

电渣板坯热模压成形工艺研究

张家东¹, 王安国², 宿纯文², 陈 瑞¹, 高云保¹, 熊云龙¹

(1. 沈阳铸造研究所有限公司 高端装备轻合金铸造技术国家重点实验室, 辽宁沈阳 110022;

2. 沈阳航空航天大学, 辽宁沈阳 110136)

摘要: 提出了一种将X型叶片板坯化拓扑变换后电渣熔铸, 压模设计、模压及热处理实现板坯逆向拓扑变换为曲面水轮机叶片的新工艺。叶片通过板坯化拓扑变换后电渣熔铸可解决其直接电渣熔铸充型难的问题, 板坯结晶器法兰处施加耐热弹性材料可解决叶片板坯铸造应力大的问题, 在板坯极点对应的压模处预置定位柱及复式模压可解决定位精度要求高的问题。与模压相伴的热处理工艺可以在低能耗下同时实现形状与性能要求。通过该工艺生产的电渣熔铸模压叶片有化学成分均匀、组织致密、晶粒细化、无超标缺陷、夹杂物少而弥散等优点。参比砂铸叶片样件的生产过程, 电渣熔铸模压叶片, 具有环保效果好、造型快捷、样件力学性能高等优点; 参比砂铸叶片样件, 其冲击韧性提升了约30%, 其他力学性能指标全方位改善。参比等厚钢板模压叶片工艺方案, 电渣熔铸模压叶片成形工艺方案可大大降低生产成本, 提高生产效率。

关键词: 电渣熔铸; 压模; 模压; 板坯; 叶片

作者简介:

张家东(1978-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为金属材料的设计与制备。

E-mail: zjd_1978@163.com

通讯作者:

王安国, 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: 13604188303@136.com

中图分类号: TF142

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

12-1555-06

基金项目:

辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC2008036)。

收稿日期:

2022-03-22 收到初稿,

2022-06-29 收到修订稿。

水轮机转轮叶片的制造质量直接影响水轮机的水力效率、空化性能及机组运行稳定性。多年来, 人们一直在不断探索改进水轮机叶片制造工艺, 以求提高其综合力学性能, 降低生产成本。传统生产水轮机叶片主要有砂型铸造和钢板板坯模压两种工艺方法^[1]。虽然以砂型组合造型为特点的砂型铸造方法可简化生产工序并降低加工难度; 但是砂型铸造水轮机部件内部微观缩松及表面砂眼缺陷时有发生, 且其力学性能相对不高^[2], 难以适于高使用寿命要求的工况^[3-4]。钢板板坯模压法以叶片吸力面为基准进行实体拓扑展开^[5-7], 参照叶片展平面形状及叶片最大厚度定制并裁切钢板后, 高温下模压制坯^[8-9]; 其交付叶片内部质量、致密度及表面状态虽优于砂铸, 但厚的等厚钢板制坯过程缺陷控制不稳定^[10]; 等厚钢板模压后加工成厚度变化很大的叶片^[11], 其加工去除极度不均匀的余量, 参比同类砂铸叶片毛坯加工去除较均匀的余量明显需要切削掉重量更多的金属, 金属利用率显著降低, 制造成本及加工周期必然显著增加。

电渣熔铸在熔渣保护下可顺序凝固近净自补缩成形^[12], 其试样抗汽蚀能力约为砂铸试样的1.25倍^[2], 是一种提供高品质近净成形部件的新方法^[13-14]。X型叶片(字母X形状的叶片)任意方向选定为重力方向时均无可供宽幅自耗电极贯通的连续垂直型腔, 其直接进行自耗电极导通电路的连续电渣熔铸充型难度极大; 其电渣熔铸时难以避免金属液爬坡充型段, 金属液在叶片型腔内连续充型凝固时容易因爬坡充型段应力叠加导致铸件局部铸造应力大; X型叶片厚度随位置变化很大, 模压过程容易因叶片定位不准导致模压后局部厚度严重不足。为解决X型叶片电渣熔铸时充型难度大, 其板坯电渣熔铸时铸造应力大, 以及板坯模压时定位精度要求高的三大难题, 同时为实现X型叶片高品质、适宜成本的双重目标, 沈阳铸造研究所有限公司通过对某电站X型叶片分析研究, 结合相应材料的相关热处理工艺^[15-16], 开发出了一种基于电渣熔铸叶片板坯+热模压成形叶片的全新的工艺方法; 对其交付产品的相关技术指标与参比砂铸叶片样件相关技术指标进行了对比分析, 并对其相关经济及效率指标与钢板模压进行简要对比。

