

热处理对 1Cr12Ni3Mo2VN 马氏体耐热钢组织和性能的影响

王 彧 柳木桐 钟 平

(北京航空材料研究院钢与稀贵金属所,北京 100095)

摘 要 试验 1Cr12Ni3Mo2VN 钢(/% : 0.13C, 0.16Si, 0.70Mn, 11.42Cr, 2.78Ni, 1.67Mo, 0.30V, 0.0360N) 的冶金流程为 30 t EAF-LF-VD-3 t ESR-锻造成 $\Phi 350$ mm 材。研究了 950 ~ 1 100 °C 淬火和 200 ~ 700 °C 回火对 1Cr12Ni3Mo2VN 钢组织与性能的影响以及 500 °C, 500 ~ 10 000 h 时效的拉伸性能。结果表明, 淬火温度 950 ~ 1 100 °C 对 1Cr12Ni3Mo2VN 钢力学性能的影响不明显; 该钢的回火脆性区在 600 °C 左右, 但对钢的塑性的影响较小。经 1 040 °C 淬火, 540 °C 回火的 1Cr12Ni3Mo2VN 钢, 在 500 °C 时效 500 h 后, 其抗拉强度和屈服强度分别下降了 7.7% 和 5.8%, 时效 10 000 h 后, 其抗拉强度和屈服强度分别下降了 13.4% 和 14.6%, 断面收缩率下降了 40%, 主要原因是杂质元素在晶界处偏聚以及碳化物在晶界处析出。

关键词 1Cr12Ni3Mo2VN 马氏体耐热钢 热处理 组织 性能 时效

Effect of Heat Treatment on Structure and Properties of Martensite Heat-Resistant Steel 1Cr12Ni3Mo2VN

Wang Yu, Liu Mutong and Zhong Ping

(Steel and Precious Metals Research Institute, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095)

Abstract The metallurgical flowsheet of tested steel 1Cr12Ni3Mo2VN (/% : 0.13C, 0.16Si, 0.70Mn, 11.42Cr, 2.78Ni, 1.67Mo, 0.30V, 0.0360N) is 30 t EAF-LF-VD-3 t ESR-forged to $\Phi 350$ mm products. The effect of quenching at 950 ~ 1 100 °C and tempering at 200 ~ 700 °C on structure and properties of steel 1Cr12Ni3Mo2VN and the tensile properties of steel aging at 500 °C for 500 ~ 10 000 h have been studied. Results show that the effect of quenching temperature at 950 ~ 1 100 °C on mechanical properties of steel 1Cr12Ni3Mo2VN is not obvious; the temper brittleness zone of steel is at about 600 °C, nevertheless tempered at this temperature the decrease of plasticity of steel is smaller; as compared with the mechanical properties of steel 1Cr12Ni3Mo2VN quenched at 1 040 °C and tempered at 540 °C, with ageing at 500 °C for 500 h the tensile strength and yield strength of steel decrease respectively by 7.7% and 5.8%, and with ageing at 500 °C for 10 000 h the tensile strength and yield strength of steel decrease respectively by 13.4% and 14.6%, and the reduction of area of steel decreases by 40%, its main cause is aggregation of impurity elements and deposition of carbide at grain boundary.

Material Index Martensite Heat-Resistant Steel 1Cr12Ni3Mo2VN, Heat Treatment, Structure, Properties, Ageing

1Cr12Ni3Mo2VN 钢由于比一般 12Cr 型马氏体耐热不锈钢含有更多的合金元素 Ni、Mo、V、N, 故其具有更高的强度、更好的高温热强性、高温抗氧化性及组织和性能稳定性, 主要用于航空发动机机匣、大容量火电机组汽轮机末级叶片及紧固件, 燃气轮机零部件的制造^[1-6]。

1 试验材料及方法

试验材料采用 1Cr12Ni3Mo2VN 钢棒材(表 1), 冶炼工艺为电弧炉(30 t) + LF + VOD + 电渣重熔, 锭重 3 t。开坯后锻造成 $\Phi 350$ mm 棒材。试验料的原始组织为马氏体, 无 δ -铁素体(图 1)。

从棒材 1/2 半径处纵向切取力学性能试样, 进行 950 ~ 1 150 °C 淬火、(565 ± 5) °C 回火的淬火温度影响的试验和 (1 040 ± 10) °C 淬火、200 ~ 700 °C 回火的回火温度影响的试验。对于长期时效试验, 淬火

表 1 1Cr12Ni3Mo2VN 钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of steel 1Cr12Ni3Mo2VN / %							
C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	N
0.13	0.16	0.70	11.42	2.78	1.67	0.30	0.036 0



