

700 °C 超超临界汽轮机用镍基合金转子锻件的试制

聂义宏^{1,3}, 白亚冠^{2,3}, 寇金凤², 郭伟^{2,3}, 张鑫², 曹志远², 王宝忠¹

(1. 中国第一重型机械股份公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161042)

(2. 中国一重 天津重型装备工程研究有限公司, 天津 300457)

(3. 黑龙江省高端核电装备智能制造重点实验室, 黑龙江 齐齐哈尔 161042)

摘要: 为了实现快速突破、掌握大吨位镍基合金转子锻件的制造关键技术并积累关键数据, 中国一重开展了 700 °C 超超临界汽轮机转子用大截面镍基合金转子锻件的试制。通过多次锻拔的自由锻造方式完成了直径 600 mm 的试制件的制造。经过检测, 锻态晶粒度可达 4~6 级, 热处理态晶粒度可保持在 1~2 级, 试制锻件室温抗拉强度>1000 MPa, 屈服强度>600 MPa, 冲击功>45 J, 700 °C 抗拉强度>800 MPa, 屈服强度>500 MPa, 室温和 700 °C 的延伸率和断面收缩率均在 25% 以上, 实现了大截面镍基合金锻件的均质化制造。

关键词: 镍基合金; 锻造; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.1⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)10-3814-05

为了提高煤炭的清洁高效利用, 减少碳排放、提高发电热效率, 提高发电设备的参数是非常重要的方向之一。国际上最早在 21 世纪初就开始了 700 °C 以上先进超超临界火力发电技术(A-USC)的研发工作^[1-6]。中国于 2010 年成立了“700 °C 超超临界燃煤发电技术创新联盟”, 开始了 700 °C 超超临界材料相关技术的研究工作^[6-8]。

在汽轮机转子方面, 由于铁素体耐热钢的最高使用温度不超过 650 °C, 因此针对 IN 617、IN 740 等成熟合金及其改进型合金开展了深入的研究, 以满足 700 °C 机组转子的要求^[5,7,9,10]。在众多的候选材料当中, IN 617 合金及其改进型镍基合金是研究热度最高的合金, 用其可制造汽轮机转子、叶片以及锅炉的部件等^[1-6]。欧美均已开展了中试锻件甚至成品锻件的试制, 其中德国 SAAR 公司制造了世界上最大的试制件, 成品质量达到 28 t, 牌号为 TOS1-II (改型 IN617) 合金。除此外, 还试制了 10 t 级 FENIX-700 (改型 IN706)、Nimonic263、IN625、IN740H 等合金的锻件^[4,6,7]。为了在此领域实现自主知识产权和形成自主保障, 中国一重联合了相关单位率先开展了改型 IN617 合金锻件的试制, 以期获得 700 °C 超超临界汽轮机机组用镍基合金转子试制锻件。

1 实验方法

收稿日期: 2021-03-03

基金项目: 国家能源应用技术研究及工程示范项目(NY20150101-1); 天津市重点研发计划科技支撑重点项目(18YFZCGX00220)

作者简介: 聂义宏, 女, 1977 年生, 博士, 高级工程师, 中国第一重型机械股份公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161042, 电话: 0452-6811108, E-mail: nieyihong@126.com

本次试制的铸锭采用 VIM(真空感应熔炼)+PESR (气体保护电渣重熔) 的双联工艺进行冶炼, 质量为 5.5 t, 成分见表 1。

铸锭经均匀化处理后在水压机上进行多次锻拔开坯, 锻造温度区间 900~1200 °C, 锻后进行粗加工并探伤, 再进行热处理。表面经加工后再进行探伤, 最终获得直径为 600 mm 的锻件。锻件生产流程为: 冶炼-均匀化处理-锻造-机加工-探伤-热处理-机加工-探伤-组织与性能检测。从锻件上取盘片, 在截面心部、1/2R、边缘分别取试样进行组织与力学性能的检测, 同时沿径向和切向成 90° 分别各取 2 组试样开展不同方向的力学性能测评。

