

引用格式:白亚冠,聂义宏,张鑫,等.先进超超临界汽轮机转子用大截面 C700R-1 合金锻件及力学性能[J].材料工程,2025,53(11):72-79.

BAI Yaguan, NIE Yihong, ZHANG Xin, et al. Large section C700R-1 alloy forging for advanced ultra-supercritical turbine rotor and mechanical properties[J]. Journal of Materials Engineering, 2025, 53(11): 72-79.

先进超超临界汽轮机转子用大截面 C700R-1 合金锻件及力学性能

Large section C700R-1 alloy forging for
advanced ultra-supercritical turbine rotor
and mechanical properties

白亚冠^{1,2,3}, 聂义宏^{1,2,3*}, 张鑫¹, 寇金凤¹, 郭伟¹,
李红梅¹, 张冰冰¹, 曹志远¹, 王宝忠²

(1 天津重型装备工程研究有限公司, 天津 300457; 2 中国第一重型
机械股份公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161042; 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)

BAI Yaguan^{1,2,3}, NIE Yihong^{1,2,3*}, ZHANG Xin¹, KOU Jinfeng¹,
GUO Wei¹, LI Hongmei¹, ZHANG Bingbing¹,
CAO Zhiyuan¹, WANG Baozhong²

(1 Tianjin Heavy Industries Research & Development Co., Ltd., Tianjin
300457, China; 2 China First Heavy Industries, Qiqihar 161042,
Heilongjiang, China; 3 Heilongjiang Provincial Key Laboratory
of Intelligent Manufacturing for Advanced Nuclear Power
Equipment, Qiqihar 161042, Heilongjiang, China)

摘要:面向未来煤炭清洁高效利用的发展需求,开展了先进超超临界汽轮机转子用 C700R-1 镍基合金转子锻件的研制,并对试制的转子锻件进行了常规力学性能和短时持久性能的检测。结果表明,采用闭式墩粗+挤压的方式可以实现 $\Phi 850$ mm 锻件的高均质化锻造。研制的大截面锻件锻态晶粒度在 4~7 级,热处理后的晶粒度在 3 级左右。由于边缘部位固溶后冷却速率高,后续时效过程中可析出大量均匀细小的 γ' 相。因此,锻件边缘拉伸性能略优于心部和 1/2R。边缘位置不同方向拉伸性能波动很小。锻件室温抗拉强度 > 950 MPa,屈服强度 > 600 MPa,冲击功 $A_{KV} > 70$ J; 700 °C 抗拉强度 > 750 MPa,屈服强度 > 500 MPa。室温和 700 °C 的伸长率和断面伸缩率均在 25% 以上。锻件在 700 °C/300 MPa 条件下的持久时间 > 7000 h。本课题通过闭式墩粗+挤压的变形方式以及合理的热处理工艺,实现了 $\Phi 850$ mm 截面等级镍基合金锻件的均质化制造,为后续全尺寸镍基合金转子锻件的制造提供了关键数据。

关键词:先进超超临界;转子;C700R-1;镍基合金;挤压;力学性能

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2023.000310 **CSTR:** 32421.14.j.issn.1001-4381.2023.000310

中图分类号: TG146.1+5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2025)11-0072-08

Abstract: To address the evolving demands for the clean and efficient utilization of coal, efforts have been devoted to the research and development of C700R-1 nickel-based alloy rotor forgings for advanced ultra-supercritical steam turbine rotors. Concurrently, tests are conducted on the conventional mechanical properties and creep rupture properties of the trial-manufactured rotor forgings. The results show that the use of the closed upsetting+extrusion method enables the high-homogeneity forging of $\Phi 850$ mm forgings. The as-forged grain size of the developed large-section forgings ranges from grade 4 to grade 7, and the grain size after heat treatment is approximately grade 3. Due to the rapid cooling rate of the edge parts after solid solution, a large number of uniform and fine γ' phases precipitate in the subsequent aging process. Therefore, the tensile properties of edge position are slightly better than those of the heart and 1/2R

position. The variation of tensile properties in different directions of edge position is small. The room temperature tensile strength can reach 950 MPa, the yield strength can reach 600 MPa, and the V-notch absorbed energy at room temperature is beyond 70 J at different positions after heat treatment. The tensile strength can reach 750 MPa, yield strength can reach 500 MPa at 700 °C. The plasticity is higher than 25% at room temperature and 700 °C. The creep life exceeds 7000 h in the condition of 700 °C/300 MPa. Through the deformation mode of closed upsetting+extrusion and reasonable heat treatment process, the homogenization manufacturing of nickel base alloy forgings with a section grade of $\Phi 850$ mm, which provides key data for the subsequent manufacturing of full-size nickel base alloy rotor forgings.