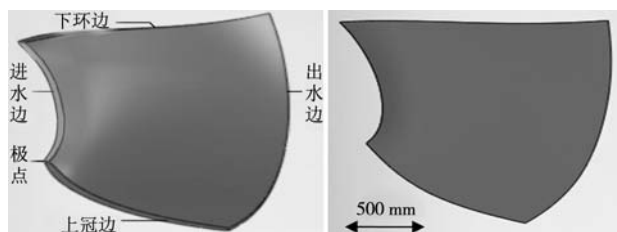
1 叶片的制备

研发的某水电站X型叶片的制备流程包括电渣熔铸板坯制备、叶片板坯粗加工、叶片模压成形等。

1.1 叶片板坯的电渣熔铸制备

1.1.1 叶片实体展开

首先以X型叶片进水边及出水边吸力面的四个极点（顶点）为参考，寻找适宜的基准点进行实体拓扑展开，获得单面为平面的叶片展平实体，该X型叶片展平前后形状如图1所示（图中背面的吸力面展平后为平面）。在叶片展平实体的基础上可进行电渣板坯加工余量设计及相应的自耗电极、结晶器、熔铸成形工艺等设计。



(a) 叶片展平前实体 (b) 叶片展平后实体

图1 叶片展平前后形状

Fig. 1 Shapes of the blade before and after flattening

1.1.2 结晶器及自耗电极

电渣熔铸过程中，在铜材质工作面、隔板、法兰及水管组成的结晶器内（见图2），自耗电极经电流电压作用于熔渣的电阻热而熔化，经熔渣保护而自补缩凝固；其结晶器内腔工作面形状接近叶片展平后的形状，材料选用厚度为20~25 mm的紫铜板，工作面外部以隔板及法兰板承载流动冷却水，保障凝固速度。

该研发叶片材质为ASTM A743 CA6NM，交货重约1 800 kg，化学成分及力学性能要求见表1和表2。以“EAF+AOD”方法为其提供电渣熔铸叶片板坯用自耗电极及其同类尺寸规格比照用砂铸叶片样件的化学成分（质量分数%）分别为：0.027% C，0.34% Si，0.56% Mn，0.027% P，0.006% S，12.6% Cr，4.17% Ni，

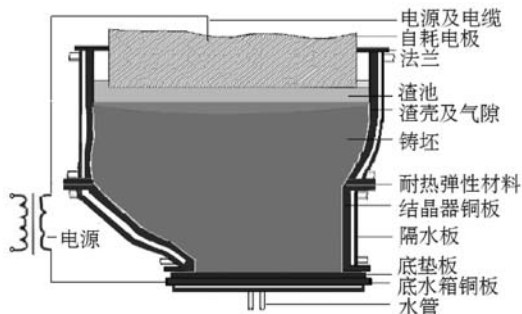


图2 电渣熔铸叶片板坯示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the ESC blade blank

0.50% Mo，0.028% C，0.32% Si，0.55% Mn，0.027% P，0.006% S，12.5% Cr，4.16% Ni，0.49% Mo。自耗电极填充系数（对应熔铸位置的自耗电极截面积与模具型腔截面积比）控制在0.35~0.5。

表1 ASTM A743 CA6NM化学成分要求

Table 1 Chemical composition requirements of the ASTM A743 CA6NM

ASTM A743 CA6NM							w_B /%
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
≤0.06	≤1.00	≤1.00	≤0.04	≤0.03	11.5~14.0	3.5~4.5	0.4~1.0

