DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.09.003

硼对 HSLA 钢高温塑性变形行为的影响

金　莹[1],朱建雷[1],邓　超[2],崔慧娟[1]
(1. 咸阳职业技术学院 机电学院,陕西 咸阳 712000; 2. 西安理工大学 材料科学与工程学院,陕西 西安 710048)

摘　要:通过高温热拉伸实验研究了硼对 HSLA 钢高温塑性变形行为的影响。研究了不同温度下的断面收缩率、力-行程曲线以及断口组织形貌。结果表明,含硼试验钢的热塑性有明显改善,其塑性低谷变浅;另一方面,硼对奥氏体晶界可以起到强化作用,可起到应力蓄积作用,进而产生足够的驱动力和激活能促使动态再结晶提前发生,使高塑性区向低温区偏移。

关键词:硼微合金化;动态再结晶;断裂行为;热塑性;高温拉伸

中图分类号:TG142;TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)09-0759-04

Effect of Boron on High Temperature Plastic Deformation Behavior of HSLA Steel

JIN Ying[1], ZHU Jianlei[1], DENG Chao[2], CUI Huijuan[1]
(1. School of Mechanical and Electrical Technology, Xianyang Vocational Technical College, Xianyang 712000, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The effect of boron on the plastic deformation behavior of HSLA steel at high temperature was studied by high temperature tensile test. Section shrinkage, force-stroke curve and microstructure of fracture were studied at different temperatures. The results show that the thermoplasticity of boron tested steel is improved obviously, and its plastic trough becomes shallower. On the other hand, boron can strengthen austenite grain boundaries and play a role of stress accumulation, and then generate enough driving force and activation energy to advance the dynamic recrystallization, so that the high plastic zone to the low temperature zone shift.

Key words: boron micro-alloying; dynamic recrystallization; fracture behavior; high temperature plasticity; high temperature tensile

微合金钢在连铸连轧工艺生产过程中,铸坯容易在振痕根部、板坯边缘以及其上表面产生裂纹,这些裂纹导致铸坯质量降低、严重影响终端钢材成品率[1-3]。大量的研究工作针对低碳低合金钢以及微合金钢,在低温奥氏体区和奥氏体-铁素体双相区这个温度区间生产过程中,造成的连铸坯的表面裂纹做了广泛的研究[4-5]。实际生产和相关研究结论表明[6-7],大部分高强度低合金钢(HSLA)连铸坯在弧形机上受到弯曲应力及矫直应力,此过程中将会发生一系列的形变和相变过程。但是,在此阶段之前,合金元素已经沿奥氏体晶界析出,形成大量沿晶第二相析出物。由于沿晶第二相的存在以及在弯曲和矫直过程中会在铸坯表面产生的应力集中,导致铸坯表面对裂纹非常敏感[8]。因此,研究微合金钢的热塑性形变行为对工业生产具有重大指导意义。本实验的主要目的是研究硼对 HLSA 钢热塑性形变行为的影响,通过实验分析其相应的塑性低谷温度区间,并给实际生产提供实验依据。

1　实验材料及方法

实验材料所用原材料为半工业试验产品,其化学成分如表 1。通过线切割、车铣等工序,制得尺寸为 ϕ10 mm×110 mm 的圆柱状热拉伸试样。采用 Gleeble 热模拟试验机在不同温度下进行高温拉伸实验,实验所采用的拉伸工艺为 10 ℃/s 升温至 1 350 ℃保温 30 s,然后 3 ℃/s 降温至实验温度保温

表1 试验钢化学成分 w(%)
Tab.1 The chemical composition of the tested HSLA steel

编号	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Ti	B
1#	0.16	0.18	0.48	0.015	0.003	0.01	0.001	0.001	0.000 1
2#	0.16	0.26	0.49	0.011	0.005	0.01	0.01	0.011	0.001 4

收稿日期:2021-07-13
基金项目:陕西省教育厅专项科学研究计划(21JK0972),咸阳职业技术学院博士科研启动基金项目(2021BK02)
作者简介:金　莹(1974—),陕西商洛人,副教授,硕士.研究方向:机械制造及材料设计.电话:15891653091,Email:372747813@qq.com