Key words: advanced ultra-supercritical; rotor; C700R-1; nickel-based alloy; extrusion; mechanical property

在国家的“双碳”战略下,推进煤炭清洁高效利用,切实发挥煤炭的兜底保障和压舱石作用,确保国家能源电力安全保供是一项非常重要的任务。提高煤炭的清洁高效利用的重点发展方向为提高发电蒸汽参数。国外二十多年前就开始 650 °C 甚至更高温度等级的发电装备材料的研发工作。欧美日等国家针对材料成分优化、锻造工艺开发、组织稳定性及焊接等开展了大量研究工作^[1-11]。在材料选材、大截面锻件试制等方面已经有较多的积累,并已经成功完成了 IN617(欧洲)、TOS1X-I(欧洲)、TOS1X-II(欧洲)、Alloy263(欧洲)、FENIX-700(日本)、LTES700R(日本)等多种材质的直径超过 800 mm 的锻件试制。我国起步相对较晚,国家能源局于 2010 年组织成立了“700 °C 超超临界燃煤发电技术创新联盟”,集合了国内各个领域最强的研发机构和制造单位,共同开展 700 °C 超超临界机组材料及制造技术的研究工作^[12-14]。但镍基合金中合金元素种类多、变形抗力大、再结晶难度大,且导热系数小、热膨胀系数大,其制造过程中容易存在开裂、晶粒粗大、截面晶粒度不均匀、混晶等问题,制造难度非常大。国内也从未见 $\Phi 600$ mm 以上转子锻件的研制报道,在大截面镍基合金转子锻件研制方面尚属空白。因此开展大截面镍基合金转子锻件的研制对于国家掌握此类锻件的关键核心技术至关重要。

在 650 °C 及以上超超临界汽轮机转子用材料方面,国外已对 IN718、IN617B 等合金开展了研究,国内也根据自身国情开展了选材研究工作,其中,钢铁研究总院基于选择性强化设计的理念发明了一种适用于 700 °C 超超临界汽轮机转子的新型镍基合金-C700R-1,并进行了相关的实验室基础研究,获得了较多的数据^[15-17]。为了在此领域实现自主知识产权和形成自主保障,本课题组联合国内相关研发与特冶单位于国内率先开展了大截面 C700R-1 合金锻件的试制,创新性地采用闭式墩粗+挤压的制造方式成功获得了国内首个 $\Phi 850$ mm 等级的 700 °C 超超临界汽轮机机组用镍基合金转子锻件。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

本次试制的材料为面向 700 °C 超超临界汽轮机转子锻件开发的一种新材料——C700R-1 合金。铸锭由抚顺特钢冶炼,冶炼路线为:真空感应熔炼+气体保护电渣重熔+真空自耗重熔,铸锭直径为 810 mm。

铸锭经 1180~1200 °C 长时均匀化处理,采用闭式墩粗+挤压的方式成形,锻造温度区间 900~1200 °C,最终获得锻件直径 ≥ 850 mm,锻件照片见图 1。从锻件上切取试片,对整个试片不同位置的锻态显微组织进行观察与分析。对锻件进行粗加工后,再整体进行固溶+时效热处理,并进行最终的精加工。在完成热处理的锻件上切取试片,在试片的横截面心部、1/2R、边缘位置分别切取试样进行显微组织与力学性能的检测,同时于试片边缘部位分别沿径向和切向呈 90° 各取两组试样开展不同方向的力学性能评测,其中,持久性能试样沿轴向取自试片横截面 1/2R 处,取样位置见图 2 所示。



图1 $\Phi 850$ mm 的 C700R-1 锻件

Fig.1 $\Phi 850$ mm forging of C700R-1

1.2 实验方法

金相试样经金相砂纸研磨并抛光后在 5 mL H_2SO_4 + 150 mL HCl + 20 g $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ + 80 mL H_2O 的溶液中浸蚀制成。采用 Axiovert 200 MAT 光学显微镜、Quanta400 扫描电镜观察分析合金的显微组织;采用

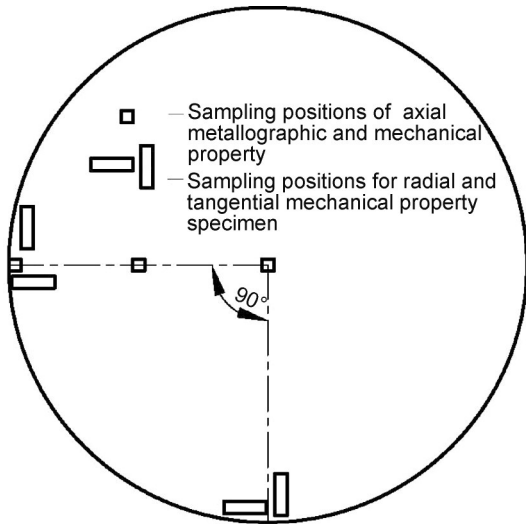


图2 取样位置示意图

Fig.2 Sampling position diagram

截点法按 GB/T 6394 评定晶粒度等级;采用 $\Phi 5$ mm 的标准拉伸试样按照 GB/T 228.1、GB/T 228.2 在 CSS44300 电子万能试验机上测试锻件的室温与 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 拉伸性能;采用 $\Phi 5$ mm 持久试样按照 GB/T 2039 在 RDJ 机械式高温持久试验机上测试锻件的短时持久性能,测试温度为 $700\text{ }^{\circ}\text{C}$,应力为 300 MPa ;采用 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 55\text{ mm}$ 的标准 V 口冲击试样按照 GB/T 229 在 CBD-500 电子式摆锤冲击试验机上测试锻件的冲击性能。

2 结果与分析

2.1 铸锭横截面不同位置成分

从铸锭冒口侧横截面的边缘、 $1/2R$ 和心部分别取

样进行关键成分检测,结果见表 1,可见通过采用三联特种冶炼工艺,可很好地将直径达到 $\Phi 810\text{ mm}$ 的铸锭同一横截面上的化学成分控制在 1 个比较均匀的状态,无明显的宏观偏析存在。