表2 ASTM A743 CA6NM力学性能要求

Table 2 Mechanical property requirements of the ASTM A743 CA6NM

$R_{P0.2}$ /MPa	R_m /MPa	A/%	Z/%	KV_2 (0 °C)/J	HBW
≥550	≥755	≥15	≥35	≥32.5	230~285

1.1.3 熔铸成形工艺

叶片板坯的电渣熔铸生产工艺流程及结果如下。

(1) 组型：采用对开放式水冷金属型快捷组造型，一型可反复利用百次；造型过程可避免砂型铸造的树脂固化剂等污染，绿色环保。

(2) 配渣：优化三元渣配比，以保障熔铸大曲面时具备适宜的渣强度及渣粘度。其质量配比为 CaF_2 ：50%~70%， Al_2O_3 ：15%~30%， CaO ≤15%， SiO_2 ≤6%， MgO ≤6%；渣量120~140 kg，使液态渣层厚度可控。

(3) 通电起弧造渣：首选石墨电极化渣以形成液态熔渣，随后随型自耗电极插入液态熔渣导电路路并因熔渣电阻热熔化而汇集成熔滴。

(4) 熔铸成形过程控制：熔铸成形过程控制主要保障金属逐层凝固过程成形饱满，无缩松及裂纹类缺陷。熔铸成形过程，金属熔滴的供给速度依托适宜电功率及伺服电机调控电渣炉装卡自耗电极支臂的快慢速升降完成。经分析与实践，熔铸当量直径均值约 $\Phi 450$ 的叶片板坯各截面时，保障金属熔滴穿过渣层形成适宜形状金属熔池，宜给定电流均值约 $9\ 000\ A \pm 500\ A$ ，电压均值约 $90\ V \pm 4\ V$ ；补缩阶段，给定电流均值约 $3\ 000\ A \pm 150\ A$ ，电压均值约 $77\ V \pm 3\ V$ ；熔化速率始终保持在5~18 kg/min。板坯熔铸过程，金属熔池逐步在结晶器内凝固成形，铸坯收缩应力很大，易产生破坏性裂纹而导致报废；叶片板坯宽约2 000 mm，采用退让结晶器^[17]的老方法易因收缩间隙过大而产生钢渣渗漏；通过分析应力应变情况，将耐热弹性材料分别布置在法兰与法兰、法兰与底垫板之间，有效地解决了铸造应力释放问题。

(5) 分型清坯：电渣熔铸后，叶片板坯分型后清理，得到坯料实物照见图3。坯料最薄及最厚处分别约50 mm及130 mm，重约2 900 kg，材料利用率约60%。

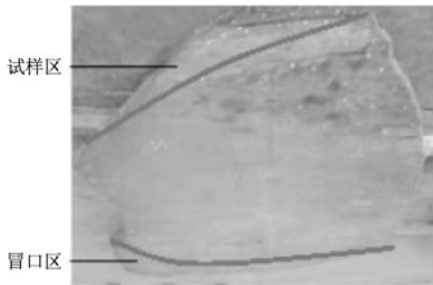


图3 电渣熔铸叶片板坯照
Fig. 3 ESC blade slab

1.2 叶片板坯粗加工

依据金属加热冷却过程变形的特殊性，在模压叶片板坯铸态成形时，板坯主体部分按客户交付叶片展平后背面（吸力面）、正面（压力面）各加4 mm余量；进水边（厚边）、出水边（薄边）、上冠边、下环边由外至内约400 mm区域内，正背面额外过渡加厚6→0 mm；四周单面加宽10 mm进行加工，叶片板坯粗加工后如图4所示。

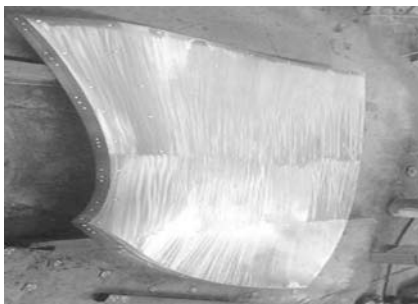


图4 电渣熔铸叶片板坯展平后粗加工照
Fig. 4 Rough machining picture of the ESC blade slab after flattening