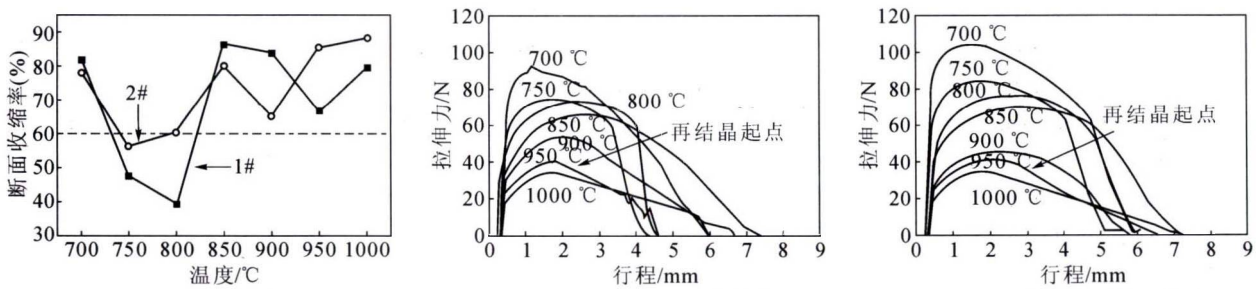
1 min 进行拉伸，应变速率为 5×10^{-3} s^{-1}，断裂后空冷至室温，实验温度为：700、750、800、850、900、950、1 000 ℃。

2 实验结果及分析

2.1 高温塑性测试结果及分析

在连铸过程中，当断面收缩率大于 60%时铸坯不易出现裂纹，而当收缩率小于 60%时，在连铸过程中铸坯的裂纹敏感性显著增高[9-11]。所以，将断面收缩率等于 60%作为门槛值，来划分高塑性区和低塑性区的范围，断面收缩率低于 60%所对应的温度区间定义为塑性低谷区。由图 1 高温拉伸曲线可知，对于两个试验钢来说，低温区塑性低谷区温度为 750~800 ℃。在此温度范围内，1# 试验钢的 R_A 为 39%~47%；2# 试验钢的 R_A 为 56%~60%。在生产过程中，连铸坯顶弯、矫直温度应避开此温度区间，即板坯的末端矫直温度应该大于 800 ℃。

通常，在 850 ~1 000 ℃，含铌、钒钢在较低的应变速率下形变过程中均会发生铌的碳氮化物的形变诱导析出，不含硼的微处理钢的热塑性往往会因此而受到较大的影响，这就说明了为什么 1# 钢在 950 ℃表现出较低的塑性，而 2# 钢在 900 ℃表现出较低的塑性。其主要原因是 1# 钢只是经过少量的铌微处理，当在 950 ℃形变时，铌的析出相才对热塑性的影响表现出来；而 2# 钢则含有 Nb、V 等微合金元素，尤其是钒，具有比 Nb 更低的析出温度，所以 2# 钢在 900 ℃就表现出了较低的热塑性。对于含硼的微处理钢由于硼具有较好的晶界强化作用，从而在 900 ℃以上的区间 2# 试验钢表现出较好的热塑性，由于硼、钛的加入，2# 钢在 950 ℃比 1# 钢的断面收缩率开始有了明显的提高了；换而言之，在断裂之前，含硼钢能够承受更大的应力，而这一部分更大的应力将大于此温度发生动态再结晶所需的临界应力，这将导致动态再结晶温度的降低，如图 1 (b)、(c)所示。而对于低温区来说，1# 钢具有较低的低温塑性低谷区，而 2# 钢的塑性低谷区的热塑性有明显的改善。总而言之，说明硼的加入可以有效改善钢铁材料的热塑性。



(a)断面收缩率　(b)1#拉伸力-行程曲线　(c)2#拉伸力-行程曲线

图 1 高温拉伸曲线

Fig.1 The high temperature tensile curves of the experiment steels

2.2 断口组织分析

图 2 为 1# 钢试样的断口低倍和高倍及纵切面的组织形貌。在 800 ℃时断面收缩率很小(39%)，说明此温度附近高温塑性很差；从图 2 (a-I)的断口组织可以看出试样在此温度附近的断裂方式为穿晶断裂，图 2 (a-II)的断口纵向显微组织表明断口附近没有微裂纹和空洞生成。850 ℃时则有较高的面收缩率，达到了 86%；由于试验过程中的打弧效应，使得横向断口表面温度过高，发生的融化而看不清断口表面形貌，但是从图 2 (b-II)的断口纵向金相显微组织可以看出其断裂方式为沿晶断裂和穿晶断裂，主要是沿着质体相对较软奥氏体晶界先共析铁素体发生断裂。而且断口附近可以看到晶界处有微裂纹和空洞生成。当温度为 950 ℃时，1# 钢又表现出较差的热塑性，其断面收缩率降至 67%；从图 2 (c-I)和图 2 (c-II)可以看出其断裂方式以沿晶断裂为主，在断口附近有较多的微裂纹形成。