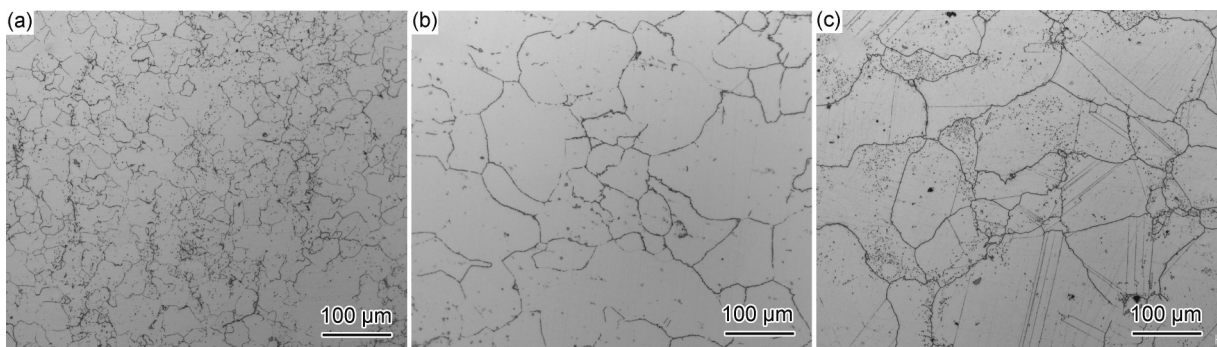
表 1 铸锭不同位置的主要化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of ingot(mass fraction/%)

Position	C	Cr	Mo	Co	Al	Ti	W	Ni
Edge	0.050	20.5	8.8	12.0	1.23	1.40	0.71	Bal.
$1/2R$	0.051	20.6	8.9	12.1	1.25	1.39	0.70	Bal.
Center	0.055	20.6	8.8	12.1	1.26	1.41	0.72	Bal.

2.2 锻件锻态显微组织

在锻态试片的内侧(靠近锻件本体侧)横截面边缘、 $1/2R$ 和心部分别取样进行晶粒度的观察与评定。图 3 为 $\Phi 850\text{ mm}$ 等级试制件的锻态显微组织,由图 3 中 3 个位置的金相照片对比可知,大型 C700R-1 合金铸锭经过变形后铸态组织完全破碎,各部位均可获得完全等轴晶组织。并且经过闭式镦粗+挤压的大变形量塑性变形后,锻件晶粒可显著得到细化,并保持在 4~7 级的水平。其中心部和 $1/2R$ 处晶粒尺寸相差较小,均为约 4.5 级,这是由于锻件截面较大,在锻造过程中由于剧烈的塑性变形会使得心部和 $1/2R$ 处存在一定的温度升高,且镍基合金的导热系数较小,在以上因素的共同作用下,锻件内部的再结晶晶粒会发生一定的长大。而边缘由于锻造时变形量大、温度适中且锻后冷却速度较快,发生再结晶后温度已经不能使晶粒发生长大,因此锻件外周侧晶粒度可保持在 7 级左右。

图3 锻件锻态不同位置晶粒尺寸 (a)边缘;(b) $1/2R$;(c)心部Fig.3 Grain size at different positions of forging (a)edge;(b) $1/2R$;(c)center

2.3 锻件热处理态显微组织

采用一级固溶+一级时效的工艺,对试制件整体进行了性热处理。从完成热处理的试制锻件上切取试片并按照图 2 所示取样,对边缘、 $1/2R$ 和心部的试样进行

了显微组织观察和晶粒度测定,结果见图 4,5。由图 4 与图 3 对比可知,经过热处理后,锻件各部位的晶粒均发生了明显的长大,同一横截面上晶粒度整体较均匀,在 3 级左右,但个别部位存在较小晶粒,且对应部位析出相较多。

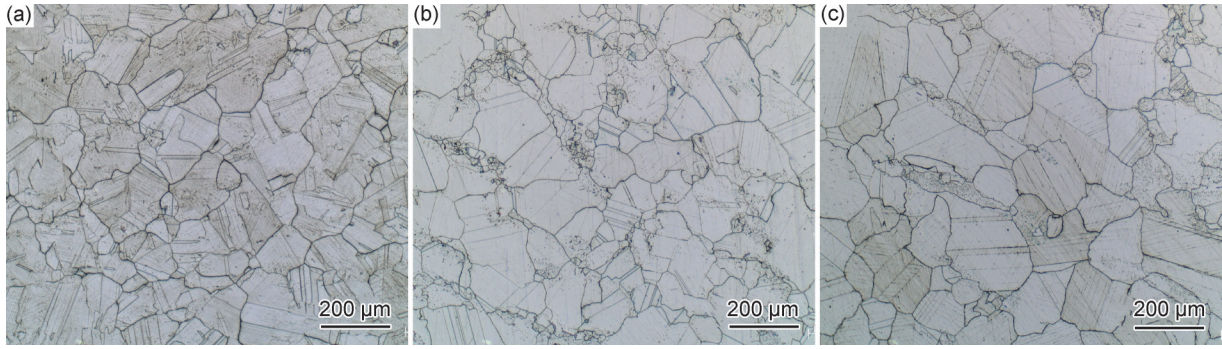


图 4 锻件热处理态不同位置显微组织 (a)边缘;(b)1/2R;(c)心部
Fig.4 Microstructures at different positions of forging after heat treatment (a)edge;(b)1/2R;(c)center

