

· 综述 ·



## 超超临界电站汽轮机叶片材料及组织性能控制技术

赵吉庆, 杨 钢, 刘正东, 何西扣, 包汉生  
(钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院, 北京 100081)

**摘 要:**综述了超超临界汽轮机叶片钢和合金的研究进展和发展现状。叶片材料按使用环境不同,可分为高温叶片和末级大叶片。高温叶片材料,在役 600~620 °C 超超临界电站选用 9%~12% 系铁素体耐热钢,630 °C 以上蒸汽参数铁基材料的热稳定性不足,需选用镍基耐热合金,世界首台 630 °C 示范机组选用了 80A 叶片合金。700 °C 以上蒸汽参数镍基叶片合金仍处于研发阶段,世界各国的候选材料均为  $\gamma'$  时效强化型镍基合金,我国已开发出 W/Mo 复合强化的 GY200 镍基叶片合金。末级大叶片可分为 12%Cr 马氏体钢、高 Cr 沉淀强化型不锈钢、钛合金,新一代末级叶片钢 2Cr12Ni4Mo3VNbN、B50A789G 具有更高的强度韧性匹配,将逐渐替代传统的 12%Cr 马氏体钢和 17-4PH 叶片钢,应用于大功率机组。从成分控制、二次重熔、锻造开坯、终锻成型工艺等方面,总结了用量最广的铁素体(马氏体)系叶片钢的成分-组织-性能的关系,以及生产过程的关键控制技术。对叶片钢的发展提出建议与展望,未来 10 年,对于铁素体(马氏体)系叶片钢,低成本的纯净化冶炼技术、批量化的质量稳定性控制技术是未来主要发展方向,对于 700 °C 镍基叶片合金,国内正在开展材料与产品的设计开发攻关,预计 2030 年形成技术突破,开发出自主化的叶片合金和产品。

**关键词:**超超临界汽轮机; 叶片钢及合金; 9%~12%Cr 铁素体钢; 镍基叶片合金

**DOI:**10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00147 **中图分类号:**TG115. 2

## Control Technology of Materials and Microstructure Properties for Steam Turbine Blades in Ultra-supercritical Power Plants

Zhao Jiqing, Yang Gang, Liu Zhengdong, He Xikou, Bao Hansheng  
(Special Steel Institute of Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The research progress and development status of ultra-supercritical steam turbine blade steels and alloys are reviewed. According to the different operating environments, blade materials can be classified into high-temperature blades and last-stage large blades. For high-temperature blade materials, 9% to 12% ferritic heat-resistant steels are used in 600 °C-620 °C ultra-supercritical power plants in operation. For steam parameters above 630 °C, the thermal stability of iron-based materials is insufficient, and nickel-based heat-resistant alloys need to be selected. The world's first 630 °C demonstration unit selected 80A blade alloy. Nickel-based blade alloys for steam parameters above 700 °C are still in the research and development stage. The candidate materials in various countries are all  $\gamma'$  precipitation-strengthened nickel-based alloys, and China has developed the W/Mo composite-strengthened GY200 nickel-based blade alloy. Last-stage large blades can be divided into 12%Cr martensitic steel, high-Cr precipitation-strengthened stainless steel, and titanium alloys. The new generation of last-stage blade steels, 2Cr12Ni4Mo3VNbN and B50A789G, have a better strength-toughness match and will gradually replace traditional 12%Cr martensitic steel and 17-4PH blade steel, being applied in high-power units. The relationship between composition, microstructure, and properties of the most widely used ferritic (martensitic) blade steels is summarized from aspects such as composition control, secondary remelting, forging billet, and final forging forming process, as well as the key control technologies in the production process. Suggestions and prospects for the development of blade steels are proposed. In the next 10 years, for ferritic (martensitic) blade steels, low-cost purification smelting technology and batch quality stability control technology will be the main development directions. For 700 °C nickel-based blade alloys, domestic research and development of materials and products are underway and will become the main development direction in the field of blade materials. It is expected that a technological breakthrough will be achieved by 2030, and self-developed blade alloys and products will be developed.

**Key Words:** Ultra-supercritical Steam Turbine; Blade Steel and Alloy; 9%-12%Cr Ferritic Steel; Nickel-based Blade Alloy

能源是支持国家经济持续发展的动力,我国对高效清洁能源的需求逐年增加,燃煤火电作为我国

主要的电力供应方式,在保障国家电力能源安全方面仍发挥决定性作用。高效率、低排放的高参数超

**基金项目:** 国家重点研发计划(2021YFB3704100)

**作者简介:** 赵吉庆(1984—),男,博士,正高级工程师;

**E-mail:** zhaojiqing@nercast.com;

**收稿日期:** 2025-05-31

超临界发电技术始终是燃煤发电的发展方向,根据国家能源局发布的数据,2025年,超超临界火电机组占比将超过70%<sup>[1-2]</sup>。超超临界汽轮机进汽温度高于600℃、压力超过27MPa,具有大容量、高参数的特征<sup>[3]</sup>。叶片是汽轮机的关键零件,也是最精细、最重要的零件之一。汽轮机叶片的工作条件苛刻、复杂,高、中压转子叶片承受高温、高压、蒸汽氧化、离心力、震动疲劳等复杂工况的综合作用,叶片材料需要具备足够的高温蠕变、疲劳性能与抗蒸汽氧化性能;低压湿蒸汽环境的末级大叶片承受更大的离心力、弯曲应力与湿蒸汽腐蚀,叶片材料需要具备良好的耐腐蚀性能和高的强韧性匹配;除此之外,叶片在有限的空间下高速旋转,还需要高的尺寸精度与抗振能力<sup>[4-6]</sup>。无论高温叶片材料还是末级大叶片材料,均是影响蒸汽轮机效率的关键因素,高温叶片材料的最高许用温度决定了机组的蒸汽温度参数<sup>[6-7]</sup>,末级大叶片的综合力学性能决定了其长度,是影响汽轮机功率和电厂成本的重要因素<sup>[8]</sup>。如此复杂的服役工况和高的综合服役性能要求,使叶片钢的成分体系复杂,工艺要求高,电厂成本控制,还要求低成本化,因此,叶片钢是耐热钢中难度最大的高端产品之一。

介绍了超超临界电站汽轮机叶片钢及合金的发展现状,包括高温下应用的镍基耐热合金、9%~12%Cr铁素体(马氏体)系耐热钢,末级大叶片用高强度韧性匹配的马氏体时效钢与沉淀硬化不锈钢。总结了应用最广泛的铁素体(马氏体)系叶片钢成分-组织-性能的关系与生产控制技术,分析国内高性能叶片钢的技术水平,同时,对我国叶片钢的技术发展方向提出了展望与建议。

## 1 高、中压转子叶片用耐热钢与合金

### 1.1 550~630℃超(超)临界汽轮机铁素体(马氏体)系叶片钢

汽轮机转子、叶片钢高温蠕变断裂强度的提高,促进了机组温度的提升。最初用于高压汽轮机的耐热钢是12CrMoV系列的X21CrMoV 121,是一种德国牌号,上限使用温度为550℃,20世纪80~90年代在欧洲大量应用制造蒸汽集箱、汽轮机叶片等热端部件。在此基础上,美国、日本、欧洲等国家和地区一直通过化学成分的优化,开发了系列9%~12%Cr耐热钢,将最高使用温度提高到620℃。汽轮机用9%~12%Cr铁素体耐热钢的发展进程如图1所示<sup>[5]</sup>。

