

热力学计算在新型热强耐蚀钢设计中的应用

苗伟 李国利 陈晓红 杨鑫 于芳

(北京卫星制造厂,北京 100094)

文 摘 运用 Thermo-Calc 计算软件分析碳化物对热作模具钢性能的影响,对新型热强耐蚀钢的合金成分进行了初步设计,并对该成分合金钢的组织性能进行了试验表征。结果表明,该钢种的基体组织为回火马氏体,其上有碳化物均匀,弥散分布;该钢种室温抗拉强度高达到 2 067 MPa,在 620℃ 回火 2 h 时硬度为 50HRC 左右,在 NaCl 腐蚀环境中耐蚀。

关键词 热力学计算,成分设计,微观组织,性能

中图分类号: TG14

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.01.003

Application of Thermodynamics Calculation to Design of A New Type of Steel With Heat Strength

MIAO Wei LI Guoli CHEN Xiaohong YANG Xin YU Fang

(Beijing Spacecrafts, Beijing 100094)

Abstract Through the study on the effect of carbides on properties of hot work die steels by the Thermo-Calc software, the compositions of a new type heat strength and corrosion resistance steel were designed preliminary. Microstructures and properties were characterized. The matrix structure of this steel was martensite, in which carbides dispersed. The tensile strength of this steel was as high as 2 067 MPa at room temperature. The hardness was about 50HRC, when tempered at 620℃ for 2 hours, corrosion resistance of the steel was good in NaCl.

Key words Thermodynamics calculation, Composition design, Microstructure, Property

0 引言

热处理在环境、安全、能耗等方面属于高污染、高危害、高能耗的行业。随着“十二五”期间大力推广“清洁和绿色技术”,航天企业热处理生产中引入新的高效、节能技术是一种必然趋势。在新材料研究及热处理生产中引入计算机模拟技术能实现热处理工艺的优化制定,材料的组织和性能预测,产品质量的精确控制,是实现精确高效热处理的重要手段。为此将热力学计算引入到材料成分设计和热处理生产工艺制定中,减少工艺试验次数,达到热处理工艺生产高效、节能、环保的目的。Thermo-Calc 是一种基于热力学基本原理的计算软件,是设计与开发高性能新材料的有效工具^[1]。90 年代以后,国外有关利用 Thermo-Calc 软件系统进行材料设计和热处理工艺制定的研究报道屡见不鲜。Janson 等人^[2]在设计新型高性能轴承钢时,利用软件计算,得到了 Fe-4Cr-4Mo-

2V-4.5Ni-2.5Co 的等温截面图;Takashi 等人^[3]在研究渗碳体颗粒尺寸及分布对高碳 Cr 轴承钢切削性能及刀具寿命的影响时,也通过软件实现了不同成分钢中渗碳体析出的定量计算。G. Asa 等人^[4]和 B. Anders 等人^[5]分别对 9% Cr 和 12% Cr 热强钢中的富 Cr 的 $M_{23}C_6$ 粗化行为采用 DICTRA 软件进行了模拟计算,获得了与实验测定较为一致的结果。近几年,国内有关计算热力学的研究发展也较为迅速。Li Jingbo 等人^[6]在采用软件计算预测不同成分碳钢中的相变量和相变速率时发现计算与实验结果相吻合,从而证明了运用计算软件指导热处理工艺的可行性^[7]。

1 研究方法

Thermo-Calc 是瑞典皇家学院为进行热力学计算而专门开发的软件。经过几十年的完善发展,现已成为功能强大、结构较为完整的计算系统,是目前在世

收稿日期:2014-12-11

作者简介:苗伟,1982 年出生,工程师,主要从事星船热处理工艺工作。E-mail:miaowei03072101@163.com

界上享有相当声誉且具有一定权威的计算软件。对于各种合金的平衡相图、各种温度下相的种类及相对量均可进行定量分析计算^[8]。试样均在高温箱式电阻炉中进行热处理,加热速度 200 ~ 300℃/h。力学性能测试分别在 Istron-5569 型电子式万能机和 JB-5 型冲击试验机上进行。冲击试样采用夏氏 V 型缺口,尺寸为 10 mm×10 mm×55 mm。采用日本理学电机 D/max-rB 旋转 X 射线衍射仪分析相组成,采用 Philips 公司生产的 CM-12 型透射电子显微镜观察试样的显微结构。将试样制成 10 mm×10 mm×8 mm,利用 5% NaCl 溶液作为腐蚀剂对试样进行周期 720 h 的失重法腐蚀试验。

