

SA508-3 钢平衡相转变的热力学计算和分析

陈红宇^{1,2} 刘正东² 林肇杰² 周芸¹

(1 昆明理工大学材料与冶金工程学院, 昆明 650093; 2 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081)

摘要 采用 Thermo-Calc 热力学软件计算了 SA508-3 钢(%: 0.19C, 0.01 ~ 0.22Si, 1.40 ~ 1.58Mn, 0.65 ~ 0.76Ni, 0.50 ~ 0.55Mo) 的析出相、析出温度和各相的含量, 并研究了 Si 和 Mn-Ni-Mo 含量对该钢析出相的影响。计算结果表明, SA508-3 钢平衡态的析出相主要为合金渗碳体、 M_7C_3 及 Mo 的碳化物。Si 含量变化对钢中各相析出温度和析出量无显著影响。随 Mo 含量降低, 钢中脆性相析出减少, 但对合金渗碳体析出无显著影响。SA508-3 钢最佳回火温度为 643 ~ 678 °C。

关键词 SA508-3 钢 析出相 热力学计算

Thermodynamic Calculation and Analysis on Equilibrium Phases Transformation in SA508-3 Steel

Chen Hongyu^{1,2}, Liu Zhengdong², Lin Zhaojie² and Zhou Yun¹

(1 College of Materials and Metallurgy, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2 Institute for Structural Materials, Center Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract Precipitated phases, precipitated temperature and each phase content in SA508-3 steel - 0.19C, 0.01 ~ 0.22Si, 1.40 ~ 1.58Mn, 0.65 ~ 0.76Ni, 0.50 ~ 0.55Mo have been calculated by using Thermo-Calc thermodynamic software, and effect of Si and Mn-Ni-Mo content on precipitated phases in the steel was studied. The calculated results show that main equilibrium precipitates in SA508-3 steel are alloying cementite, M_7C_3 and Mo carbide. There is no obvious effect of Si content change on precipitated temperature and precipitated amount of each phase. With increasing Mo content the brittle precipitated phases decreased while there is not obvious effect on alloying cementite precipitates. The optimum tempering temperature for SA508-3 steel is 643 ~ 678 °C.

Material Index SA508-3 Steel, Precipitated Phase, Thermodynamic Calculation

随着锻件向大型化发展以及热处理条件的限制, SA508-3 钢大型锻件淬火时, 心部甚至截面 1/4 处冷却速度不足, 导致出现铁素体甚至珠光体组织, 严重影响了材料的低温韧性^[1]。本文采用 Thermo-Calc 热力学计算软件, 对 SA508-3 钢的析出行为进行了计算和分析, 在 SA508-3 钢标准成分范围内进一步发掘 SA508-3 钢淬透性潜力。

1 Thermo-Calc 热力学计算软件的计算模型及计算条件

Hillert 和 Staffansson 首先提出用于描述单相吉布斯(Gibbs)自由能的亚点阵模型作为热力学计算模型, Sundman 和 Agren 将该模型推广到含有多个亚点阵与任意多个组元的亚点阵模型^[2]。Thermo-Calc 热力学模型是在 Sundman 和 Agren 结论的基础上建立的^[3]。计算时, 合金体系为 1 mol, 参照状态为 298.15 K 和 10^5 Pa, 温度为摄氏温度(°C)。合金系的各组元按质量分数输入, 数据库为 TCFE3。在已完成的工作基础上, 选取计算用 SA508-3 钢的基

本成分如表 1 所示。利用 Thermo-Calc 软件, 计算 SA508-3 钢中可能存在的平衡相、平衡相的重量百分数以及平衡相的析出、溶解温度等。

表 1 试验 SA508-3 钢化学成分/%
Table 1 Chemical compositions of test SA508-3 steels / %

炉号	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
1 [#]	0.19	0.01	1.58	0.006	0.006	0.76	0.55
2 [#]	0.19	0.11	1.58	0.006	0.006	0.76	0.55
3 [#]	0.19	0.22	1.58	0.006	0.006	0.76	0.55
4 [#]	0.19	0.22	1.40	0.006	0.006	0.65	0.50