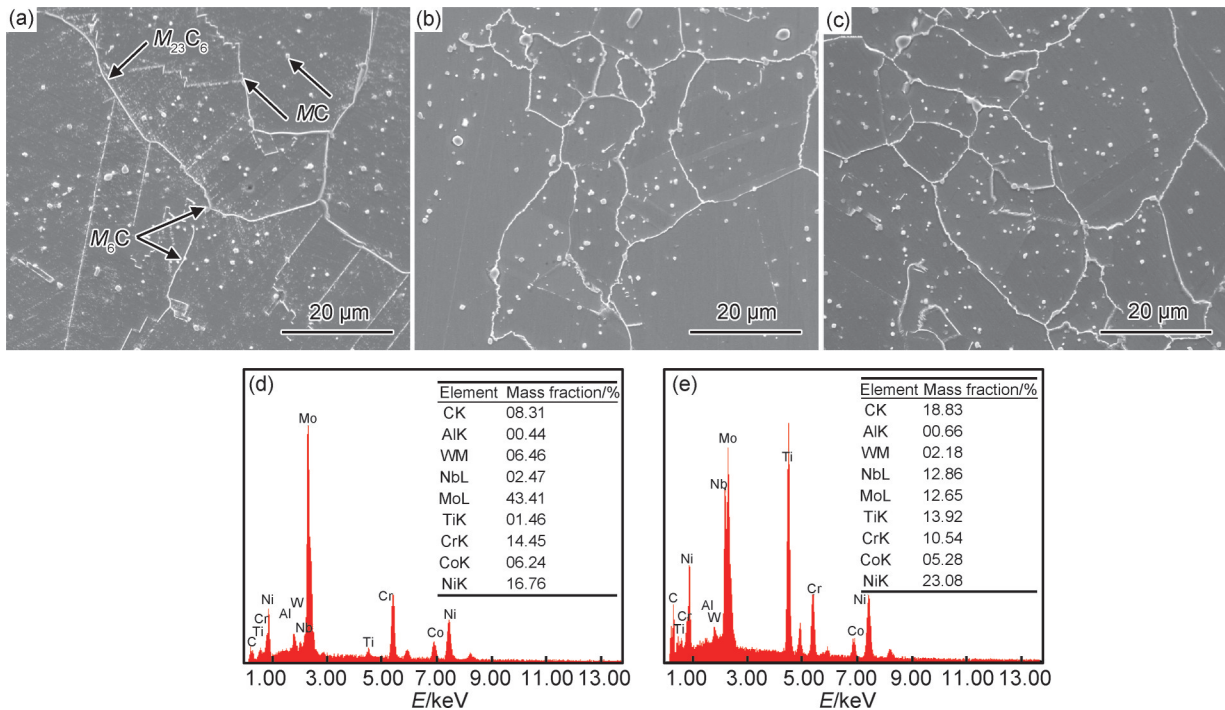


图 5 锻件内部析出相形貌及能谱结果 (a)边缘;(b)1/2R;(c)心部;(d) $M_{23}C_6$ 能谱结果;(e)MC能谱结果
Fig.5 Precipitates morphologies of forging and results of EDS (a)edge;(b)1/2R;(c)center;(d)EDS result of $M_{23}C_6$;(e)EDS result of MC

对细小晶粒区域进行放大观察后发现(图5),此部位晶界和晶内均存在较多的块状析出相。析出相有两种形态:一种形状较规则,整体比较接近块状,个别呈球状。结合EDS结果和文献^[18-22],此类析出相为富含Mo、Nb、Ti的一次MC型碳化物。此类碳化物于冶炼凝固过程中形成,存在较尖锐的棱角,其回溶温度较高,在铸锭锻造前的均匀化处理过程中并不能够完全回溶到基体中。经过长时间的高温保温处理后其棱角会钝化,避免了铸锭在锻造过程中的应力集中,从而降低了锻造开裂倾向。同时在后续的锻造过程中会发生部分碎化和回溶。但由于固溶处理温度要远低于均匀化处理温度,因此此类碳化物会保留至最终的锻件中。另一种析出相形态较不规则,有的会呈长条状,此类析出相为富含Mo、Cr的 M_6C 型碳化物。Mo在C700R-1合金中为主要偏析元素。由于本

次试制所用铸锭直径较大,心部和1/2R处凝固过程中冷却速度较慢,因此铸锭枝晶间Mo元素含量较高。同时铸锭内部枝晶发达,二次枝晶间距较大,如心部可达131 μm^[23-24],在均匀化处理中偏析元素扩散距离较远,难以实现完全的均匀化。在枝晶间存在一定的Mo元素偏析会促进 M_6C 的析出。除了块状的析出相外,在晶界还存在较多的尺寸较小的颗粒状析出相,根据之前的研究结果及EDS结果,为富含Cr、Mo的 $M_{23}C_6$ 型碳化物^[18-20,25],由锻件在固溶处理后的冷却过程中和时效过程中析出。在固溶处理过程中,合金内部存在的碳化物会起到钉扎晶界的作用,从而抑制晶粒的长大,形成个别锯齿晶界,有利于锻件在服役过程中的持久性能。由于Mo、Ti、Nb等元素均易在铸锭枝晶间偏析,在经过热处理后,会在局部形成碳化物的不均匀分布,从而造成局部晶粒较细。边缘处由于

