达到最大值.在同一温度时,随着含碳量的增加,热导率减小,而密度趋大.

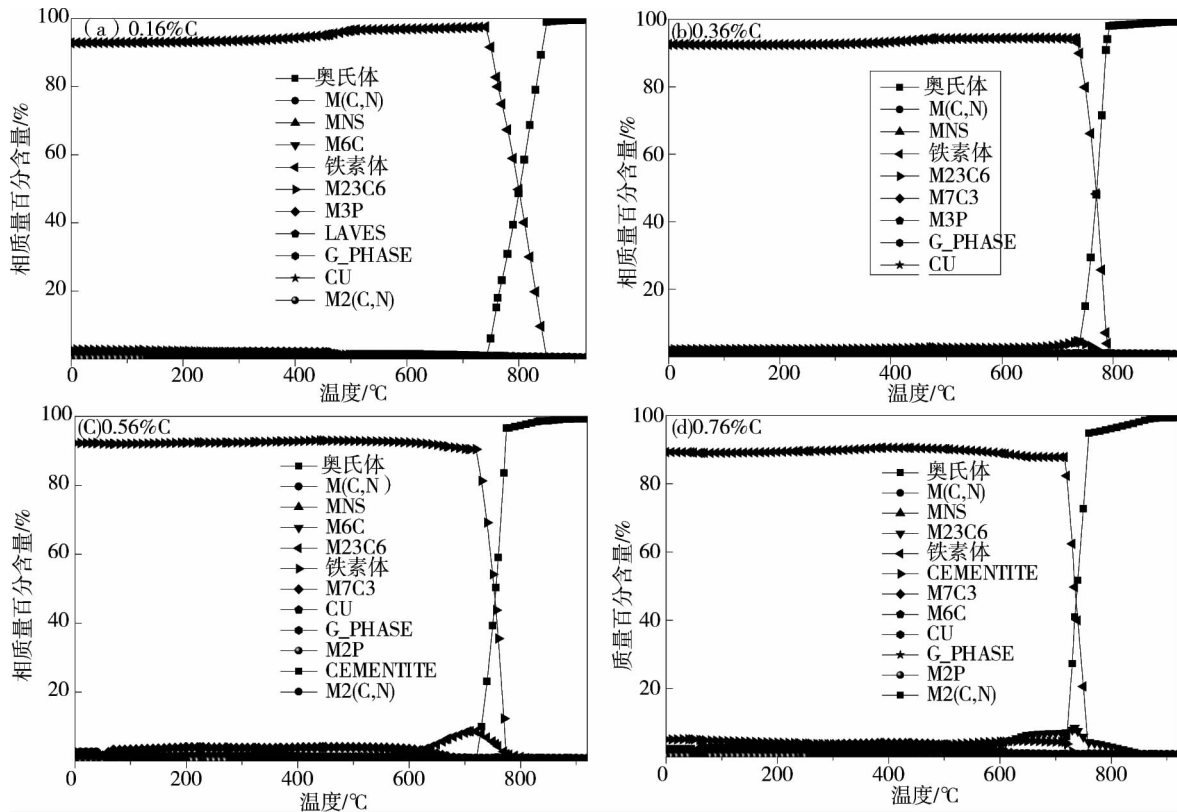


图1 不同含碳量的16Cr3NiWMoVNbE钢淬火组织的平衡相图

表2 不同含碳量的16Cr3NiWMoVNbE钢淬火组织的相组成

C 成分/%	铁素体	M23C6	G-phase	Laves	M(C,N)	M2(C,N)	M3P	CU	MNS	M7C3	渗碳体
0.16	92.50	2.57	2.21	1.92	0.70	0.07	0.05	0.05	0.01		
0.36	92.44	2.13	1.88		0.67		0.05	0.04	0.01	1.29	
0.56	92.09		1.67		1.15			0.04	0.01	3.28	0.80
0.76	89.94		1.49		1.87			0.04	0.01	2.68	4.67

