

Mn 含量对合金钢活塞正火组织的影响及改善措施

Effect of Mn Content on the Normalizing Structure of Alloy Steel Pistons and Improvement Measures

供稿|吕晓霞, 欧周华, 刘田, 浦一凡, 杜文乐, 裴贺莹 / LÜ Xiaoxia, OU Zhouhua, LIU Tian, PU Yifan, DU Wenle, PEI Heying

内容导读

针对 ASTM A322-4140 合金钢活塞进行正火处理后得到贝氏体组织而非技术标准要求的珠光体和铁素体的现象, 通过观察不同 Mn 含量的 ASTM A322-4140 合金钢正火组织, 研究了 Mn 含量对该活塞正火组织的影响, 提出了改善合金组织的热处理工艺。研究表明, 将 Mn 质量分数控制在 0.75%~0.80% 时可有效预防活塞正火后贝氏体组织的产生。此外, 根据贝氏体在高于 500 °C 进行回火可发生回复及再结晶, 重新析出铁素体的特点, 在贝氏体生成后采用正火 (880 °C×4 h+空冷) 加回火 (650 °C×6 h+空冷) 的热处理工艺可有效改善甚至消除贝氏体组织。

合金钢是在碳钢的基础上有目的地加入一些合金元素而得到的钢种。常加入的合金元素有 Si、Mn、Cr、N、Mo、Cu 等, 这些元素的添加可以提高钢的淬透性、高温强度、回火稳定性及其他物理化学性能, 扩大了碳钢的应用范围^[1], 因此被广泛应用于压缩机的零件或结构件。其中, ASTM A322-4140 合金钢作为一种中碳合金结构钢, 因其具有强度高、淬透性高, 韧性好, 淬火时变形小的特点被广泛应用于压缩机的曲轴、活塞等主要部件^[2]。

ASTM A322-4140 作为本厂的压缩机活塞的常用合金钢, 其热处理过程主要包括正火处理和调制处理。在对 ASTM A322-4140 合金钢活塞进行正火处理后常会得到贝氏体+珠光体+铁素体的混合组

织, 不符合组织为珠光体和铁素体的标准要求, 造成了部分活塞组织不合格, 甚至对活塞热处理(调质处理)后的力学性能产生了负面影响, 影响了产品交付进度, 并造成一定的经济损失。研究表明, 适量的 Mn 元素在奥氏体分解过程中能够抑制共析铁素体的析出, 推迟珠光体转变^[3], 因此, Mn 含量控制对产品质量稳定性至关重要。为了分析贝氏体组织生成原因, 改善和消除该非正常组织, 本文通过调整 ASTM A322-4140 合金钢中的 Mn 质量分数, 研究 Mn 含量对活塞正火后组织的影响规律, 根据贝氏体组织的析出特性, 制定减低甚至消除合金正火后产生贝氏体的热处理优化工艺, 为后续研究 ASTM A322-4140 合金钢及相似材料的热处理工

艺提供一定的理论依据。

实验方法

本实验所用材料为 6 种不同 Mn 含量的 ASTM A322-4140 活塞，化学成分如表 1 所示。其中活塞直径为 $\phi 100$ mm，实物如图 1 所示，该活塞所用的正火处理工艺为：试样在 350 °C 时入炉，随炉加热至 880 °C 保温 6 h 后空冷至室温。活塞经过

正火处理后，在距离其表面 10 mm 处取检验面积为 225 mm²，高度为 15 mm 的金相试样。金相试样经机械研磨及抛光后，用质量分数 4% 的硝酸酒精溶液进行浸蚀、吹干，使用德国 Axio Observer Z1M 型金相显微镜对试样进行微观组织观察，并采用美国 FEI 扫描电镜对试样进行微区成分分析，最后采用 THVP-50 型维氏硬度计分析活塞中 Mn 含量对正火组织显微硬度的影响。

表 1 实验用活塞的主要化学成分（质量分数）

试样编号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo
1 [#]	0.39	0.31	0.75	0.017	0.004	0.97	0.25	0.074	0.17
2 [#]	0.38	0.33	0.80	0.019	0.004	0.96	0.23	0.076	0.17
3 [#]	0.39	0.34	0.85	0.017	0.004	0.95	0.22	0.075	0.17
4 [#]	0.39	0.34	0.90	0.017	0.004	0.97	0.23	0.075	0.19
5 [#]	0.38	0.32	0.95	0.018	0.003	0.97	0.22	0.076	0.18
6 [#]	0.39	0.31	1.00	0.019	0.004	0.96	0.22	0.075	0.19