汽轮机部件9%~12%Cr铁素体耐热钢走了一条和锅炉钢相近的技术路线,由于叶片钢除了高温强度外,还关注室温强度与耐腐蚀性,C含量一般高于相同温度下使用的锅炉钢。12%Cr铁素体耐热钢的发展经历了大约四个阶段<sup>[9]</sup>。第一阶段(1960s),在X21CrMoV121的基础上,日本东芝通过添加Ta+N,开发出TOS101(11CrMoVTaN);GE通过添加Nb+N,开发出GE-original(11CrMoVNbN);西屋公司通过添加W,开发出Westinghouse 422(12CrMoVW)。这三种12%Cr型铁素体耐热钢,可以将上限使用温度提高至565℃<sup>[10-14]</sup>。第二阶段(1980s)的开发主要有两种途径,第一种途径在含Nb或Ta钢中添加固溶强化元素W,将使用温度进一步提高至593℃,代表钢种为东芝开发的TOS107(也称GE-modified)、欧洲开发的X12CrMoVWNbN101(COST E)<sup>[15-18]</sup>;第二种途径将Mo元素含量提高至1.5%,同时,降低C含量,通过Mo的固溶强化以及对M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>碳化物的稳定作用,也可以提高使用温度,代表钢种日本的TR1100(TMK1)<sup>[16-19]</sup>。第三阶段的发展

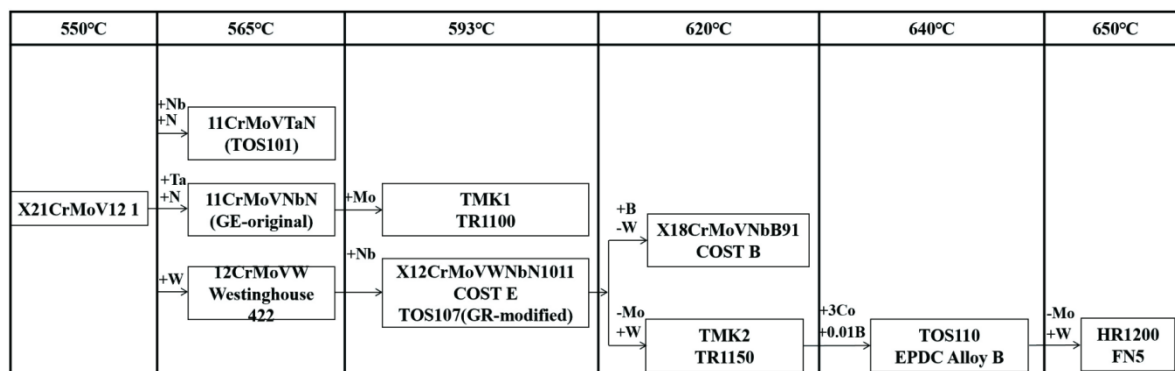


图1 汽轮机用9%~12%Cr铁素体耐热钢的发展

Fig. 1 Development of 9%~12%Cr ferritic heat-resistant steel for steam turbines

(1990 s),也有两种技术途径。第一种途径通过研究发现,添加晶界强化元素B,能够进一步提高高温蠕变断裂强度,欧洲在COST E的基础上,去W加B,开发了X18CrMoVNB91(COST B)钢,继续降Ni加Co,开发了COST-FB2钢,使用温度能够提高到620 °C。另一种途径,日本通过将w[W]提高至1.8%,开发出TR1150(TMK2)。第四阶段(1990 s)将w[W]提高至2.7%,提高固溶强化与对析出相的稳定化作用,同时添加3% w[Co],平衡Cr/Ni当量,抑制δ铁素体,开发了HR1200和FN5耐热钢。文献报道中两个钢种在650 °C、10万小时的持久强度高于100 MPa,但实际上并没有用于制造汽轮机转子或叶片,更没有在600 °C以上蒸汽温度应用的报道。12%Cr铁素体叶片钢的化学成分见表1<sup>[20-21]</sup>。

汽轮机用12%Cr铁素体耐热钢的持久强度如图2所示<sup>[4]</sup>,这些钢种大多是作为转子钢而开发的,

但部分钢种可以用作叶片,如12Cr1Mo[图2(b)中a钢种]、12CrMoV[图2(b)中b钢种]、12CrMoWV、12CrMoVNBn[图2(b)中c钢种]等能够在565 °C以下蒸汽温度下使用;12CrMoVNBnNW、1Cr11Ni-MoWV、2Cr11Mo1VNbN(H46)钢等能够在593 °C以下温度选用,12CrMoVNBnNW钢[图2(b)中d钢种]在565 °C下的持久强度比12CrMoVNBn提高25%,上汽-西门子选用12CrMoVNBnNW制造600 °C左右的高中压3~5级叶片,选用C含量更高的X19CrMoN-bVN11-1[图2(b)中e钢种]制造高中压6~13级叶片。12%Cr铁素体耐热钢应用的最高温度为620 °C,选用的钢种1Cr11Co3 W3NiMoVNBn,该钢种也大量应用于制造螺栓紧固件<sup>[21]</sup>。

随着使用温度的提高,12%Cr系叶片钢的Cr含量有一定程度的降低,但由于对耐蒸汽氧化性能的要求较高,叶片钢无法像转子钢一样通过降低

表 1 铁素体系叶片钢的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical compositions of ferritic blade steels

钢号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	Co	V	Nb	N	B	Re
H46	0.15	0.40	0.60	11.50	-	0.60	-	-	0.30	0.25	0.075	-	-
LAPELLO	0.30	0.25	1.00	12.00	0.30	2.75	-	-	0.25	-	-	-	-
FV448	0.10	0.46	0.86	10.70	0.65	0.60	-	-	0.14	0.26	0.050	-	-
AISI422	0.23	0.40	0.60	12.50	0.70	1.00	1.00	-	0.25	-	-	-	-
AL 419	0.25	0.30	1.00	11.50	0.50	0.50	2.50	-	0.40	-	0.100	-	-
TAF	0.16	0.50	0.80	11.50	-	1.00	-	-	0.20	0.20	0.015	0.040	-
TAF650	0.10	-	0.50	11.00	0.50	0.15	2.60	3.0	0.20	0.08	0.025	0.015	-
TR1150(TMK2)	0.13	0.05	0.50	10.70	0.70	0.4	1.80	-	0.17	0.06	0.045	-	-
GE(Mod.)	0.14	0.03	0.60	10.00	0.70	1.0	1.00	-	0.18	0.045	0.040	-	-
TF2	0.18	0.05	0.50	11.00	0.10	0.20	2.40	-	0.20	0.08	0.025	0.015	-
TOS110	0.11	-	-	10.00	0.20	0.70	1.80	3.0	0.20	0.05	0.020	0.010	-
HR1200(FN5)	0.11	0.05	0.60	11.00	0.50	0.15	2.60	3.0	0.20	0.08	0.025	0.015	-
Alloy D(TOS203)	0.11	0.05	0.50	10.50	0.60	0.10	2.50	1.0	0.20	0.10	0.030	0.010	0.2

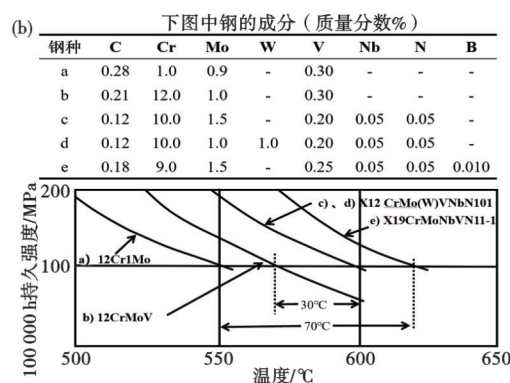
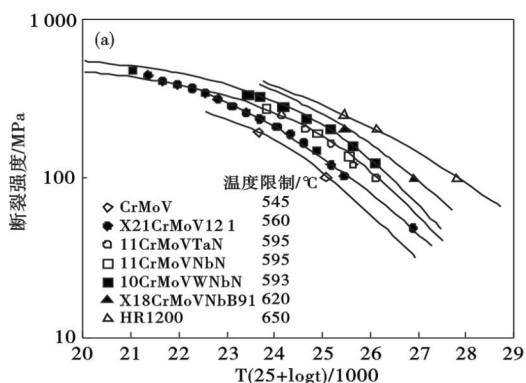


