

稀土微合金化对5CrNiMo钢组织和性能的影响*

赵晓栋¹, 姜江¹, 胡国栋¹, 李凤照¹, 李国宝^{1, 2}

(1 山东大学 材料科学与工程学院, 山东 济南250061; 2 济南钢铁集团总公司, 山东 济南250101)

摘要: 入微量的稀土元素后, 5CrNiMo钢中硫含量降至0.009%和0.005%的高纯度钢数量级。退火组织、淬火组织和淬火后回火组织均显著细化, 在硬度、强度相当的情况下, 5CrNiMo钢的冲击功与不添加稀土元素的同炉次钢相比, 分别提高14J和19J, 增幅达51%和68%。在试样表面达到相同龟裂程度时, 试样所需的冷热循环周次比不加稀土的试样分别提高了35%和69%。

关键词: 稀土; 微合金化; 高纯度钢; 细化; 冲击韧性

中图分类号: TG142.1+3 文献标识码: A 文章编号: 1004-4620(2004)02-0040-04

Effects of RE Microalloying on Microstructure and Properties of 5CrNiMo Steel

ZHAO Xiao-dong¹, JIANG Jiang¹, HU Guo-dong¹, LI Feng-zhao¹, Li Guo-bao^{1, 2}

(1 School of Material Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2 Jinan Iron and Steel Group, Jinan 250101, China)

Abstract: Using rare-earth as microalloying element, RE alloys is added to 5CrNiMo steels by instantaneous dense flow technique under normal processing conditions with conventional smelting methods. The microstructure of 5CrNiMo steels is systematically studied by metallographic microscope and SEM, and mechanical properties and compositions are tested and analyzed. The results show that with little addition of RE elements, the content of S decreases to 0.009% and 0.005%, the value of standard of high purity steel. The microstructures under heat treatment of anneal, quench and temper after quench are all conspicuously refinement. Compared with 5CrNiMo steels of the same heat without RE additions, the impact work of the steels increases by 51% and 68%, 14J and 19J respectively, while the hardness and strength remained stable. The times of cool-heat cycle operation needed of the samples without RE are increased by 35% and 69% with RE content to the same extent of crazing on the surface of the samples.

Keywords: rare-earth; microalloying; high-purity steel; refinement; impact toughness

5CrNiMo作为热作模具钢, 在工作时与炽热金属相接触, 模具工作部分的温度会升高至300~400℃、500~800℃甚至上千度。除承受巨大的机械应力和炽热金属流动变形的强摩擦外, 还要承受炽热金属和冷却介质交替作用而引起的热应力, 因而其常见的失效形式有模腔塑性变形、磨损、热疲劳开裂等。因此, 热作模具钢应具备的基本性能是: 高的高温强度、热稳定性、良好的韧性、良好的热疲劳和热磨损能力以及良好的抗氧化性能和耐蚀性。为获得高品质5CrNiMo钢, 可采用电渣重熔等冶炼工艺, 降低钢中硫等杂质元素的含

量，以减少硫引起的热脆性。本研究在常规生产条件下，对稀土5CrNiMo钢的成分和微观组织进行了研究，并进行了常规力学性能的检测和成分分析。

1 实验方法

冶炼设备为5t电弧炉，镁钙砖碱性炉衬。进行了两炉次的工艺试验，每炉冶炼12t 5CrNiMo钢，采用正常的出炉工艺，为对比，浇注时一半（6t）钢水以瞬间密流工艺添加阻燃自爆式稀土等微合金化元素，另一半不加。镁碳砖钢包底设置吹氩透气砖。钢水进入钢包过程开始吹氩，吹氩时间为6min。以Si、Mn弱氧化剂预脱氧，以强氧化剂Al进行终脱氧。两炉加入稀土后得到的钢锭的稀土含量分别为0.008%和0.032%，记为1[#]、2[#]；不加稀土的钢锭记为3[#]。从钢水包到浇注一盘钢锭的时间为120s，均匀加入变质剂的时间为90s。稀土添加剂为粉状稀土压制的圆柱形颗粒，主要元素为La、Ce、Nd等轻稀土元素，外包一层以纯铁粉为主的阻燃剂，冶炼过程中用可调速喂料机由中注管加入钢中。

浇注后按购货方要求锻成钢料。试样直接从钢料上截取尺寸为 $\phi 180\text{mm}$ 圆钢，加工成试验所需要的形状和尺寸。所选用的试样分别标记为1[#]、2[#]、3[#]，各试样的化学成分分析结果如表1所示。

