稀土对高 Nb 钢奥氏体晶粒长大行为影响*

李亮军，王 琨

（内蒙古包钢钢联股份有限公司轨梁轧钢厂，内蒙古 包头 014010）

摘 要： 钢中奥氏体晶粒越细小，经过组织转变后组织的力学性能越好。本实验利用 Gleeble－1500D 热模拟机模拟稀土高 Nb 钢热处理过程，并对试样进行 TEM 观察与分析，研究稀土对在加热时不同保温时间下奥氏体晶粒大小的影响。结果表明：稀土能有效抑制加热过程中奥氏体晶粒长大，具有调整晶粒稳定性的作用，并且稀土降低沉淀相溶解的温度，促进第二相粒子在奥氏体中的溶解。

关键词： 稀土；奥氏体晶粒；第二相粒子

中图分类号： TG115.21⁺3 **文献标识码：** B **文章编号：** 1009－5438(2017)04－0037－04

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2017.04.010

Effect of Rare Earth on Austenite Grain Growth Behavior in High Nb Steel

LI Liang－jun, WANG Kun

(*Rail and Beam Plant of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp.*, *Baotou* 014010, *Nei Monggol*, *China*)

Abstract: The smaller the austenite grain in steel is, the better the mechanical properties of structure are after structural transformation. In this paper, the Gleeble－1500D thermal simulator is used to simulate the heat treatment process of rare earth high Nb steel, and the TEM observation and analysis are carried out on the test pieces to study the effect of rare earth on austenite grain size in different holding time. The results show that: Rare earth can effectively inhibit the austenitic grain growth in heating process and play a role in adjusting the grain stability. In addition, rare earth can reduce the temperature of precipitation phase and promote the dissolution of second－phase particles in austenite.

Key words: rare earth; austenite grain; second－phase particle

稀土元素在金属材料中的研究和应用已有80多年的历史，稀土因独特的电子壳结构而具有极强的化学活性。目前，稀土作为中间合金已广泛用于钢铁、机械、汽车和军事工业，被认为是发展21世纪新一代高强韧钢中有效提高高强钢韧性的重要元素。我国是稀土资源大国，将稀土资源优势转化为钢铁产品的品种优势和经济优势，扩大稀土在钢中的应用范围，是科研人员研究的方向之一[1－4]。本实验研究了高 Nb 钢在奥氏体区保温过程中稀土对奥氏体晶粒尺寸的影响，并结合现有研究成果，确定了稀土在高 Nb 钢高温加热中的作用。

1 实验材料与实验方法

1.1 实验材料及腐蚀方法

利用容量为5 kg的真空感应熔炼炉炼得A、B、C三种实验用钢，其中，实验钢A不加稀土元素；实验钢B加入少量稀土元素La，实验钢C加入较多的稀土La。具体化学成分（质量分数）见表1。将熔

* 收稿日期：2017－05－08

作者简介：李亮军（1986－），男，山西省朔州市人，硕士，工程师，现从事钢轨热处理技术工作。

炼后的钢锭锻造成宽33 mm、厚50 mm的长方体锻坯，再用线切割将试样切割成Φ8 mm×15 mm的热模拟样，在Gleeble－1500D上进行热模拟实验。实验后将试样纵向切开，打磨抛光，利用苦味酸溶液(蒸馏水70 mL＋少量海鸥牌洗头膏(1～2 g)＋苦味酸2.5 g(应保证高温加热后器皿底部仍有少量未溶苦味酸)＋二甲苯(1滴)＋盐酸(1滴)氢氟酸(1滴，以控制腐蚀速度)＋极少量$CuCl_2$，侵蚀时使用控温控时水浴锅)腐蚀晶界[5]。为了保证每种成分至少300个晶粒被测量，随机采集金相照片各4张，采用图像处理软件Image－Tool测定晶粒大小。

表1 实验用钢的化学成分(质量分数) %

编号	C	Si	Mn	P	S	Nb	Al	La
A	0.081	0.41	0.66	0.014	<0.01	0.090	0.021	0
B	0.079	0.40	0.64	0.015	<0.01	0.093	0.037	0.004～0.006
C	0.064	0.41	0.69	0.014	<0.01	0.095	0.049	0.009～0.013