试样经金相砂纸研磨并抛光, 然后在硫酸(5 mL)+盐酸(150 mL)+硫酸铜(20 g)+水(80 mL)的溶液中浸蚀。采用德国 Carl Zeiss 公司的 Axiovert 200 MAT 光学显微镜、美国 FEI 公司的 Quanta400 扫描电镜观察分析合金的显微组织; 采用截点法测定晶粒度; 采用直径 5 mm 的标准拉伸试样和 10 mm×10 mm×55 mm 的标准 V 口冲击试样测试锻件的拉伸和冲击性能。

表 1 锻件的主要化学成分

Table 1 Chemical composition of the forging (wt%)								
C	Cr	Mo	Co	Al	Ti	Ni	B	Ta
0.049	19.53	8.79	11.78	1.3	1.35	Bal.		Trace

2 结果及讨论

2.1 锻态显微组织

对自由锻造获得的试制件切取盘片并开展了心部、1/2R 和边缘的晶粒度测定。图 1 为试制锻件的显微组织及晶粒度测定结果。由图可知, 经多次墩拔锻造, 锻件各部位均为完全再结晶组织, 说明通过锻造已将铸态组织完全打碎。锻件截面晶粒度在 4~6 级, 晶粒尺寸整体呈心部 > 1/2R > 边缘的规律, 其中心部和 1/2R 处晶粒尺寸相差不大, 边缘由于锻造时变形量大、温度适中且锻后冷却较快, 晶粒较细。

2.2 热处理态显微组织

对试制锻件进行了固溶+时效热处理, 同样切取盘片并进行了心部、1/2R 和边缘的显微组织观察和晶粒度测定, 结果见图 2。由图 2 可知, 经过热处理后, 锻件各部位的晶粒均发生了明显的长大, 锻件截面各部位均为等轴晶组织, 且晶粒尺寸均匀, 无异常长大现象, 不同部位的晶粒度在 1~2 级之间, 整体均匀。

对锻件的析出相进行了观察与分析, 见图 3。可知, 经过固溶+时效的热处理后, 试制件内部析出相

主要由晶界与晶内的块状析出相和颗粒状析出相组成。经过 EDS 分析并根据之前的研究^[9]可知, 尺寸较大的块状析出相富含 Mo、Nb、Ti 等元素, 为冶炼凝固过程中形成的一次 MC 型碳化物。其回溶温度较高, 在均匀化处理、锻造及后续的热处理过程中未能够回溶到基体中; 晶界和晶内的小颗粒碳化物为富含 Cr、Mo 的 $M_{23}C_6$ 型碳化物^[9,10], 为锻件在固溶处理后的冷却过程中和时效过程中析出。对比 3 个位置的析出相可知, MC 型碳化物均有分布, 但晶界 $M_{23}C_6$ 型碳化物差别明显, 心部和 1/2R 处晶界 $M_{23}C_6$ 型碳化物尺寸较大, 晶界较宽, 大部分带有一定的弯曲, 而边缘处晶界较细, $M_{23}C_6$ 型碳化物尺寸较小, 整体平直。锻件在固溶处理后的冷却过程中, 由于镍基合金导热系数小、锻件截面大, 因此心部和 1/2R 部位的冷却速度要远小于边缘, 在缓慢的冷却过程中一定程度的晶粒长大与碳化物析出的钉扎交互作用形成了弯曲晶界, 且碳化物有较充足的动力进行析出长大, 造成了锻件边缘与心部和 1/2R 处晶界碳化物尺寸与晶界形态的不同。

2.3 力学性能



图 1 试制锻件金相组织及晶粒度

Fig.1 OM microstructures and grain sizes at different positions of the forging: (a) centre, 4.3 class; (b) 1/2R, 4.5 class; (c) edge, 6.5 class



图 2 锻件热处理态金相组织

Fig.2 OM microstructures and grain sizes at different positions of the forging after heat treatment: (a) centre, 1.3 class; (b) 1/2R, 1.8 class; (c) edge, 1.5 class