图 2 典型12%Cr铁素体耐热钢的持久强度:(a) Larson-Miller曲线,(b)10<sup>5</sup>h下的断裂强度

Fig. 2 The endurance strength of typical 12%Cr ferritic heat-resistant steel : (a) Larson-Miller curve, (b) fracture strength at 10<sup>5</sup> hours

w [Cr]至9%,进一步提高持久强度,620 °C以上蒸汽温度的叶片多采用热强性与耐蚀性更高的镍基合金,如 Refractoloy-26、Nimonic 80A,其中 Nimonic 80A 合金的应用最为广泛,是西门子许可的首个用于1 000 MW 机组高压叶片的商业材料,世界首台630 °C示范电站,选用了80A制造高压转子叶片,图3<sup>[22]</sup>为Nimonic 80A的持久强度(LMP为Larson-Miller参数法的P参数, $P=T(C+\lg t_r)$ )。

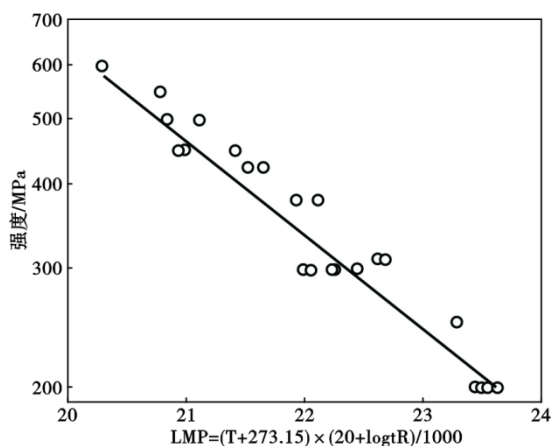


图3 Nimonic 80A 合金的持久性能  
Fig. 3 The durability of the Nimonic 80A alloy

### 1.2 700 °C 先进超超临界(A-USC)汽轮机高温叶片合金

为进一步提高电站的热效率,减少CO<sub>2</sub>气体排放量和燃煤消耗,下一代先进超超临界电站将蒸汽温度提高到700 °C,压力达到了35 MPa以上,预计热效率将达到50%以上<sup>[1,23]</sup>。蒸汽温度和压力的提高,对叶片材料的持久强度,耐腐蚀和高温氧化等

性能的要求也更为苛刻。传统的铁素体和奥氏体耐热钢以碳化物为主要强化相,在700 °C下会快速粗化,失去强化作用,不能应用于700 °C先进超超临界汽轮机,热稳定性更高的镍基耐热合金成为唯一的选择。10万小时下的持久断裂强度不小于100 MPa是评价耐热合金是否许用的重要依据,图4<sup>[24]</sup>为耐热钢及合金的高温持久强度曲线,700~760 °C下,固溶强化型的镍基耐热合金,如CCA617与Haynes230合金的持久强度的富余量并不大,γ'相析出强化的镍基耐热合金,成为先进超超临界参数汽轮机叶片合金的首选。

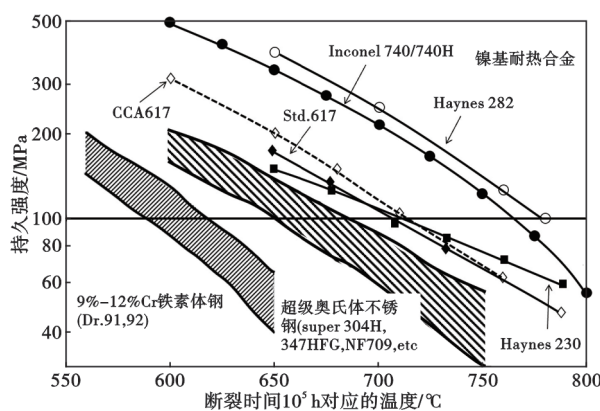


图4 不同合金体系耐热钢及合金的持久强度  
Fig. 4 Creep strength of heat-resistant steel and alloys of different alloy systems

美国、欧洲、日本等国家和地区,自1998年起相继开启了“AD700”“A-USC”等700 °C电站材料的研究计划<sup>[25-28]</sup>,在20~30种镍基耐热合金中筛选,并推荐了锅炉、汽轮机部件用镍基耐热合金,汽轮机部件候选材料见表2<sup>[29-32]</sup>。

表2 各国700 °C超超临界汽轮机机组镍基候选材料

Table 2 Nickel-based candidate materials for 700 °C ultra-supercritical steam turbine units in various countries

汽轮机部件	欧洲牌号	日本牌号	美国牌号	中国牌号
气缸铸件/阀门	Inconel625	LTES(Cast)、IN625 617(Cast)	Nimonic 105	C-HRA-3 CR700-1 Inconel625 K984
	Inconel617		Inconel 740 Haynes 282	
转子	Nimonic263	LTES700R、USC141 FENIX-700、IN625、 IN617、TOSIX	Haynes 263	C700R-1 C700R-2
	Inconel625 Inconel718 Inconel617		CCA617 Haynes282 U720 Li Inconel740 Nimonic105	
叶片	Waspaloy	U500、U520、IN-X750 M252、USC141	Waspaloy	GY200 Waspaloy Nimonic 105
	Nimonic105		Nimonic105	
螺栓	Waspaloy	LTES、USC141 U500、Waspaloy	U700、U710	Waspaloy Nimonic 105、 Nimonic 115
	Nimonic105		U720、Nimonic 105 Nimonic 115	

无一例外,叶片紧固件的候选材料均是 $\gamma'$ 时效强化型镍基合金,Al+Ti和均不小于 $3^{[33]}$ 。中国在2010年成立“国家700℃超超临界燃煤发电技术创新联盟”后,进入了700℃电站材料的研发阶段,近15年来,主要的研究集中在锅炉部件,尤其是锅炉管,已经形成了自主化的700℃锅炉材料体系与无缝管、管件工业产品的制造技术,同时,积累了最长近40 000 h的持久数据,代表合金为C-HRA-1、C-HRA-3<sup>[7]</sup>。700℃汽轮机叶片的研发滞后于锅炉管,多集中在实验室阶段。钢铁研究总院报道了Waspaloy、Nimonic 105、USC 141等国外候选合金的持久强度和长期时效研究结果<sup>[34-37]</sup>,根据10 000 h的数据外推,除USC141持久强度不够理想,Waspaloy、Nimonic 105合金的持久强度均可以达到10万小时、100 MPa的要求。上述合金长期时效后,均出现了晶界碳化物粗化与冲击韧性快速下降,因此,700℃叶片材料的进一步研究方向应侧重于晶界碳化物的时效稳定性、提高冲击韧性等方面。我国也对700℃叶片合金进行了自主化研发,在USC 141的基础上,调整Mo含量,添加W及微量元素B、Zr、Nb,开发出了新型耐热合金GY100;在Waspaloy合金的基础上,添加1%~5%w[W],开发出了新叶片合金GY200<sup>[38-41]</sup>。图5<sup>[41]</sup>为GY200合金的持久强度和长时效后的力学性能,在持久强度和高温时效稳定性方面均有所改善,

700、750℃、10万小时的持久强度外推值分别约195、130 MPa,W元素替代部分Mo进入 $M_{23}C_6$ 相,提高了晶界碳化物的时效稳定性<sup>[40-41]</sup>。

## 2 低压末级大片钢与合金

汽轮机低压末三级叶片在400℃以下的湿蒸汽环境下工作,服役温度低于材料的蠕变温度,对高温强度几乎没有要求。末级大叶片的长度,很大程度上决定了汽轮机组的效率,对材料的性能要求最高。高强度和高韧性的匹配,以及耐蒸汽腐蚀性能是末级大叶片最主要的性能要求,也是材料发展的方向。图6<sup>[42]</sup>为末级叶片钢强度、韧性、腐蚀、疲劳性能的对比,12Cr和15Cr型叶片钢表现出优良的综合性能,近年来大量应用在大功率机组<sup>[42-43]</sup>。