冶炼凝固过程中冷却速度较快,偏析程度较低,一次MC型碳化物和 M_6C 型碳化物较少,晶粒度的均匀性要优于心部和1/2R。

2.4 力学性能结果

(1) 拉伸与冲击性能

从经过热处理后的锻件上切取试片,按图2所示对锻件的力学性能均匀性进行测定与评价。图6为锻件不同部位的轴向力学性能结果对比。由图6(a), (b)可知,经过热处理后,各部位的室温强度和塑性均较均匀,边缘强度要略高于心部和1/2R。这是由于在固溶处理后的冷却过程中,锻件内部的冷却速率要远低于边缘位置。在冷却过程中会析出碳化物和 γ' 相,并发生一定的长大。越靠近心部,冷却速率越低, γ' 相的尺寸越大。而边缘部位由于冷却速率很快,在冷

却过程中几乎不发生 γ' 相的析出。在后续的时效处理过程中,锻件内部由于在冷却过程中已经析出了 γ' 相,在时效过程中只能析出少量甚至不会析出 γ' 相,而边缘部位则会析出大量的 γ' 相,且尺寸都较小。均匀细小且较多数量的 γ' 相能够起到更好的强化作用,因此边缘的整体强度要高于锻件内部。同理,边缘部位晶界碳化物的尺寸也要小于锻件内部,其塑性也要略优于锻件内部。锻件整体室温抗拉强度(TS) >950 MPa,屈服强度(YS) >600 MPa,伸长率(EL) $>30\%$,断面收缩率(RA) $>30\%$,冲击功 $A_{KV}>70$ J。700 °C温度下的短时强度规律同室温(图6(c)),只是边缘部位塑性要低于心部和1/2R部位,高温性能整体均匀,整体抗拉强度 >750 MPa,屈服强度 >500 MPa,伸长率和断面收缩率 $>30\%$ 。

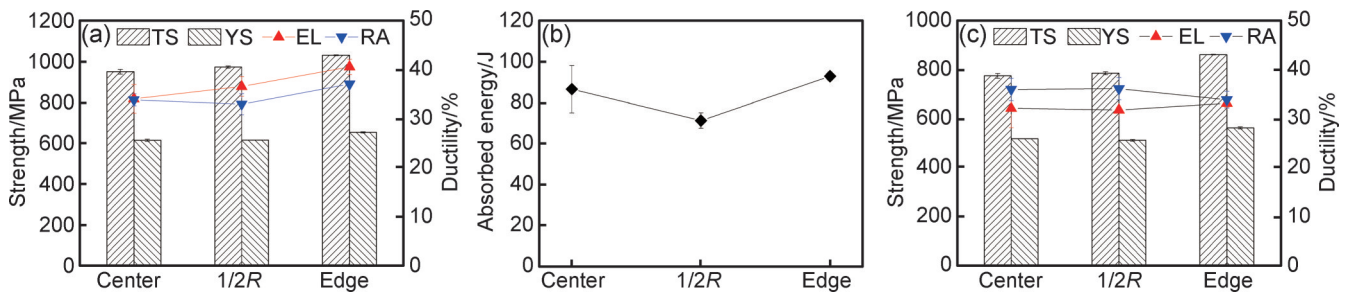


图6 锻件截面不同位置轴向力学性能 (a)室温拉伸;(b)室温V型缺口冲击吸收能量;(c)700 °C拉伸性能

Fig.6 Mechanical properties of different positions of forging section

(a)tensile properties at room temperature; (b)V-notch absorbed energy at room temperature; (c)tensile properties at 700 °C

图7为锻件边缘处不同方向的拉伸性能结果。由图7(a), (b)可知,3个方向的室温拉伸性能水平波动

较小,抗拉和屈服强度的最大值与最小值之间差值不超过30 MPa,波动幅度很小,其塑性指标平均值均高

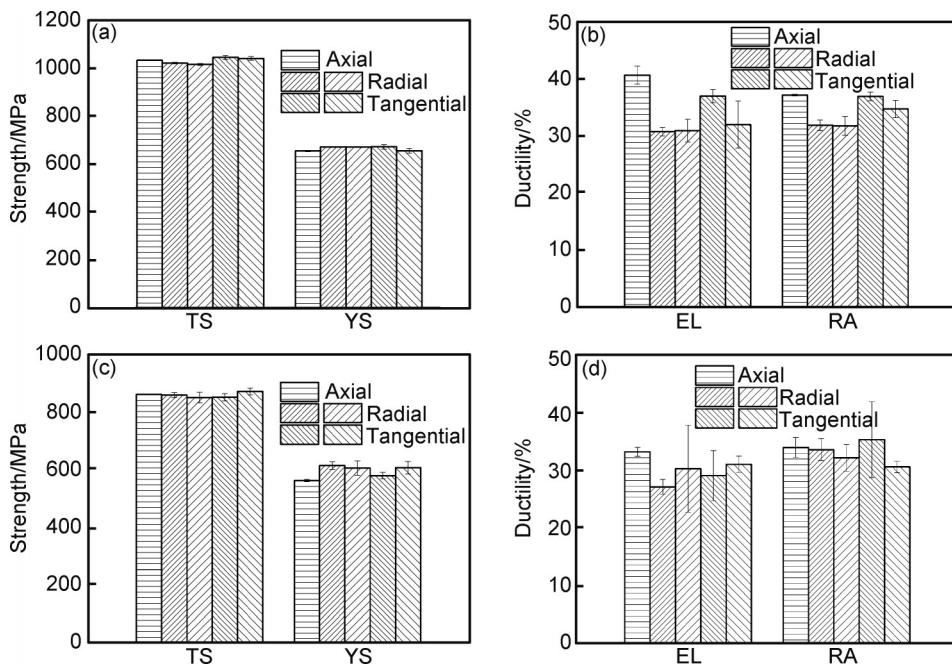


图7 锻件不同方向拉伸性能 (a),(b)室温;(c),(d)700 °C

Fig.7 Comparison of tensile properties in different directions (a),(b)room temperature; (c),(d)700 °C