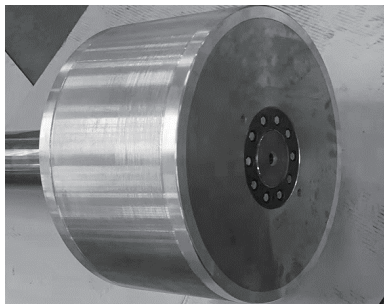


图 1 活塞

实验结果与分析

微观组织分析

图 2 所示为正火后试样的微观组织形貌，组织由珠光体+铁素体+非正常组织组成，图 2(a) 中的区域 2 为非正常组织形貌，非正常组织由板条状、针

状的铁素体、残余奥氏体及弥散碳化物构成，疑似为复杂贝氏体组织。利用扫描电镜对该区域进一步放大观察，如图 2(b)，该组织是由奥氏体的晶界向晶内生长（见图 2(b) 中的区域 3），故可观察到原奥氏体晶界（图 2(b) 中的区域的箭头处）由于板条状及针状铁素体之间的取向各异，导致原奥氏体晶粒被分割、细化，图中 2(b) 中的区域 4 为层片状珠光体组织。

利用扫描电镜对图 2(a) 中的区域 1 和 2 处分别进行成分分析（EDS），并利用维氏硬度计在区域 1 和 2 处进行维氏硬度检测，结果如表 2 所示。可以看出，2(a) 中区域 1 的 Mn 质量分数为 0.79%，区域 2 的 Mn 质量分数为 0.98%，说明区域 2 存在 Mn 的偏析。区域 2 的维氏硬度为 HV 360，硬度远高于区域 1 的维氏硬度 HV 175，根据上述微观组织

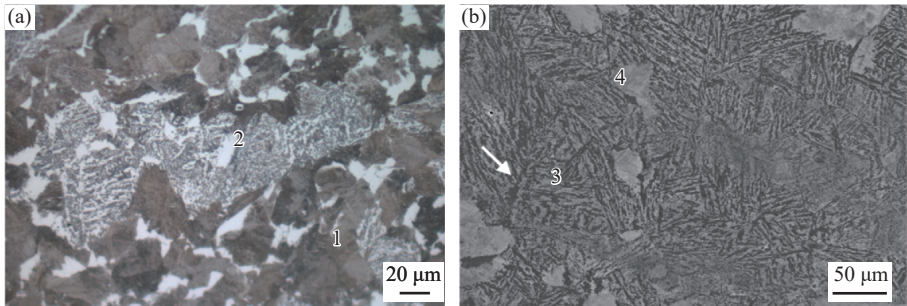


图 2 试样 3 正火后微观组织形貌：(a) 金相显微镜下微观形貌；(b) 区域 2 扫描电镜下组织形貌

表 2 微区成分分析及硬度

图2(a)位置	质量分数/%				硬度, HV
	Si	Cr	Mn	Fe	
1	0.22	1.20	0.79	97.79	175
2	0.28	1.22	0.98	97.54	360

形貌结合成分偏析及硬度的特征推断出区域 2 的组织为贝氏体组织。

不同 Mn 含量活塞的组织形貌

不同 Mn 质量分数的试样组织形貌如图 3 所示。Mn 质量分数为 0.75% 和 0.80% 的试样组织均由珠光体+铁素体构成且分布均匀，无贝氏体组织。

Mn 质量分数为 0.85% 的正火组织中有少量贝氏体组织在原奥氏体晶界产生并向晶内生长，铁素体含量降低，少量铁素体沿原奥氏体晶界析出，原奥氏体晶粒内开始出现多个珠光体的混晶现象，此时

组织由混晶珠光体+贝氏体+少量沿晶界铁素体构成，组织分布不均匀，如图 3(c) 所示。当 Mn 质量分数为 0.90% 时，贝氏体含量开始增多，组织由混晶珠光体+贝氏体+少量沿晶界铁素体构成，组织分布不均匀，如图 3(d) 所示。此时的贝氏体主要由针状和块状铁素体、残余奥氏体及弥散碳化物构成。

当 Mn 质量分数为 0.95% 时，珠光体含量极少，沿原奥氏体晶界分布的铁素体消失，此时的微观组织主要为贝氏体+极少量的珠光体，如图 3(e) 所示。当 Mn 质量分数增加到 1.00% 时，珠光体和铁素体均消失，组织为均匀的贝氏体。可以看出，当 Mn 质量分数 $\geq 0.95\%$ 时，正火后的组织中针状和块状铁素体、残余奥氏体及弥散碳化物形貌的贝氏体消失，组织转变为板条状的贝氏体，由于该组织是由奥氏体的晶界向晶内生长，故此时依旧可以清晰的观察到原奥氏体晶界。