目前用于末级大叶片材料可分为三类:12%Cr型马氏体不锈钢、高Cr沉淀硬化型不锈钢以及钛合金,见表3<sup>[42]</sup>。

12%Cr型马氏体不锈钢是目前用量最大的末级叶片材料,应用最多的钢种为2Cr13与1Cr12Ni3Mo2VN,这两个钢种屈服强度一般不高于900 MPa,在3 600 r/min转速下的极限长度是840 mm,3 000 r/min下的极限长度是1 200 mm。日本在KT5312AS6(对应国内1Cr12NiMo2VN)钢的基础上增加C、Ni、Mo含量,添加强碳化物形成元素Nb,开发了新一代12%Cr型末级大叶片用钢

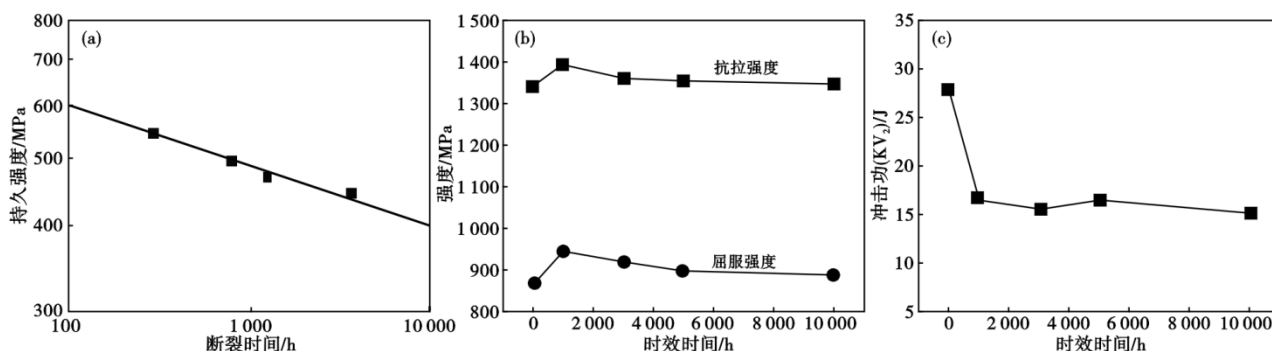


图5 GY200合金持久强度和长期时效后的力学性能:(a)持久强度,(b)强度,(c)冲击功

Fig. 5 Creep strength and mechanical properties of GY200 alloy after long-term aging : (a) endurance strength, (b) strength, (c) impact energy

表3 三类末级叶片材料

Table 3 Three types of last stage blade materials

类型	材料牌号	用量最大牌号
12%Cr钢	1Cr12Mo、2Cr13、2Cr12MoV、1Cr12Ni3Mo2VN、X12CrNiMoV12-2、2Cr12Ni4Mo3VNbN、X1CrNiMoAlTi12-1	2Cr13、1Cr12Ni3Mo2VN
高Cr的沉淀硬化型不锈钢	0Cr17Ni4Cu4Nb、X5CrNiCuNb16-4、B5A0789G、15-5PH、PH13-8Mo	0Cr17Ni4Cu4Nb、B5A0789G
钛合金	Ti-6Al-4V	-

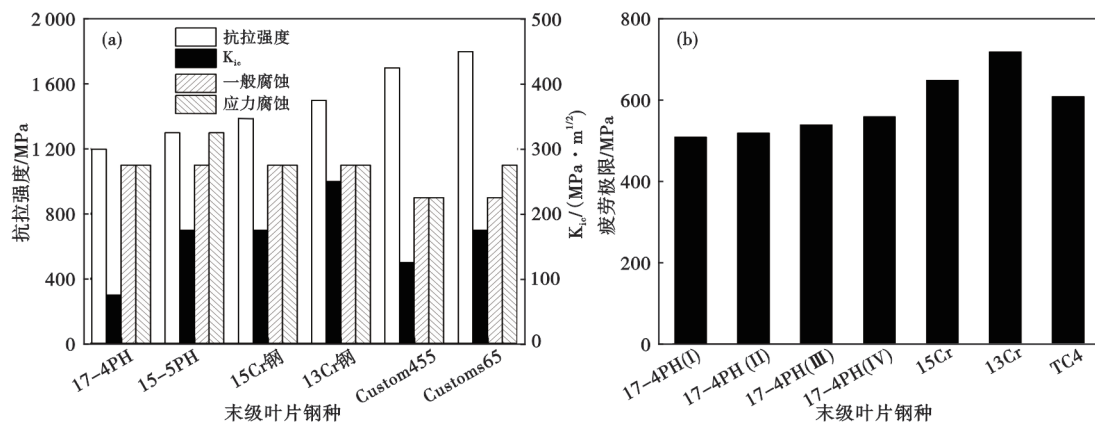


图6 末级叶片钢强度、韧性、腐蚀疲劳性能对比:(a)强度、韧性和腐蚀性能,(b)疲劳性能

Fig. 6 Comparison of strength, toughness and corrosion fatigue performance of the last stage blade steel : (a) strength, toughness and corrosion resistance, (b) fatigue resistance

2Cr12Ni4Mo3VNbN, 屈服强度可达到 1 050 MPa 以上, 冲击功不低于 40 J, 已被我国东方汽轮机厂引进, 用于百万千瓦级核电汽轮机 1 200 mm 末级叶片, 以及超超临界火电改造机组, 替代 1Cr12Ni3Mo2VN, 实现机组功率提升。2Cr12Ni4Mo3VNbN 采用电弧炉+电渣重熔工艺冶炼, 要求 ABCD 四类夹杂物总和不大于 2.5 级, 国内抚钢、长城特钢、宝武特冶、江油六合等特钢企业, 初步掌握了高纯净冶炼技术, 批量生产的稳定性技术, 仍是未来需要攻克的难题。近年来西门子公司推出了一种双真空冶炼的 Al、Ti 时效强化型 12%Cr 叶片钢 X1CrNiMoAlTi12-1, 屈服强度高 1 160 MPa 以上, 主要用于工业燃气轮机, 要求 ABCD 单类夹杂物不超过 0.5 级, 可见随着长度与应用要求的增加, 末级叶片的高纯净冶炼技术是未来需要重点发展的方向<sup>[42-44]</sup>。

沉淀硬化型不锈钢一般比 12%Cr 型马氏体不锈钢的屈服强度更高, 同时具有优良的强度韧性匹配和耐腐蚀和抗水滴冲蚀性能, 是国内外制造末级长叶片的首选材料, 包含了高 Cr 型 0Cr17Ni4Cu4Nb、X5CrNiCuNb16-4、B5A0789G 钢等, 以及低 Cr 型 PH13-8Mo。0Cr17Ni4Cu4Nb 是目前用量最大的末级叶片材料, 通过不同温度时效处理, 可以将其性能调整至 3 档, 实现一材多用。通过富 Cu 相析出强化, 0Cr17Ni4Cu4Nb 屈服强度高于 1 100 MPa 的时效温度区间, 冲击功低于 40 J, 使材料无法在峰值强度区间使用, 制造叶片的极限长度一般不大于 1 200 mm。B50A789G 是 0Cr17Ni4Cu4Nb 的改进型钢种, 适当降低 Cr、Cu 含量, 添加 Nb、Mo、N 等元素, 高温回火时形成稳定性高的 MX 相, 使材料能够在富 Cu 相的过时效温度下热处理, 屈服强度高

1 150 MPa 以上, 冲击功不低于 60 J。随着 1 000 MW 机组的发展, B50A789G 的用量逐年增加, 制造叶片的最大长度可以达到 1 250~1 300 mm, 逐渐成为大功率机组高 Cr 型末级长叶片钢的首选材料。PH13-8Mo 钢作为末级叶片材料由日本三菱公司推出, 目标是用于制造 3 600 r/min、1 270 mm 和 3 000 r/min、1 524 mm 长叶片。通过 Al、Ti 时效强化, PH13-8Mo 屈服强度达到 1 400 MPa 以上, 同时, 冲击功达到 60 J, 已受到国内汽轮机厂关注, 作为制造 1 500 mm 等级长叶片的候选材料<sup>[42-44]</sup>。

