

含铌微合金钢的高温塑性

张丽珠

(济南济钢设计院, 山东 济南 250101)

摘要: 综述了不同温度区间含铌微合金钢的高温塑性。研究发现, 随着钢中铌含量的增加, 钢的高温塑性变差, 最小塑性温度区移至单相 γ 低温区; 在单相 γ 低温区, 由于NbC、Nb(CN)的析出, 降低了钢的塑性; 在 $\gamma+\alpha$ 两相区, Nb对钢的塑性影响较小, 钢的脆性是沿 γ 晶界薄膜状先共析铁素体 α 相的析出造成的。

关键词: 微合金钢; 高温塑性; 单相 γ 低温区; $\gamma+\alpha$ 两相区; 先共析铁素体

中图分类号: TF762⁺.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-4620(2001)04-0041-03

Hot ductility of Nb-bearing microalloyed steel

ZHANG Li-zhu

(Jigang Design Institute of Jinan, Jinan 250101, China)

Abstract: This paper describes comprehensively the hot ductility of Nb-bearing microalloyed steel in different temperature range. It points out NbC and Nb(CN) precipitates lowering the ductility of the steel in the low temperature single phase γ region. In the $\gamma+\alpha$ two-phase region, precipitation of proeutectoid ferrite film along austenite grain boundaries is the main reason for the embrittlement of the steel.

Key words: microalloyed steel; hot ductility; low temperature single phase γ region; $\gamma+\alpha$ two-phase region; proeutectoid ferrite

在发展连铸技术提高连铸比的过程中, 消除铸坯缺陷, 提高铸坯质量是非常重要的问题。随着连铸连轧、热送热装技术的发展, 对铸坯质量要求也越来越高, 生产无缺陷高温铸坯, 以满足后部工序的需要。铌是高强度低合金钢中加入很广泛的合金元素, 采用控轧控冷工艺, 轧制过程中微细的NbC、Nb(CN)的析出能够细化钢的组织, 并对钢起到沉淀强化作用, 从而得到强度高、韧性好的钢材。但是在连铸过程中, 由于钢中微细的氮化物、碳氮化物的析出, 钢的高温塑性变差, 铸坯表面裂纹, 尤其是横裂、角横裂发生频繁, 严重影响铸坯的表面质量。