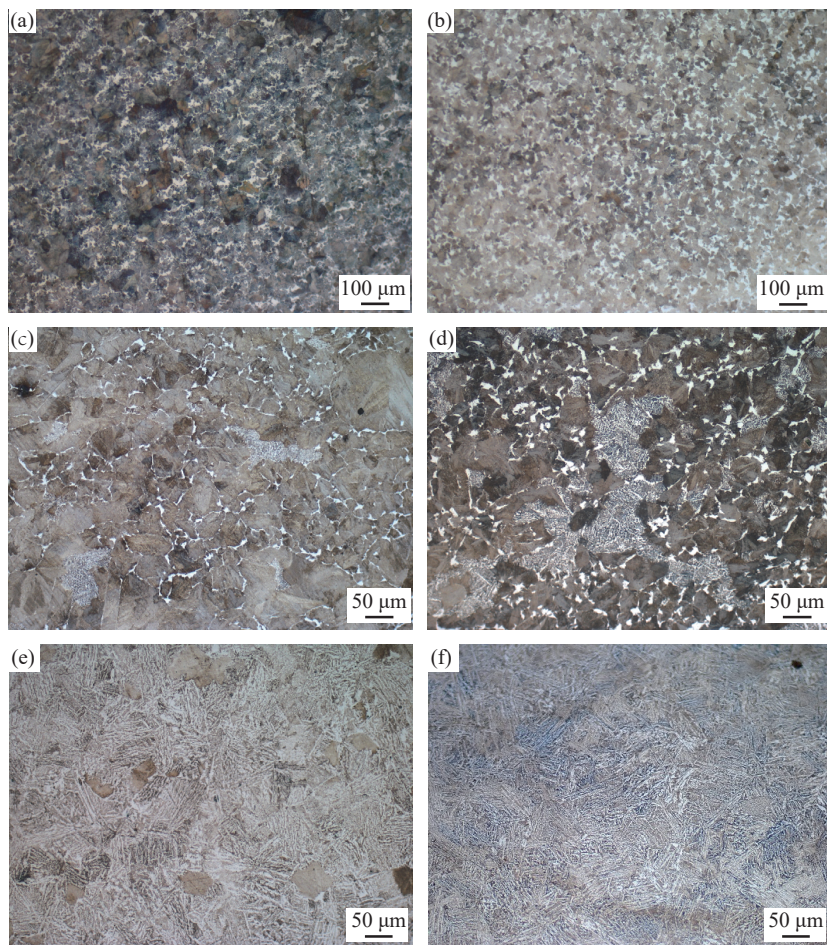


图 3 不同 Mn 质量分数试样组织: (a) 0.75%; (b) 0.80%; (c) 0.85%; (d) 0.90%; (e) 0.95%; (f) 1.00%

综上所述,当 ASTM A322-4140 活塞的 Mn 质量分数控制在 0.75%~0.80% 时,经过正火(880 °C×6 h+空冷)后的组织为均匀分布的珠光体和铁素体,无贝氏体产生。当 Mn 质量分数增加到 0.85% 时,组织中开始有少量贝氏体(呈细针状出现),铁素体沿原奥氏体晶界分布,且含量较少,在原奥氏体内出现多个珠光体的混晶现象。Mn 质量分数>0.85% 时,随着 Mn 含量的增加贝氏体逐渐增多,铁素体和珠光体含量逐渐降低,在 Mn 质量分数为 1.0% 时,相同的正火制度下珠光体和铁素体消失,组织均为板条状贝氏体。

工艺优化方案

Mn 在奥氏体转变过程中一方面有抑制先共析铁素体析出的作用^[3],可以推迟先共析铁素体和珠光体的转变^[4-5],为贝氏体的转变创造了有利条件;另一方面可以促使亚稳区的奥氏体转变为针状铁素体,而未转变的奥氏体中由于富碳,变得更加稳定,抑制了粒状贝氏体的产生,从而得到低温转变的板条状贝氏体^[6],故在常规的上述正火工艺处理下,当 Mn 质量分数<0.85% 时,组织为相对稳定的珠光体+铁素体,Mn 质量分数≥0.85% 时,组织中开始出现贝氏体,此时贝氏体由针状铁素体+残余奥氏体+弥散碳化物构成,由于 Mn 元素抑制先共析铁素体的作用导致随 Mn 含量的增加铁素