5CrNiMo钢为 $850^{\circ}\text{C} \times 20\text{min}$ 淬火，淬火后 $520^{\circ}\text{C} \times 3\text{h}$ 回火及 $790^{\circ}\text{C} \times 5\text{h}$ 退火三种热处理状态。冲击试验和拉伸试验采用标准的U形缺口冲击试样和拉伸试样。冲击试样冲断后，制取金相和断口试样。

表1 5CrNiMo钢试样成分 %

试样号	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo	RE
1 [#]	0.59	0.34	0.62	0.009	0.014	0.64	1.59	0.14	0.008
2 [#]	0.55	0.36	0.62	0.005	0.015	0.66	1.64	0.17	0.032
3 [#]	0.55	0.30	0.70	0.016	0.015	0.65	1.66	0.17	0.000

注：表中S的含量是通过三次光谱分析和一次化学分析并反复校核后的数据。

2 实验结果与讨论

2.1 显微组织分析

用光学金相显微镜观察到的试样各种热处理状态下的微观组织见图1~3。

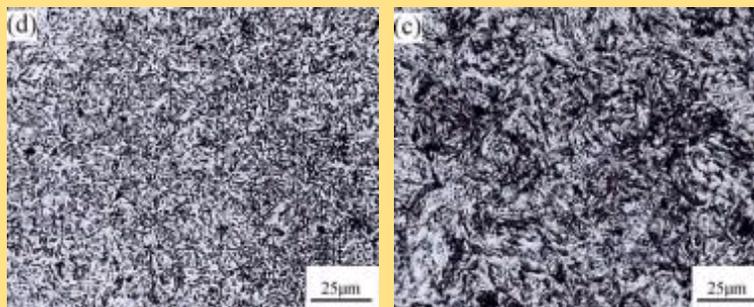


图1 淬火状态下5CrNiMo钢显微组织 400 \times

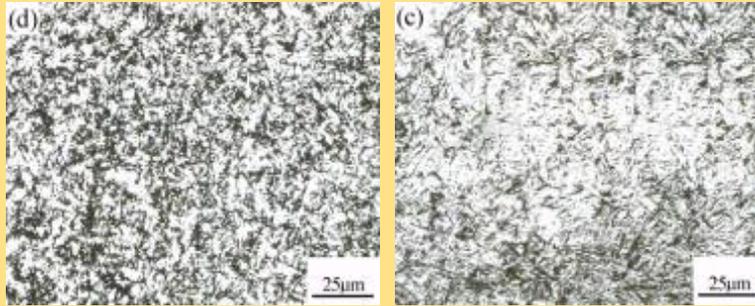


图2 回火状态下5CrNiMo钢显微组织 400×

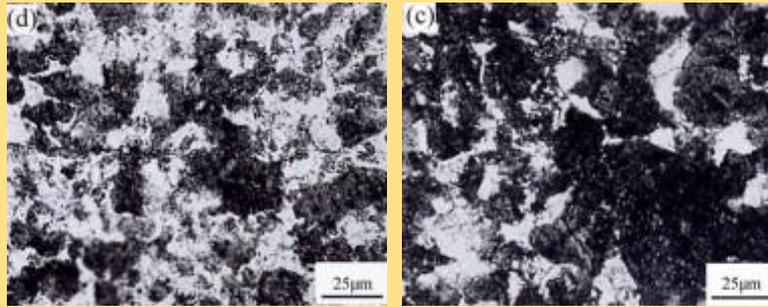


图3 退火状态下5CrNiMo钢显微组织 400×

可以看出加稀土后的微观组织比未加稀土的组织呈现出明显的细化效果。图1中，2[#]钢淬火组织是隐晶和细小的马氏体，而3[#]的马氏体板条和针状特征明显；同样，加入稀土的回火索氏体中碳化物细小均匀分布在基体组织上（图2）；这种细化作用在接近平衡组织的退火珠光体状态也是显著的（图3），观察退火珠光体，3[#]组织的晶粒尺寸约为25 μm ，相当于晶粒度7~8级。2[#]组织的晶粒尺寸约在12 μm ，相当于晶粒度9~10级，组织更为均匀。2[#]的淬火组织比1[#]明显细化，见图4。

在稀土加入量适当的条件下，稀土含量越多，其细化效果越明显。稀土在钢中除形成夹杂物外，还以固溶形式存在。虽然稀土原子的半径比铁原子的半径大40%，固溶度很低，但正是这些固溶在钢中的微量稀土元素对相变过程产生了很大的影响。为了降低畸变能，稀土往往偏聚在奥氏体晶界处，这样既降低了晶界能，减少晶粒长大的驱动力，阻碍了奥氏体晶粒的进一步长大；又可以阻止有害元素在晶界的偏聚，这样奥氏体晶粒在高温下得到了充分细化，使得室温组织晶粒细化效果也很明显。