该叶片板坯粗加后的厚度变化范围为30~120 mm，电渣熔铸叶片板坯的加工余量相对均匀，单面平均加工余量约6 mm，远小于约130 mm等厚钢材模压工艺时单面约24 mm的加工余量，模压用电渣熔铸叶片板坯的重量约为等厚钢板板材重量的60%。加工量骤减的同时极大降低加工周期，降低生产成本，提高了生产效率。参比砂型铸造工艺，无需切割大型补缩冒口及补贴，机械加工前的预处理工作量减少。

1.3 叶片压模的设计制造及模压

1.3.1 叶片压模的设计制造

根据叶片板坯粗加工留量优化设计出了叶片板坯，优化后的叶片背面型线考虑回弹量确定下模型线，叶片正面型线考虑回弹量确定上模型线。板坯极点附近对应压模的位置布置多重定位柱，定位柱位置设计压模上下模型线的基准，经三维预演确定压模热压成形间隙，从而确立压模模型，叶片上下压模三维图见图5。

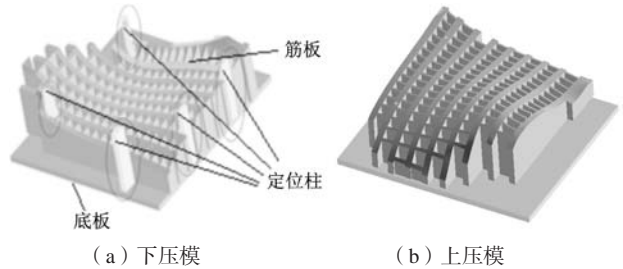


图5 模压叶片压模三维图

Fig. 5 Three dimensional diagram of the die for the molded blade

由于叶片压制时模具与工件接触区域及附近工况恶劣，可选择强度较好的A3钢厚板为模具上、下模材料。叶片压制时，其空间跨度比较大，模具受力不均，模具结构设计必须合理可靠。上、下模设计成中空式带加强筋结构，以减轻重量和便于冷却。上下压模采用4点以上定位柱对叶片压制时进行定位。

按模具CAD实体尺寸下料切割100 mm厚底板，80 mm厚竖板，30 mm厚筋板，按焊接结构图纸铆焊竖板，点焊筋板，并全部焊透。龙门铣床先铣压模底平面，后铣压模型线面。压模加工完后，在机床上检查压模型线，合格后再焊接下模定位柱，焊接时百分表检查定位柱位置，防止移位变形。

1.3.2 叶片模压成形工艺

(1) 装压模：根据压力机平台上下模具定位装置，先固定下模具，再固定上模具，试行程，确保行程没有冲突；根据下压模四周的限位块测量上下模具的合模偏差，作为后面多次压型后模具移位数据资料，后期用于修正使用。

(2) 叶片板坯加热：综合考虑ASTM A743 CA6NM材质不锈钢件适宜的正火温度及等厚钢板模压温度^[15-16]，坯料加热模压的温度选为 $1\ 070\ ^\circ\text{C} \pm 30\ ^\circ\text{C}$ ，保温时间为 $5\ \text{h} \pm 2\ \text{h}$ ，叶片加热时放置本体热电偶，本体热电偶放置在一件叶片上，进、出水边各放置1个，本体试样随炉一同热处理。

(3) 压型及取工件：工件在压模中准确定位，才能保证压制有效；分析及实践表明，工件加热前在极点处额外预焊限位凸块，可很好保障定位精度。用2~3个吊钩，配合长度约5 m的加长杆拖住吊钩，吊钩在工件两侧保证平衡，吊出工件，保证压制前板坯表面温度 $\geq 800\ ^\circ\text{C}$ （测温枪确认）。压型过程，可分3次对叶片进行压制：第一次将工件压制到2/3变形，打开模具快速确认工件是否移位，如果移位较大，将工件适当调整位置，保证工件在有效压制范围；第二次压制，将工件基本压制到位后切勿增加压力，打开模具，确认工件的型线和移位，如果有移位和型线不合理，进行工件的适当调整；第三次压制，将工件压制到位，