图 1 1Cr12Ni3Mo2VN 钢 $\Phi 350$ mm 锻材的组织形貌
Fig. 1 Morphology of structure of steel 1Cr12Ni3Mo2VN $\Phi 350$ mm forged product

温度为(1 040 ± 10) °C,时效温度为(500 ± 10) °C,时效时间为 500、2 000、10 000 h。

2 结果与分析

2.1 淬火温度对组织和性能的影响

由图 2 可见,随着淬火温度的升高,1Cr12Ni3Mo2VN 钢的强度及冲击韧性值变化并不明显,抗拉强度在 1 190 ~ 1 230 MPa,冲击韧性在 240 ~ 270 J/cm²,布氏硬度值在 360 ~ 380,总体来看,淬火温度在 950 ~ 1 100 °C 变化,均可得到较好的力学性能。

由图 3 可见,淬-回火组织均为回火马氏体 + 析出碳化物。不同温度淬火后马氏体板条宽度接近,马氏体板条边界清晰,原奥氏体晶界和板条界之间无 δ-铁素体析出,在马氏体板条内部弥散析出细小的强化相。

2.2 回火温度对组织和性能的影响

由图 4 可见,随着回火温度的升高,钢的强度、硬度及冲击韧性值均呈现出先升高后降低的变化趋势。在 500 °C 回火时,强度达到峰值,抗拉强度和屈

服强度分别为 1 470、1 170 MPa,回火温度超过 500 °C 后强度和硬度下降幅度较大。回火温度对塑形的影响不大,断面收缩率随回火温度的升高呈现先升高后降低的趋势。在低温区,冲击韧性随回火温度升高而升高,在 575 °C 回火时达到峰值,之后开始下降,表明该钢的回火脆性区在 600 °C 左右。产生这种回火脆性的原因是 Ni、Cr 等元素向晶界处偏聚,同时促进了 Sb、Sn、P 等杂质元素的偏聚,从而降低了晶界处的断裂抗性,使材料的冲击韧性大幅降低^[7-8]。但从图 4(b)中可以看出,这种回火脆性对材料的塑形影响较小。

从图 5(a)中可以看出,断口整体反映为韧性断裂区形貌,韧窝沿着断裂方向被拉长,韧窝底部凹陷,发现韧窝内有第二相粒子或夹杂物。在此温度回火,强度、冲击韧性较高,延伸率较小,主要是在低温回火时,发生了过渡碳化物沉淀,这种碳化物(可以看成是硬而细小的质点)弥散在淬火的马氏体中,这些质点由于弥散强化而使材料的强度得到

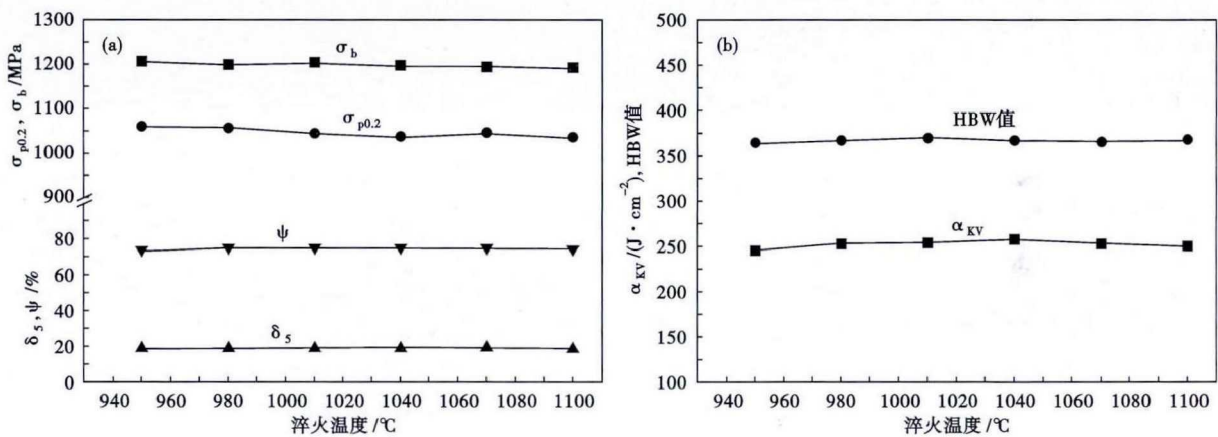


图 2 淬火温度对 1Cr12Ni3Mo2VN 钢力学性能的影响,565 °C 3 h 回火:(a) 拉伸力学性能;(b) 冲击韧性与硬度值
Fig. 2 Effect of quenching temperature on Mechanical properties of steel 1Cr12Ni3Mo2VN, tempered at 565 °C for 3 h: (a) tensile strength and plasticity; (b) impact toughness and hardness value



