

## 9Cr18Mo 马氏体不锈钢的平衡相热力学计算

张剑桥

(太钢不锈钢股份有限公司技术中心,太原 030003)

**摘要** 采用 Thermo-Calc 热力学计算软件,对 9Cr18Mo 马氏体不锈钢(%:0.95~1.10C,16.0~18.0Cr,0.4~0.7Mo)平衡析出相 $M_{23}C_6$ 和铁素体以及非平衡凝固进行了模拟计算分析。结果表明,凝固时 9Cr18Mo 钢中 C、Cr、Mo 和 Fe 偏析都比较严重;C 和 Cr 含量对 $M_{23}C_6$ 析出量以及 $M_{23}C_6$ 与基体中的 Cr、Fe 含量有一定的影响;而 Mo 含量的变化仅对 $M_{23}C_6$ 析出量以及 $M_{23}C_6$ 所含 Cr、Mo 元素有所影响。

**关键词** 9Cr18Mo 马氏体不锈钢 析出相 热力学计算

## Thermodynamic Calculation on Equilibrium Precipitated Phases in Martensitic Stainless Steel 9Cr18Mo

Zhang Jianqiao

(Technology Center, Taigang Stainless Steel Co Ltd, Taiyuan 030003)

**Abstract** Simulated calculation and analysis on equilibrium precipitated phases  $M_{23}C_6$  and ferrite as well as non-equilibrium solidification of martensitic stainless steel 9Cr18Mo (%: 0.95 ~ 1.10C, 16.0 ~ 18.0Cr, 0.4 ~ 0.7Mo) have been carried out by using Thermo-Calc thermodynamic calculation software. Results show that during solidification the segregation of C, Cr, Mo and Fe in steel 9Cr18Mo is rather serious, the C and Cr content in steel have definite effect on the precipitated amount of  $M_{23}C_6$  and the elements such as Cr and Fe content in  $M_{23}C_6$  and in matrix, while the change of Mo content in steel only effects on the precipitated amount of  $M_{23}C_6$  and the Cr and Mo content in  $M_{23}C_6$ .

**Material Index** Martensitic Stainless Steel 9Cr18Mo, Precipitated Phases, Thermodynamic Calculation

9Cr18Mo 钢较 9Cr18 钢具有更高的硬度和抗回火稳定性。由于该钢具有高硬度及耐蚀性,被主要用于制造在腐蚀环境和无润滑强氧化气氛下工作的轴承零件。如船舶、化工石油机械中的轴承。9Cr18Mo 还可用来制造高质量的刀具如医用手术刀及其它既耐磨损又耐腐蚀的零件<sup>[1]</sup>。

9Cr18Mo 钢中碳与铬的相互作用使钢在高温时具有稳定的奥氏体或奥氏体加铁素体相区,从而在淬火时形成马氏体组织。铬可提高钢的耐蚀性,还可提高钢的淬透性。钼除改善钢的耐蚀性外,主要是提高钢的强度和硬度以增强二次硬化效应<sup>[2]</sup>。

### 1 热力学模拟方法

采用 Thermo-Calc 相平衡和热力学评估软件与相应的不锈钢数据库进行热力学模拟计算。通过利用系统中各相的热力学特征函数严格的热力学关系,建立热力学模型,将相图和各种热力学数据联系起来,计算系统中的热力学信息。将 9Cr18Mo 马氏体不锈钢的标准成分(表 1)作为 Thermo-Calc 软件的输入条件,通过改变合金中主要析出相形成元素 C、Cr、Mo 的含量,得到可能析出的平衡相,并预测合金化学成分对析出相的影响。

表 1 9Cr18Mo 马氏体不锈钢的标准及典型成分/%

Table 1 Standard and typical chemical composition of martensitic stainless steel 9Cr18Mo / %

项目	C	Cr	Mo	Fe
标准	0.95~1.10	16.0~18.0	0.4~0.7	余量
典型	1.02	17.00	0.55	余量

### 2 结果与讨论

#### 2.1 9Cr18Mo 马氏体不锈钢的热力学平衡相

经热力学平衡相计算,得出表 1 典型成分 9Cr18Mo 马氏体不锈钢的热力学平衡图(图 1),得出该不锈钢的凝固温度为 1420~1295℃。首先从液相析出高温铁素体相(BCC),然后液相与铁素体相发生包晶反应,生成奥氏体相(FCC),在约 1400℃时,高温铁素体相完全消失,平衡相为液相与奥氏体相。在 1295℃,碳化物 $M_7C_3$ 从奥氏体析出,1026℃时析出量达到最大,然后缓慢降低,同时伴随着碳化物相( $M_{23}C_6$ )的析出。在 819℃以下,奥氏体相消失,此温度以下,系统平衡相为铁素体相(81.7%)和碳化物( $M_{23}C_6$ ,18.3%)。