保压5~10 min后取出工件。

(4) 退火: 叶片板坯模压型线初检合格后, 试样随叶片板坯直接退火处理, 退火温度为 $610\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温时间为 $7\text{ h} \pm 1\text{ h}$, 然后炉冷至 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下后空冷, 之后再进行最终型线确认。整个过程完毕后, 无须重新进行正回火。

参比等厚板材模压工艺, 该非等厚板模压成形工艺的定位精度因四个极点的厚度不一而难度更高。参比砂型铸造工艺, 该方案属于增加工艺部分, 通过该工艺模压后的叶片最大变形量约4 mm, 其最大变形量小于同类相似大小砂铸叶片淬火后约7 mm的最大变形量。

2 检测分析

叶片板坯模压退火后(模压叶片)对其进行了化学成分分析、力学性能检验、无损探伤检验、型线检测、金相分析及夹杂物分析, 各项指标均符合交付条件。

2.1 化学成分分析

叶片板坯化学成分(同模压叶片化学成分)及比照砂铸叶片样件成分见表3, 可见, 自耗电极成分经电渣工艺成为叶片板坯后, 成分变化很小, 符合表1所示的交付要求。

表3 模压叶片板坯及对应砂铸化学成分

Table 3 Chemical compositions of the molded blade slab and sand casting blade

$w_B/\%$

样品	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
电渣板坯用自耗电极	0.027	0.34	0.56	0.027	0.006	12.5	4.17	0.50
模压叶片	0.028	0.32	0.54	0.025	0.006	12.5	4.15	0.49
砂铸叶片样件	0.028	0.32	0.55	0.027	0.006	12.5	4.16	0.49

表4 模压叶片及对应砂铸本体试样力学性能检测结果

Table 4 Test results of the mechanical properties of the molded blade and sand casting blade body samples

试样编号	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	R_m/MPa	$A/\%$	$Z/\%$	$KV_2(0\text{ }^{\circ}\text{C})/\text{J}$	HBW
模压1-1	600	850	22	58	113 105 115	265 262 262
模压1-2	610	865	23	63	106 110 111	263 263 262
模压1-3	580	868	21	65	116 120 118	260 265 263
砂铸叶片样件	565	841	17	42	75 81 78	254 257 259

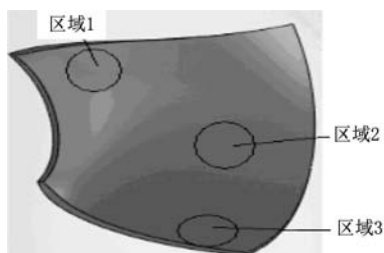


图6 叶片模压退火后本体检测区域

Fig. 6 Inspection areas of the blade body after die pressing and annealing

2.2 力学性能检测

对叶片板坯模压退火后本体及比照砂铸样件本体同炉热处理的试样进行四组力学性能检测, 检测结果见表4, 四组试样的力学性能检测结果均符合表2所示的交付要求; 电渣熔铸叶片板坯经模压后参比砂型铸造, 其抗拉强度、屈服强度、伸长率及硬度均略有提高, 断缩及冲击韧性显著提高约30%。

对叶片模压退火后不同形变区域(1区域、2区域、3区域)进行了硬度(GB/T 231.1)试验, 选取的检测区域如图6所示, 各个区域的硬度检测结果见表5, 略高于同炉热处理砂铸叶片样件同区域约HBW270的本体硬度, 说明其耐磨损能力更佳; 通过对各个区域的硬度检测结果分析可知, 不同形变区域其相应的硬度检测结果接近, 硬度分布均匀性优于砂铸叶片, 易避免应力集中点产生, 叶片不容易破损。