体含量逐渐降低,贝氏体含量逐渐增加,当 Mn 质量分数增加到 1.00% 时,组织均转变为板条状的贝氏体。

研究资料表明:贝氏体铁素体(BF)在高于 500 °C 进行回火时的变化包括碳原子的脱溶、碳化物的析出、形貌和亚结构的变化,同时铁素体产生回复及再结晶^[5]。重新正火+回火后可以使贝氏体组织减少甚至消失,铁素体再结晶、重新产生,故试样在经过正火后可以尝试增加正火+回火工艺来改善贝氏体组织。

在上述试样中,Mn 质量分数为 0.95% 和 1.0% 的合金钢正火后贝氏体含量较多,对该试样重新进行一次正火+回火的热处理工艺,具体工艺如表 3 所示。

表 3 热处理工艺

工艺	入炉温度/°C	保温温度/°C	保温时间/h	冷却方式
正火	≤350	880	4	空冷
回火	≤350	650	6	空冷

重新热处理后的试样再次经过磨样、抛光、腐蚀后在金相显微镜下观察,可见原组织中贝氏体消失,组织由均匀的珠光体和铁素体构成,见图 4。说明采用重新正火(880 °C×4 h+空冷)+回火(650 °C×6 h+空冷)的热处理制度可有效改善甚至消除原正火过程中已产生的贝氏体组织。

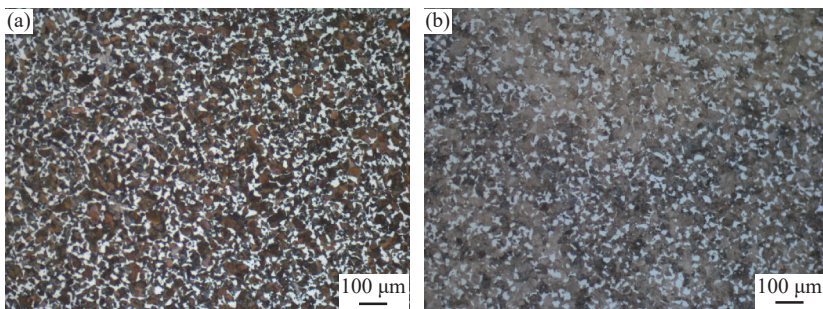


图 4 不同 Mn 质量分数试样重新热处理后的组织:(a) 0.95%;(b) 1.00%

结束语

(1) 活塞 Mn 质量分数控制在 0.75%~0.80% 时,经正火处理(880 °C×6 h+空冷)后无贝氏体产生。

(2) 当活塞中 Mn 质量分数控制在 0.85%~1.00% 时,正火处理(880 °C×6 h+空冷)容易产生贝氏体,且随着 Mn 含量的增加,铁素体含量降低,贝氏体含量增多。

(3) 采用正火(880 °C×4 h+空冷)+回火(650 °C×

6 h+空冷)的热处理工艺可有效改善活塞中因热处理产生的贝氏体组织。

参考文献

- [1] 焦健, 焦洋. 浅谈硅、锰两种元素在合金钢中的作用. 内蒙古石油化工, 2012, 38(20): 25
- [2] 潘王虎. 烧结和热处理参数对注射成形 4140 合金钢的影响 [学位论文]. 长沙: 中南大学, 2014
- [3] 赵运堂, 尚成嘉, 杨善武, 等. 低碳微合金钢在过冷奥氏体亚稳定区的转变. 北京科技大学学报, 2007(7): 694
- [4] 宋仲明, 焦辉, 朱正峰, 等. ZG25MnCrNi 钢正火组织中贝氏体的形成原因及预防措施分析. 铸造技术, 2015, 36(7): 1722
- [5] 高古辉, 张寒, 白秉哲. 回火温度对 Mn 系低碳贝氏体钢的低温韧性的影响. 金属学报, 2011, 47(5): 513
- [6] 龙松朋, 周旭东. 42CrMoA 钢过冷奥氏体连续冷却相转变曲线. 热加工工艺, 2011, 41(22): 83

作者简介: 吕晓霞 (1992—), 女, 内蒙古扎兰屯市人, 工程师。2017 年毕业于沈阳工业大学材料工程专业, 主要研究方向金属材料检测。通信地址: 辽宁省沈阳市中德大街 11 号; E-mail: 237090866@qq.com。