图 3 (a)950 °C,(b)1 040 °C 和(c)1 100 °C,淬火对 1Cr12Ni3Mo2VN 钢组织的影响,565 °C 3 h 回火
Fig. 3 Effect of quenching at 950 °C (a), 1 040 °C (b) and 1 100 °C (c) on structure of steel 1Cr12Ni3Mo2VN, tempered at 565 °C for 3 h

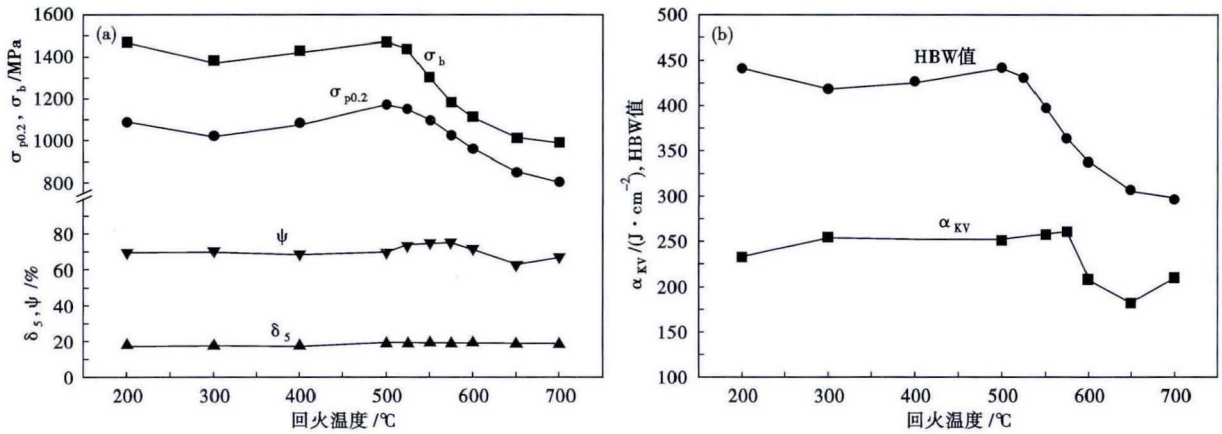


图 4 回火温度对1 040 °C 1 h 油冷 1Cr12Ni3Mo2VN 钢力学性能的影响:(a) 拉伸力学性能;(b) 冲击韧性与硬度值

Fig. 4 Effect of tempering temperature on mechanical properties of steel 1Cr12Ni3Mo2VN quenched at 1 040 °C for 1 h, oil cooling: (a) tensile strength and plasticity; (b) impact toughness and hardness value

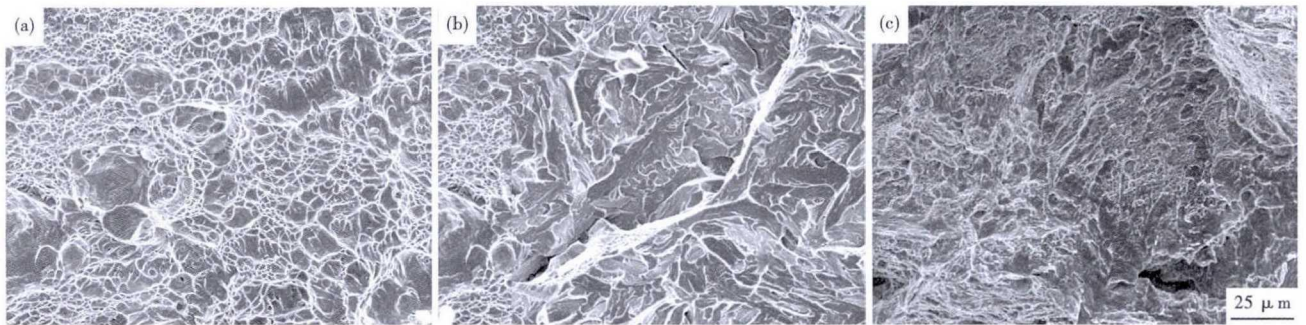


图 5 1Cr12Ni3Mo2VN 钢1 040 °C 1 h 油冷, 200 °C (a), 525 °C (b) 和 650 °C (c) 3 h 回火的冲击断口形貌