于 30%。对于 700 °C 短时拉伸性能(见图 7(c), (d)), 强度的变化幅度均在 50 MPa 以内, 而伸长率和断面收缩率平均值均可保持在 25% 以上。由图 8 所示锻件不同方向的冲击性能结果可知, 边缘处不同方向的冲击功 A_{KV} 值均大于 70 J, 表现出了优异的冲击性能。同时, 还对开口方向是否对冲击性能结果有影响做了

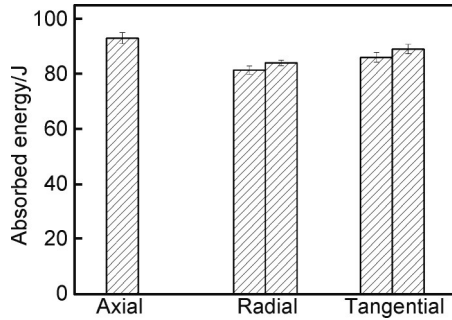


图 8 锻件不同方向 V 型缺口冲击吸收能量

Fig.8 Comparison of V-notch absorbed energy in different directions

研究, 结果表明对于本锻件无明显影响。这是由于此拉伸试样取样位置均位于锻件边缘部位, 经过热处理后其组织均匀, 不存在锻造纤维组织或织构等。

综上, 本次通过闭式镦粗 + 挤压方式试制的 $\Phi 850$ 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, 无明显各向异性现象。

图 9 和图 10 为拉伸试样断裂后的典型断口形貌, 可见室温拉伸断口存在沿晶断裂特征(见图 9(a) 和图 10(a)), 放大倍数观察时可以发现较多韧窝的存在(见图 9(b)), 但更多位置呈沿晶断裂特征(见图 10(b))。700 °C 短时拉伸断口呈现穿晶断裂特征(见图 9(c), (d) 和图 10(c), (d)), 放大倍数后可观察到小而浅的韧窝。结合塑性指标可知, 尽管室温断口形貌存在明显的沿晶断裂特征, 但其韧窝大而深, 整体塑性指标甚至略高于 700 °C 条件下的短时拉伸结果。

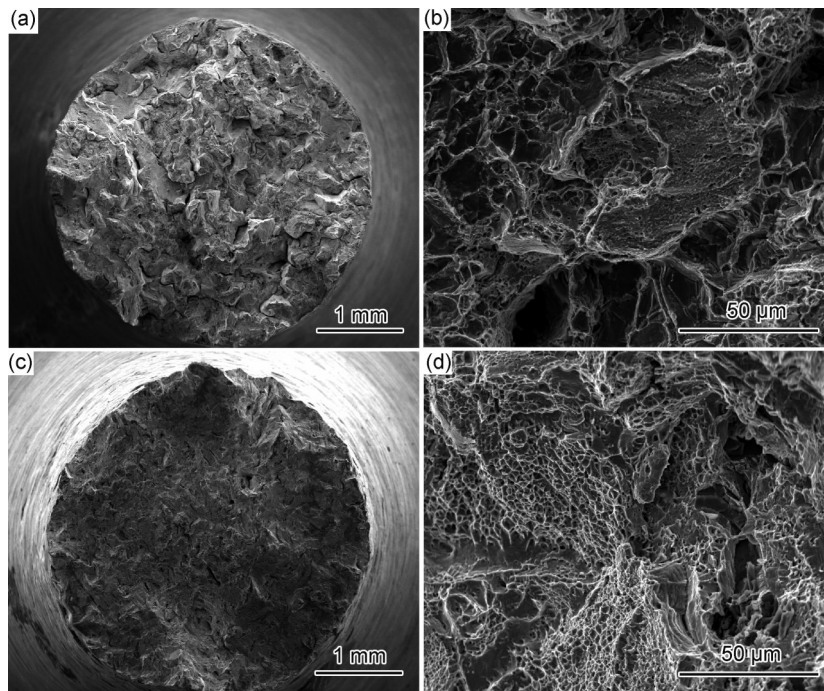


图 9 典型拉伸断口形貌(心部试样) (a), (b) 室温; (c), (d) 700 °C

Fig.9 Fracture morphologies of tensile specimens(sample of center) (a), (b) room temperature; (c), (d) 700 °C

(2) 短时持久性能从经过热处理的锻件横截面的 $1/2R$ 处切取持久试样, 进行 700 °C/300 MPa 条件下的短时持久实验测试, 其持久实验时间最短为 7096 h, 最长为 7839 h。文献中^[18]研究了成分改进对 IN617 合金各项力学性能数据的影响规律, 其中持久性能最好的 IN617mod2 合金在 700 °C/300 MPa 条件下的持久实验时间为 3982 h, 要远低于本文结果。IN617mod2 合金成分与 C700R-1 合金接近(见表 2), 主要强化元素

Al、Ti 的含量基本相当, 主要区别在于本试制件含有质量分数约 0.7% 的 W 元素, 这是本试制件持久强度高于文献的原因之一, 同时也要关注到, 镍基合金具有导热系数小、 γ' 相析出速率高等特点, 大截面锻件在固溶处理后的冷却过程中, 其 $1/2R$ 处冷却速度相对较慢, 有利于 γ' 相的析出与长大, 也可能为其短时持久性能较优的原因。同时本文获得的 C700R-1 合金锻件的短时持久性能数据也要显著高于传统 IN617 合金^[26]。

