变形温度对0.05C-0.13Nb钢组织和析出物的影响

文建华[1,2] 孙新军[2] 刘清友[2] 阴树标[2] 项金钟[1]
(1 云南大学物理科学技术学院,昆明650091; 2 钢铁研究总院结构材料研究所,北京100081)

摘 要 用Gleeble-1500D热模拟试验机和电子显微镜研究了在950~750 ℃不同温度下变形50%后0.05C-0.13Nb钢的组织和析出相。结果表明,随变形温度由950 ℃下降至750 ℃,0.05C-0.13Nb钢中多边形铁素体含量(体积分数)由20%增至80%,多边形铁素体晶粒尺寸由9 μm降至4 μm;变形后的组织由多边形铁素体、粒状贝氏体和1~3 μm马氏体/奥氏体岛组成;钢中的析出物为1~10 nm的Nb(C,N),随变形温度降低析出物数量增加。

关键词 变形温度 0.13Nb钢 组织 析出物

Effect of Deforming Temperature on Structure and Precipitates of 0.05C-0.13Nb Steel

Wen Jianhua[1,2], Sun Xinjun[2], Liu Qingyou[2], Yin Shubiao[2] and Xiang Jinzhong[1]
(1 School of Physical Science and Technology, Yunnan University, Kunming 650091;
2 Institute for Structural Materials, Center Iron and Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The structure and precipitates of 0.05C-0.13Nb steel deformed by 50% at different temperature between 950~750 ℃ have been studied by Gleeble-1500D thermal simulation machine, SEM and TEM. Results showed that with deforming temperature decreasing from 950 ℃ to 750 ℃, the polygonal ferrite content (volume percent) in 0.05C-0.13Nb steel increased from 20% to 80% and grain size of polygonal ferrite decreased from 9 μm to 4 μm; the deformed structure in steel consisted of polygonal ferrite, grain bainite and 1~3 μm martensite/austenite island; and the amount of 1~10 nm precipitates Nb(C,N) in steel increased with decreasing deformed temperature.

Material Index Deforming Temperature, 0.13Nb Steel, Structure, Precipitates

铌能细化晶粒,并通过Nb(C,N)的析出强化和相变控制提高材料的强度[1-3]。近些年来,研究和开发出了高温轧制工艺(HTP),通过降低碳含量同时提高铌含量的合金设计,使钢在热机械轧制(TMCP)过程中,利用固溶铌来提高奥氏体的再结晶温度,使控制轧制可以在更高的温度进行,从而降低了轧机的负荷。然而,轧制温度的提高,亦会对钢材的组织转变和其间碳氮化物的沉淀析出产生影响,从而影响材料的性能[4,5]。所以,有必要研究微合金钢在低碳高铌条件下,相关轧制参数对组织及性能的影响规律,以便进一步优化铌钢的轧制工艺。

1 试验材料与方法

试验钢的化学成分(%)为:0.05C、0.17Si、1.40Mn、0.13Nb、0.010P、0.002S、0.006N。热模拟和单向压缩试验在Gleeble-1500D热模拟试验机上进行,试样尺寸为Φ8 mm×12 mm。试样加热到1 250 ℃,均热保温5 min,以20 ℃/s的冷却速度分别冷至950,900,850,800,750 ℃后以1/s的变形速率变形50%,完成后以5 ℃/s的冷却速度冷至室温。使用截线法统计多边形铁素体的晶粒尺寸。

2 试验结果及讨论

2.1 显微组织

从图1可以看出,随变形温度下降,针状铁素体减少,多边形铁素体增多,且晶粒尺寸减小。变形温度较高时,组织由针状铁素体和多边形铁素体组成,此时针状铁素体较多,多边形铁素体的晶界也较为连续和光滑;当变形温度为750 ℃时,组织大部分转变为多边形铁素体,且晶粒尺寸明显减小,晶界也变得模糊。进一步对组织中的多边形铁素体晶粒尺寸和体积分数进行定量分析(图2)发现,在950~850 ℃这一范围变形后,多边形铁素体晶粒尺寸的减小幅度不大,只有1.5 μm左右,而在850~750 ℃这一范围变形后,晶粒尺寸从约7.5 μm减小到4 μm。同时,对多边形铁素体体积分数的定量分析表明,随变形温度下降,组织中多边形铁素体体积分数增加;在950 ℃变形,所得到的室温组织中多边形铁素体较少,体积分数为20%左右,当变形温度降低到750 ℃后,体积分数增加到80%以上。