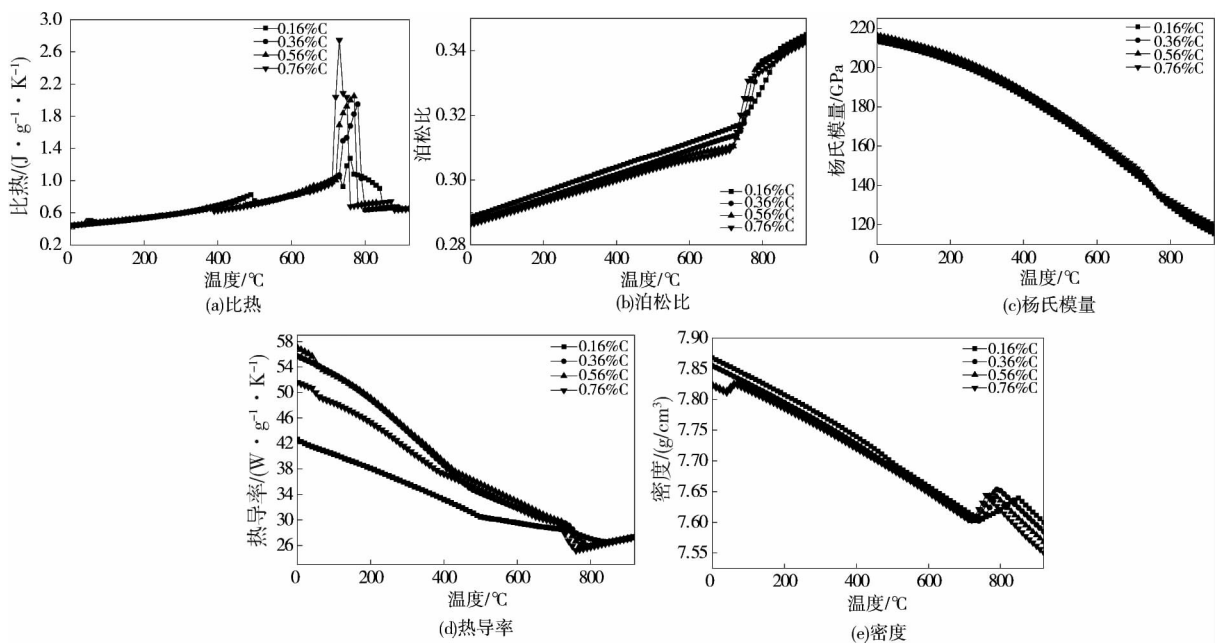


图2 不同含碳量的16Cr3NiWMoVNbE钢热物理和力学性能

2.2 CCT 曲线模拟计算与分析

过冷奥氏体连续冷却转变曲线(CCT 曲线)是分析连续冷却过程中奥氏体转变过程以及转变产物的组织和性能的依据.图 3 是基于 JMatPro 软件模拟计算的不同含碳量水平的 16Cr3NiWMoVNbE 钢的 CCT 曲线.由图 3 可知,随着含碳量的增加,铁素体(F)析出线向右下移动直至消失.表 3 为图 3 对应的 4 种不同含碳量水平的 16Cr3NiWMoVNbE 钢的珠光体(P)、贝氏体(B)、铁素体(F)、马氏体(M)的转变温度.由表 3 可知,当碳含量增加至 0.76%时,珠光体(P)与马氏体(M)的转变温度分别降至 760.4,193.9 ℃.

分析图 3 中连续冷却转变曲线(CCT 曲线)可知,4 种不同含碳量水平的 16Cr3NiWMoVNbE 钢在 100.0,10.0,1.0,0.1 ℃/s,这 4 种不同冷速率情况下的淬火组织如表 4 所示.