2.3 型线及无损探伤检测

以精度0.1 mm的天远三维摄像测量系统测量研究对象, 每100 mm左右放一标志点(图7中的大量白点), 测出标志点与实体模型的差值即为余量^[18]。该摄像测量系统测得, 模压退火后, 叶片实物参比精加实体的压力面及吸力面单面加工余量为 $4\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$,

表5 模压后叶片本体硬度检测结果

Table 5 Hardness test results of the molded blade body

区域	模压叶片硬度值 HBW	砂铸叶片样件 HBW (各测3次)
1	280 279 278	263 266 265
2	279 283 280	270 271 269
3	281 279 274	275 276 274

完全满足精加要求(图7); 该摄像测量系统测得, 电渣熔铸叶片板坯毛坯至粗加工的单面加工余量为 $4\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$; 因此, 电渣叶片板坯毛坯至精加实体,

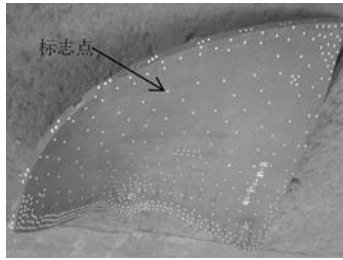


图7 叶片模压退火后毛坯照

Fig. 7 Blank image of the blade after die pressing and annealing

压力面及吸力面单面累计加工余量约 $8\text{ mm} \pm 3\text{ mm}$ 。该摄像测量系统测得，砂铸叶片样件毛坯至精加工实体的压力面及吸力面的单面加工余量约 $9\text{ mm} \pm 4\text{ mm}$ ；可见，电渣板坯热模压成形工艺控制加工余量方面稍具优势。

参比砂铸叶片样件能达到全区域UT 2级，全区域PT 2级（样件无损探伤检验，达到CCH 70-4的交付要求）；电渣模压叶片可达到出水边（薄边）UT 1级，进水边（厚边）UT 2级，全区域PT 2级。

通过5%~10%的硅酸钠对模压叶片1-3区域（如图6）及砂铸叶片样件同区域（如图6）进行清洗后，然后用3%的氢氟酸和35%硝酸的配比进行酸洗；酸洗结

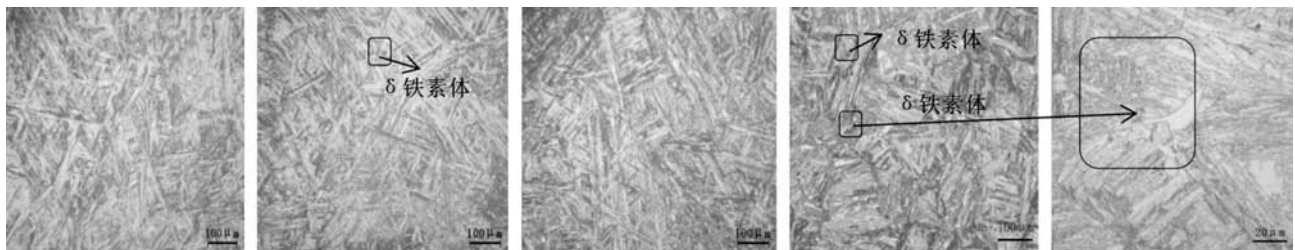
果显示，模压叶片无点腐痕迹，表明材料致密均匀、无疏松、增碳、夹渣等缺陷，砂铸叶片样件则在2区域出现了点腐痕迹。

2.4 金相及夹杂物分析

对叶片模压退火后1-3区域及砂铸叶片样件经等同热处理后区域2进行了金相检测。由图8所示的金相检验结果可知，叶片模压退火后本体三个区域组织一致，均是典型回火马氏体+少量 δ 铁素体组织；叶片模压退火后，区域2的 δ 铁素体含量 $< 1.5\%$ ，符合 δ 铁素体含量 $< 5\%$ 的特殊交付要求，略优于该砂铸叶片样件经等同热处理时，区域2的 δ 铁素体 $< 2\%$ （图8d）。该电渣模压叶片区域2的 δ 铁素体含量略少于该砂铸叶片样件区域2外，其大小也较小，更难以发现。

