

低碳 Nb-V 微合金化高强度冷镦硼钢耐延迟断裂性的研究

周新龙^{1,2} 叶飞¹ 陈伟庆¹ 刘振清²

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083;2 武钢研究院鄂钢分院,鄂州 436001)

摘要 试验用低碳硼钢(%:0.13~0.21C,0.0005~0.0037B)和低碳 Nb-V 微合金化硼钢(%:0.18~0.24C,0~0.033Nb,0~0.050V,0.0005~0.0022B)分别由实验室 50 kg 真空感应炉和碳管炉冶炼,轧-锻成 Φ13 mm 圆棒,然后加工成拉伸和带缺口的延迟断裂试样。经 950 °C 水淬+200 °C 回火处理后钢的延迟断裂性由延迟断裂强度比 $R = \sigma_n$ (延迟断裂强度)/ σ_c (拉伸强度)表示。结果表明,0.028% Nb-0.032% V 微合金化 0.0005% B 钢的 σ_c 为 1 480 MPa, R 值为 0.665,均高于 880 °C 油淬+400 °C 回火 40Cr 钢和 35CrMo 钢的 σ_c 和 R 值(σ_c 分别为 1 460 MPa 和 1 530 MPa, R 值 0.583 和 0.556)。

关键词 低碳微合金化 高强度硼钢 延迟断裂

A Study on Delayed Fracture Resistance of Low Carbon Nb-V Microalloying High Strength Cold Heading Boron Steel

Zhou Xinlong^{1,2}, Ye Fei¹, Chen Weiqing¹ and Liu Zhenqing²

(1 Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Egang Sub-Institute, Wugang Research Institute, Ezhou 436001)

Abstract Test low carbon boron steel (%:0.13~0.21C, 0.0005~0.0037B) and low carbon Nb-V microalloying boron steel (%:0.18~0.24C, 0~0.033Nb, 0~0.050V, 0.0005~0.0022B) were melted respectively by laboratory 50 kg vacuum induction furnace and carbon tube furnace, and the tensile specimen and notched delayed fracture specimen were turned from Φ13 mm rolled-forged rod. The delayed fracture resistance of test steels water-quenched at 950 °C and tempered at 200 °C is presented by delayed fracture strength ratio $R = \sigma_n$ (delayed fracture strength) / σ_c (tensile strength). Results showed that the tensile strength of 0.0005% B steel microalloying with 0.028% Nb and 0.032% V was 1 480 MPa and its R value was 0.665 which was higher than that of 40Cr steel and 35CrMo steel quenched at 880 °C, oil cold + tempered at 400 °C (both σ_c were respectively 1 460 MPa and 1 530 MPa, R value 0.583 and 0.556).

Material Index Low Carbon Microalloying, High Strength Boron Steel, Delayed Fracture

延迟断裂是由于材料-环境-应力的相互作用而产生的一种环境脆化^[1]。钢的强度越高,其延迟断裂敏感性也越高^[2,3]。随着汽车工业、工程结构等领域对螺栓高强度化的要求日益迫切,对高强度螺栓用钢耐延迟断裂性能的研究也越来越多^[2,3]。高强度标准件通常由中碳合金钢生产,由于这些钢种的碳含量及合金含量较高,冷镦开裂和延迟断裂敏感性相对较大,且成本也相对较高。

1 试验方法

试验用含硼钢(表 1)在 50 kg 真空感应炉内冶炼,微合金化含硼钢在实验室碳管炉内冶炼。分别浇铸成 30 kg 钢锭和 1 kg 圆型钢锭(Φ50 mm),然后在 1 150~1 200 °C 加热后轧制成厚 12 mm 的钢板或用空气锤锻打成 Φ13 mm 的圆棒,再加工成拉伸试样(图 1a)和延迟断裂试样(图 1b)。延迟断裂试样经热处理后精加工备用。

含硼钢、微合金化含硼钢试样热处理时的加热

温度为 950 °C,保温时间 30 min,水淬,200 °C 回火 2 h;35CrMo、40Cr 试样加热温度为 880 °C,保温时间 30 min,油淬,400 °C 回火 2 h。利用加速型恒载荷缺口偏斜拉伸试验方法(试验装置如图 1c)对试验钢的延迟断裂强度进行检测,试验用缓蚀介质为盐酸酸化至 PH=2±0.5 的 3.5%~5% NaCl 水溶液。