1.2 热模拟工艺的确定

将Φ8 mm×15 mm热模拟试样在Gleeble－1500D热模拟机上模拟加热保温过程。为保证在加热过程中合金元素能够充分固溶，且不会因为奥氏体化温度过高或在高温下保持时间过长而造成的奥氏体晶粒粗化。必须确定合理的升温速度、保温温度和保温时间。文献[6]指出，在1 250 ℃加热温度下，合金元素固溶程度较好。制定热处理工艺见表2：

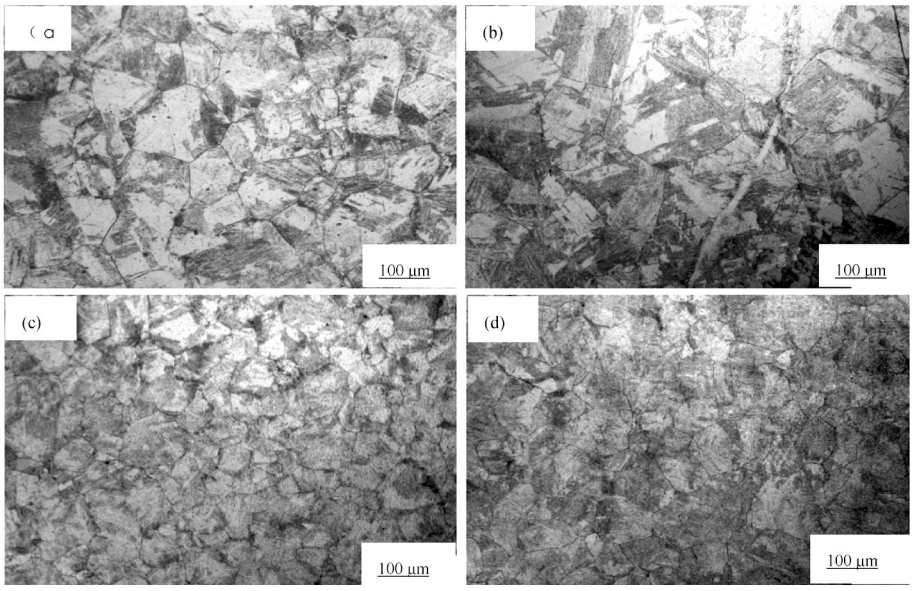
表2 热处理工艺

加热速度 /(℃·s^{-1})	加热温度 /℃	保温时间 / min	淬火介质
10	1250	5、10	冰盐水

2 实验结论与讨论

2.1 保温时间对奥氏体晶粒尺寸的影响

实验钢在奥氏体化温度下保温时会发生奥氏体晶粒长大，而奥氏体晶粒的长大是依靠晶界迁移完成的[7]，但无论是缓慢长大，还是急剧长大，都是大晶粒吞并小晶粒，或许多小晶粒合并成大晶粒的过程。图1给出了实验钢在设定的加热温度下保温不同时间后的奥氏体晶粒照片，利用Image－Tool测定晶粒平均直径结果见表3：



(a) A#5 min (b) A#20 min(c) B#5 min(d) B#20 min

图1 在1 250 ℃不同保温时间奥氏体晶粒大小

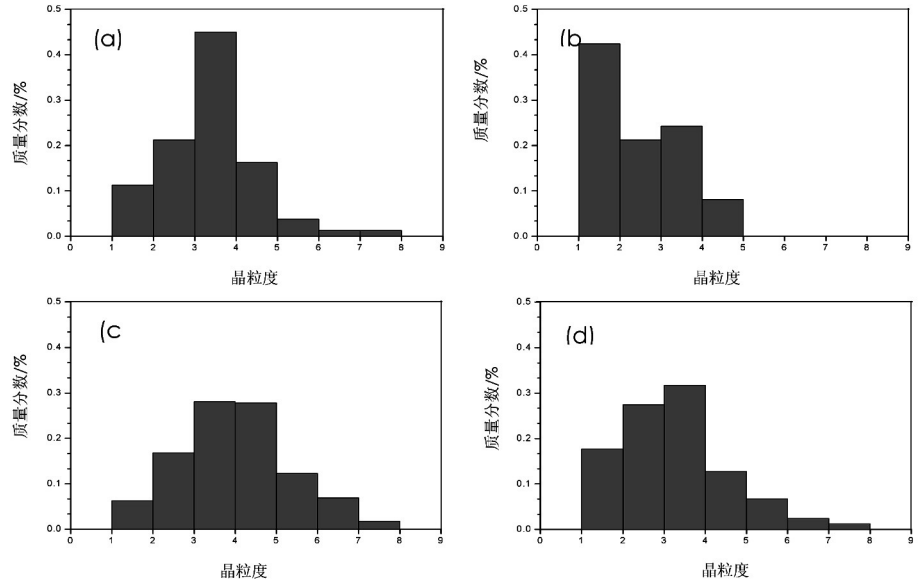
对比表3中不同成分的实验钢在不同保温时间下的奥氏体晶粒尺寸，发现随着保温时间增加，实验钢A、B、C奥氏体晶粒均有所长大，在保温5 min时，晶粒尺寸相差不大，但随着保温时间的增加，晶粒尺寸相差越加明显。与实验钢B、C不同，实验钢A(未添加稀土)随保温时间的延长奥氏体晶粒粗化明显，奥氏体长大速率较快。而含有稀土的实验钢B、C在相同保温时间下，奥氏体晶粒尺寸增长缓慢。