Ti 合金具有比强度高、耐腐蚀性好等诸多优点, 从 20 世纪 60 年便应用于汽轮机叶片, 尤其在大功率的核电半速机中应用最广泛, 典型材料是 Ti-6Al-4V, 一般用作制造 1 000 mm 以上的长叶片。Ti 合金的缺点也十分明显, 成本高、导热性差、加工焊接难度大于钢, 蒸汽环境下的疲劳性能也低于 12%Cr 叶片钢, 国内应用很少, 更多是作为制造 1 200 mm 以上长度等级长叶片的候选材料<sup>[45]</sup>。

对于末级叶片钢, 合金含量较高, 多采用高温回火调控强度与韧性匹配, 除冶金质量的高技术要求外, 普遍存在由残余奥氏体引起的组织与性能不均匀问题, 如何在成本受控的基础上, 解决上述问题是未来末级大叶片钢的技术发展方向。

### 3 铁素体(马氏体)系叶片钢成分-组织-性能控制技术

铁素体(马氏体)系叶片钢体系广泛且复杂, 综合性能要求高, 还要兼顾低成本, 厘清成分-组织-性能的关系, 明确生产制造各工序的细小变化对组织性能的影响, 是实现叶片材料高性能稳定化的关

键。稳定化的成分-组织过程控制细节,也是国产叶片钢与国外材料性能差异的主要原因。

### 3.1 成分的影响与控制

对于9%~12%w[Cr]系铁素体叶片钢,成分设计的总体思路是优先考虑Cr-Ni当量的平衡,控制 $\delta$ 铁素体析出,在此基础上对强、韧化元素进行优化,调控强韧性匹配与持久强度。合金元素对力学性能的影响如图7所示。持久强度最高w[Cr]为8.5%~9.5%,高于9.5%将形成 $\delta$ 铁素体,受耐腐蚀性能的限制,铁素体系叶片钢的w[Cr]很难降至8.5%~9.5%水平,一般最低控制在10.5%,因此,相近成分体系的叶片钢的使用温度低于锅炉钢或转子钢。W、Mo元素作为固溶强化元素添加,单独加Mo时,w[Mo]为1.6%强度最高,Mo当量(w[Mo]+1/2w[W])为1.6%时强度最高。以W代Mo能够提高持久强度,不是因为固溶强化效应不同,主要原因是含W的Laves相或 $M_{23}C_6$ 的粗化速率更低。为了平衡W、Mo添加引起的Cr当量提高,需要添加Co元素抑制 $\delta$ 铁素体,9%~12%w[Cr]钢中一般w[W]的上限含量为3%,w[Co]的上限含量也为3%。V、Nb是稳定相MX的主要形成元素,600℃时较高的高温强度对应的w[V]、w[Nb]分别为0.1%、0.05%;650℃时较高的高温强度对应的w[V]、w[Nb]分别为0.18%、0.05%。B是高温叶片钢中最重要的晶界强化元素,550℃下0.01%w[B]蠕变断裂强度达到最高,超过600℃,B量越多,强度越高,但w[B]大于0.03%蠕变断裂韧性下降,叶片钢中的上限w[B]一般也不高于0.03%<sup>[5,46]</sup>。

对于末级大叶片材料,成分设计的总体思路是首先考虑Cr-Ni当量匹配控制 $\delta$ 铁素体,在此基础上优化强化元素的含量,实现相变点的控制与强韧性

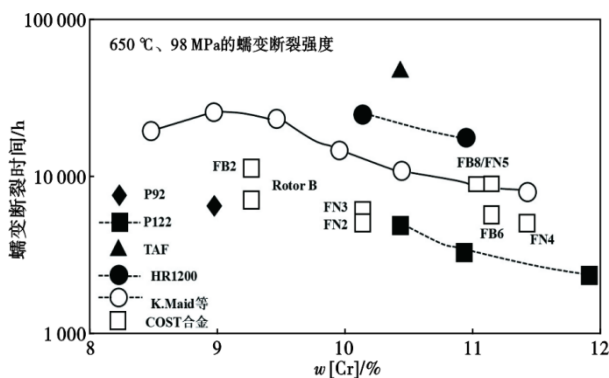


图7 Cr含量对叶片钢力学性能的影响

Fig. 7 Effect of Cr content on mechanical properties of blade steel

匹配。末级叶片钢中主要强化元素为C、Cu、Nb、N、Mo等,添加足够的Ni平衡Cr-Ni当量,提高韧性,主要的韧化机制是残奥或逆变奥氏体增韧,因此,相变点的对组织性能均匀性的影响非常大,尤其对于高Cr型沉淀强化型叶片钢。C元素在12%Cr型马氏体钢中作为主要的强化元素,一般按中上限水平添加,在高Cr沉淀强化型叶片钢则需要按下限控制,防止相变点过低形成大量残奥,以及影响MX型强化相的析出。B50A 789G钢中,C含量对大尺寸一次NbC和纳米MX强化相的影响大,微小波动也会引起性能的大幅度变化。C含量越低,材料的强度和韧性匹配越好,热处理工艺窗口越宽,因此,C、Nb的精准控制是最关键的质量稳定性控制要点<sup>[5]</sup>。

### 3.2 工艺过程控制的影响与关键技术

冶炼是纯净度和成分均匀性的调控过程,铁素体(马氏体)系叶片钢最常规的冶炼方式是电弧炉+炉外精炼+电渣重熔,由于合金化程度高,成分体系复杂,通常采用电弧炉+炉外精炼+模铸+电渣重熔工艺流程制造坯料,且电渣重熔锭型控制在 $\phi 660$  mm以下,避免出现大尺寸一次析出相。随着近年来叶片钢纯净度要求逐年提高,尤其末级大叶片(1Cr12Ni2Mo3VN、2Cr12Ni4Mo3VNbN等)要求A+B+C+D类夹杂物总和不超过2.5级,对原材料纯净度、电渣重熔Al烧损控制以及电渣重熔工艺提出更高要求。表4为钢液主要脱氧元素与O含量、纯净度间对应关系。由表4可知,作为钢液中主要脱氧元素,Al-O平衡对钢液夹杂物含量具有决定性影响。w[Al]低于0.005%时,钢液中O含量急剧上升,夹杂物总和达到3.5级以上,而随着w[Al]增至0.01%以上,夹杂物及O含量控制水平明显提高<sup>[47]</sup>。

Al作为铁素体形成元素,如果残余量较大,会形成 $\delta$ 铁素体,降低组织均匀,如图8所示,因此,冶炼过程中Al的添加和控制非常关键。

热加工是成分和组织均匀性调控过程,对于含W、Mo、Nb的叶片钢,均匀化退火和开坯墩拔锻造工艺对改善冶炼偏析引起的粗大一次碳化物尺寸作用突出。图9是B50A789G钢不同均匀化退火温度下一次NbC的形貌,匀化退火温度由1220℃提高至1250℃,小尺寸(也达到微米级)的一次NbC全部回溶,大尺寸NbC尺寸显著减小。一次NbC尺寸、数量显著下降后,材料在保持强度不变的前提下,冲击功能够稳定增加约20J,时效温度窗口也增加10~15℃。

表 4 不同 Al、O 含量与夹杂物的关系

Table 4 Relationship between different Al and O contents and inclusions

化学成分(质量分数)/%				夹杂物总和/级
Si	Ti	Al	O	
0.27	0.010	0.010	0.003 9	2.5
0.28	<0.010	0.010	0.002 4	1.5
0.24	<0.005	0.017	0.003 8	2.5/3.0
0.26	<0.005	0.023	0.004 6	3.0
0.17	<0.005	0.028	0.003 0	2.0
0.24	0.003	0.004	0.006 2	6.0/7.0
0.15	0.003	0.003	0.007 4	5.5
0.23	0.003	0.002	0.007 6	5.0/6.0
0.23	0.003	0.003	0.007 7	4.5/5.0
0.19	0.003	0.004	0.007 7	3.5
0.22	0.003	0.003	0.006 6	3.5
0.24	0.003	0.002	0.005 3	3.5
0.27	0.003	0.005	0.003 3	3.5
0.20	<0.005	0.026	0.001 4	2/2.5