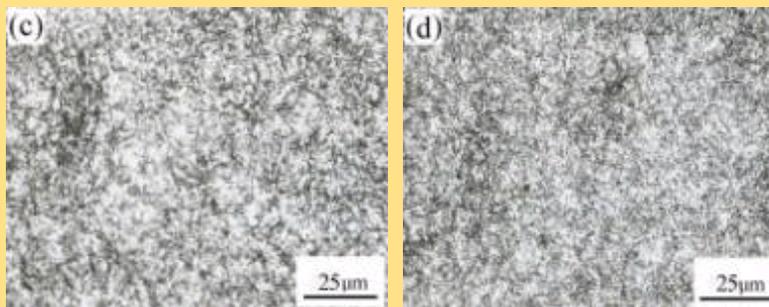


图4 不同稀土含量的5CrNiMo钢淬火组织对比 400×

由点阵匹配原理及相关资料可知，初生 γ 相的最密排面（111）在Ce₂O₃、La₂O₃和Ce₂O₂S的（0001）面上形核的点阵错配度分别为6.8%、8.0%和8.5%，说明Ce₂O₃、La₂O₃和Ce₂O₂S成为奥氏体的形核核心是有效的。从 γ -Fe中首先析出来的高熔点稀土氧硫化物，可作为 γ -Fe继续形核的核心，增加非均匀形核的形核率，使得 γ -Fe形核的核心增多，达到了细化晶粒的作用。

2.2 强度硬度分析

在HR-150A型洛氏硬度计上对5CrNiMo钢520℃×3h回火状态下的不同成分试样进行硬度测试，1#、2#、3#试样的硬度分别为HRC41.5、43.5及40.0。这说明微量稀土对于5CrNiMo钢的硬度的影响不大。将实验所用1#、2#、3#标准拉伸试样（试样状态均为盐浴炉加热淬火后520℃×3h回火），在SCHENCK-RSA250电子万能试验机上进行拉伸试验，结果见表2。

表2 5CrNiMo钢试样的拉伸试验数据

样号	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
1#	1303	1210.2	7.4
2#	1359	1270.9	8.6
3#	1406	1279.4	8.5

从表2看出，2#试样屈服强度、抗拉强度和延伸率较1#试样略微升高，其屈服强度提高5%，抗拉强度提高4.3%，相差不大。2#试样的抗拉强度比3#试样降低了3.3%，屈服强度降低了0.6%，延伸率提高了1.2%，二者的各项指标也相差无几。可以认为是数据误差。

实践证明，金属材料的各种硬度值之间、硬度值与强度值之间具有近似的相应关系。钢的硬度一般与碳含量有关，而抗拉强度的影响因素很多。

一般认为，随加入到钢中稀土量的增加，钢的强度多数呈现先下降后上升的规律。这是因为稀土对钢的强度的影响具有两面性。一方面稀土具有净化钢液，与C，N，P元素交互作用，减少珠光体数量等作用，会降低钢的强度；另一方面，稀土固溶，细化晶粒，减少珠光体片层间距及渗碳体厚度和促进氮化物的细小，弥散析出等作用有利于钢的强度的提高。由于这一矛盾的存在，使得在多数钢中强度下降或升高的幅度都不是很大。加入稀土后，能够保持钢的硬度和强度不会降低，或有略微的升高，这对于要求钢具备良好的综合性能是非常有利的。

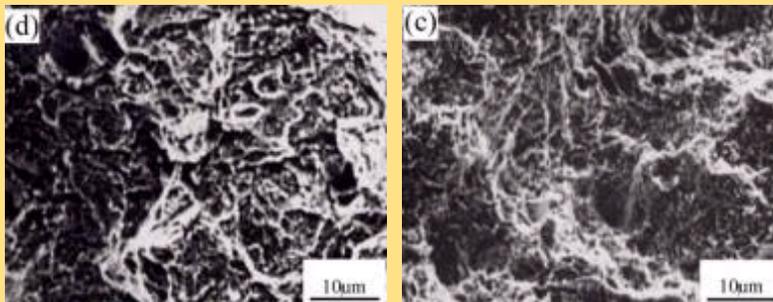
2.3 冲击韧性分析

在JB30G型冲击试验机上对回火状态试样做冲击试验，1#、2#、3#试样的冲击功分别为41.5、46.1、27.4 J。说明加入稀土后，5CrNiMo钢的冲击韧性显著提高。图5为选择同样断裂部位的2#与3#冲击试样断口在扫描电镜下观察到的形貌。