2 合金成分设计

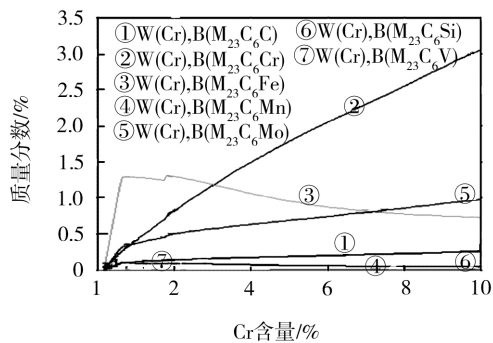
2.1 设计思路

以热作模具钢 HOTHVAR 的成分作为主要参考依据,通过提高原有耐蚀性元素 Cr、Mo 的含量以及加入 Nb、Ni 等元素来调整钢中碳化物形式和相转变温度,同时增加基体的固溶度以提高耐蚀性。利用 Thermo-Calc 软件进行热力学相图计算,以参考钢种中各相的相对含量为标准,设计 Cr、Mo、Nb、Ni 的含量范围,控制各类碳化物形态和含量,保证设计

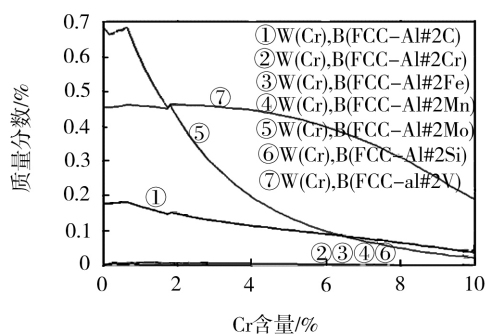
钢种的基本力学性能与参考钢种在同一水平。同时研究 Cr、Mo、Nb、Ni 含量及温度变化对钢中各相转变的影响,从而为新型热强耐蚀钢的成分设计和热处理工艺选择提供理论依据^[7]。

2.2 利用 Thermo-Calc 设计合金成分

图 1 为 Thermo-Calc 软件计算的 580℃ 时 Cr、Mo、Nb 含量的变化对热强耐蚀钢中 $M_{23}C_6$ 、MC 型碳化物含量的影响。由图 1 可见,Cr 含量 > 6.0wt% 时,MC 型碳化物的含量随 Cr 含量的增加而明显降低,而 $M_{23}C_6$ 型碳化物随 Cr 含量的增加而增大,为控制 $M_{23}C_6$ 型碳化物含量,更多的保留 MC 型碳化物,Cr 含量选择 6.0wt% ~ 7.0wt%。改变 Mo 含量会使 $M_{23}C_6$ 、MC 型的碳化物的含量产生变化。图 2 显示,Mo 含量在 2wt% 左右时, $M_{23}C_6$ 型碳化物的含量最高,而 > 2wt% 时开始下降,且 MC 型与 $M_{23}C_6$ 型变化趋势一致,因此 Mo 含量选择 3.0wt% ~ 4.0wt%。图 3 所示,MC 型碳化物随 Nb 含量的增加而升高, $M_{23}C_6$ 型明显降低,因此添加适量的 Nb 可以在提高钢的奥氏体化温度而不致引起晶粒长大,同时考虑价格因素,Nb 含量选择 1.5wt% ~ 2.5wt%。



