

淬火冷却速度对耐热钢 1Cr12Ni3Mo2VN 组织和性能的影响

谢学林¹ 杨钢² 傅骏¹ 王泽忠¹ 雍歧龙²

(1 四川工程职业技术学院材料工程系, 德阳 618000; 2 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081)

摘要 研究了1 040 ℃ 1 h 油冷、炉冷(5 ℃/min)、1 ℃/min、0.5 ℃/min冷却后耐热钢 1Cr12Ni3Mo2VN 的组织 and 该钢1 040 ℃ 1 h 不同冷却速度淬火 + 565 ℃ 2 h 空冷后的力学性能。试验结果表明, 该钢 4 种冷却速度淬火均可得到马氏体组织, 但油冷 + 回火的 A_{KV2} 值为 156.5 J, 而 5 ~ 0.5 ℃/min 冷却 + 回火时为 40.5 ~ 16.5 J。残余奥氏体发生热失稳分解是导致试验钢淬火缓冷后冲击韧性显著下降的主要原因; 在淬火缓冷过程中 720 ~ 820 ℃ 这一温度段, 由于原奥氏体晶界上碳化物的大量析出, 使残余奥氏体中合金元素和碳含量的显著减少, 造成淬火组织中的残余奥氏体稳定性大幅度下降。

关键词 耐热钢 1Cr12Ni3Mo2VN 淬火冷却速度 组织 力学性能

Effect of Quenching Cooling Rate on Structure and Mechanical Properties of Heat-Resistant Steel 1Cr12Ni3Mo2VN

Xie Xuelin¹, Yang Gang², Fu Jun¹, Wang Zezhong¹ and Yong Qilong²

(1 Dept of Materials Engineering, Sichuan Engineering Vocational Technology College, Deyang 618000;
2 Institute for Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract Structure of heat-resistant steel 1Cr12Ni3Mo2VN quenched at 1 040 ℃ for 1 h oil cooling, furnace cooling (5 ℃/min), 1 ℃/min and 0.5 ℃/min cooling and mechanical properties of the steel quenched at 1 040 ℃ for 1 h with different cooling rate + tempered at 565 ℃ for 2 h have been studied. Test results show that martensite structure of the steel quenched with four cooling rate is obtained, but A_{KV2} value of the steel by quenching, oil cooling and tempering is 156.5 J, while that by quenching, 5 ~ 0.5 ℃/min cooling and tempering is 40.5 ~ 16.5 J. The thermal decomposition of retained austenite in steel slow-cooled is main reasons for impact energy marked decreasing, i. e. during quenching slow-cooling at 720 ~ 820 ℃; a large amount of carbide precipitates at original austenite grain boundary led to obvious decreasing alloying elements and carbon content in residual austenite and poor stability of residual austenite in quenched structure.

Material Index Heat Resistant Steel 1Cr12Ni3Mo2VN, Quenching Cooling Rate, Structure, Mechanical Properties

提高燃煤发电机组蒸汽参数(压力和温度), 最关键的制约因素是耐热钢材料的开发^[1,2]。本文研究了制造超临界火电机组汽轮机末级长叶片(1 100 mm) 1Cr12Ni3Mo2VN 马氏体耐热钢淬火冷却速度对试验钢组织与性能的影响。

1 实验材料及方法

实验材料为攀长钢生产的 $\Phi 220$ mm 锻材, 冶炼工艺: 30 t 电弧炉冶炼 + 电渣重熔(2.5 t)。实验材料的化学成分(%)为: 0.14C、0.17Si、0.77Mn、0.005S、0.016P、11.41Cr、2.96Ni、1.67Mo、0.26V、0.039N。本叶片钢属于自硬性很强的钢种, 即使淬火按 0.5 ℃/min 缓冷方式冷却也得到马氏体组织。试验钢经 1 040 ℃ 1 h 奥氏体化后淬火再回火(565 ℃ 2 h 空冷), 淬火冷却速度采用油冷(约 200 ℃/min)、炉冷(约 5 ℃/min)、1 ℃/min 炉冷、0.5 ℃/min 炉冷 4 种冷却方式, 分别模拟长叶片不同部位的热处理工艺。把试验钢 1 040 ℃ 1 h 奥氏体化后