利用 Thermo-Calc 软件中 Schell-Gulliver 模型,模拟计算 9Cr18Mo 非平衡凝固过程随温度和液相

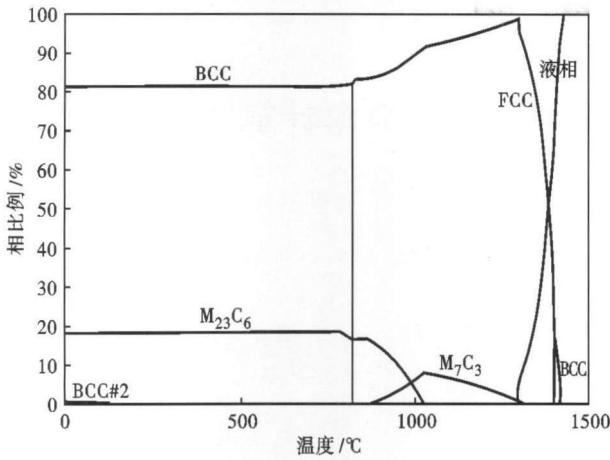


图 1 温度对 9Cr18Mo 马氏体不锈钢各平衡相析出量的影响  
Fig. 1 Effect of temperature on precipitated amount of each equilibrium phase in martensitic stainless steel 9Cr18Mo

含量变化的元素再分配规律。随着液相体积的减少,液相中的 C、Cr、Mo 含量呈增加趋势(图 2),但 C 及 Cr 是先增加,后降低,Mo 则是越接近凝固,增加越快。而 Fe 则是随凝固的进行,液相中含量逐渐降低。最终液相成分(%)为: 66.4Fe、25.5Cr、5.67Mo、2.75C。

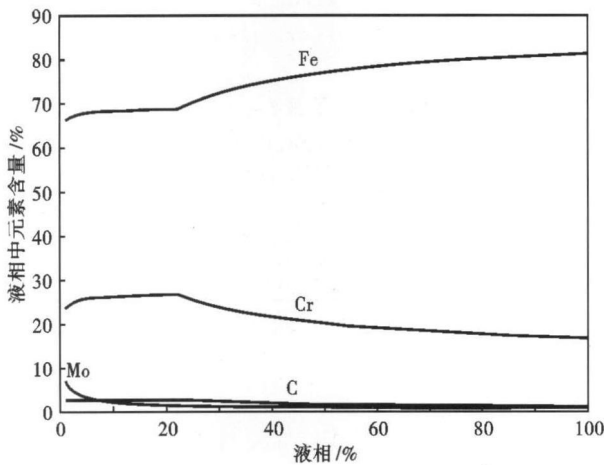


图 2 9Cr18Mo 马氏体不锈钢凝固过程中液相体积变化对液相中合金元素含量的影响  
Fig. 2 Effect of change of liquid phase volume percentage on alloy element content in liquid phase during solidification of martensitic stainless steel 9Cr18Mo

## 2.2 平衡析出相规律

在室温下,9Cr18Mo 的主要成分为铁素体相和  $M_{23}C_6$ ,也存在很少的 BCC#2 相。同时在 100 °C 左右各元素的扩散已基本停止,各相成分已基本稳定,因此主要研究 100 °C 时的平衡相(表 2)。

### 2.2.1 元素对 $M_{23}C_6$ 的影响

随温度降低, $M_{23}C_6$  中所含 Cr 越高,Fe 则相反,随温度降低而降低,C、Mo 则基本不变(图 3)。

表 2 9Cr18Mo 马氏体不锈钢在 100 °C 时各相比例及成分/%

Table 2 Percentage of each precipitated phase and its analysis in martensitic stainless steel 9Cr18Mo at 100 °C / %

各相	C	Cr	Mo	Fe	比例
BCC	0	0.28	0	99.72	81.56
$M_{23}C_6$	5.60	90.82	3.02	0.56	18.2
BCC#2	0	99.93	0	0.07	0.24