对模压叶片及砂铸叶片样件的冲击试样端面进行了夹杂物分析。由图9所示的检验结果可知，模压叶片冲击试样区域的夹杂物分布优于砂铸叶片样件冲击试样区域的夹杂物分布，弥散度更佳，尺寸更小，这与其制坯阶段经历了电渣精炼有关。

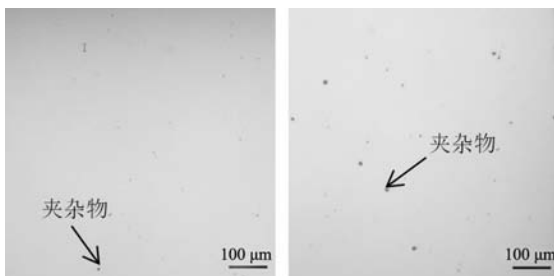
叶片模压退火后，其各区域参比砂铸叶片样件，马氏体晶粒尺寸相当，却有更好的韧性。叶片模压退



(a) 叶片模压退火区域1 (b) 叶片模压退火区域2 (c) 叶片模压退火区域3 (d) 砂铸叶片样件区域2 (e) 砂铸叶片样件区域2

图8 叶片退火后不同区域低倍金相组织

Fig. 8 Low magnification metallographical microstructures of different areas of the blade after annealing



(a) 模压叶片冲击试样 (b) 砂铸叶片样件冲击试样

图9 夹杂物分布

Fig. 9 Low magnification distributions of the inclusions

火后，韧性更佳，与其模压时模具传热效果好，固溶效果好，后期的逆变奥氏体转化更充分或数量更适宜有关^[15]；同时也与其经历的电渣熔铸过程，导致夹杂物分布及尺寸更合理有关。

3 结论

(1) 电渣熔铸板坯模压工艺，其叶片板坯实体与目标叶片实体具有拓扑展开关系，模压叶片加工余量及退火变形量参比砂铸稍小，材料利用率在60%以上；参比钢板式模压叶片，金属利用率提高，成本降低。

(2) 电渣熔铸板坯过程中，法兰处施加耐热弹性材料可缓解铸造应力；板坯极点对应压模处预置多重定位柱，附加3次压制法，可增加模压时的定位精度；叶片模压温度为 $1\ 070\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，模压后直接进行 $610\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火，可省去正火处理，保障优异性能的同时，节约了成本。

(3) 电渣熔铸板坯模压后的叶片组织致密，表面光洁，酸洗前后均无疏松、夹渣、缩孔等砂铸常见超标缺陷显现；成分合格，性能优良，硬度均匀，断缩及冲击韧性指标参比同炉砂铸同本体试样提升约30%。

(4) 电渣熔铸板坯模压后的叶片 δ 铁素体含量 <1.5%，略优于砂铸叶片样件的 δ 铁素体含量 <2%；其夹杂物分布弥散度及尺寸更佳，其叶片板坯压形后的组织，参比砂铸叶片样件，具有更好的韧性。

参考文献:

- [1] 李红霞, 柏长友, 杨保. 马氏体不锈钢水轮机叶片铸造缺陷修补工艺的研究 [J]. 铸造工程, 2015 (5): 27-29.
- [2] 陈瑞, 李旭东, 郝学卓, 等. 电渣熔铸三峡电站水轮机导叶 [J]. 铸造, 2004 (7): 500-502.
- [3] 吴现龙, 邵抗振, 李桐, 等. 大型薄壁不锈钢水轮机下环的铸造工艺研究 [J]. 铸造技术, 2012, 33 (5): 578-579.
- [4] 邵抗振, 吴现龙, 李克锐. 大型低碳不锈钢水轮机上冠的铸造生产 [J]. 铸造技术, 2011, 32 (7): 928-929.
- [5] 董爽, 桂林, 韦晶. 基于CFD的水轮机叶片优化设计研究 [J]. 吉林水利, 2020 (1): 29-34.
- [6] 陈昭运, 薛伟. 一种新的模压叶片展开方法 [J]. 大电机技术, 2000 (4): 46-49.
- [7] 罗朝云, 杨建军, 赵锦. 基于有限元的结构优化分析方法-拓扑优化 [J]. 电子世界, 2014 (14): 90.
- [8] 王地召, 王贞凯. 水轮机转轮叶片模压成型技术 [J]. 东方电气评论, 2006 (1): 42-46.
- [9] CASTRO C F, ANTONIO C A, SOUSA L C. Optimization of shape and process parameters in metal forging using genetic algorithms [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 146 (3): 356-364.
- [10] 刘超. 特厚钢板探伤不合格原因分析及控制 [J]. 宽厚板, 2021, 27 (2): 34-36.
- [11] 文甜洁. 电渣重熔过程钢液流动现象和非金属夹杂物行为的研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- [12] SCHNEIDER R S, MOLNAR M, GELDER S, et al. Effect of the slag composition and a protective atmosphere on chemical reactions and non-metallic inclusions during electro-slag remelting of a hot-work tool steel [J]. Steel Research International, 2018, 89 (10): 1-9.
- [13] KARIMI-SIBAKI E, KHARICHA A, WU M, et al. A multiphysics model of the electroslag rapid remelting (ESRR) process [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130 (5): 1062-1069.
- [14] VLASOV A F, MAKARENKO N A, KUSHCH H M, et al. The sectors workpieces and drum reel's die cubes electroslag casting with exothermic electrical conductive fluxes [J]. Solid State Phenomena, 2021, 313: 118-126.
- [15] 宋蕾, 赵岭, 高云保, 等. ZG06Cr13Ni4Mo 不锈钢的强韧化研究现状 [J]. 铸造, 2021, 70 (11): 1259-1264.
- [16] 汪洁, 宁海霞. 金属学热处理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [17] 陈瑞, 李旭东, 郝学卓, 等. 电渣熔铸可退让结晶器: CN2595499 [P]. 2003-12-31.
- [18] 王安国, 姜周华, 唐骥, 等. 空心环形件电渣熔铸内结晶器铜板变形有限元瞬态分析 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2016, 37 (9): 1332-1337.

Research on Die Pressing Process of Electroslag Casting Slab

ZHANG Jia-dong¹, WANG An-guo², SU Chun-wen², CHEN Rui¹, GAO Yun-bao¹, XIONG Yun-long¹
(1. State Key Laboratory of Light Alloy Casting Technology for High-End Equipment, Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. Shenyang Aerospace University, Shenyang 110136, Liaoning, China)

Abstract:

A new process of slab topological transformation of X-shaped blade followed by melting and casting, die design, die pressing and heat treatment to achieve the reverse topological transformation of the slab into curved hydraulic turbine blade was proposed. Electroslag melting and casting after slab topology transformation can solve the problem of direct electroslag melting and filling difficulty of the casting. The problem of casting stress was solved by applying heat-resistant elastic material to the flange of slab mold. Presetting the positioning column at the pressing die corresponding to the slab pole and multiple pressing can solve the problem of high positioning accuracy requirements. The heat treatment process accompanying with the hot forming can achieve the shape and performance requirements at the same time with low energy consumption. The electroslag melting and casting molded blade produced by this process had the advantages of homogeneous chemical composition, compact structure, grain refinement, no defects exceeding standard, fewer inclusions. Compared with the production process of sand casting blade sample, the electroslag melting and casting molded blade had the advantages of good environmental protection, fast molding, high metal utilization and high mechanical properties of the sample. Compared with samples of the reference sand casting blade, the new technology blades have increased their impact toughness by about 30%, and other mechanical performance indexes improved comprehensively, the mechanical properties of the blades and so on were much better than that of the sample sand casting one. This method can greatly reduce the costs in comparison with equal thickness steel plate hot forming method, and improve the productive efficiency.

Key words: electroslag melting and casting; pressing die; die pressing; slab; blade