Fig. 5 Morphology of impact fracture of steel 1Cr12Ni3Mo2VN quenched at 1 040 °C for 1 h oil cooling and tempered at 200 °C (a), 525 °C (b) and 650 °C (c) for 3 h

了提高。从图 5(b) 可以看出, 在 525 °C 回火时, 其韧窝平均深度比低温下明显增大, 撕裂棱逐渐增多, 说明材料在拉伸的过程中裂纹在扩展时遇到了更多的阻碍, 裂纹扩展方向改变了多次, 撕裂棱增多, 因而吸收了更多的能量, 从而使材料的韧性升高。图 5(c) 为 650 °C 回火冲击试样断口形貌。在该温度下, 材料发生回火脆性。从图 5(c) 中可以看出, 其断裂方式变为解理、准解理, 呈脆性断裂特征。

2.3 长期时效对组织和性能的影响

试验材料经 1 040 °C 淬火 + 540 °C 回火后, 在 500 °C 下进行长期时效, 所得拉伸性能见图 6。可以看到, 材料的抗拉强度、屈服强度和断面收缩率均随保温时间的延长而下降, 延伸率基本保持不变。时效 500 h 后, 材料的屈

服强度和抗拉强度分别下降了 7.7% 和 5.8%, 断面收缩率下降了 7.2%; 时效 2 000 h 后, 屈服强度和抗拉强度分别下降了 8.6% 和 7.6%, 时效 10 000 h 后, 屈服强度和抗拉强度分别下降了 13.4% 和 14.6%, 断面收缩率下降了 40%。相对来说, 1Cr12Ni3Mo2VN 钢具有比较好的高温稳定性。

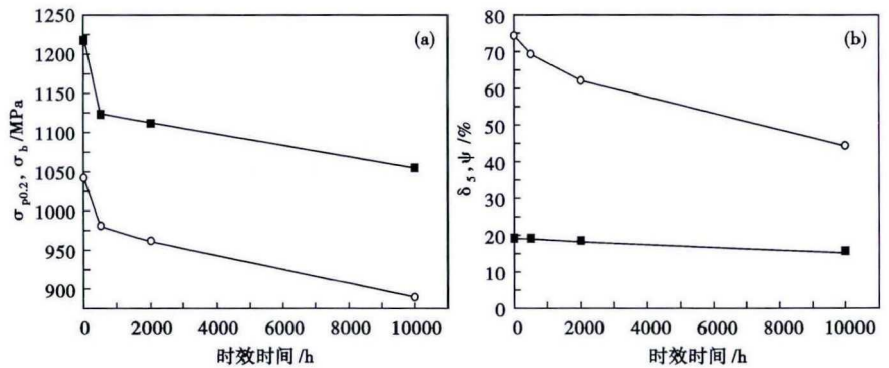


图 6 500 °C 时效对 1 040 °C 淬火、540 °C 回火的 1Cr12Ni3Mo2VN 钢拉伸强度(a) 和塑性(b) 的影响

Fig. 6 Effect of aging at 500 °C on tensile strength (a) and plasticity (b) of steel 1Cr12Ni3Mo2VN quenched at 1 040 °C and tempered at 540 °C

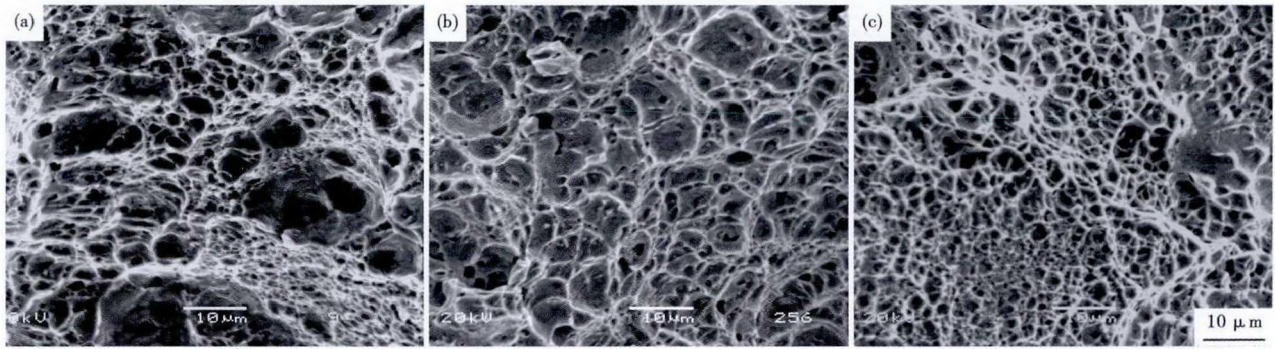


图7 500 ℃时效(a)500 h, (b)2 000 h和(c)10 000 h对1 040 ℃淬火,540 ℃回火的1Cr12Ni3Mo2VN钢拉伸断口形貌
Fig. 7 Morphology of tensile fracture of steel 1Cr12Ni3Mo2VN quenched at 1 040 ℃, tempered at 540 ℃ and aging at 500 ℃ for 500 h (a), 2 000 h (b) and 10 000 h (c)