按 0.5 ℃/min 炉冷至 820 ~ 140 ℃ 不同温度出炉空冷, 再回火(565 ℃ 2 h 空冷)以试验钢中残余奥氏体的稳定性。

2 实验结果与分析

2.1 室温力学性能测试分析

由表 1 可见, 随着冷却速度的减小, 抗拉强度 R_m 先略微升高, 再略微降低, 1 ℃/min 炉冷时达到最大值 1 220 MPa; 屈服强度 $R_{p0.2}$ 变化不大, 油冷时为最大值 1 020 MPa; 硬度 HRC 与抗拉强度 R_m 变化趋势一致, 先略微升高, 再略微降低, 炉冷和 1 ℃/min 炉冷时达到最大值 37.4 HRC; 随着淬火冷却速度的减小, 伸长率 A 略微降低, 油冷时为最大值 19.3%, 0.5 ℃/min 炉冷时为最小值 17.0%; 断面收缩率 Z 呈下降趋势, 其中, 从油冷到 1 ℃/min 炉冷, 略微下降, Z 由 71.8% 降到 68%, 而从 1 ℃/min 炉冷到 0.5 ℃/min 炉冷下降明显, Z 由 68% 降到 62.3%; 冲击韧性显著下降, 其中, 从油冷到炉冷下

降幅度最大,由 156.5 J 下降到 40.5 J,从炉冷到 0.5 °C/min 炉冷,下降趋缓,由 40.5 J 下降到 16.5 J。可见,淬火冷却速度对室温断面收缩率 Z 和冲击韧性影响较大,尤其对冲击韧性有显著影响。

由图 1 可见,1040 °C 按 0.5 °C/min 炉冷至不同温度空冷出炉对抗拉强度 R_m 、屈服强度 $R_{p0.2}$ 和伸长率 A 影响也不大;在 720 ~ 820 °C,随着温度的降低,断面收缩率 Z 有较大幅度的下降,从 820 °C 的 73.3% 下降到 720 °C 的 65%,在 140 ~ 720 °C,随着温度的降低,变化趋缓;在 720 ~ 820 °C,随着温度的降低,冲击韧性显著下降,从 820 °C 的 164.5 J 下降到 720 °C 的 23 J,在

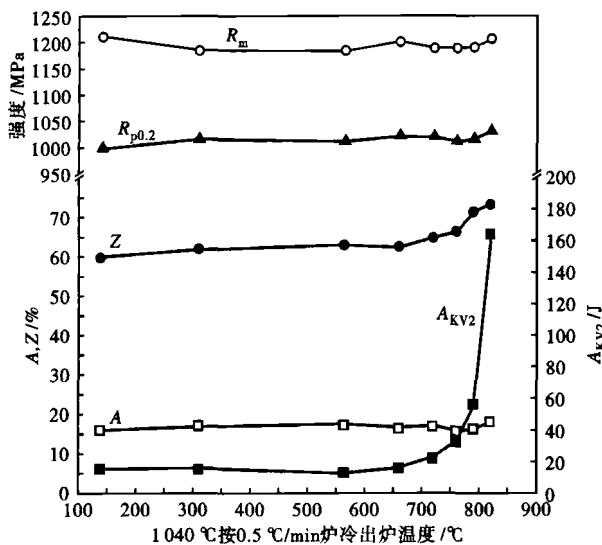


图 1 1040 °C 按 0.5 °C/min 冷却后空冷温度对 1Cr12Ni3Mo2VN 钢力学性能的影响

Fig.1 Effect of air cooling temperature after at 1040 °C, 0.5 °C/min cooling on mechanical properties of steel 1Cr12Ni3Mo2VN

表 1 淬火冷却速度对 1Cr12Ni3Mo2VN 钢力学性能的影响

Table 1 Effect of quenching cooling rate on mechanical properties of steel 1Cr12Ni3Mo2VN

热处理工艺	R_m / MPa	$R_{p0.2}$ / MPa	A / %	Z / %	A_{KV2} / J	硬度 (HRC)
1040 °C 1 h 油冷 + 565 °C 2 h 空冷	1160	1020	19.3	71.8	156.5	36.1
1040 °C 1 h 炉冷 (5 °C/min 降温) + 565 °C 2 h 空冷	1215	978	17.5	69.0	40.5	37.4
1040 °C 1 h 炉冷 (1 °C/min 降温) + 565 °C 2 h 空冷	1220	985	18.0	68.0	24.5	37.4
1040 °C 1 h 炉冷 (0.5 °C/min 降温) + 565 °C 2 h 空冷	1155	1015	17.0	62.3	16.5	35.4

140 ~ 720 °C,随着温度的降低,变化不大。

2.2 金相组织分析

由图 2 可见,4 种不同淬火冷却速度的组织均为回火马氏体,即马氏体板条 + 析出碳化物,四者的晶粒和马氏体板条大小差不多;油冷时,组织中原奥氏体晶界比较干净,细小的碳化物在基体中弥散析出(图 2a),随着淬火冷却速度的减小,组织中析出的碳化物逐渐增多,沿原奥氏体晶界有大量聚集、粗化的碳化物析出(图 2b, d, e)。