对组织中针状铁素体的微细织构进行分析,发现其由准多边形铁素体、粒状贝氏体和马氏体/奥氏

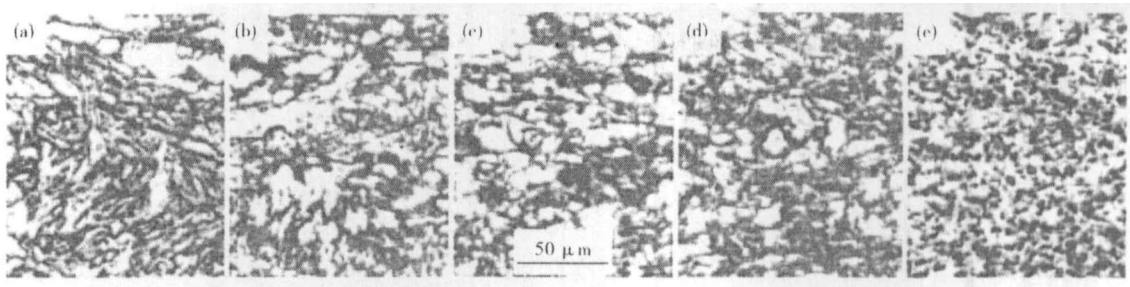

图 1　0.05C-0.13Nb 钢的组织形貌,变形温度:(a) 950 ℃; (b) 900 ℃; (c) 850 ℃; (d) 800 ℃; (e) 750 ℃

Fig. 1　Structure morphology of 0.05C-0.13Nb steel, deforming temperature: (a) 950 ℃; (b) 900 ℃; (c) 850 ℃; (d) 800 ℃; (e) 750 ℃

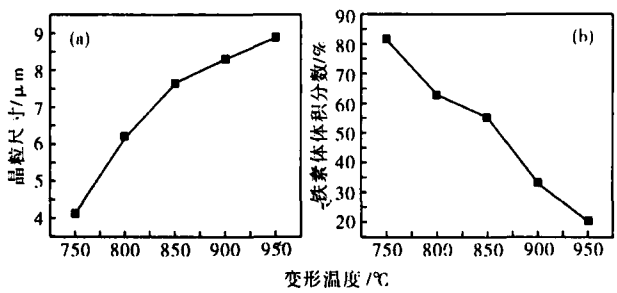

图 2　变形温度对 0.05C-0.13Nb 钢中多边形铁素体晶粒尺寸(a)和体积分数(b)的影响

Fig. 2　Effect of deformation temperature on grain size (a) and volume percent (b) of polygonal ferrite of 0.05C-0.13Nb steel

体(M/A)岛组成,其 SEM 形貌见图 3(a)。M/A 岛尺寸有大有小,小的尺寸在 1 μm 以下,大的 2 ~ 3 μm,且形状极不规则。M/A岛边界上多为连续分布的马氏体,并逐渐向中间延伸,把奥氏体分隔开来。这可能是由于在较低温度下,一些未转变的细小过冷奥氏体小岛在冷却过程中,由粒子的界面或位错线开始逐渐向马氏体转变,但有一部分则来不及转变,以残余奥氏体的形态保留了下来。图 3(b)为透射电镜观察到的M/A岛形貌,黑色部分为马氏体。