不同锻拔工艺对 2Cr11Mo1VNbN 叶片钢持久强度与一次 NbC 尺寸的影响如图 10<sup>[48-49]</sup>, 随着钢锭开

坯只拔长(0D1B)到 3 锻 3 拔(3D3B), 649 °C、228 MPa 下持久断裂时间提高显著, 统计不同锻拔工艺下一次 NbC 的尺寸可以发现, 锻拔次数增加后, 一次 NbC 的尺寸显著减小, 从而提高了持久强度。从成本控制角度, 需要通过试验研究确定最佳的锻拔工艺, 一方面降低偏析和大尺寸有害相对性能的不利影响, 一方面实现成本可控, 以 2Cr11Mo1VNbN 叶片钢为例, 虽然 3 锻 3 拔的持久强度最高, 但 2 锻 2 拔后性能的提升明显, 选用 2 锻 2 拔更加经济合理。

对于  $w[W]$ 、 $w[Mo]$  大于 1% 的叶片钢, 会形成  $M_6C$ 、LAVES 相等高温相, 偏析严重的钢锭尤其显著, 高温析出相在锻造应力的诱导下, 会快速长大, 后续热处理无法有效回溶, 导致冲击性能恶化或持久强度不稳定。合理的终锻温度能够消除富 W、Mo 有害相或避免大尺寸有害相析出, 图 11 为 2Cr12NiMo1W1V 钢种不同终锻温度下的显微组织, 终锻温度由 930 °C 降至 850 °C, 析出了大量粗大的  $M_6C$  相<sup>[50]</sup>。终锻温度过高, 会增加晶粒度的控制

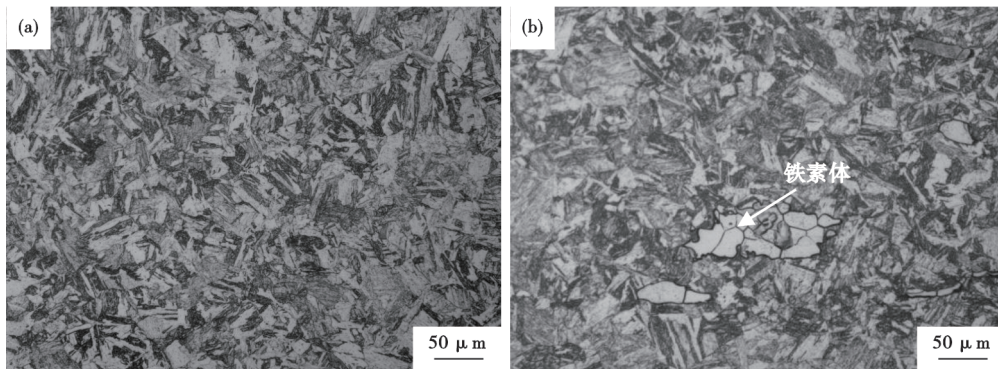


图 8 1Cr12Ni3Mo2VN 钢中不同 Al 含量的微观组织: (a)0.02%w[Al], (b)0.26%w[Al]  
Fig. 8 Microstructure of 1Cr12Ni3Mo2VN steel with different Al contents : (a)0.02%w[Al], (b)0.26%w[Al]

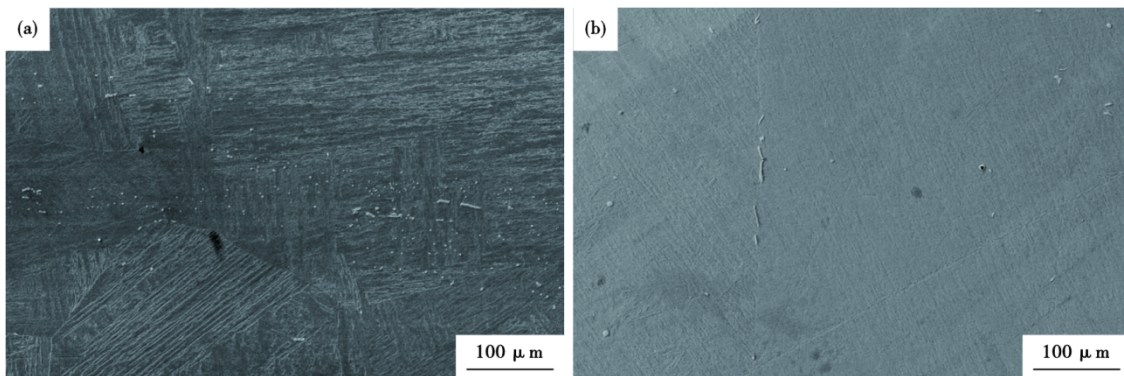


图 9 不同均匀化退火温度对 789G 钢中一次 NbC 尺寸与数量的影响: (a)1 220 °C×36 h, (b)1 250 °C×36 h  
Fig. 9 Effect of different homogenization annealing temperatures on primary NbC size and quantity in 789G steel : (a)1 220 °C×36 h, (b)1 250 °C×36 h

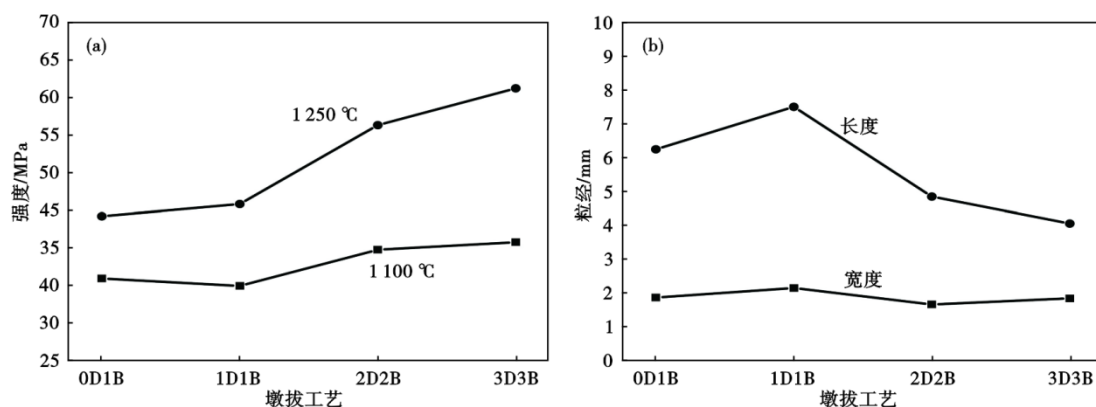


图10 墩拔工艺对2Cr11Mo1VNbN叶片钢持久强度与一次NbC的影响:(a)持久强度,(b)一次NbC尺寸

Fig. 10 Effect of upsetting process on the rupture strength and primary NbC of 2Cr11Mo1VNbN blade steel : (a) endurance strength, (b) one-time NbC size

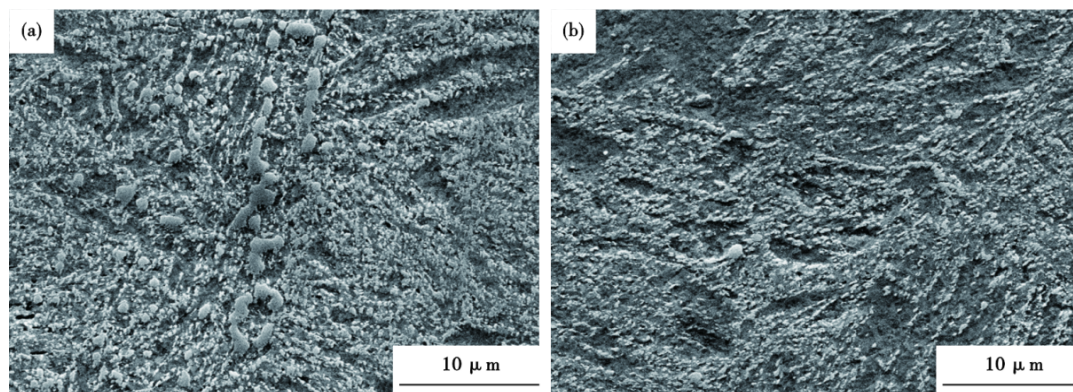


图11 不同终锻温度下2Cr12NiMo1 W1V叶片钢的显微组织:(a)850 °C ,(b)930 °C

Fig. 11 Microstructure of 2Cr12NiMo1 W1V blade steel at different final forging temperatures : (a) 850 °C, (b) 930 °C