从图7中可以看到,长期时效后各试样断口基本以大小不均的等轴韧窝以及少数拉长韧窝组成,韧窝之间以撕裂棱的方式连接,在韧窝底部可见碳化物析出,断裂方式表现为韧性穿晶断裂。10 000 h时效试样的韧窝较浅,这也与塑性下降相对应。

通常认为长期时效脆化的机制是杂质元素的晶界偏聚或第二相的析出造成的,且杂质元素P偏聚结合第二相的析出将导致Ni-Cr钢的严重脆化^[9]。对于350~450 ℃长期时效的研究表明^[10],发生脆化的原因是时效过程中的 α' 脆性相析出,以及杂质元素Sn的偏聚。在595 ℃时效,位错密度下降,且原始组织中弥散分布的 M_2C 和 M_7C_3 碳化物逐渐转变成 $M_{23}C_6$ 碳化物,并聚集长大,导致强度逐渐降低;时效脆化的主要原因是杂质元素的非平衡晶界偏聚和

碳化物的晶界析出共同作用^[11-12]。同时,基体的回复和再结晶作用造成软化,也导致了强度的下降。

3 结论

(1)在950~1 100 ℃,淬火温度对1Cr12Ni3Mo2VN钢的室温力学性能影响不大。

(2)1Cr12Ni3Mo2VN钢的回火脆性区在600 ℃左右,这种回火脆性对钢的塑性影响较小。

(3)1Cr12Ni3Mo2VN钢经过淬火、回火,在500 ℃保温10 000 h后,同没有经过长期时效相比,其抗拉强度和屈服强度分别下降了13.4%和14.6%,断面收缩率下降了40%。造成这种脆化的主要原因是杂质元素在晶界处偏聚以及碳化物在晶界处析出。

参考文献

- [1] 黄晓斌,罗通伟,何晓辉. 汽轮机末级叶片用钢1Cr12Ni3Mo2VN的研制[J]. 特钢技术, 2005(3): 51-57.
- [2] 滕长岑. 耐热钢[M]. 北京: 中国标准出版社, 2010: 1-27.
- [3] Yang G, Wang C and Liu X Q, et al. Embrittlement Mechanism Due to Slow Cooling during Quenching for M152 Martensitic Heat Resistant Steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2010, 6: 60-66.
- [4] Kazushi Hamada, Kazushige Tokuno and Yukio Tomita, et al. Effect of Precipitate Shape Modified 9Cr-Mo Steels[J]. ISIJ International, 1995, 35(1): 86-91.
- [5] Katsumi Yanadam, Asaaki Igarashi and Seiichi Muneki, et al. Creep Properties Affected by Morphology of MX in High-Cr Ferritic Steels [J]. ISIJ International, 2001, 41(Suppl): 116-120.
- [6] Hald J. Microstructure and Long-Term Creep Properties of 9-12% Cr Steels [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008, 85: 30-37.
- [7] 藤田辉夫. 不锈钢的热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983: 27.
- [8] 肖纪美. 不锈钢的金属学问题[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006: 213.
- [9] Mulford R A, McMahon C J and Pope D P, et al. Temper Brittleness of Ni-Cr Steels by Phosphorus [J]. Metallurgical Transactions A, 1976, 7A: 1183-1195.
- [10] Angeliu T, Hall E L and Earsen M, et al. The Long-Term Aging Embrittlement of Fe-12Cr Steels Below 773K [J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2003, 34A(4): 927.
- [11] 杨 钢, 郭永华, 刘新权, 等. 595 ℃长期时效对M152马氏体耐热钢力学性能的影响[J]. 钢铁, 2010, 45(7): 66-70.
- [12] Yang G, Guo Y H and Liu X Q, et al. Effect of Long-Term Aging at 595 ℃ on Mechanical Properties of M152 Martensitic Heat-Resistant Steel [J]. Iron and Steel, 2010, 45(7): 66-70.

王 彧(1983-),男,助理工程师,2006年河北工业大学(本科)毕业,结构钢和不锈钢研究。
E-mail: 13810586986@163.com

收稿日期: 2017-11-20