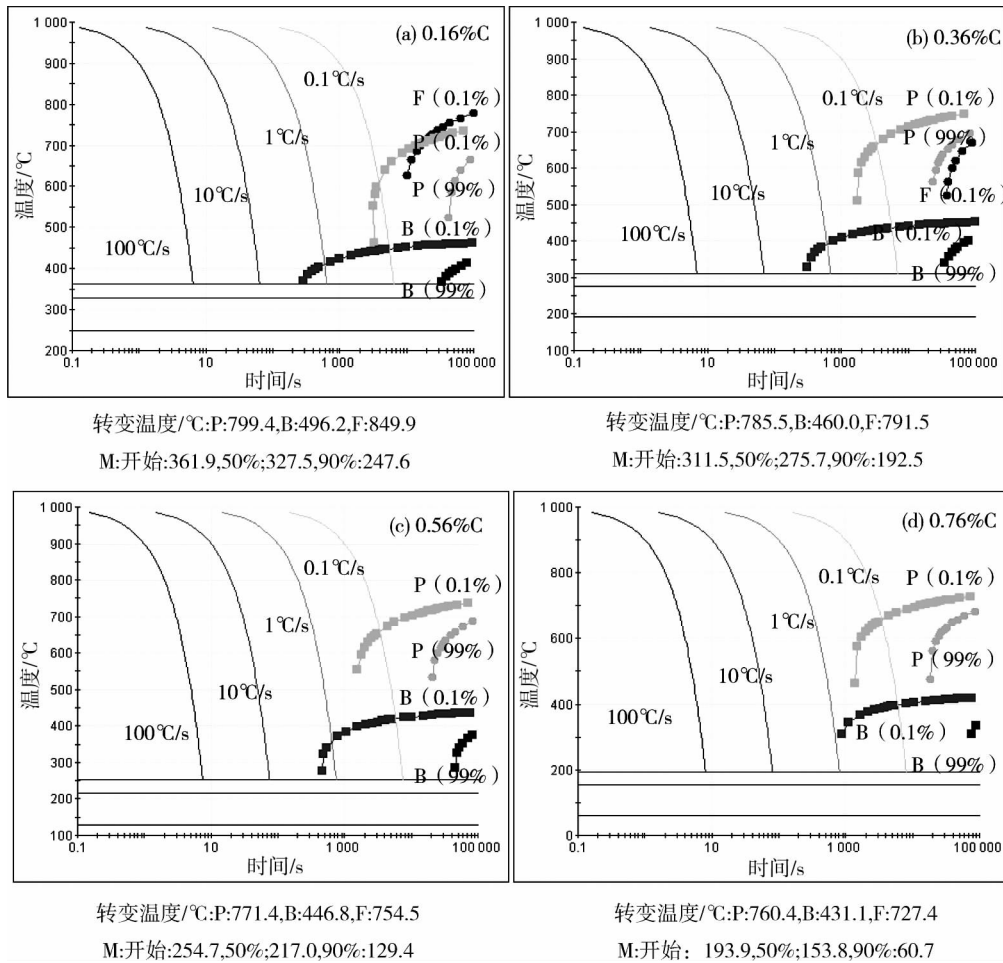


图 3 不同含碳量的 16Cr3NiWMoVNbE 钢的连续冷却转变曲线

表 3 不同含碳量的 16Cr3NiWMoVNbE 钢 F,P,B,M 的转变温度 ℃

C 含量/%	P	B	F	M
0.16	779.4	469.2	850.9	361.9
0.36	785.5	460.0	791.5	311.5
0.56	771.4	446.8	754.5	254.7
0.76	760.4	431.1	727.4	193.9

表 4 不同含碳量的 16Cr3NiWMoVNbE 钢在不同冷速淬火后的组织

冷速/(℃/s)	0.16% C	0.36% C	0.56% C	0.76% C
100.0	M	M	M	M
10.0	M	M	M	M
1.0	M+B	M+B	M+B	M
0.1	M+B+P	M+B+P	M+B+P	M+B+P

2.4 Jominy 末端淬火分析

Jominy 末端淬火试验法是研究金属材料淬透性的常用方法之一^[19,21]。图4是对4种不同含碳量水平的16Cr3NiWMoVNbE钢淬火工艺,基于JMatPro软件模拟计算的末端淬火抗拉强度、屈服强度、洛氏硬度随淬火深度变化的曲线。表5为JMatPro软件模拟计算的4种含碳量水平的合金淬火末端对应的抗拉强度、屈服强度、洛氏硬度。由图4和表5可知,同一温度条件下,随着含碳量的增加,抗拉强度、屈服强度、洛氏硬度值变大。当碳含量为0.16%时,在距淬火端面3cm时,合金3项性能开始有较大降幅。当碳含量为0.76%时,合金淬火末端的抗拉强度、屈服强度与洛氏硬度分别强化为2350.12MPa,2193.62MPa,61.87,这3种力学性能在距离淬火端面4~9cm有最大降幅,合金淬透性明显增大。

实际生产过程中,某型航空发动机碳含量为0.18%厚度为5mm的16Cr3NiWMoVNbE钢零部件经渗碳+920℃淬火后零件表面碳含量为0.58%时表面硬度为HRC59.5,芯部硬度为HRC39。实际生产情况与JMatPro软件模拟计算结果基本吻合。