注: 钢中残余 Cr 为 0.13%。

2 计算结果

2.1 SA508-3 钢的热力学平衡相

根据表 1 中各炉钢的成分, 分别计算了 4 炉钢平衡态时的析出相、析出温度及各相的质量百分含量。1[#]、2[#]、3[#] 钢中 C 和其它主要合金元素含量相同, 而 Si 含量不同, 研究 Si 对 SA508-3 钢性能的影响; 3[#] 和 4[#] 钢的 C、Si 含量相同, Mn-Ni-Mo 由上限降为中限, 目的是研究 Mn-Ni-Mo 含量对 SA508-3 钢性

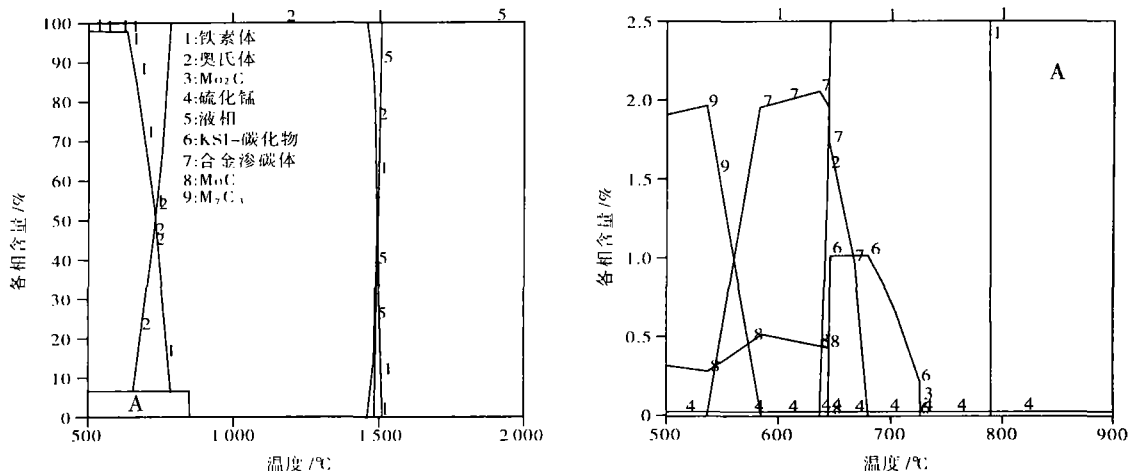


图 1 SA508-3 钢 2# 平衡转变过程中相含量的变化

Fig. 1 Phase evolution of SA508-3 steel 2# during equilibrium transformation

能的影响。图 1 是 2# 钢的计算结果图,其它各炉钢采用相同的分析方法。

通过计算得 1#、2#、3# 钢中平衡态的析出相为合金渗碳体、 M_7C_3 、 MoC 、 Mo_2C 和 KSI-碳化物。

合金渗碳体 $(FeCrMn)_3C$ 在析出温度范围内随温度的增加,Fe 含量增大,Mn 含量减小,Cr 含量基本不变;KSI-碳化物由于金属原子与碳原子摩尔比为 3:1,因此该碳化物也是合金渗碳体,只是合金元素与合金渗碳体有些差别; Mo_2C 中 Mo 是主要合金元素。4# 钢的平衡态的析出相为合金渗碳体、 M_7C_3 、 MoC 和 KSI-碳化物。合金渗碳体中的合金元素与变化规律和 1#、2#、3# 钢相同,只是 Mn 含量略有降低,Fe 含量略有升高; M_7C_3 中主要合金元素也是 Mn、Fe、Mo、Cr,其中 Fe、Cr 含量略有升高,Mn、Mo 含量略有降低;MC-SHP 和 KSI-碳化物的成分及合金含量与 1#、2#、3# 钢基本相同。

2.2 Si、Mn-Ni-Mo 对 SA508-3 钢析出相的影响

在 1#、2#、3# 钢中,C 和 Mn-Ni-Mo 含量相同而 Si 含量不同,由表 2、表 3 可以看出,1#、2#、3# 钢析出相的析出温度、析出量都差别很小。因此 Si 对析出相的析出温度、析出量的影响很小。4# 钢的 Mn-Ni-Mo 由上限降为中限,而 C、Si 含量相同,KSI-碳化物和