图 3 为 2# 钢的断口及纵切面的组织形貌。在 750 ℃时断面收缩率较小，只有 56%，说明此温度附近塑性较差，但其已经接近了 60%这个门槛值，但相对于 1# 钢来说，其热塑性有了较大的改善，硼对晶界的强化作用起到了明显的效果。从图 3(a-I)的断口照片可以看出试样在此温度附近的断裂方式为穿晶断裂和沿晶界断裂，且从图 3(a-II)的断口纵向显微照片中观察断口附近发现有微裂纹和空洞沿奥氏体晶界的先共析铁素体处生成。850 ℃时则有较高的面收缩率，达到了 80%；从图 3(b-I)可以看到大量的韧窝，且从图 3(b-II)中可以观察到断口附近形成了小而多的微裂纹和空洞。而当温度为 900 ℃时，2# 钢又表现出较低的热塑性，其断面收缩率降至 65%。从图 3(c-I)的显微组织中可以看出大量的韧窝，韧窝底部可看到大量的第二相，同时

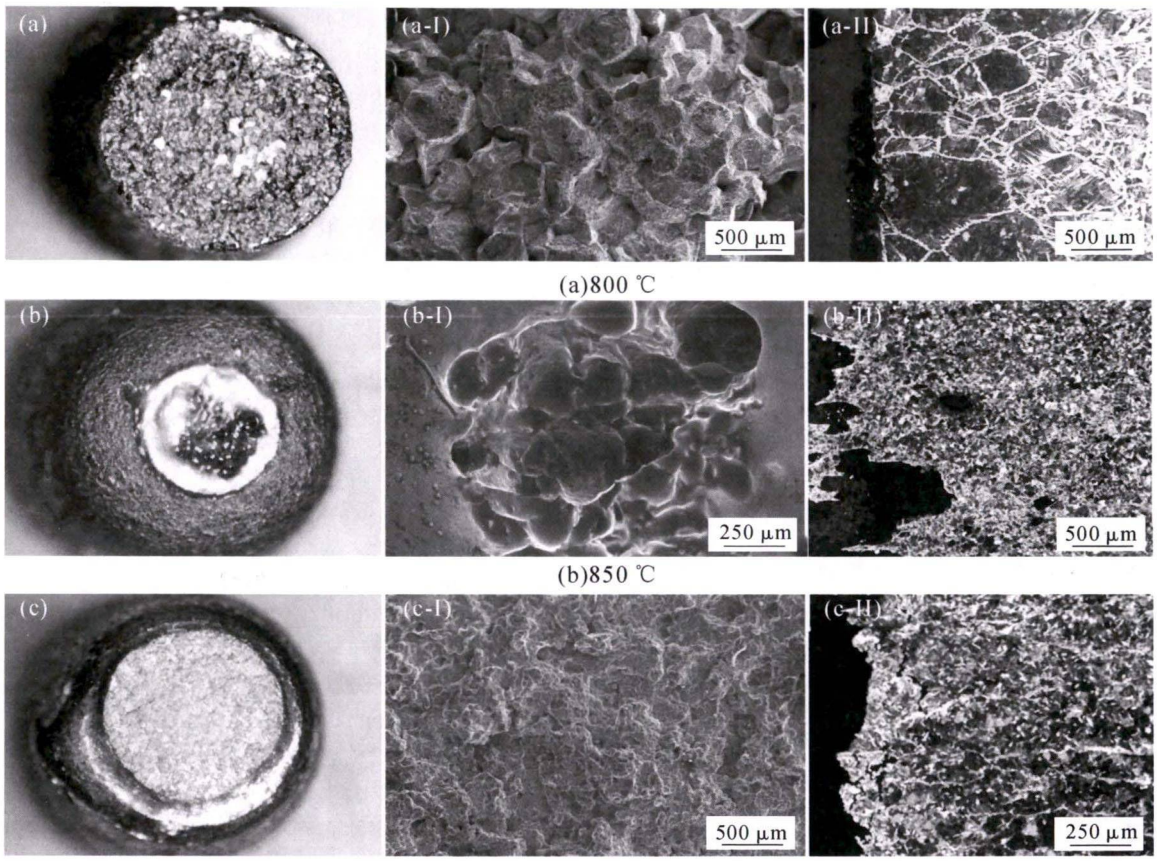