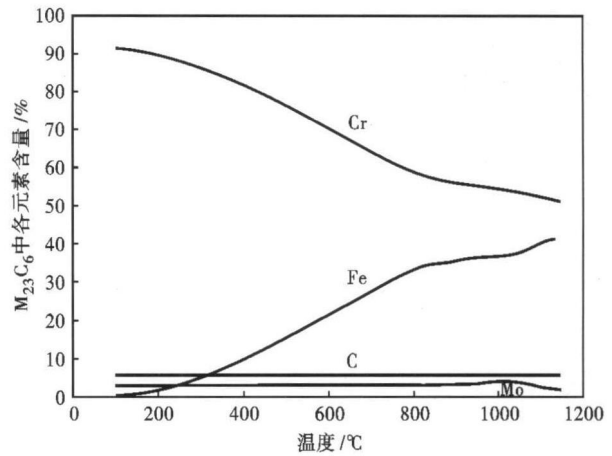


图 3 温度对 9Cr18Mo 马氏体不锈钢  $M_{23}C_6$  中合金元素含量的影响

Fig. 3 Effect of temperature on alloy element content in  $M_{23}C_6$  of martensitic stainless steel 9Cr18Mo

由图 4(a) 可见,随钢中 Cr 含量增加, $M_{23}C_6$  的含量也随之增加,当 Cr 含量为 16.3% 时, $M_{23}C_6$  达到 18.2%,然后基本保持不变。由图 5(a) 可见,随钢中 Cr 含量增加, $M_{23}C_6$  中 Cr 含量先是保持 89% 不变,在 Cr 含量为 16.3% 时,开始增加,在 Cr 含量为 16.8% 时,达到最高点 91%,而 Fe 含量正好相反。 $M_{23}C_6$  中 C 和 Mo 含量则基本不随 Cr 含量的变化而变化。

随着钢中 Mo 含量的增加, $M_{23}C_6$  析出量从 18.14% 增加至 18.27%,变化较小。同时随着 Mo 含量的增加, $M_{23}C_6$  中 Mo 的含量逐渐增加,而 Cr 含量正好相反,但变化都较小。 $M_{23}C_6$  中 C 和 Fe 含量则基本不随钢中 Mo 含量的变化而变化。

由图 4(b) 可见,随着钢中 C 含量增加, $M_{23}C_6$  的析出量也增加,当 C 含量为 1.06 时达到最大, $M_{23}C_6$  析出量约为 19.0%,然后开始降低。由图 5(b) 可见,随着钢中 C 含量的增加, $M_{23}C_6$  中 Cr 的含量先是保持不变,约为 91.0%,在 C 含量为 1.03% 时,开始降低,在 C 含量为 1.06% 时,达到最低点,约为 89%。而 Fe 含量正好相反。 $M_{23}C_6$  中 C 和 Mo 含量则基本没有变化。

### 2.2.2 元素对铁素体相的影响

100 ℃时,铁素体平衡相中 C 和 Mo 非常少,可忽略。

从图 6 (a) 可见,钢中 Cr 含量为 16.0% ~ 16.3% 时,基体中 Cr 约为 0.055%;钢中 Cr 含量 ≥ 16.8% 时,基体 Cr 含量为 0.28%。而基体中的 Fe

含量相反,最高时为 99.94%,最低为 99.7%。

当系统中 Mo 含量为 0.4% ~ 0.7% 时,基体中的各个元素基本保持不变。

由图 6 (b) 可见,当钢中 C 含量为 0.95% ~ 1.03% 时,基体 Cr 含量约为 0.28%;钢中 C 含量为 1.03% ~ 1.08% 时,基体 Cr 含量迅速降低至 0.05%,当钢中 C ≥ 1.08% 时,基体中的 Cr 保持不变。而 Fe 含量正好相反,最低为 99.7%,最高为 99.98%。

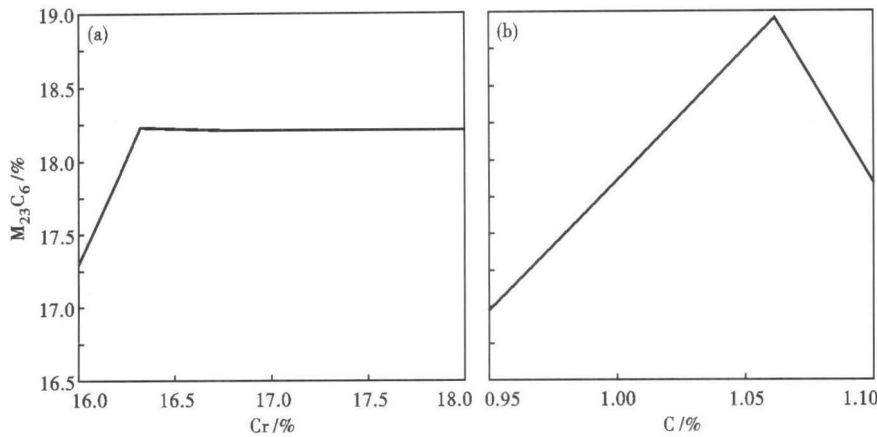


图 4 9Cr18Mo 马氏体不锈钢中 Cr(a) 和 C(b) 含量对  $M_{23}C_6$  析出量的影响  
Fig. 4 Effect of Cr (a) and C (b) content in martensitic stainless steel 9Cr18Mo on precipitated amount of  $M_{23}C_6$