表 2 SA508-3 钢各析出相析出的温度/°C

Table 2 Precipitated temperature of precipitates in SA508-3 steel /°C

炉号	合金渗碳体 (FeCrMn) ₃ C	M_7C_3	MoC	KSI-碳化物	Mo_2C	A_1	A_3
1#	539 ~ 678	500 ~ 584	500 ~ 642	642 ~ 724	723 ~ 735	634	787
2#	536 ~ 678	500 ~ 582	500 ~ 645	642 ~ 727	725 ~ 737	635	787
3#	532 ~ 680	500 ~ 579	500 ~ 644	643 ~ 727	727 ~ 738	637	792
4#	506 ~ 687	500 ~ 557	500 ~ 644	642 ~ 734	-	655	798

表 3 SA508-3 钢各析出相的最大含量/%

Table 3 Maximum content of each precipitated phase in SA508-3 steel /%

炉号	合金渗碳体 (FeCrMn) ₃ C	M_7C_3	MoC	KSI-碳化物	Mo_2C
1#	2.03	1.96	0.50	1.03	0.09
2#	2.05	1.96	0.50	1.03	0.09
3#	2.05	1.94	0.51	1.06	0.08
4#	2.15	1.92	0.51	0.91	-

合金渗碳体的析出总量即渗碳体的量与前 3 炉差别不大,估计 Mn-Ni-Mo 的降低对强度影响不大。与 1#、2#、3# 钢相比,4# 钢平衡态时 A_1 、 A_3 有一定的提高,其中 A_3 提高 11 °C,由此可见,Mn-Ni-Mo 的降低缩小了 SA508-3 钢的奥氏体区。

由表 3 可以看出,由于 Mo 含量降低,4# 钢的平衡态没有 Mo_2C 的析出, MoC 的析出量基本不变,KSI-碳化物的析出量减少,合金渗碳体的析出量增加,KSI-碳化物和合金渗碳体的总量基本不变。由于固溶状态的 Mo 有抑制 P、Sn、As 等杂质元素偏聚的作用,而杂质元素的偏聚有增加材料变脆的倾向^[4],所以 Mo 的碳化物是回火时不希望出现的。结合合金渗碳体和 KSI-碳化物的析出温度区间为 643 ~ 678 °C,使之既利于合金渗碳体和 KSI-碳化物的析出,又可以避开 MoC 、 Mo_2C 析出的温度区。Mn 在析出相中主要存在于合金渗碳体和 M_7C_3 中,Mn 含量降低时,合金渗碳体析出量略微增加, M_7C_3 的析出量基本不变,所以适当降低 Mn 含量反而促进合金渗碳体的析出。

研究表明,提高 C 含量会降低钢的低温韧性,因此在保证强度的情况下,C 应该尽量降低;合金元素中除 Ni 和一定量 Mn 之外,都不利于韧脆转变温

度的降低,主要是因为 Ni 增加层错能,促进低温时螺位错交滑移,使裂纹扩展消耗功增加,促使韧性增加;同时 Mn 含量高于 1.55% 时会与 P 产生共偏聚^[5],促进回火脆性,因此 Mn-Mo 的成分选择,需要考虑淬透性和低温韧性二者的综合影响。

当然,仅仅从析出相的总量来考虑 SA508-3 钢的力学性能是不全面的,因为 Ni 虽不形成析出相,固溶到铁素体中产生固溶强化,仍能提高材料的强度。1[#]、2[#]、3[#] 钢,虽然 Si 含量变化,但由于 Fe 原子和 Si 原子的原子半径相近,均约为 1.13 Å (0.113 nm), Si 原子替代 Fe 原子后晶格畸变很小,固溶强化作用很弱,故对 SA508-3 钢的力学性能影响不大。