图 2 不同温度下 1# 钢的断口低倍(左)和高倍(中)及纵切面(右)的组织形貌

Fig.2 Morphologies of low magnification (left), high magnification (meddle) and vertical section of fracture of 1# steel at different temperatures

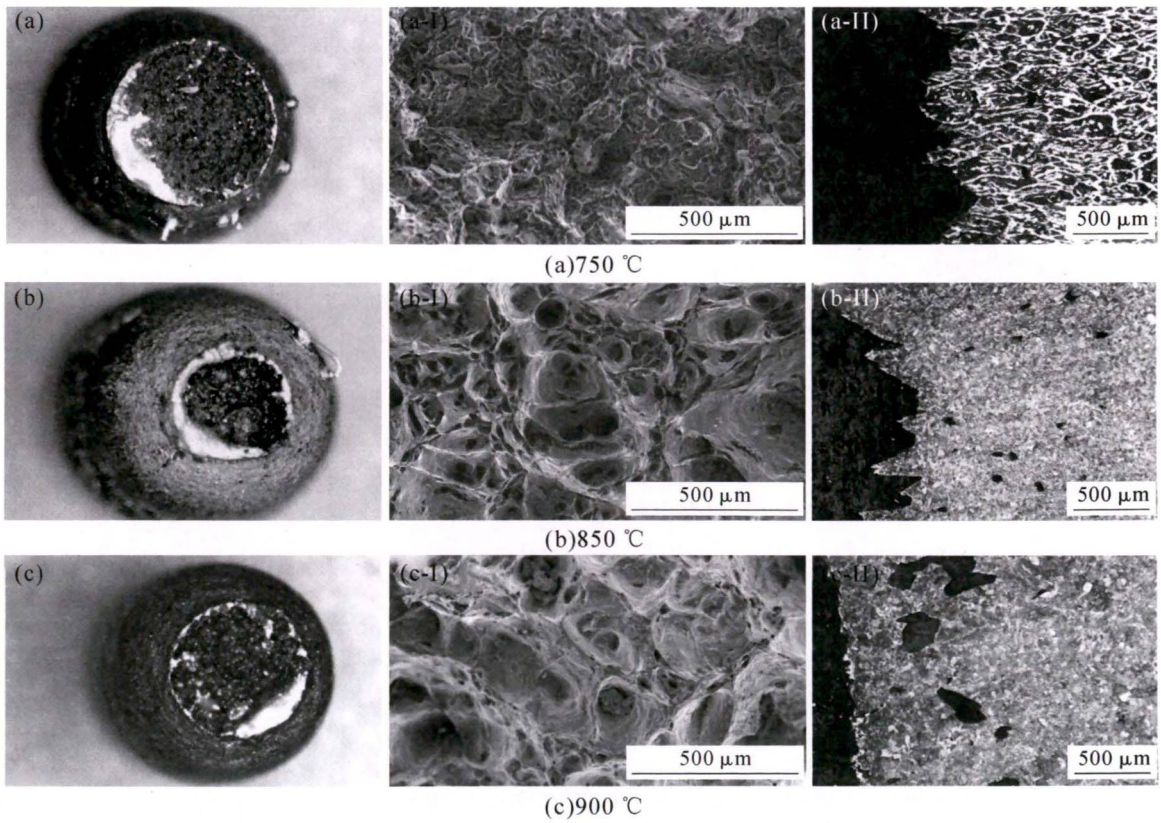


图 3 不同温度下 2# 钢的断口低倍(左)和高倍(中)及纵切面(右)的组织形貌

Fig.3 Morphologies of low magnification (left), high magnification (meddle) and vertical section of fracture of 2# steel at different temperatures