2.2　析出物

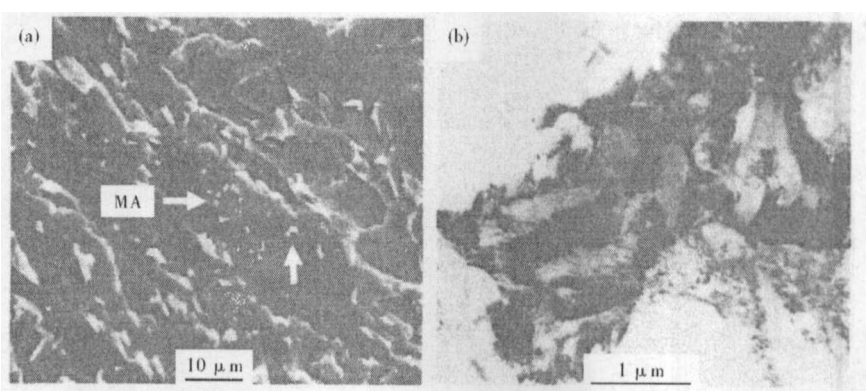

图 3　0.05C-0.13Nb 钢的组织形貌:(a) 针状铁素体,SEM;(b) M/A 岛,TEM

Fig. 3　Structure morphology of 0.05C-0.13Nb steel: (a) acicular ferrite, SEM; (b) M/A island, TEM

选取在 900 ℃和 850 ℃变形冷却后的试样进行透射电镜分析,其 TEM 形貌示于图 4。在 900 ℃变形时,Nb(C,N)主要在奥氏体晶界或亚晶界上形成,析出的量很少。在 850 ℃变形后,析出情况较为复杂,观察到 3 种类型的 Nb(C,N)析出相:(1)部分 Nb(C,N)在奥氏体晶界或亚晶界上析出,析出相为近球形,尺寸较大,粒径约 10 nm;(2)在 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变过程中发生了相间析出,析出物呈有序排列,点列间距约 30 nm;(3)一部分 Nb(C,N)在铁素体中均匀沉淀析出。

相间析出和在铁素体中均匀析出的析出相与铁素体之间存在 Baker-Nutting 位向关系,碳氮化铌在各个方向上与基体的错配度不一致,为使体积一定的 Nb(C,N)与铁素体之间的总界面能最小,析出相为圆片状[6]。进一步分析得知,相间和铁素体中均匀析出的 Nb(C,N)尺寸较小,粒径 2 ~ 5 nm。图 4(b)中标出了析出相在 850 ℃变形冷却后各种不同的析出区域。

试验钢在 900 ℃变形时,Nb(C,N)析出总量较少,固溶铌较多,因而可以极大地降低 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变的相变温度,并在冷却后获得较多的针状铁素体组织[2,6,7]。在 850 ℃变形时,绝大多数的 Nb(C,N)为

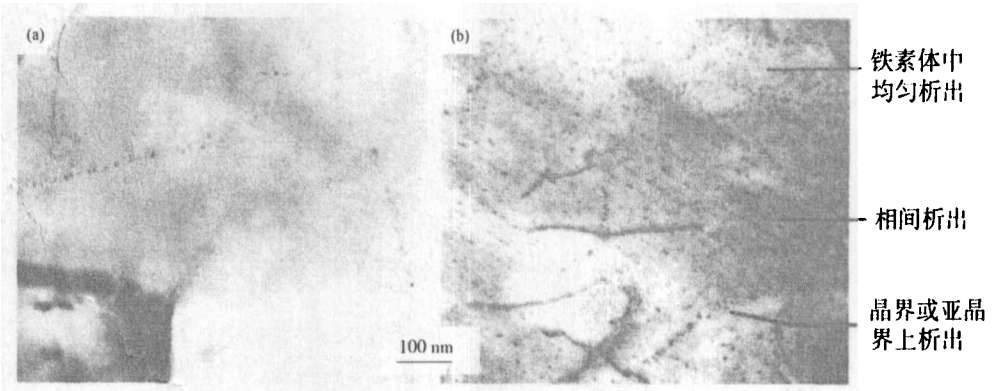

图4 0.05C-0.13Nb 钢组织形貌,TEM:变形温度(a) 900 ℃;(b) 850 ℃

Fig. 4 Structure morphology of 0.05C-0.13Nb steel, TEM: deformation temperature (a) 900 ℃ and (b) 850 ℃