对5CrNiMo钢冲击断口的观察可以看出：3#试样宏观断口比较齐平，在扫描电镜下晶粒显粗大，韧窝中存在MnS夹杂物且尺寸较大。而2#试样宏观断口有剪切唇，亮灰色弱金属光泽。在扫描电镜下韧窝边缘亮度较大，有较多突起的撕裂棱。韧窝的底部为细小的球形第二相粒子，成分检测为稀土氧硫化物。这也说明了在钢中加入稀土后，由于组织的细化和基体内夹杂物的变质及细小，使得钢中产生裂纹的机会减少，同时裂纹扩展所需的能量增大，钢的韧性得到明显改善。

一般情况下，细化晶粒是强化金属极为重要的强韧化机制。通过晶粒的细化，可以在保持钢强度不降低的情况下，显著提高钢材的韧性，提高钢的综合性能。这是因为晶粒越细，造成裂纹所需要的应力集中越难，裂纹传播所消耗的能量越高，裂纹在不同位向的各个晶粒的传播越困难。

另一方面，钢中加入稀土后，稀土能够在晶界首先偏聚，故能够改变晶界状态，净化晶界，使得晶界的磷偏聚大为减弱，断口的形貌由沿晶断裂向穿晶断裂过渡，也在一定程度上提高了钢材的韧性。



第三个方面，5CrNiMo钢中加入稀土后，钢中原来分布着的尺寸较大、长条状的MnS，FeS等夹杂物变成尺寸较小、球形或椭圆形、弥散均匀分布的稀土硫氧化物。变质后的夹杂物，减小了夹杂物周围的应力集中，明显减轻条状夹杂物对基体的割裂作用，而且使得疲劳裂纹在钢中形成的机会减少，也进一步阻止了疲劳裂纹的扩展，因而，同时提高了钢的韧性和疲劳性能。

韧性的提高对以热疲劳失效为主的5CrNiMo钢提高寿命是有利的，同时在承受大载荷时，可以在保持相同的冲击韧性前提下，降低钢的回火温度，获得较高的强度，提高模腔的抗塑变能力。

2.4 热疲劳性能分析

在高频加热设备上用感应圈对不同成分回火状态的热疲劳试样进行加热，热疲劳试样尺寸为 15mm×30mm。通电加热2s后断电，用冷水使试样温度降至室温。经520℃×2s、水冷（室温）循环处理，用10倍放大镜检查试样表面裂纹情况。在试样表面达到相同龟裂程度时，比较不同试样所需的冷热循环周次。1#、2#、3#试样的冷热循环周次分别为678、850、502次（阳压12.5kV；阳流1.5A；栅流0.28A）。说明稀土元素的加入显著提高了5CrNiMo的热疲劳性能。在试样表面达到相同龟裂程度时，1#和2#试样所需的冷热循环周次比3#试样分别提高了35%和69%。

夹杂物对于钢的热疲劳性能有很大的危害，一方面它同基体的弹性模量不同，外加应力作用时相当于基体缺陷，在其周围形成应力集中；另一方面，夹杂物与基体有不同的热膨胀系数，MnS的线膨胀系数为 $18.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，与基体（线膨胀系数为 $12.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）相差悬殊，这种夹杂物在快速冷却时以很大的速度收缩，在周围形成空隙，形成热疲劳裂纹源，导致气体原子的聚集，加重氧化。而稀土氧化物多为圆形或椭圆形，减小了应力集中，RE2O2S，RE2S3等的线膨胀系数（ $10.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 和 $12.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）和弹性模量与基体相近，有较好的适配性，而且具有良好的形态与分布，加之细化了晶粒，净化了晶界，因而热疲劳裂纹萌生较晚，扩展变慢，使钢的热疲劳性能显著提高。

3 结论

3.1 加入稀土后的5CrNiMo钢在各种热处理状态下，显微组织显著细化，成分更为均匀；在稀土加入量适当的条件下，随稀土含量的增加，其细化效果更为明显。钢中硫含量降至0.009%和0.005%的高纯度钢数量级。

3.2 在5CrNiMo钢中加入稀土，在保持钢的强度、硬度基本不变的前提下，冲击功与不添加稀土元素的同炉次钢相比，分别提高了14J和19J，增幅达到了51%和68%。在试样表面达到相同龟裂程度时，稀土含量为0.008%和0.032%的试样所需的冷热循环周次比不加稀土的试样分别提高了35%和69%。以增加小于0.3%的成本，可提高51%~68%的冲击韧性，效益非常可观。这也为降低钢的成本，提高经济效益提供了新的途径。

[返回上页](#)