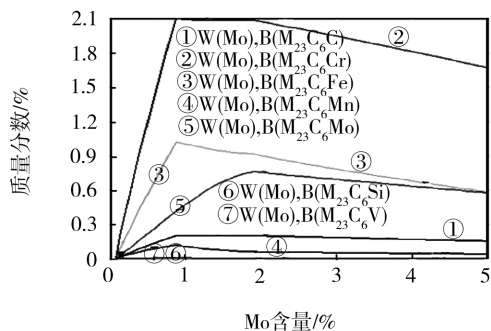
(a) $M_{23}C_6$ 型碳化物



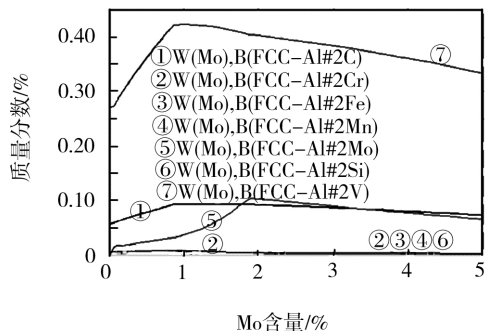
(b) MC 型碳化物

图 1 钢中碳化物随 Cr 含量的变化

Fig. 1 Content of the carbide with chromium



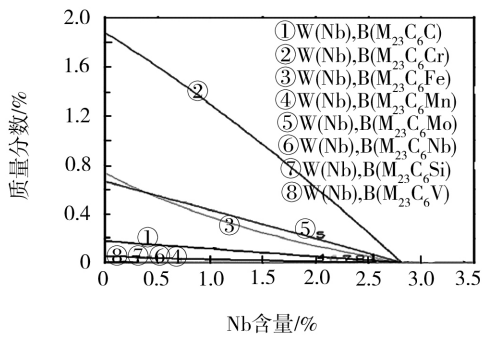
(a) $M_{23}C_6$ 型碳化物



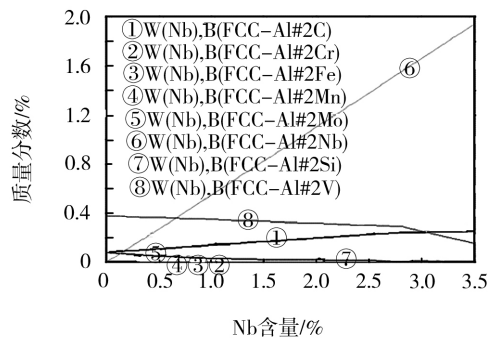
(b) MC 型碳化物

图 2 钢中碳化物随 Mo 含量的变化

Fig. 2 Content of the carbide with molybdenum



(a) $M_{23}C_6$ 型碳化物



(b) MC 型碳化物

图3 钢中碳化物随 Nb 含量的变化

Fig. 3 Content of the carbide with niobium

2.3 合金成分设计结果

设计的新钢种化学成分为 C:0.5 wt% ~0.6wt% , Cr:6.0wt% ~7.0wt% , Mo:3.0wt% ~4.0wt% , Nb:1.5 wt% ~2.5wt% , Ni:1.0wt% ~1.4wt% , Si:0.8wt% ~1.0wt% , Mn:0.8wt% ~1.0wt% , V:0.8wt% ~1.0wt% , S < 0.03wt% , P < 0.035wt% , 余量为 Fe。根据该成分,利用 Thermo-Calc 软件计算的各种碳化物质量分数随温度的变化如图 4 所示。

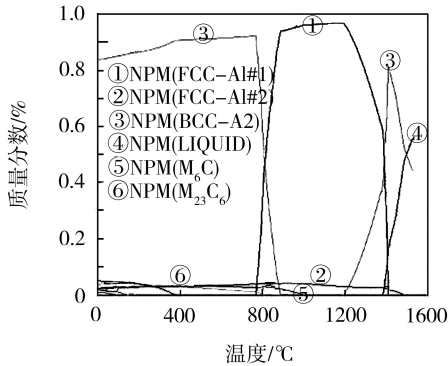


图4 钢中各相的含量随温度的变化

Fig. 4 Transformation of the phase with temperature

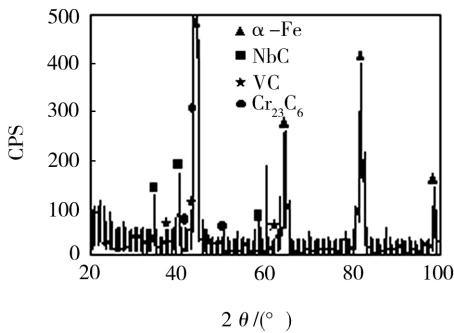
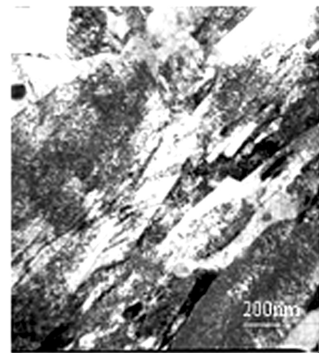


图5 1120°C+580°C 处理后的显微组织分析

Fig. 5 Microstructure of the steel was treated at 1120°C+580°C



3.2 力学性能

经 1120°C 淬火后分别在 500、520、540、560、580、600、620°C 回火 2 h,其硬度变化情况如图 6 所示。新

该钢的奥氏体化温度可选择在 1100°C 以上,使得 $M_{23}C_6$ 和 M_6C 碳化物完全溶解,增加回火过程中弥散碳化物析出的能力,提高回火稳定性,同时保留一定量的 MC 碳化物,阻止奥氏体晶粒长大^[9]。

3 合金组织性能分析

根据设计的合金成分,利用真空磁感应电炉熔炼 13.5 kg 的铸锭。进行 1200°C 保温 4 h 的高温扩散退火。然后在 1150~1200°C 进行高温锻造成棒料。实测化学成分为 C:0.55wt% , Cr:6.13 wt% , Mo:3.34% , Nb:2.06wt% , Ni:1.38wt% , Si:1.05wt% , Mn:0.80wt% , V:0.79wt% , S:0.001wt% , P:0.027wt%。从锻坯上截取试样,经 860~880°C 保温 4 h,然后随炉冷至 500°C 以下出炉空冷。退火后的模块加工成力学性能测试试样,经 1120°C 淬火+580°C 回火(2 h)后再磨削加工至规定尺寸。