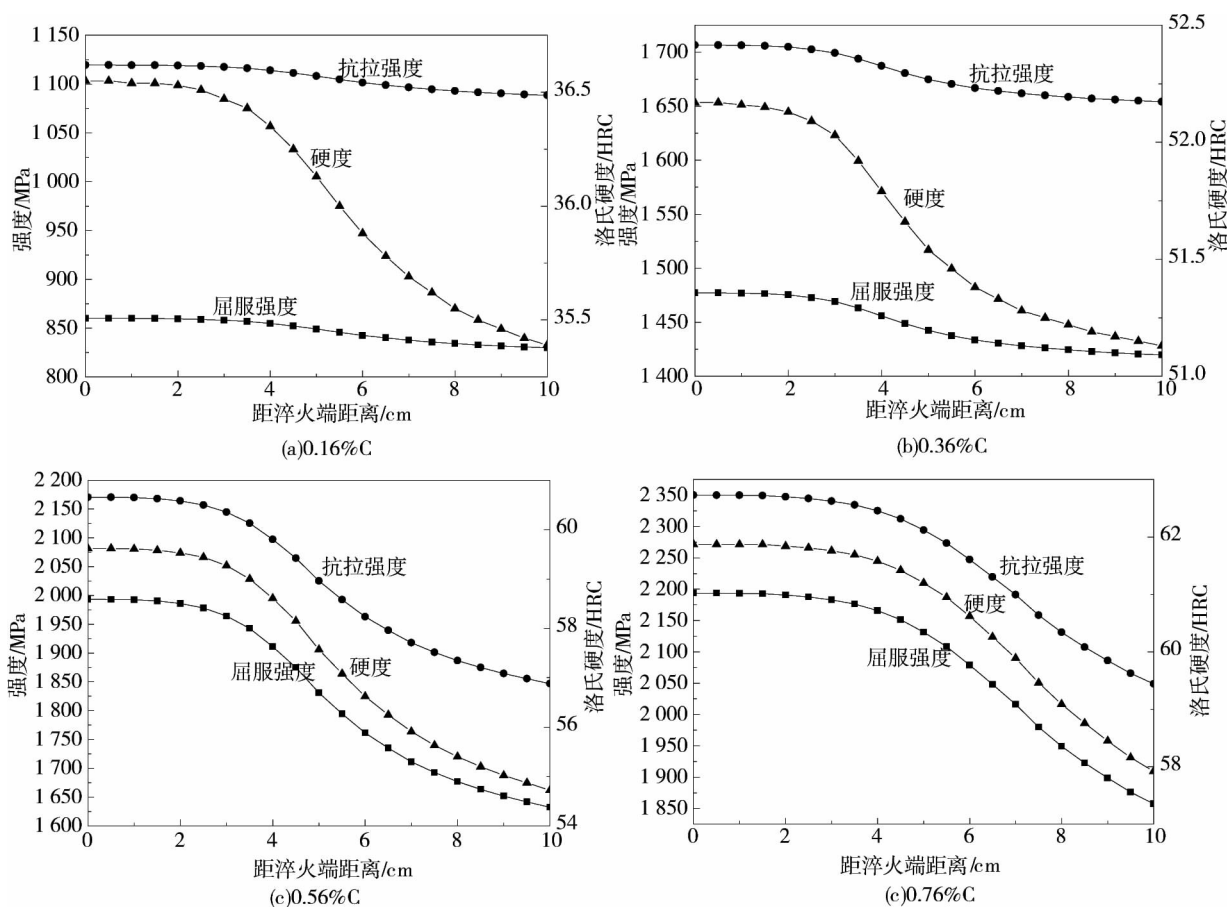


图4 不同含碳量的16Cr3NiWMoVNbE钢的末端淬透性

表5 不同含碳量的16Cr3NiWMoVNbE钢淬火末端的抗拉强度、屈服强度、洛氏硬度

性能/%	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	洛氏硬度
0.16	1 119.42	860.04	36.55
0.36	1 906.56	1 477.11	52.17
0.56	2 170.47	1 993.13	59.62
0.76	2 350.12	2 193.62	61.87

3 结论

1)随着碳含量增加,A1和A3温度均逐渐降低,0.16%,0.36%,0.56%,0.76%这4种含碳量水平的合金A1温度和A3分别为740.83,850.00℃;734.49,793.53℃;720.11,774.86℃;715.97,760.00℃。含碳量

为 0.76% 淬火组织中的渗碳体含量增多至 4.67%.