本次实验中采用延迟断裂强度比(DFR)来评价试验钢延迟断裂性能,如式(1)所示:

$$R = \sigma_n / \sigma_c \quad (1)$$

式中: R -延迟断裂强度比; σ_n -缺口试样延迟断裂强度; σ_c -空气中相同试样的拉伸强度。

2 试验结果

2.1 试验钢的显微组织和延迟断裂行为

由图 2(a)可见,淬火+低温回火后得到的组织是板条状低碳回火马氏体,其板条交错排列,这种组织具有良好的强、韧性,对裂纹扩展阻力较大。

表1 试验钢的化学成分、 σ_c 和 R 值
Table 1 Chemical composition, σ_c and R value of test steels

分类	编号	化学成分/%									σ_c / MPa	R / %
		C	Si	Mn	P	S	Ti	B	Nb	V		
低碳硼钢	1	0.15	0.05	0.76	0.010	0.005 1	<0.005	0.000 5	-	-	655	0.602
	2	0.13	0.04	0.74	0.010	0.005 1	<0.005	0.001 5	-	-	692	0.615
	3	0.16	0.05	0.74	0.011	0.004 9	<0.005	0.004 0	-	-	895	0.425
	4	0.17	0.05	0.77	0.009	0.004 8	<0.005	0.042 0	-	-	945	0.420
	5	0.21	0.06	0.84	0.009	0.004 8	0.033	0.003 7	-	-	955	0.418
低碳微合金化硼钢	1	0.24	0.05	0.83	0.018	0.016	0.021	0.000 5	0.011	-	1 305	0.768
	2	0.18	0.03	0.74	0.019	0.016	0.017	0.001 7	0.022	-	1 410	0.671
	3	0.22	0.04	0.84	0.019	0.016	0.016	0.001 0	0.033	-	1 420	0.699
	4	0.23	0.04	0.83	0.019	0.016	0.018	0.000 5	-	0.050	1 280	0.821
	5	0.23	0.05	0.85	0.019	0.015	0.017	0.001 6	0.028	0.032	1 480	0.665
	6	0.24	0.05	0.83	0.019	0.019	0.012	0.002 2	0.032	-	1 490	0.615
中碳 CrMo 钢	1	商用 40Cr 钢									1 460	0.583
	2	商用 35CrMo 钢									1 530	0.556

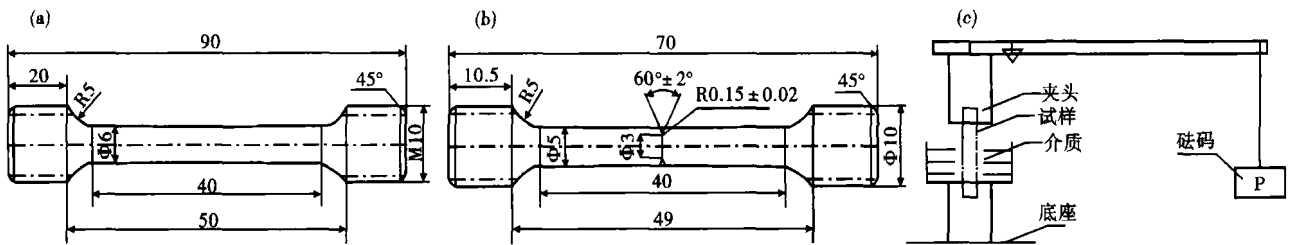


图1 (a)拉伸试样,(b)延迟断裂试样和(c)延迟断裂试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of tensile specimen (a), delayed fracture specimen (b) and delayed fracture test device (c)