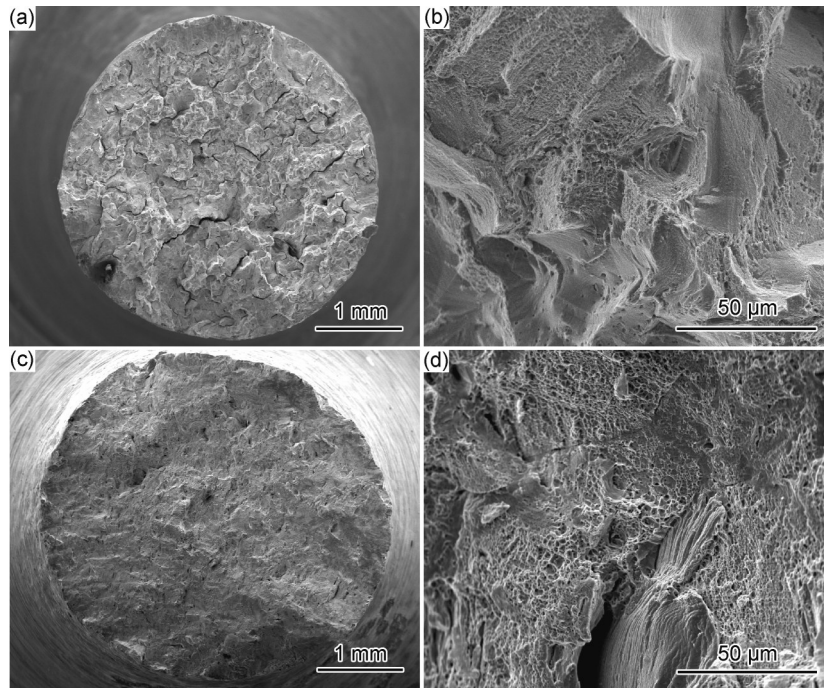


图10 典型拉伸断口形貌(边缘试样) (a),(b)室温;(c),(d)700 °C

Fig.10 Fracture morphologies of tensile specimens(sample of edge) (a),(b)room temperature;(c),(d)700 °C

表2 IN617mod2合金的主要化学成分^[18](质量分数/%)

Table 2 Chemical compositions of IN617mod2^[18]
(mass fraction/%)

C	Cr	Mo	Co	Al	Ti	Nb	Ni
0.007	19	9	12	1.35	1.35	0.3	Bal.

3 结论

(1)采用闭式镦粗+挤压的变形方式可充分破碎铸态组织并细化晶粒,使 $\Phi 850$ mm等级截面C700R-1合金锻件的整体晶粒度控制在4~7级,并结合合理的热处理工艺可使整个锻件晶粒度保持在3级左右。

(2)试制锻件力学性能均匀,无明显各向异性,室温抗拉强度 >950 MPa,屈服强度 >600 MPa,冲击功 $A_{KV}>70$ J,700 °C抗拉强度 >750 MPa,屈服强度 >500 MPa,室温和700 °C的伸长率和断面收缩率均在25%以上。

(3)试制件的短时持久性能优异,700 °C/300 MPa短时持久时间 >7000 h。

参考文献

- [1] ARRELL D. Next generation engineered materials for ultra supercritical steam turbines, siemens power generation report [R]. Orlando:FL, U S A Department of Energy, 2006: 1.
- [2] SCHWANT R, SHEN C, SOARE M. New materials enable unprecedented improvement in turbine performance [J]. AM&P Technical Articles, 2013, 171(1): 18-22.
- [3] IMANO S, DOI H, KAJIKAWA K, et al. Modification of alloy 706 for high temperature steam turbine rotor application[C]//Superalloys 718, 625, 706 and Various Derivatives (2005). Pennsylvania: TMS, 2005: 77-86.
- [4] SPEICHER M, KAUFFMANN F, SHIM J H, et al. Microstructure evolution in Alloy 617 B after a long-term creep and thermal aging at 700 °C[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 711: 165-174.
- [5] WEITZEL P S, TANZOSH J M, BORING B, et al. Advanced ultra-supercritical power plant (700 to 760 °C) design for indian coal [R]. Ohio, USA: Babcock & Wilcox Power Generation Group, 2012:1.
- [6] DONTH B, BLAES N, DIWO A, et al. Large-scale manufacture of nickel alloy turbine rotor forgings for A-USC power plants [J]. Transactions of the Indian National Academy of Engineering, 2020, 5(1): 75-82.
- [7] MASAFUMI F, EIJI S, YOSHINORI T, et al. Advanced USC technology development in Japan[C]//Proceedings from the sixth International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Plants. New Mexico: [s.n.], 2010: 325-343.
- [8] NARAYAN S A, MOITRA A, BHASKAR P, et al. Effect of thermal aging on microstructure, hardness, tensile and impact properties of Alloy 617[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 710: 47-56.
- [9] HAJIME K, TAKASHI S, CHRISTIAN B, et al. Development of technology for improving efficiency of large coal-fired thermal power plants[J]. Hitachi Review, 2011, 60(7): 365-370.
- [10] DING K, WEI T, FAN M, et al. Two stress rupture modes observed in Alloy 617-9%Cr dissimilar welded joint [J]. Materials