油冷时,断口形貌几乎都为韧窝断口,在断口上分布着许多韧窝,在一些韧窝底部可观察到第二相粒子(图 3a 箭头所指处),属于塑性断裂;随着淬火冷却速度的显著减小,炉冷、1 °C/min 炉冷、0.5 °C/min 炉冷三者的断口形貌都为准解理和解理的混合断口,属于脆性断裂(图 3b, c, d),其中,炉冷的“河流花样”较少,解理断面较宽大,撕裂棱较多(图 3b 箭头所指处),1 °C/min 炉冷、0.5 °C/min 炉冷两者的“河流花样”较多,解理断面较细小,撕裂棱较少(图 3c, d 箭头所指处),可见,相对于炉冷(5 °C/min),1 °C/min 炉冷、0.5 °C/min 炉冷两者的准

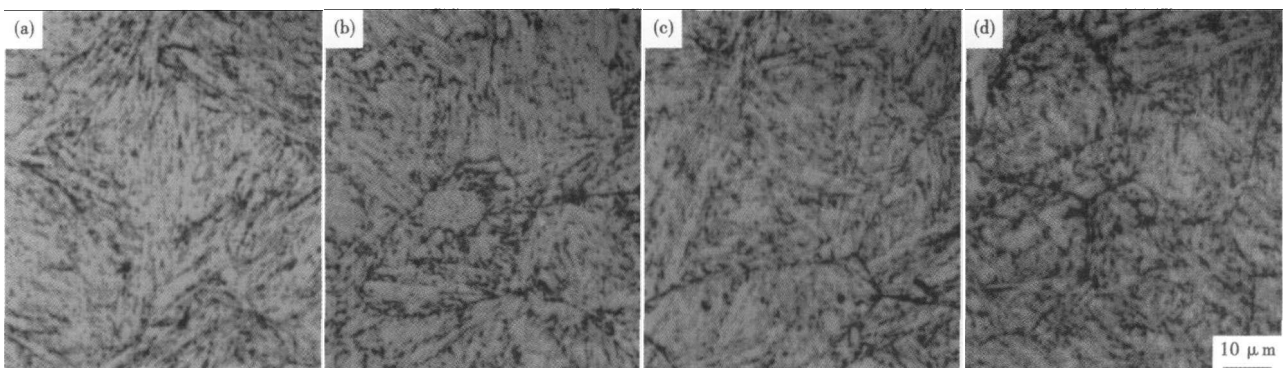


图 2 淬火冷却速度对 1Cr12Ni3Mo2VN 钢组织的影响:(a)油冷;(b)5 °C/min、(c)1 °C/min 和 (d)0.5 °C/min 冷却

Fig.2 Effect of quenching cooling rate on structure of steel 1Cr12Ni3Mo2VN; oil cooling (a); 5 °C/min (b), 1 °C/min (c) and 0.5 °C/min (d) cooling

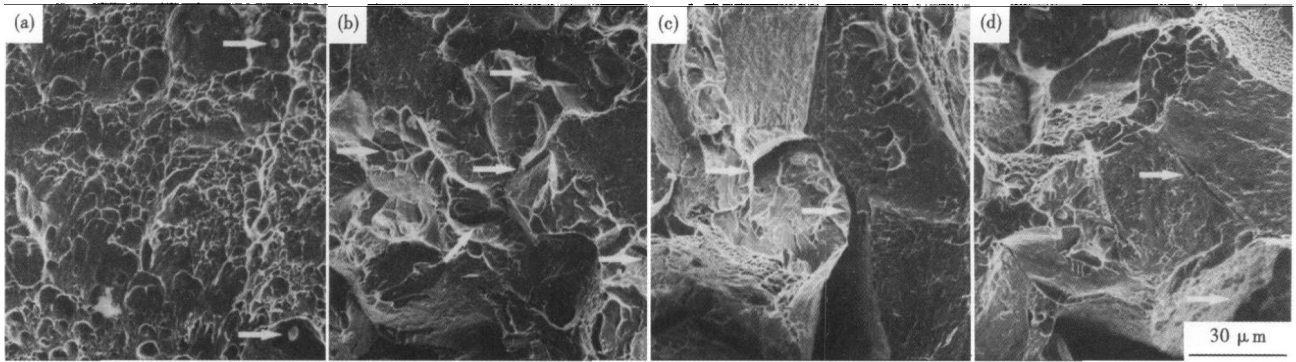


图3 淬火冷却速度对1Cr12Ni3Mo2VN钢冲击断口形貌的影响:(a)油冷;(b)5 °C/min、(c)1 °C/min和(d)0.5 °C/min冷却,箭头处第二相粒子