难度,实际生产过程,不可避免会形成一定数量的高温相,需要掌握不同尺度高温相的回溶温度以及对力学性能的影响,结合设备、材料特点,选择合适的终锻温度。

热处理是组织和性能的调控过程,是实现组织和力学性能最优化组合的最终措施。对于不同温度下应用的叶片钢,强韧化匹配侧重的方向不同,但总体要求是一致的。叶片钢试样级的热处理研究报道较多,容易达到预期的强度与塑韧性匹配,热处理的温度与时间窗口也较为宽泛。实际生产过程,需综合考虑工件尺寸、现场热处理环境的影响,否则产品性能容易出现不合格项,最常见的是由热处理冷速不足引起的脆化问题。图12<sup>[51]</sup>为1Cr12Ni3Mo2VN叶片钢不同淬火冷却速度下的冲击功与显微组织,随着淬火冷却速度下降,会沿着马氏体板条连续析出 $M_2C$ 相,引起材料脆化,产品热处理过程,需要根据工件尺寸的增加,采用提高淬火冷速的工艺措施。

对于铁素体(马氏体)系叶片钢,预备热处理是调整组织均匀性的重要途径,前期工序中遗传的混晶等问题,大部分能够通过合适的预备热处理消除<sup>[52]</sup>。对于高Cr型叶片钢,预处理还能改善横纵向力学性能的差异,消除残余奥氏体,如图13所示<sup>[53-54]</sup>。预备热处理或高温回火对热处理前碳化物的预调控,是提高产品最终力学性能和组织均匀性的重要途径,国内目前的研究更多集中在晶粒度与去应力防开裂等方面,预处理技术对亚结构与第二相精细化调控是叶片钢需要进一步系统研究的方向。

## 4 结论与展望

总体上看,国内超超临界电站叶片钢几乎实现了100%国产化生产与供应,其原因一方面是由于成本因素,国外企业的利润下降,不再大量供给;更重要的原因是随着我国冶金与制造水平的提高,叶片钢的质量稳定性和应用性能显著提高,缩小了与国外的差距。国产2Cr11Mo1VNbN、2Cr12NiMo1W1V、

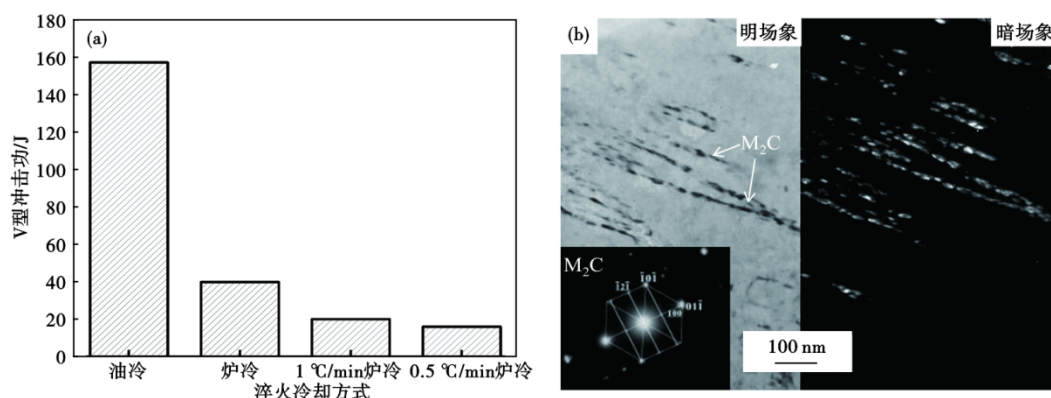


图 12 不同淬火冷却速度下 1Cr12Ni3Mo2VN 叶片钢的冲击功与微观组织:(a) 冲击功, (b) 0.5 °C/min 炉冷后的 TEM 组织  
Fig. 12 Impact energy and microstructure of 1Cr12Ni3Mo2VN blade steel at different quenching cooling rates: (a) impact energy, (b) TEM microstructure after furnace cooling at 0.5 °C/min

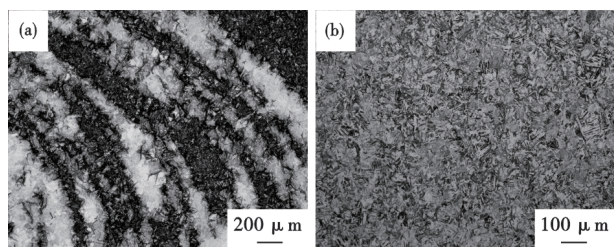


图 13 预处理对高 Cr 型叶片钢残余奥氏体的改善:(a) 热处理态, (b) 预备热处理+热处理态

Fig. 13 Improvement of residual austenite in high-Cr blade steel by pretreatment: (a) heat-treated state, (b) pre-heat-treated + heat-treated state

2Cr12Ni3Mo4VNbN、1Cr12Ni3Mo2VN、B50A789G 等高端叶片钢的冶金质量、强韧性匹配、组织与性能稳定性等方面均达到了国外产品相当的水平,部分

品种实现了稳定化供货,成本可控。未来 10 年,超超临界火电作为电力能源“压舱石”的地位仍不可替代,未来叶片钢市场需求巨大,产品性能、成本的竞争也会愈发激烈。技术领先是提高叶片钢产品竞争力的唯一途径,对于铁素体(马氏体)型叶片钢,稳定化的低成本高纯净冶炼技术、产品规模化生产的质量稳定性提升技术是未来的发展方向,以坯代锭、采用连铸流程的高纯净、低偏析冶金技术将成为进一步降本增效的重要突破点。在电力结构绿色低碳转型的战略背景下,我国有望建造 700 °C 高参数示范电站,镍基耐热合金叶片是技术攻关的重点产品,700 °C 下高持久、抗疲劳、耐腐蚀的镍基合金叶片材料与叶片的高精度制造技术,将是未来十年国内高端装备制造领域的重点发展方向。

### 参考文献

- [1] 王倩, 王卫良, 刘敏, 等. 超(超)临界燃煤发电技术发展与展望[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 1-9.
- [2] 王哮江, 刘鹏, 李荣春, 等. “双碳”目标下先进发电技术研究进展及展望[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 58-65.
- [3] 史进渊, 李军, 刘霞, 等. 我国大型汽轮机技术研究进展与展望[J]. 动力工程学报, 2022, 42(6): 498-506.
- [4] 杨钢, 王立民, 程世长, 等. 蒸汽轮机用叶片钢的研究进展[J]. 特钢技术, 2009, 15(3): 1-7.
- [5] 刘正东, 程世长, 王起江, 等. 中国 600 °C 火电机组锅炉钢进展[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [6] Lucacci G. Materials for Ultra-Supercritical and Advanced Ultra-Supercritical Power Plants[M]. Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2017.
- [7] 刘正东, 陈正宗, 何西扣, 等. 630~700 °C 超超临界燃煤电站耐热管及其制造技术进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 539-548.
- [8] Tadashi Tanuma. Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants[M]. Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2022.
- [9] Masuyama F. Advances in physical metallurgy and processing of steels. history of power plants and progress in heat resistant steels [J]. ISIJ International, 2001, 41(6): 612-625.
- [10] Ronald L, Klueh, Donald R, Harries, Development of High (7%~12%) Chromium Martensitic Steels. High-Chromium Ferritic and Martensitic Steels for Nuclear Applications [J]. ASTM International, 2001, 1: 5-11.
- [11] 林腾昌, 王慧, 王成杰, 等. 超临界高中压转子用 12%Cr 钢的研究现状[J]. 铸造技术, 2012, 33(11): 1267-1269.
- [12] 范华, 杨功显. 超临界与超超临界汽轮机组用材[J]. 东方电气评论, 2005, 19(2): 90-97+105.
- [13] 赵成志, 魏双胜, 高亚龙, 等. 超临界与超超临界汽轮机耐热钢的研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2007, 19(9): 1-5.
- [14] Viswanathan R, Bakker W, Materials for Boilers in Ultra Supercritical Fossil Power Plants[C]. Proceedings of 2000 International Joint Power Generation Conference, Florida: 2000, 1-22.