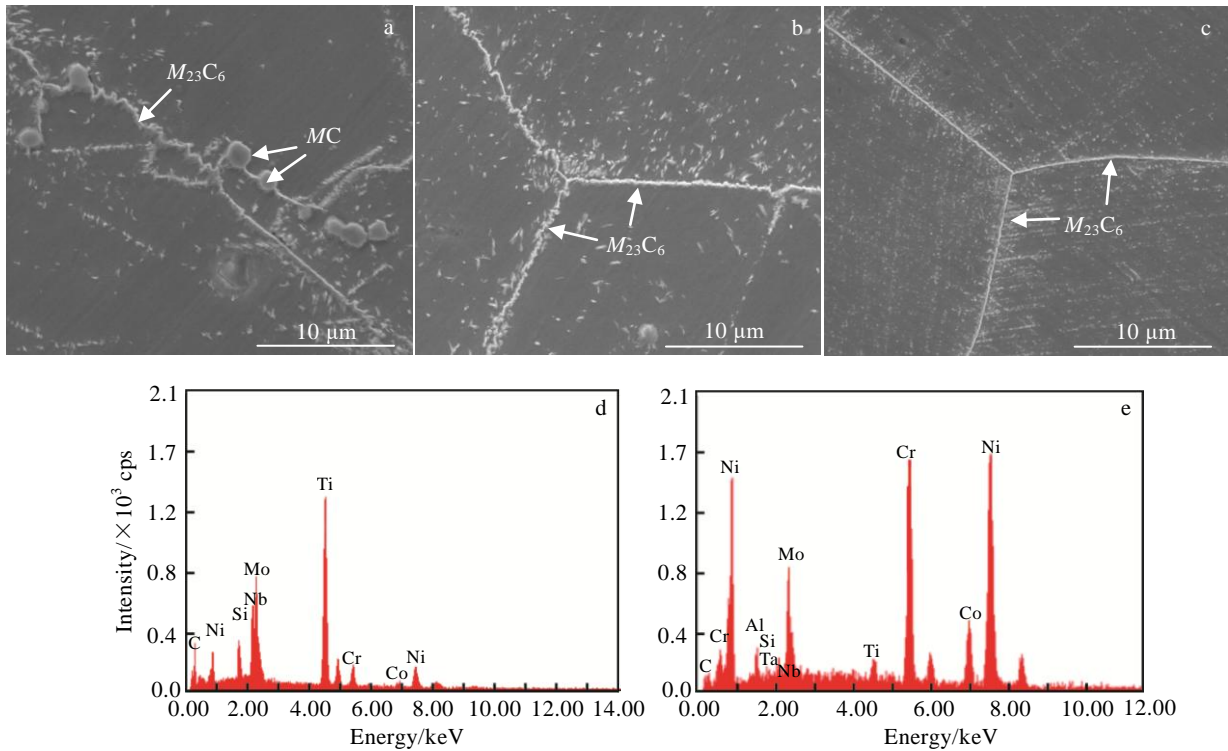


图 3 锻件内部析出相形貌及 EDS 分析结果

Fig.3 Precipitates morphologies at different positions of the forging: (a) centre, (b) 1/2R radius, (c) edge; EDS spectra of MC in Fig.3a (d) and M₂₃C₆ in Fig.3b (e)

从经过热处理后的试制锻件的心部、1/2R 和边缘处分别取拉伸和冲击试样，研究锻件不同位置的轴向力学性能均匀性，见图 4。由图 4a, 4b 可知，经过热处理后，心部和 1/2R 处的室温强度、塑性相当，边缘的强度、塑性和冲击功较高，整体抗拉强度>1000 MPa，屈服强度>600 MPa，延伸率和断面收缩率均>25%，冲击功>45 J。其边缘部位冲击功明显较高，这是由于边缘部位晶界处碳化物尺寸较小，其晶界结合强度整体较高导致。由图 4c 可知，700 °C 温度下的力学性能

规律同室温，整体均匀，整体抗拉强度>800 MPa，屈服强度>500 MPa，延伸率和断面收缩率>25%。

从边缘处沿轴向、径向和切向分别切取拉伸试样（径向和切向分别取 2 组试样，同方向 2 组试样与盘片圆心连线成 90°）进行拉伸性能的测试，检测结果见图 5。由图 5a, 5b 可知，3 个方向的室温拉伸性能水平波动较小，抗拉强度的最大值与最小值之间差值不超过 100 MPa，屈服强度的最大值与最小值之间差值不超过 60 MPa，波动幅度在 10% 以内；其延伸率和