- Letters, 2020, 260: 126978.
- [11] WANG Y, CUI H, FAN M, et al. Characterization on the gradient microstructure near the fusion interface of dissimilar metal between high Cr heat-resistant steel and Ni-based alloy 617[J]. Materials Characterization, 2019, 151: 227-236.
- [12] 田仲良, 包汉生, 何西扣, 等. 700 °C 汽轮机转子用耐热合金的研究进展[J]. 钢铁, 2015, 50(2): 54-60, 69.
TIAN Z L, BAO H S, HE X K, et al. Research development on the heat resistant alloy used for 700 °C USC turbine rotor[J]. Iron and Steel, 2015, 50(2): 54-60.
- [13] 刘正东. 中国 700 °C 燃煤发电机组耐热材料研发[C]//中国金属学会. 2011 年全国高品质特殊钢生产技术研讨会文集. 西宁: [s.n.], 2011: 72-77.
- [14] 林富生, 谢锡善, 赵双群, 等. 我国 700 °C 超超临界锅炉过热器管用高温合金选材探讨[J]. 动力工程学报, 2011, 31(12): 960-968.
LIN F S, XIE X S, ZHAO S Q, et al. Selection of superalloys for superheater tubes of domestic 700 °C A-USC boilers[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(12): 960-968.
- [15] 聂义宏, 白亚冠, 寇金凤, 等. 700 °C 超超临界汽轮机用镍基合金转子锻件的试制[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(10): 3814-3818.
NIE Y H, BAI Y G, KOU J F, et al. Trial manufacturing of Ni-base alloy rotor forging for 700 °C advanced USC power plant[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(10): 3814-3818.
- [16] 刘正东. 电站耐热材料的选择性强化设计与实践[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2017.
LIU Z D. Selective strengthening design and practice of heat-resistant materials in power station[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2017.
- [17] 田仲良, 姜森宝, 陈正宗, 等. C700R-1 耐热合金 700 °C 时效组织和性能演变[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(9): 60-65.
TIAN Z L, JIANG S B, CHEN Z Z, et al. Microstructure and mechanical properties evolution of heat resistant alloy C700R-1 after aging at 700 °C[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(9): 60-65.
- [18] 白亚冠, 聂义宏, 寇金凤, 等. 成分改进对 IN 617 合金组织及性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(1): 327-334.
BAI Y G, NIE Y H, KOU J F, et al. Effect of compositional modification on microstructure and properties of IN617 alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(1): 327-334.
- [19] 白亚冠, 聂义宏, 吴贇, 等. 固溶温度和冷却方式对转子用改型 IN617 合金晶粒尺寸及碳化物的影响[J]. 大型铸锻件, 2018(4): 32-35.
BAI Y G, NIE Y H, WU Y, et al. Effect of solid solution temperature and cooling manner on grain size and carbide of modified IN617 alloy used for rotor[J]. Heavy Castings and Forgings, 2018(4): 32-35.
- [20] 聂义宏, 白亚冠, 金嘉瑜, 等. 时效温度对改进型 Inconel 617 合金的组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(2): 52-60.
NIE Y H, BAI Y G, JIN J Y, et al. Effect of aging temperature on microstructure and mechanical properties of modified Inconel 617 alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42(2): 52-60.
- [21] WANG J, ZHOU L, SHENG L, et al. The microstructure evolution and its effect on the mechanical properties of a hot-corrosion resistant Ni-based superalloy during long-term thermal exposure[J]. Materials & Design, 2012, 39: 55-62.
- [22] WANG J, ZHOU L, QIN X, et al. Primary MC decomposition and its effects on the rupture behaviors in hot-corrosion resistant Ni-based superalloy K444[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 553: 14-21.
- [23] 李红梅, 聂义宏, 朱怀沈, 等. 改型 IN617 合金大锭型的铸态组织及均匀化工艺[J]. 金属热处理, 2019, 44(10): 105-111.
LI H M, NIE Y H, ZHU H S, et al. As-cast microstructure and homogenization process of large-scale ingots of modified IN617 superalloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(10): 105-111.
- [24] 吴贇, 聂义宏, 赵帅, 等. 改型 617 合金的铸态组织特征及均匀化工艺[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(7): 150-156.
WU Y, NIE Y H, ZHAO S, et al. As-cast microstructure and homogenization process of modified alloy 617[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(7): 150-156.
- [25] 郭岩, 王博涵, 侯淑芳, 等. 700 °C 超超临界机组用 Alloy 617 mod 时效析出相[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(14): 2314-2318.
GUO Y, WANG B H, HOU S F, et al. Aging precipitates of Alloy 617 mod used for 700 °C ultra supercritical unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(14): 2314-2318.
- [26] WRIGHT J K, LILLO T M, WRIGHT R N, et al. Creep and creep-rupture of Alloy 617[J]. Nuclear Engineering and Design, 2018, 329: 142-146.
- 基金项目:**国家重点研发计划基金项目(2021YFB3704102);2021 年国家新材料应用示范平台项目(TC210H022);黑龙江省自然科学基金项目(JQ2021E007)
- 收稿日期:**2023-04-25;**录用日期:**2023-07-06
- 通讯作者:**聂义宏(1977—),女,正高级工程师,博士,主要从事大型镍基合金与不锈钢锻件研发,联系地址:天津市经济技术开发区络达路 16 号(300457),E-mail:nieyihong@126.com

(本文责编:齐书涵)