1 铌对钢高温塑性的影响

图1、2分别表示了铌对钢高温强度和塑性的影响。随着铌含量的增加, 钢的高温塑性变差, 特

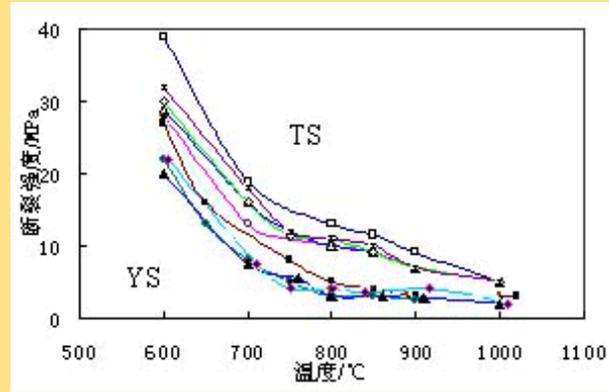


图1 Nb对钢高温强度的影响

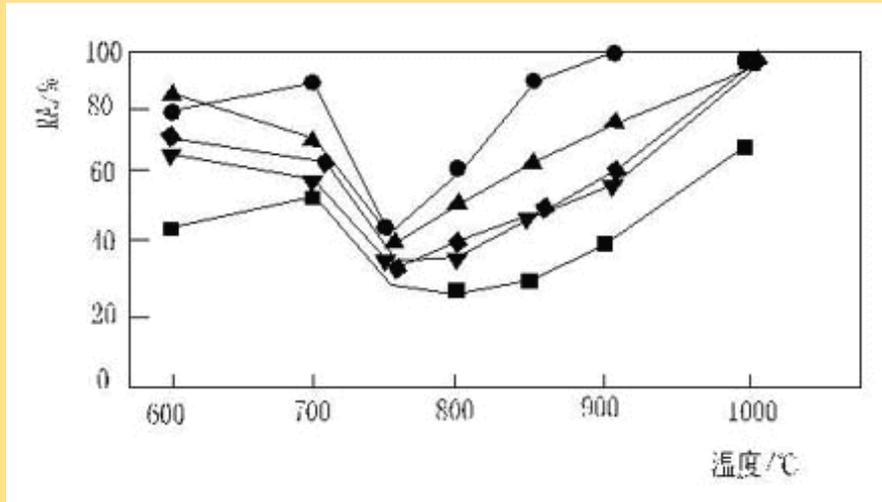


图2 Nb对钢高温塑性的影响

别是在单相 γ 低温区，这是NbC、Nb(CN)在 γ 晶界析出造成的。而在 $\gamma+\alpha$ 两相区高温区，铌含量变化对钢的高温塑性影响较小，脆化是由于沿 γ 晶界薄膜状先共析铁素体 α 相的析出；当变形温度降至700℃左右，钢的高温塑性出现恢复，此时铌又成为主要因素，破坏了钢的高温塑性⁽¹⁾。

2 含铌微合金钢在单相 γ 低温区的高温塑性

普通钢的最小塑性温度区在 $\gamma+\alpha$ 两相区，而含铌钢的脆性温度向高温移动，进入 γ 域，且钢的脆化程度明显高于普通钢。图3(a、b)分别表示了不同应变速率下不含铌钢与含铌钢高温塑性的比较⁽²⁾。

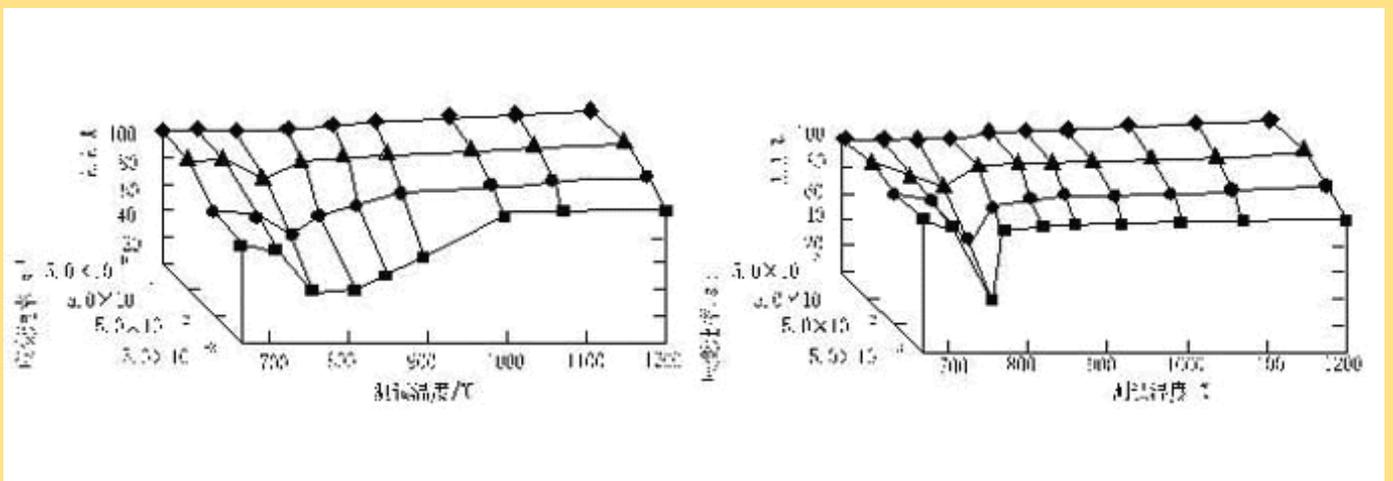


图3 不同应变速率下不含铌钢与含铌钢高温塑性

在单相 γ 低温区，铌降低钢的高温塑性主要原因是：

(1) 晶界附近形成无析出带，造成应力集中。含铌钢在变形过程中，产生两种类型的析出物：一类是晶界上较粗大的析出物，这类析出物充当了晶界微孔的形核位置；另一类是基体内细小弥散的动态析出物，这类析出物直径大约为10nm，形成于变形过程中产生的位错线上。晶界上NbC、Nb(CN)的析出消耗了铌原子，而基体内的析出物引起基体强化，因此在晶界附近形成较软的无析出带PFZs（约250nm）^{〔3〕}，使晶界析出物与基体结合力降低。应力下发生塑性变形时，无析出带上产生应力集中，沿 γ 晶界的微细析出物作为应力集中源点，与晶界脱开形成微孔，在晶界滑移作用下，微孔连接、聚合长大而产生晶间裂纹^{〔4〕}，如图4所示。析出物粒子越小，粒子之间晶间距越近，钢的塑性越低。