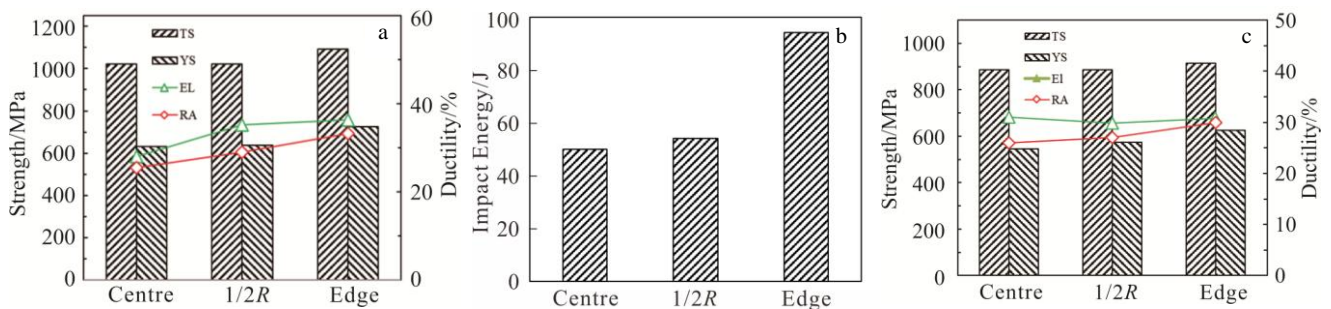


图 4 锻件截面不同位置轴向力学性能

Fig.4 Axial mechanical properties of different positions of the forging: (a) tensile properties at room temperature; (b) V-notch impact energy at room temperature; (c) tensile properties at 700 °C

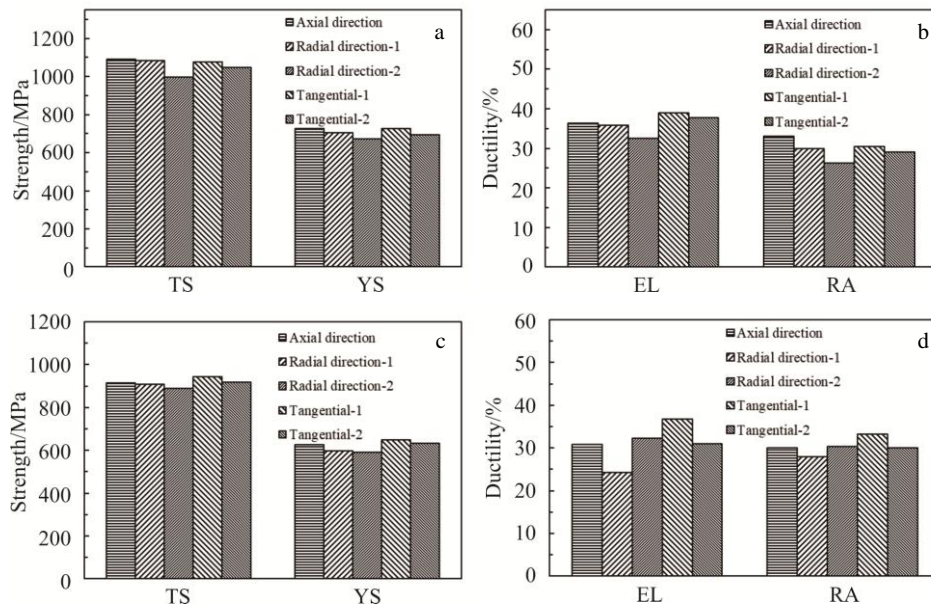


图 5 锻件不同方向拉伸性能

Fig.5 Comparison of tensile properties in different directions for the forging at room temperature (a, b) and 700 °C (c, d)

断面收缩率均可保持在 25% 以上。而对于其高温拉伸性能 (见图 5c, 5d), 强度的变化幅度均在 60 MPa 以内, 而延伸率和断面收缩率均可保持在 20% 以上。