表 3　保温时间对奥氏体晶粒尺寸的影响

实验钢	晶粒平均直径/μm	
	保温 5 min	保温 20 min
A	105	151.5
B	83	114.4
C	100	118.0

另外，由表 3 可以看出，当稀土加入量不同时，奥氏体晶粒尺寸也有所差别，尤其在保温时间较短时，实验钢 B(少量稀土)与实验钢 C 晶粒尺寸差别明显，但随着保温时间的延长，这种差别逐渐减小。由此可以看出，稀土的添加能有效有效抑制钢中奥氏体晶粒尺寸，达到细化晶粒的目的，但是随稀土含量的不同其抑制作用规律也不同。

晶粒度是表示晶粒大小的一种尺度，晶粒大小直接影响材料最终的机械性能。利用 image - tool 统计奥氏体晶粒尺寸分布结果见图 2。



(a) A#5 min (b) A#20 min (c) B#5 min (d) B#20 min

图 2　不同保温时间小奥氏体晶粒尺寸分布

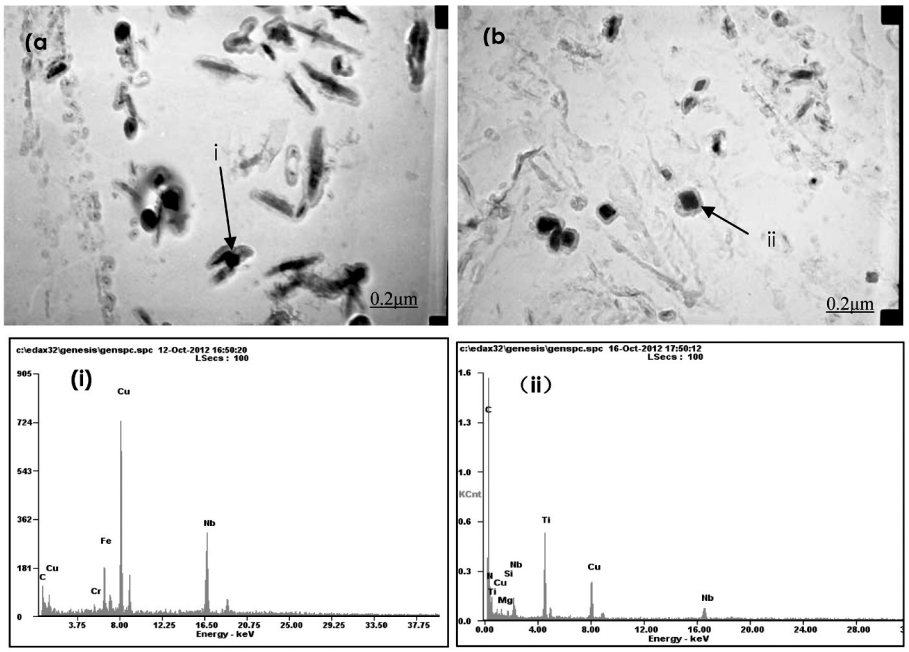
分析图 2 可知，未添加稀土的 A 钢在保温5 min 时，晶粒大小主要分布于 1 级到 5 级晶粒度之间，且在 3 级到 4 级居多。当保温时间达到 20 min 时，晶粒大小分布发生明显变化，1 到 2 级晶粒度的大晶粒占据 42.4%，原先包含的少量的细小晶粒均已消失，此时占据空间的主要以大晶粒为主，此时奥氏体晶粒长大更多是通过晶粒间的相互吞食来实现。而对于实验钢 B 当保温时间为 5 min 时，钢在添加稀土后晶粒尺寸基本在各个范围都有分布，同时随着保温时间的增加，虽然有向大晶粒过渡的趋势，但进行缓慢，晶粒增长速率变缓，各尺寸晶粒分布变化不大。