(2) NbC、Nb(CN)在晶界析出，促使晶界滑移，在三重点产生应力集中，造成晶界破坏。晶界滑移产生裂纹形成于单相 γ 中，而不是 α 相中，这是由于单相 γ 在变形过程中表现出的动态恢复程度较低，因而产生的变形应力和加工硬化程度较高，在晶界三重点处易产生应力集中，造成沿晶破坏。

当晶界无析出物时，晶界在滑移过程中，滑移带对晶界冲击，产生晶界阶梯，成为微孔的形核位置，此时晶界破坏需要的应力较大。当晶界出现NbC、Nb(CN)等析出物时，滑移带冲击这些微粒，使每个粒子周围产生局部应力集中，此时需要较小的应力就会在粒子周围产生孔洞，孔洞通过变形机理或空位扩散机理聚合长大，形成晶界裂纹，使钢的塑性变差^{〔5〕}。

(3) NbC、Nb(CN)在晶界析出，抑制动态再结晶进行。晶界迁移是提高钢的高温塑性的重要因素。

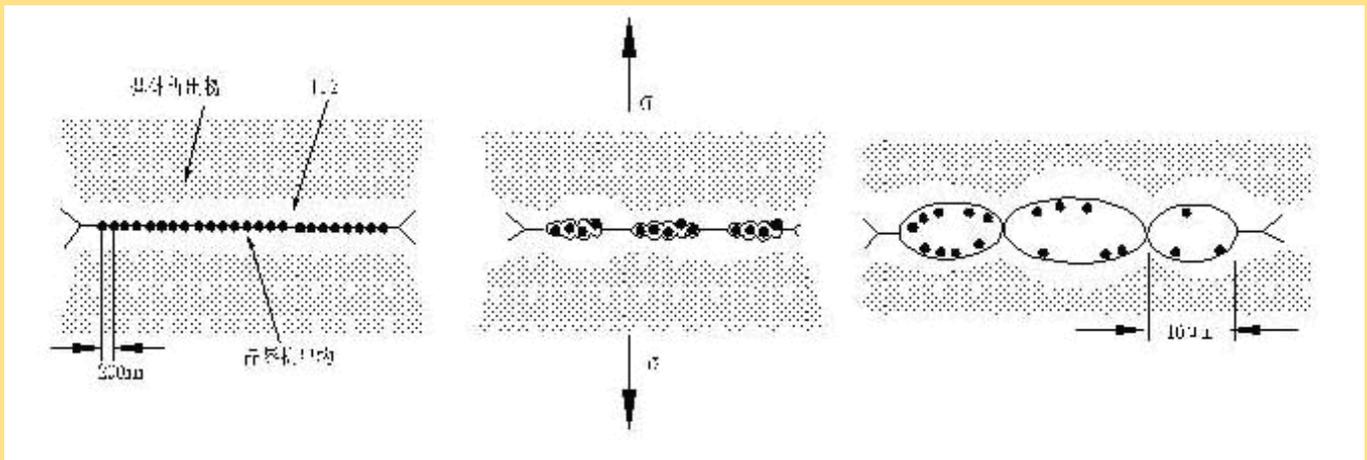


图4 含Nb微合金钢由于显微孔洞的聚合而导致钢的断裂

这是由于变形早期产生的微裂纹通过晶界迁移而隔离在原晶界处，阻止微孔的聚合长大，从而提高钢的高温塑性。尽管晶界迁移可以孤立裂纹的聚合长大，但裂纹反过来对晶界施加拖滞力和捕捉力，阻碍晶界移动。在合适的拉伸应力作用下，通过晶格空穴扩散，裂纹可能沿着捕捉的晶界长大，最终使晶界再次开裂。只有当晶界迁移驱动力大于裂纹对晶界的拖滞力时，才能消除钢的高温脆性。

动态再结晶是获得高的晶界迁移驱动力的有效途径，形核于晶界上凸缘处。此处由于亚晶界对原晶界的钉扎，晶界两侧的变形能不同，晶界迁移相对较快。随着再结晶的进行，再结晶晶粒覆盖了整个原始晶界。钢中固溶的铌由于提高再结晶临界应变 ε_c ，从而抑制了动态再结晶^{〔1〕}。另外，析出相粒子钉扎在 γ 晶界，阻挠晶界流动，使再结晶温度向高温移动，降低了钢的高温塑性，促使晶间裂纹的形核和长大。