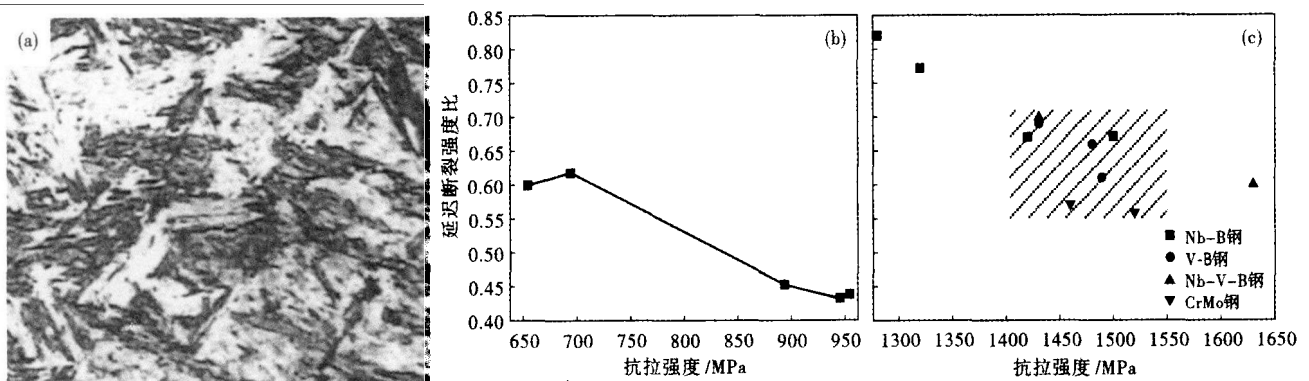


图2 (a)低碳 Nb-V 微合金化硼钢组织形貌,950 °C 30 min 水淬+200 °C 2 h 回火,×320;(b)低碳硼钢抗拉强度对延迟断裂强度比的影响;(c)不同微合金化低碳硼钢和 CrMo 钢的抗拉强度对延迟断裂强度比的影响

Fig.2 (a) Morphology of structure of low carbon Nb-V microalloying boron steel, 950 °C 30 min water quenching + 200 °C 2 h tempering, ×320;(b) Effect of tensile strength of low carbon boron steel on delayed fracture ratio R value of steel;(c) Effect of tensile strength of different low carbon microalloying boron steels and CrMo steel on delayed fracture ratio R value of steels

如图2(b)所示,低碳含硼钢的延迟断裂强度比在0.4~0.6,随着抗拉强度的提高,延迟断裂强度比呈下降的趋势。

图2(c)对比了铌、钒单独微合金化和复合微合金化的低碳含硼钢与35CrMo、40Cr中碳冷锻钢的延迟断裂强度比。可以看出,随试验钢的强度增加,延迟断裂强度比有降低的趋势;在1400~1550 MPa这一延迟断裂敏感性较高的强度范围内(图2c中阴

影区),铌、钒复合微合金化含硼钢的耐延迟断裂性能较好,其次是含铌硼钢且好于含钒硼钢,最差的是中碳铬、钼钢。

2.2 试验钢延迟断裂断口形貌

如图3所示,低碳含硼钢和微合金化含硼钢的延迟断裂试样断口基本上以穿晶断裂为主,无明显的沿晶断裂倾向。中碳铬、钼钢则出现了部分沿晶裂纹(如图3d)。低碳含硼钢中部分试样的断口中

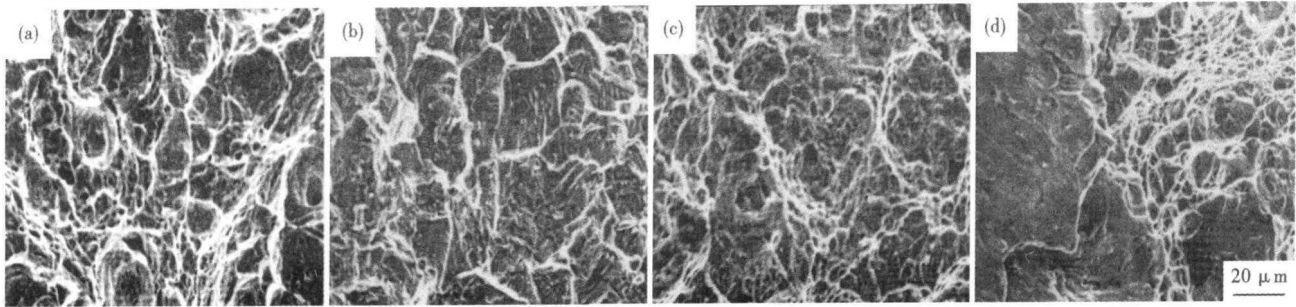


图3 试验钢延迟断裂断口形貌, (%) : (a) 0.16C-0.0040B; (b) 0.22C-0.033Nb-0.0010B; (c) 0.23C-0.050V-0.0005B; (d) 35CrMo
Fig. 3 Morphology of delayed fracture of different test steel grades, % : (a) 0.16C-0.0040B; (b) 0.22C-0.033Nb-0.0010B; (c) 0.23C-0.050V-0.0005B; (d) 35CrMo