2) 合金中铁素体(F)、珠光体(P)、贝氏体(B)、马氏体(M)的转变温度均随着碳含量的增加分别从 850, 779.4, 469.2, 361.9 °C 降至 727.4, 760.4, 431.4, 193.9 °C.

3) 含碳量为 0.76% 的合金淬火末端的抗拉强度、屈服强度与洛氏硬度分别强化为 2 350.12 MPa, 2 193.62 MPa, 61.87, 这 3 种力学性能在距离淬火端面 4~9 cm 有最大降幅.

参考文献:

- [1] 许金山, 赵仁鹏, 鲁江涛, 等. 航空薄壁零件数值模拟优化分析[J]. 技术与市场, 2015, 2(3):201-209.
- [2] 王葛, 王莉莉, 高静娜, 等. 30CrMo 钢大直径厚壁压力气瓶淬火过程数值模拟[J]. 钢铁, 2015, 5(2):46-53.
- [3] 谷臣清, 罗启文, 卢正欣. 航空发动机轴承钢高温碳氮共渗的渗层组织与性能[J]. 材料热处理学报, 1998, 19(1):26-30.
- [4] 马欣新, 唐光泽, 赵开礼. 航空发动机高温轴承用 Cr4Mo4V 钢升温注渗技术[J]. 国防制造技术, 2012, 2(4):22-36.
- [5] 韩非, 徐亚东, 韩桐, 等. 基于数值模拟的 H13 钢淬火工艺研究[J]. 热加工工艺, 2015, 4(2):32-54.
- [6] Guo Z, Saunders N, Schile J P, et al. Material properties for process simulation[J]. Materials Science & Engineering A, 2009, 499(1):7-13.
- [7] Kirkaldy J S, Scand J. Diffusion-controlled phase transformations in steels [J]. Metal, 1991, 20: 50-61.
- [8] Cao X, Saunders N, Campbell J. Effect of iron and manganese contents on convection-free precipitation and sedimentation of primary α -Al(FeMn)Si phase in liquid Al-11. 5Si-0. 4Mg alloy [J]. Journal of Materials Science, 2004, 39(7):2303-2314.
- [9] Kattner U R. Efficient phase diagram information and computational thermo-dynamics [J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2006, 27(2): 126-132.
- [10] 中仿科技. 金属材料相图及物理性能计算软件 JMatPro V6.1 简介[J]. Cadcam 与制造业信息化, 2012(10):35-37.
- [11] Fu J, Li Y T, Qi H P. Microstructure simulation and experimental research of as-cast 42CrMo steel during quenching process [C]//Advanced Materials Research. Trans Tech Publications, 2011, 317: 19-23.
- [12] 张文帅, 周贤良, 李晖榕, 等. 新型 16Cr3NiWMoVNbE 齿轮钢渗碳工艺与性能研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(24):216-218.
- [13] 滕佰秋, 常春江. 航空发动机用新材料——16Cr3NiWMoVNbE 齿轮钢[J]. 航空发动机, 2003, 29(2):34-37.
- [14] 汤万昌. 我国航空发动机齿轮材料的现状[J]. 航空材料学报, 2003, 23(z1):283-283.
- [15] 马俊, 张建国, 王泓, 等. 温度对齿轮钢 16Cr3NiWMoVNbE 应变疲劳性能的影响[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(6):45-51.
- [16] Baiqiu T. New Material for aeroengine-16Cr3NiWMoVNbE Gear Steel[J]. aeroengine, 2003, 56(6):213-234.
- [17] He Y, Yang K, Liu K. Age hardening and mechanical properties of a 2 400 MPa grade cobalt-free maraging steel [J]. Metallurgical and materials transaction A, 2006, 37(4): 1107-1116.
- [18] Liao S L, Zhang L W, Yue C X, et al. Experimental research and numerical simulation of dynamic microstructure evolution of GCr15 steel[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2008, 34(7):1567-1578.
- [19] Christian J W, Edmonds D V. Phase Transformations in Ferrous Alloys. TMS-AIME[M]. Warrendale: PA, 1984:293-325.
- [20] Iacocca R. CALPHAD :Calculation of phase diagrams : A comprehensive guide[J]. JOM, 1998, 478-482.
- [21] 樊东黎, 潘健生, 徐跃明, 等. 中国材料工程大典 15 卷: 材料热处理工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006:270-279.