Fig.3 Effect of quenching cooling rate on morphology of impact fracture of steel 1Cr12Ni3Mo2VN: oil cooling (a); 5 °C/min (b), 1 °C/min (c) and 0.5 °C/min (d) cooling, arrow; secondary phase particles

解理断口有所减少,解理断口有所增加,脆性增大。

3 讨论

由于油冷淬火组织中的残余奥氏体稳定性较好,导致回火组织相界比较干净,无粗化的碳化物析出,相界的结合力大;但淬火时合金元素来不及扩散,淬火组织中的原奥氏体晶界无粗化的碳化物析出(图2a),回火后细小的碳化物仅在基体中弥散析出。因此试验钢的韧塑性良好,冲击断口形貌为塑性断裂形貌-韧窝(图3a)。随着淬火冷却速度的显著减小,碳从 γ 相中析出,与周围的铬、铁形成碳化物,并沿晶界分布(图2b,c,d)。生成的碳化物随淬火冷却速率的降低有增多、粗化的趋势^[3],并使残余奥氏体中合金元素和碳含量显著减少,残余奥氏体稳定性大幅度下降,在随后的回火过程中,残余奥氏体发生热失稳分解,沿板条间析出大量碳化物(图4),由于这些碳化物受拉伸作用导致穿晶解理断裂^[4](图3b,c,d),使冲击值显著下降。根据断口形貌(图3b,c,d为准解理和解理的混合断口)推

断,残余奥氏体发生热失稳分解是导致冲击韧性显著下降的主要原因,粗化碳化物沿原奥氏体晶界析出是次要原因。

从1040 °C按0.5 °C/min炉冷至不同温度空冷的组织分析可见,820 °C时,原奥氏体晶界有少量碳化物析出,720 °C时,原奥氏体晶界有大量聚集、长大的碳化物析出,温度继续降低,原奥氏体晶界碳化物析出量变化不大。可见,在720~820 °C冷却过程中,由于原奥氏体晶界上碳化物的大量析出,使残余奥氏体中合金元素和碳含量的显著减少,造成淬火组织中的残余奥氏体稳定性大幅度下降。

4 结论

(1)残余奥氏体发生热失稳分解是导致试验钢淬火缓冷后冲击韧性显著下降的主要原因,粗化碳化物沿原奥氏体晶界析出是次要原因。

(2)低速淬火时,在820~720 °C碳化物于原奥氏体晶界大量析出,使残余奥氏体中合金元素和碳含量显著减少,其稳定性大幅度下降。

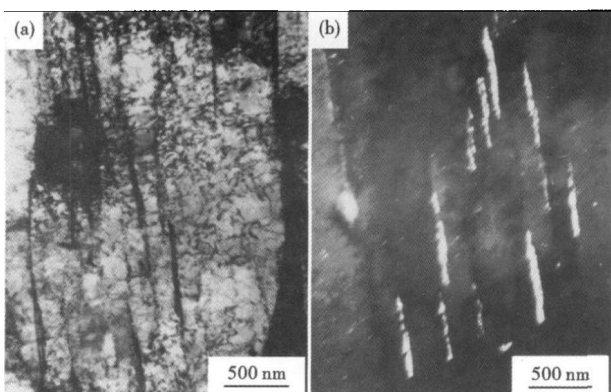


图4 板条界面析出物形貌:0.5 °C/min炉冷(a)明场;(b)暗场
Fig.4 Morphology of precipitates at interface of laths, 0.5 °C/min furnace cooling: (a) bright field; (b) dark field

参考文献

- 1 陆燕逊. 从超临界机组的发展透视研发新材料的紧迫性. 发电设备, 2006, 25(3):149
- 2 Viswanathan R, Bakker W T. Materials for Ultrasupercritical Coal Power Plants -boiler Materials; Part 2. MEPEC, 2001(10):81
- 3 王立民, 邵青安, 杨钢, 等. 冷却速率对0Cr11Ni2MoVn钢冲击韧度和组织的影响. 机械工程材料, 2006, 30(8):31
- 4 Horn R M, Ritchie Robert O. Mechanisms of Tempered Martensite Embrittlement in Low Alloy Steels. Metallurgical Transactions A, 1978, 9A(8):1039

谢学林(1972-),男,硕士,助理工程师,主要从事超(超)临界火电机组汽轮机叶片钢的开发研究。

收稿日期:2009-07-27