在断口附近形成了较大的空洞(3(c-II));而发生这种现象的主要原因是2#钢含有更多的微合金元素,在此温度下会发生形变诱导第二相的析出,而析出相对热塑性有着不良的影响。

相关研究表明[12],一般Nb微处理钢由于在奥氏体晶界处有大量的碳氮化铌析出,严重损害热塑性,其存在加深和加宽热塑性曲线的低谷区,使热塑性低谷向高温移动,其低塑性区可能会维持到1 000 ℃,到了1 000 ℃后动态再结晶临界驱动力的降低,应变产生足够的驱动力和激活能将引发动态再结晶行为的发生;在这个温度下,碳氮化物的析出将会受到抑制,且位错的移动将会变得更加活跃,因此热塑性将得到大幅提升。而对于铌微处理硼钢,由于硼的作用晶界得到强化[13],温度大于950 ℃时热塑性就开始很快的提升。由于晶界得到了强化,在拉伸过程中就可以承受更大的应力作用,而这些积蓄的应力将会产生足够的驱动力及激活能而引发动态再结晶,动态再结晶将会使热塑性提高,因此,2#钢在950 ℃时的热塑性明显高于800 ℃时的热塑性。

3 结论

(1)热模拟试验热塑性分析结果表明,在750~800 ℃温度内,1#钢在低温的塑性低谷比较的深,存在较低的断面收缩率;而2#钢由于有B、Ti的含量较高,使得其塑性低谷相对来说比较的浅,其最低断面收缩率已经接近塑性门槛值60%。

(2)硼可以提高钢铁材料的热塑性,在低温区可以改善热塑性,使得塑性低谷区变浅;在高温区,其对晶界的强化作用,在950 ℃动态再结晶行为就已发生,使得高塑性区往低温区偏移。

参考文献:

[1] 卢盛意. 连铸坯质量[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
[2] 常新年,陈伟,王博,等. 矩形连铸坯缺陷分析及优化方案[J]. 材料科学, 2021, 11(4): 367-374.
[3] 任科社. 异型钢高裂纹敏感铸坯质量控制工艺的开发及应用[J]. 冶金信息导刊, 2020(3):33-37.
[4] OKAMOTO R, BORGENSTAMA A, AGREN J. Interphase precipitation in niobium microalloyed steels [J]. Acta Materialia, 2010, 58: 4783-4790.
[5] HANNERZ N E. Critical hot plasticity and transverse cracking in continuous slabs casting with particular reference to composition [J]. Trans, ISIJ, 1985, 25:149-158.
[6] 毛新平. 薄板坯连铸连轧铁素体轧制工艺[J]. 钢铁, 2004, 39(5): 71~74.
[7] 田村今男. 高强度低合金钢的控制轧制与控制冷却 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
[8] 罗琳青. 微合金钢第二相析出行为对铸坯表层组织影响及控制[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
[9] 刘军. 微合金钢铸坯角部横裂纹控制技术的应用[J]. 连铸, 2019, 44 (3):40-44.
[10] 霍向东, 王元立. CSP生产低碳钢的组织演变和析出物研究[J]. 材料科学与工艺, 2004, 12(2): 56-59.
[11] 袁航,杨树峰,王田田,等. 亚包晶微合金钢连铸板坯角部横裂纹研究进展[J]. 中国冶金,2020,30(10): 4-11.
[12] F. Weinberg. Solidification and Casting of Metals [M]. 1977: 300-305.
[13] 符寒光. 含硼铸钢的研究和应用[J]. 铸造技术, 2006 (1): 87-89.

新书邮购

《消失模铸造工艺学》

《消失模铸造工艺学》由化学工业出版社2019年5月20日出版发行。(书号:ISBN978-7-122-34175-4)

《消失模铸造工艺学》作者刘立中,历经三十多年现场实践经验的总结和理论的升华。全书总结136个案例,选用1718帧彩色照片,撰写583千字创造性的提出了消失模铸造"三场理论",详细解读在"流场、热场、负压场"理论指导下的"消失模铸造浇注系统设计原则",提出了"借用型腔做浇道,极致简化浇注系统"新的理念,在国内外均属首创。奠定了消失模铸造的理论基础,提出了消失模铸造研究与发展的方向。

定价:498元

邮购咨询:李巧凤　电话/传真:029-83222071　微信:13991824906