相间析出和在铁素体中均匀析出,此时γ/α相变已经发生或完成,故大量析出相的作用主要体现在细晶强化和析出强化上。当 Nb(C,N)在相间和铁素体中均匀析出时,一定程度上阻碍了铁素体晶粒长大,使铁素体晶粒得到细化,并在位错绕过时在其周围留下位错环,使强度得以提高[8~10]。由此,对于铌含量较高的低碳微合金钢,配合一定的控轧工艺,可以获得大量的 Nb(C,N)析出相,并可通过改变控轧工艺,改变 Nb(C,N)的沉淀过程和析出量,从而改善钢材的强韧性。

通过比较,在900 ℃变形冷却后的组织中没有相间析出,因为在850 ℃变形时,试验钢 γ→α 转变的相变温度 Ar_3 比900 ℃变形时要高,Nb(C,N)形核速率足够快,跟上了γ/α相界面的迁移速度。而在900 ℃变形时,Nb(C,N)的形核速率较慢,跟不上 γ→α 转变时相界面的迁移,故不发生相间析出。

此外,提高微合金钢铌含量的目的之一是提高钢中固溶铌的含量,从而提高奥氏体的再结晶温度,使控制轧制可以在更高的温度进行[4,11]。然而,试验结果表明,高的变形温度不利于 Nb(C,N)的沉淀析出,并使生成多边形铁素体的晶粒尺寸变大,从而使材料的析出强化和细晶强化等作用显著减弱。尽管较高温度时能形成较多具有高位错密度的针状铁素体组织,但材料的硬度仍然较低(测定了在950,900,850,800,750 ℃变形后材料的显微硬度 HV 值分别为:254,253,260,266,275)。

3 结论

(1)随变形温度下降,0.05C-0.13Nb 钢中针状铁素体体积分数减少,多边形铁素体体积分数增大,晶粒尺寸减小。

(2)变形温度对 0.05C-0.13Nb 钢中 Nb(C,N)的析出影响较大;在900 ℃变形,Nb(C,N)只在奥氏体晶界或亚晶界上形成,而在850 ℃变形后,Nb(C,N)除在奥氏体晶界或亚晶界上形成外,还在铁素体中大量沉淀,并存在相间析出。

(3)对于铌含量较高的低碳微合金钢,可采用控轧控冷工艺得到最佳强韧性。

参考文献

1 付俊岩,东 涛. 现代含铌钢技术的发展与应用市场. 杭州:2004年全国低合金钢学术年会论文集,2004

2 雍岐龙,马鸣图,吴宝榕. 微合金钢-物理和力学冶金. 北京:机械工业出版社,1989:405

3 Senuma T. Present Status of Future Prospects for Precipitation Research in the Steel Industry. ISIJ,2002,4(1):1

4 Douglas G Stalheim. The Use of High Temperature Processing (HTP) Steel for High Strength Oil and Gas Transmission Pipeline Applications. HSLA Steels 2005 and ISUGS 2005 Proceedings (HSLA Steels). Sanya,2005,699

5 Anthony J Deardo. 铌在钢中物理冶金基本原理. 铌·科学与技术. 北京:冶金工业出版社,2003:271

6 Itman A,Cardoso K R,Kestenbach H J. Quantitative Study of Carbonitride Precipitation in Niobium and Titanium Microalloyed Hot Strip Steel. Materials Science and Technology (UK),1997,1(13):49

7 雍岐龙. 钢铁材料中的第二相. 北京:冶金工业出版社,2006:267

8 Yang Shanwu, Wang Xuemin. Behavior of Precipitation in Bainitic Steel during Relaxation Processing of RPC Technique. Journal of University of Science and Technology Beijing,2004,3(11):230

9 Hong S G,Kang K B,Park C G. Strain-induced Precipitation of NbC in Nb and Nb-Ti Microalloyed HSLA Steels. Scripta Meterialia,2002,46(2):163

10 Speer J G,Hansen S S. Austenite Recrystallization and Carbonitride Precipitation in Niobium Microalloyed Steels. Metall. Trans. A. 1989,20(1):25

11 李 扬,刘雅政,何建中,等. CSP 工艺中铌的析出特性及对微观组织的影响. 2005 中国钢铁年会论文集,2005:810

文建华(1982-),男,2004 年云南大学毕业,从事低合金钢等材料研究。

收稿日期:2006-12-05