- [15] Viswanathan R, Bakker W. Materials for ultrasupercritical coal power plants—Turbine materials: Part II[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2001, 10(1): 96-101.
- [16] Gianfrancesco A D, Cipolla L, Venditti D, et al. Creep behaviour and microstructural analysis of FB2 trial rotor steel[C]. *International Conference on Advances in Materials Technology for*. 2008: 366-376.
- [17] Gianfrancesco A Di, Cipolla L, Paura M, et al. The Role of Boron in Long Term Stability of a CrMoCoB (FB2) Steel for Rotor Application[C]. *Proceedings from the sixth International Conference on Advances in Materials Technology for Fossil Plants*, 2010: 342-360.
- [18] Fedoseeva A E, Nikitin I S, Fedoseev A E, et al. Effect of tantalum on short-term creep of a 12%Cr-3%Co-0.07%Ta martensitic steel for steam blades[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 848(1): 012020.
- [19] Dashunin N V, Manilova E P., Rybnikov A I. Phase and Structural Transformations in 12% Chromium Steel ÉP428 due to Long-term Operation of Moving Blades [J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2007, 49(1): 23-29.
- [20] 闫超鹏, 孙 锋, 单爱党, 等. 超超临界火电机组用铁素体耐热钢的研究现状[J]. *机械工程材料*, 2008, 32(12): 1-4.
- [21] 龚志华, 杨 钢, 定 巍, 等. 热处理工艺对 1Cr<sub>11</sub>Co<sub>3</sub>W<sub>3</sub>NiMoVNbNB 钢析出相及性能的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2018, 30(4): 315-321.
- [22] Chen X F, Yao Z H, Zhang M C, et al. Long time high temperature stress rupture strength behavior and structure stability study on Ni-base superalloy nimonic 80A [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2016, 853: 148-152.
- [23] 纪世东, 周荣灿, 王生鹏, 等. 700 °C 等级先进超超临界发电技术研发现状及国产化建议[J]. *热力发电*, 2011, 40(7): 86-88.
- [24] Gianfrancesco A D. *Materials for ultra-supercritical and advanced ultra-supercritical power plants*[M]. Duxford: Woodhead Publishing, 2017.
- [25] 王天剑, 范 华, 张邦强, 等. 700 °C 超超临界汽轮机关键部件用镍基高温合金选材[J]. *东方汽轮机*, 2012, 2: 46-53.
- [26] 毛健雄. 700 °C 超超临界机组高温材料研发的最新进展[J]. *电力建设*, 2013, 34(8): 69-76.
- [27] Abe F. Research and development of heat-resistant materials for advanced USC power plants with steam temperatures of 700 °C and above[J]. *Engineering*, 2015, 1(2): 211-224.
- [28] 彭建强. 700 °C 等级超超临界汽轮机用材探讨[J]. *大型铸锻件*, 2014(1): 1-8+38.
- [29] Viswanathan R, Hawk J, Schwant R, et al. Steam turbine materials for ultrasupercritical coal power plants[R]. *Energy Industries of Ohio, Incorporated*, 2009.
- [30] EIJI SAITO, SHIN NISHIMOTO, HIROYUKI ENDO, et al. Development of 700 °C Class Steam Turbine Technology[J]. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 2017, 54(3): 10-15.
- [31] 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.
- [32] 熊林敞, 田仲良. 超超临界汽轮机转子用耐热钢研究进展[J]. *上海金属*, 2018, 40(1): 89-94.
- [33] 田仲良, 包汉生, 何西扣, 等. 700 °C 汽轮机转子用耐热合金的强化机理[J]. *钢铁研究学报*, 2015, 27(9): 1-6.
- [34] 汪 力. 700 °C 超超临界蒸汽轮机叶片用 Waspaloy 合金组织与性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- [35] 700 °C 汽轮机叶片用 Nimonic 105 合金的组织及性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- [36] 王 鲁, 杨 钢, 刘正东. 碳含量对 Nimonic 105 合金的组织性能的影响[J]. *上海金属*, 2017, 39(2): 20-25+30.
- [37] 王 鲁. 700 °C~750 °C 超超临界火电汽轮机叶片用耐热合金的研究[D]. 北京: 钢铁研究总院, 2017.
- [38] 王 鲁, 杨 钢, 钱天才, 等. 添加钨对 USC 141 镍基合金力学性能的影响[J]. *钢铁研究学报*, 2014, 26(2): 41-47.
- [39] 何西扣, 王 鲁, 汪 力, 等. 一种新型耐热合金 GY200 的长期时效组织与性能[J]. *上海金属*, 2016, 38(3): 21-27.
- [40] 龚志华, 杨 钢, 马龙腾, 等. 不同 Mo、W 含量叶片用 GY200 镍基合金中碳化物的析出行为[J]. *材料热处理学报*, 2017, 38(9): 83-88.
- [41] 龚志华, 杨 钢, 包汉生, 等. 长时效对汽轮机叶片用 GY200 镍基合金组织和性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2019, 48(4): 1281-1287.
- [42] 梅林波, 沈红卫, 刘 霞. 汽轮机末级长叶片材料的开发和序列构建[J]. *热力透平*, 2017, 46(1): 9-12+27.
- [43] 彭建强, 李宇峰. 低压汽轮机末级超长叶片材料[J]. *东方汽轮机*, 2015(4): 47-55.
- [44] AKAISHI Y. E A. Development of Next-Generation Ultra-Long Exhaust End Blades for Steam Turbines and Measurement of Axial Torque at Single-Axial Gas Turbine Combined Cycle Plants [J]. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 2013, 50(3): 11-17.
- [45] 潘洪泗, 揭念柱, 方 旭. 1 050 mm 汽轮机钛合金叶片的研制[J]. *热力透平*, 2014, 43(3): 227-230.
- [46] Fujio Abe. Precipitate design for creep strengthening of 9% Cr tempered martensitic steel for ultra-supercritical power plants[J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2008(9): 1-16.
- [47] 陈德利. 抚钢先进汽轮机叶片钢的制备工艺与组织性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.
- [48] 龚志华, 王利伟, 姚 斌, 等. 锻造工艺对 2Cr11Mo1VNbN 钢横纵向组织及性能的影响[J]. *钢铁*, 2019, 54(11): 88-93.
- [49] 龚志华, 姚 斌, 王利伟, 等. 热处理工艺对 2Cr11Mo1VNbN 耐热钢组织和性能的影响[J]. *钢铁*, 2019, 54(6): 56-62.
- [50] 龚志华, 何 祺, 包汉生, 等. 2Cr12NiMo1W1V 超临界汽轮机叶片用耐热钢的热变形行为[J]. *钢铁*, 2019, 54(3): 63-68.
- [51] 杨 钢, 刘新权, 杨沐鑫, 等. 1Cr12Ni3Mo2VN(M152) 耐热钢的脆化机制[J]. *特钢技术*, 2009, 15(4): 14-24+59.
- [52] 谢学林, 杨 钢, 王泽忠, 等. 高温回火对 1Cr12Ni3Mo2VN 耐热钢力学性能和组织的影响[J]. *特殊钢*, 2010, 31(2): 51-53.
- [53] 赵吉庆, 万五霞, 李造宇, 等. 125 ksi 超级马氏体油管成分-组织-性能-工艺综合控制技术[J]. *特殊钢*, 2024, 45(5): 40-46.
- [54] 席志伟, 罗红梅, 孙国栋. 预备热处理对 A-F 区亚温淬火-回火的 42CrMo 钢组织和性能的影响[J]. *特殊钢*, 2019, 40(4): 43-47.