3 含铌微合金钢在 $\gamma+\alpha$ 两相区的高温塑性

在 $\gamma+\alpha$ 两相区，含铌钢的塑性降低是由于沿 γ 晶界薄膜状先共析铁素体的析出造成的。在这一温度区域， α 相的强度大约为 γ 相的1/4，应力变形主要集中在 α 相内。进一步说， α 相的加工硬化率特小，因而局部变形增大，使晶界集中不均匀变形而产生晶界脆裂。或 α 相内存在的MnS等夹杂物周围产生空洞，聚合长大而发展成裂纹^(5, 6)，如图5所示。

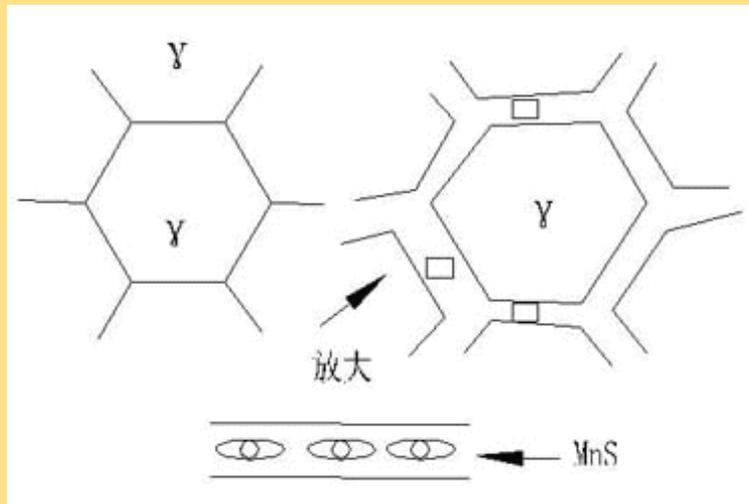


图5 α 相中微孔形成示意图

随着变形温度的降低，铁素体体积分数增加，回复容易，亚晶尺寸大，屈服应力低，可以通过变形缓冲三重点的应力集中，抑制裂纹的产生，使钢的塑性恢复。

4 结论

- 4.1 随着钢中铌含量的增加，钢的高温塑性变差，最小塑性温度区移至单相 γ 低温区。
- 4.2 在单相 γ 低温区，含铌微合金钢的高温塑性降低的主要原因为：
 - (1)晶界附近形成无析出带，造成应力集中。
 - (2) NbC 、 $\text{Nb}(\text{CN})$ 在晶界析出，促使晶界滑移，在三重点处产生应力集中，造成晶界破坏。
 - (3) NbC 、 $\text{Nb}(\text{CN})$ 在晶界析出，抑制了动态再结晶的进行。
- 4.3 在 $\gamma+\alpha$ 两相区，由于沿 γ 晶界薄膜状先共析铁素体的析出，降低了钢的高温塑性，当 α 相体积分数增加时，钢的塑性出现恢复。

参考文献：

- 1 Chiaki OUCHI and Kazuaki MATSUMOTO, Hot Ductility in Nb-bearing High -strength Low-alloy Steel [J]. Transactions ISIJ, 1982, 22: 181~189
- 2 Hirowo G. SUZVKI, Satoshi NISHIMORA and Shigehiro YAMAGUCH, Characteristics of Hot Ductility in Steel Subjected to the Melting and Solidification[J]. Transaction ISIJ, 1982, 22: 48~56
- 3 Y. Ohmori and Y. Maehara, Precipitation of NbC and Hot Ductility of Austenitic Stainless Steels[J]. Transactions of the Japan Institute of Metals, 1984, 25(3): 160~167
- 4 Y. MAEHARA and Y. OHMORI, The Precipitation of AlN and NbC and the Hot Ductility of Low Carbon Steels[J]. Materials Science and Engineering, 1984, 62: 109~119

5 B.Mintz, S.Yue and J.J.Jonas。 Hot ductility of steels and its relationship to the problem of transverse cracking during continuous casting[J]. International Materials Reviews, 1991, 36(5): 190~198

6 D.N.C. rowther B.Mintz。 Influence of carbon on hot ductility of steels[J]. Materials Science and Technology, 1986, 2(7): 672

[返回上页](#)