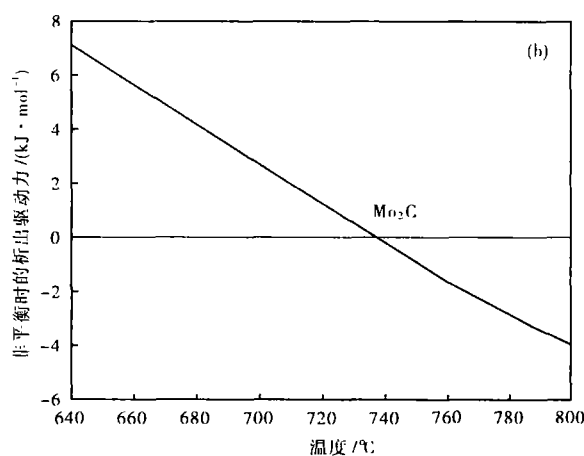
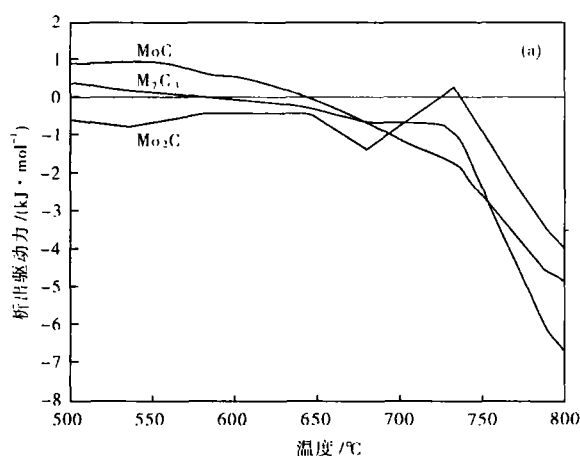


图2 MoC、M₇C₃、Mo₂C析出相平衡态(a)和 Mo₂C非平衡态(b)的析出驱动力

Fig. 2 Precipitated driving force for MoC, M₇C₃ and Mo₂C at equilibrium status (a); and for Mo₂C at non-equilibrium status (b)

M₇C₃、MoC 的析出温度低于 643 °C,在回火过程中合金渗碳体和 Mo₂C 相不可能完全析出使体系处于平衡状态;因此 643 ~ 678 °C 回火时,它们的析出驱动力比平衡态要低,估计不会有这两种相析出。

为研究 Mo₂C 的析出行为,在其它相不析出的情况下计算了 Mo₂C 的析出驱动力,如图 2(b)所示。从图 2(b)可以看出,Mo₂C 在低于 735 °C 时析出驱动力大于 0,随着温度的降低,Mo₂C 从 735 °C 开始有析出的趋势。如果淬火时由于冷速较快,Mo₂C 相来不及析出,那么在 643 ~ 678 °C 回火仍有析出的趋势。由于 Mo₂C 析出量较少,可以通过控制合适的回火时间来保证渗碳体析出的同时尽量避免 Mo₂C 的析出。

4 结论

(1) SA508-3 钢平衡态主要析出相为合金渗碳体、M₇C₃ 及 Mo 的碳化物。

(2) C 为中限时,随 Si 含量的变化,钢中各相的

3 讨论

为研究钢中除合金渗碳体之外的析出相在回火过程中的析出行为,对 2[#] 钢中 3 种碳化物 Mo₂C、M₇C₃、MoC 分别进行处理,它们进入计算,但不转变,由此计算它们的趋向转变程度——析出驱动力,如图 2(a)所示。根据前面的分析,SA508-3 钢的析出相中,(FeCrMn)₃C 随着温度的增加,Mn 含量减小而 Fe 含量增大,Cr 含量基本不变。提高合金渗碳体中合金的含量,可以提高合金渗碳体的稳定性,因此,为提高 SA508-3 钢使用时的稳定性,回火温度最好选择 643 ~ 678 °C 之间靠近下限的温度。因

析出温度、析出量基本不变;Mo 含量降低,减少了脆性相的析出而对合金渗碳体的析出量影响很小。

(3) SA508-3 钢在 643 ~ 678 °C 进行回火较为适宜。

参考文献

- 1 杨兴博,孙永立,程义,等. 国产 SA508-3 锻件厚度—平均冷却速度—显微组织—力学性能关系的研究. 锅炉制造,1995(4):32
- 2 徐祖耀,李麟. 材料热力学(第三版). 北京:科学出版社,2005
- 3 Andersson J-O, Thomas Helander, Lars Hdglund, et al. Thermo-Calc & DICTRA, Computational Tools for Materials Sciences. Calphad, 2002, 26(2):273
- 4 盛钟琦,肖洪,彭峰. A508-3 钢回火时显微组织的变化. 核动力工程,1990(4):27
- 5 魏光荣,冯德诚,黄淑珍,等. A508-3 钢热处理研究. 核动力工程,1989(3):75

陈红宇(1981-),男,在读硕士研究生,从事冶金新材料研究。

收稿日期:2006-09-18