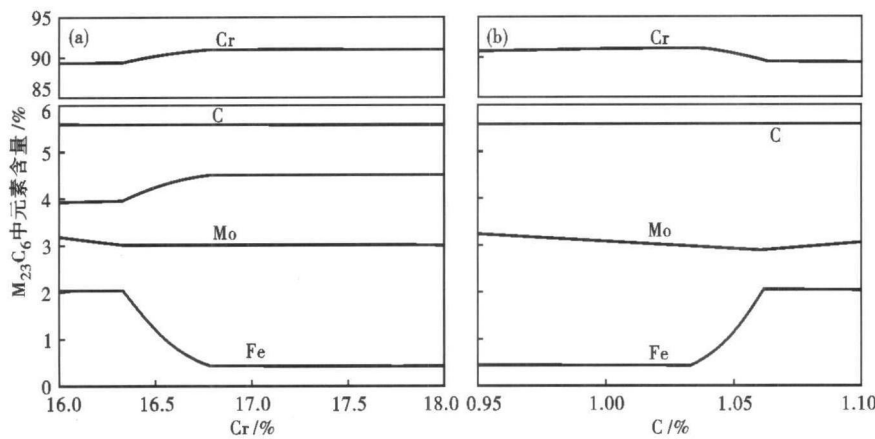


图 5 9Cr18Mo 马氏体不锈钢中 Cr(a) 和 C(b) 含量对  $M_{23}C_6$  中元素含量的影响  
Fig. 5 Effect of Cr (a) and C (b) content in martensitic stainless steel 9Cr18Mo on elements content in  $M_{23}C_6$

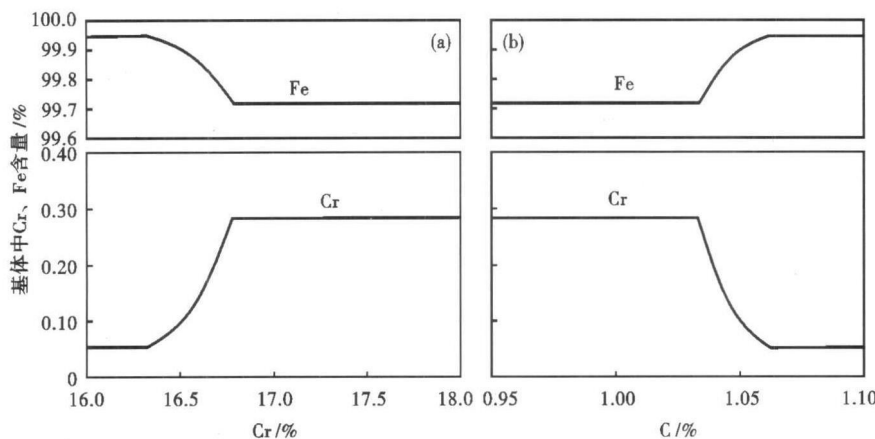


图 6 9Cr18Mo 马氏体不锈钢中 Cr(a) 和 C(b) 含量对基体中 Cr、Fe 含量的影响  
Fig. 6 Effect of Cr (a) and C (b) content in martensitic stainless steel 9Cr18Mo on Cr and Fe content in matrix

### 3 结论

(1) 9Cr18Mo 钢凝固时,钢中 C、Cr、Mo、Fe 的偏析都比较明显。

(2) 铁素体相中的 Cr、Mo、C 含量非常少,合金中的 Cr、Mo、C 都集中于  $M_{23}C_6$  中。

(3) 钢中  $M_{23}C_6$  中的 C、Mo 含量基本不随温度及合金中各元素的改变而改变。温度及合金元素的改变仅影响  $M_{23}C_6$  中 Cr 和 Fe 元素的含量。

(4) 钢中 Mo 含量的变化仅仅影响了  $M_{23}C_6$  的析出量及其所含 Cr 和 Mo 的含量。

### 参考文献

- 1 李海生. 高碳马氏体不锈钢 9Cr18Mo 生产工艺的改进. 特钢技术, 2002 (2): 30
- 2 陆世英, 张廷凯, 康喜范, 等. 不锈钢. 北京: 原子能出版社出版, 1995

张剑桥 (1979-), 男, 硕士, 工程师, 2004 年吉林大学毕业, 不锈钢研发。

收稿日期: 2010-06-21