形成了较多的韧窝状花纹(如图3a); 铌、钒微合金化含硼钢延迟断裂断口形貌则以穿晶解理形式为主, 形成了较少的韧窝(如图3b, c)。

3 结果讨论

3.1 显微组织

实验室试制的为低碳微合金化含硼钢, 试验钢的淬火、回火后的组织为板条状马氏体。关于低碳马氏体钢的延迟断裂特性, 据有关文献报道^[4], 在大致相同的强度水平下, 低碳马氏体钢比40Cr中碳钢有较低的延迟断裂敏感性。至于低碳马氏体组织为何有较低的延迟断裂敏感性, 这需要进一步深入研究, 可以设想, 这与低碳马氏体特殊的组织和亚结构特性有密切的关系。

3.2 晶界强化

由试验结果来看, 延迟断裂性能较差的中碳铬、钼钢出现了部分沿晶裂纹, 而添加了B、Nb和V等微量元素的低碳钢则未发现沿晶断裂。钢中的硼具有很快的移动速度, 在冷却过程中, 硼能迅速填补位错和原子空隙等晶格缺陷, 从而降低了晶界的形变能, 使晶界趋于更加稳定。前人的研究认为^[5], 硼占据着 γ 铁和 α 铁的空隙位置, 硼在晶界的优先偏析, 某种程度上强化了晶界。Nb、V具有细化晶粒的作用。随着晶粒细化, 变形更加均匀, 应力集中程度降低; 同时单位体积中的晶界面积急剧增加, 这使得S、P等杂质元素的晶界偏聚浓度降低, 晶界强度得到提高。因此, 添加这些微量元素有利于阻碍延迟断裂裂纹沿晶界的萌生和扩展。

3.3 氢陷阱

一般认为, 延迟断裂是由钢中在室温下容易扩散的微量氢原子在应力作用下扩散并聚集在微裂纹尖端引起的^[5,6]。氢原子富集于晶界、相界处, 使晶界显著脆化, 设置“氢陷阱”能较好的控制氢脆。Nb、V都是较强的碳化物析出元素, 晶粒内弥散的

碳化物析出, 能与氢结合并将其捕集在晶粒内部, 防止了氢在晶界的偏聚和扩散, 一定程度上也强化了晶界, 从而显著提高钢的耐延迟断裂性能。

4 结论

(1) 随着抗拉强度的提高, 试验钢的延迟断裂强度比呈下降的趋势。在1400~1550 MPa, 试验钢的耐延迟断裂性能以铌钒复合微合金化硼钢、铌硼钢、钒硼钢、中碳铬钼钢为顺序依次降低。

(2) 添加适量Nb和V微合金元素的低碳含硼高强度钢具有良好的耐延迟断裂性能, 其断口形貌以穿晶解理断裂为主; 强度较低的低碳含硼钢试样断口形成了较多的韧窝; 中碳铬、钼钢延迟断裂断口出现部分沿晶裂纹。

(3) 低碳含硼钢和微合金化含硼钢经淬火、回火得到的板条状马氏体组织具有良好的耐延迟断裂性能。对比分析认为, 铌钒微合金化低碳含硼钢通过晶粒细化、晶界强化, 形成Nb和V的碳化物氢陷阱等作用改善了试验钢的耐延迟断裂性能。

参考文献

- 1 松山晋作. 遅れ破壊. 東京: 日刊工業新聞社, 1989: 67
- 2 松本齊. 遅れ破壊はその強度レベルまで危険か(日). 特殊鋼, 1995, 44(12): 24
- 3 惠卫军, 董瀚, 翁宇庆. 耐延迟断裂高强度螺栓钢的研究开发. 钢铁, 2001, 36(3): 69
- 4 黎水钧. 低碳马氏体延迟断裂特性的研究. 机械工程材料, 1980, 25(2): 1
- 5 Wang Wendong, Zhang Shanhong, He Xinlai. Diffusion of Boron in Alloys. Acta Metall Master, 1995, 43(4): 1693
- 6 惠卫军, 董瀚, 王毛球, 等. 钒对高强度钢耐延迟断裂性能的影响. 金属热处理, 2002, 27(1): 10

周新龙(1962-), 教授级高工, 钢铁产品开发和研究。

收稿日期: 2008-11-25