3.1 显微组织

试验用钢经上述工艺淬火和回火后的组织为细小的板条状回火马氏体,其上分布有细小的碳化物(图 5)。

钢种的回火稳定性较好,在 620°C 回火硬度仍保持 50HRC 左右。

室温抗拉强度、延伸率、截面收缩率及冲击韧性

值见表1。从表1可以看出,新型热强耐蚀钢经120℃淬火+580℃回火(2 h)处理后,该钢具有很高的抗拉强度。但其韧塑性稍差。

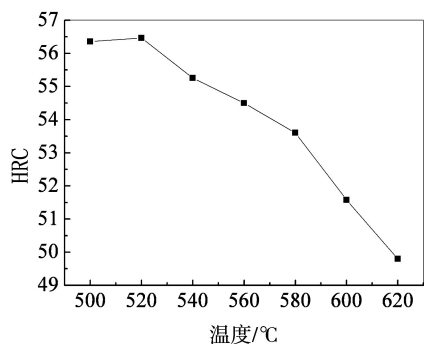


图6 120℃淬火不同回火温度对硬度的影响

Fig. 6 Effect of temper temperature on hardness

表1 室温力学性能

Tab. 1 Test results of mechanical properties

抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	延伸率 /%	收缩率 /%	冲击功 /J
2067	1568	8.1	17.0	7.9

3.3 腐蚀性能

图7为新型热强耐蚀钢在120℃淬火腐蚀速率随回火温度的变化,可以看到,腐蚀速率随回火温度升高而加快,580℃回火时腐蚀速率约为55 μm/a,根据腐蚀标准可知,试验钢的腐蚀等级为五级,评价为耐蚀。

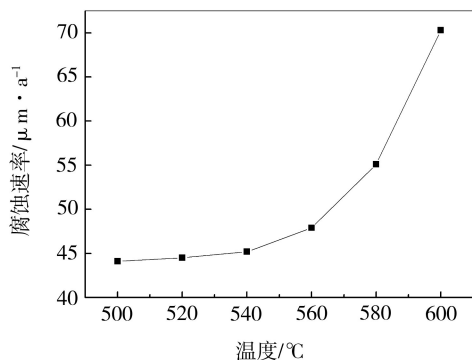


图7 120℃淬火腐蚀速率随回火温度的变化

Fig. 7 Effect of temper temperature on corrosion rates

4 结论

利用Thermo-Calc 计算软件的平衡相图计算建立了新型热强耐蚀钢中Cr、Mo、Nb、Ni含量与M₂₃C₆和MC型碳化物的含量之间的定量关系,设计了各合金元素的含量范围,并依据平衡相图初步制定热处理工艺。试验结果表明,热强耐蚀钢具有很高的强度,其抗拉强度达2067 MPa,组织为回火马氏体和均匀弥散分布的碳化物,回火稳定性好,在620℃回火硬度仍然保持在50HRC左右,在NaCl腐蚀环境中耐蚀。根据计算结果制订的热处理工艺可较好地控制钢中碳化物的类型及形态,进一步提高材料的综合力学性能。

参考文献

- [1] 谢豪杰,吴晓春. 热作模具钢的硬韧性因子[J]. 钢铁研究学报,2008,20(1):37-39
- [2] Janson. Thermodynamics and heat treatment[J]. Materials Science Forum.,1994:163-165
- [3] Inoue T. Influence of cementite distribution on machinability and tool[J]. Life of High Carbon Cr-Bearing Steel, 1998, 84(5):67-72
- [4] Asa Gustafson, Mats Hattestrand. Coarsening of precipitates in an advanced creep resistant 9% chromium steel-quantitative microscopy and simulations [J]. Mat. Sci. & Eng. A, 2002, 333:279-286
- [5] Anders Bjarbo, Mats Hattestrand. Complex carbide growth, dissolution, and coarsening in a modified 12% chromium steel-an experimental and theoretical study[J]. Meta. and Mat. Tran. A, 2001, 32A:19-25
- [6] Li Jingbo. Computer simulation of phase transformation steels[J]. Materials and Design,2001,22:39-43
- [7] 苗伟. 新型Fe-Cr-Mo-V-Nb系热强耐蚀钢的成分设计与组织控制[D]. 哈尔滨工业大学,2009:1-20
- [8] 何燕霖. 高性能预硬型塑料模具钢的计算机合金设计[D]. 上海大学,2004:4-6
- [9] 胡心彬,李麟,吴晓春. Thermo-Calc在热作模具钢合金成分设计中的应用[J]. 热处理,2004,19(3):28-29

(编辑 李洪泉)