可以看出，随着保温时间的延长，钢中添加稀土不仅可以抑制奥氏体晶粒长大，达到细化晶粒的目的，而且可以显著提高加热保温过程中晶粒的稳定性。

2.2　稀土对第二相固溶的影响

图 3 为 A、B 实验钢在 1 250 ℃加热保温后的第二相形貌照片，其中 a、b 分别为 A、B 保温 5 min 后的照片，(i)、(ii) 是对应图中第二相粒子能谱。

对比复型照片，可以看出，A 号钢未固溶相的体积分数最大，由于高温中第二相粒子尺寸较大，即使残余沉淀相数量可观，但也不能有效地钉扎奥氏体晶粒的长大。因为高 Nb 钢中固溶 Nb 较多，由此造成沉淀相在表面能差的驱动下 Ostwald 熟化效应明显[8]，而实验钢 B 中因为大部分沉淀相溶解于奥氏体中，合金元素通过固溶拖曳的作用抑制奥氏体晶粒的长大。稀土和 Nb、Ti、V 等活度相互作用系数均为负值，即稀土降低了 Nb、Ti、V 等合金元素的活度[9]，使沉淀相的完全溶解温度降低，促进沉淀相的溶解。同时结合能谱分析看到相对高熔点的 Ti 的碳化物，稀土对 Nb 沉淀相的抑制作用更强。



(a) A#5 min (b) B#5 min

图 3 TEM 析出物复型及对应能谱照片

另外，尽管 B#钢和 C#钢在保温 5 min 时析出相体积分数非常接近，但其晶粒尺寸还是存在一定的差别，B#钢(稀土含量较低)晶粒尺寸要小于 C#钢(稀土含量较高)。表明在锻态钢中，稀土有促进沉淀相溶解的作用，但稀土过量促进作用反而降低。

3 结论

(1) 在高 Nb 钢中添加稀土元素后能有效的抑制奥氏体晶界的迁移，从而抑制奥氏体晶粒粗化，最终达到细化奥氏体晶粒目的，并且随着保温时间的延长，抑制效果更佳明显。另外，随着稀土含量的不同，其抑制奥氏体晶粒长大效果也有差别。

(2) 稀土可以显著降低奥氏体晶粒长大速率，增加奥氏体区晶粒的稳定性。同时，在奥氏体化温度中，稀土可以促进第二相粒子的固溶，从而固溶拖曳抑制奥氏体晶粒的长大。

参 考 文 献

[1] 王龙妹. 稀土元素在新一代高强韧钢中的作用和应用前景 [J]. 中国稀土学报，2004，22(1)：48－54.

[2] 王龙妹，杜挺，卢先利，等. 微量稀土元素在钢中的作用机理及应用研究 [J]. 稀土，2001，22(4)：37－40.

[3] Xing Pengfei，Li Feng，Guo Jing. High temperature dephosphorus behavior of Baotou mixed rare earth concentrate with carbon [J]. Journal of rare earths，2010，(22)：194－197.

[4] 刘宏亮，刘承军，王云盛，等. 稀土对 X80 管线钢中铌元素赋存状态的影响 [J]. 稀土，2011，32(5)：6－10.

[5] 宋文钟，方琪，任慧平，等. 稀土微合金钢奥氏体晶界显示技术 [J]. 物理测试，2010，28(6)：6－9.

[6] 阴树标，刘清友，孙新军，等. 高铌钢奥氏体区变形抗力数学模型及试验研究 [J]. 昆明理工大学学报，2007，32(2)：21－25.

[7] 苏德达. 奥氏体晶粒长大与晶界迁移 [J]. 金属制品，2004，30(5)：51－54.

[8] 王远琦，陈小伟，李志华，等. Nb_Ti 微合金钢中的奥氏体晶粒长大行为研究 [J]. 钢铁，2010，45(4)：72－75.

[9] 林勤，陈邦文，唐历，等. 微合金钢中稀土对沉淀相和性能的影响 [J]. 中国稀土学报，2002，20(3)：257－260.