综上, 试制的直径 600 mm 锻件截面不同部位的组织与性能较均匀, 不同方向性能波动较小, 无各向异性现象。

3 结论

- 1) 通过自由锻造可实现大截面 (直径 600 mm) 镍基合金转子锻件的均质化制造。
- 2) 试制的转子锻件经热处理后晶粒度可保持在 1~2 级, 各部位组织均匀。
- 3) 试制锻件整体力学性能均匀, 室温整体抗拉强度 >1000 MPa, 屈服强度 >600 MPa, 冲击功 >45 J, 700 °C 抗拉强度 >800 MPa, 屈服强度 >500 MPa, 室温和 700 °C 的延伸率和断面收缩率均在 25% 以上。

参考文献 References

- [1] Klower J, Husemann R U, Bader M. *Procedia Engineering*[J], 2013, 55: 226
- [2] Joachim R, Martin G, Dominique D C *et al. Advanced Engineering Materials*[J], 2003, 5(7): 469
- [3] Xie Xishan, Chi Chengyu, Zhao Shuangqun *et al. Materials Science Forum*[J], 2013, 747-748: 594
- [4] Shailesh J P, John J B, Brian A B *et al. Procedia Engineering*[J], 2013, 55: 246
- [5] Klarstrom D L, Pike L M, Ishwar V R. *Procedia Engineering*[J], 2013, 55: 221
- [6] Tian Zhongliang(田仲良), Bao Hansheng(包汉生), He Xikou(何西扣) *et al. Iron and Steel(钢铁)*[J], 2015, 50(2): 54
- [7] Liu Zhengdong(刘正东). *2011 National High Quality Special Steel Production Technology Seminar(2011 年全国高品质特殊钢生产技术研讨会文集)*[C]. Beijing: The Chinese Society for Metals, 2011: 6
- [8] Lin Fusheng(林富生), Xie Xishan(谢锡善), Zhao Shuangqun(赵双群) *et al. Journal of Chinese Society of Power Engineering(动力工程学报)*[J], 2011, 31(12): 960
- [9] Bai Yaguan(白亚冠), Nie Yihong(聂义宏), Wu Yun(吴贇) *et al. Heavy Casting and Forging(大型铸锻件)*[J], 2018, 184(4): 32
- [10] Guo Yan(郭岩), Wang Bohan(王博涵), Hou Shufang(侯淑芳) *et al. Proceedings of the CSEE(中国电机工程学报)*[J], 2014, 34(14): 2314

Trial Manufacturing of Ni-base Alloy Rotor Forging for 700 °C Advanced USC Power Plant

Nie Yihong^{1,3}, Bai Yaguan^{2,3}, Kou Jinfeng², Guo Wei^{2,3}, Zhang Xin², Cao Zhiyuan², Wang Baozhong¹

(1. China First Heavy Industries, Qiqihaer 161042, China)

(2. Tianjin Heavy Industries Research & Development Co., Ltd, Tianjin 300457, China)

(3. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Intelligent Manufacturing for Advanced Nuclear Power Equipment, Qiqihaer 161042, China)

Abstract: For a rapid breakthrough, acquiring the key manufacturing technology and accomplishing key data accumulation, CFHI had manufactured a large-section Ni-base trial forging for 700 °C advanced USC power plant. Through several times of upsetting and drawing, the rotor trial forging with a diameter of 600 mm was successfully manufactured. Grain size of Ni-base alloy forging is 4~6 class and the grain size is 1~2 class after heat treatment. The room temperature tensile strength and yield strength can reach 1000 and 600 MPa, respectively, and impact energy is beyond 45 J at different positions after heat treatment. The tensile strength and yield strength can reach 800 and 500 MPa at 700 °C, respectively. The plasticity is more than 25% at room temperature and 700 °C. The homogeneous manufacture of large section nickel base alloy forging was realized.

Key words: Ni-base alloy; forge; microstructure; mechanical property

Corresponding author: Nie Yihong, Ph. D., Senior Engineer, China First Heavy Industries, Qiqihaer 161042, Tel: 0086-452-6811108, E-mail: nieyihong@126.com