DOI: 10.3901/JME.2013.20.049

基于铸辗复合成形的 42CrMo 钢 环坯铸造工艺与试验研究*

李永堂¹ 齐会萍¹ 李秋书¹ 陈国桢² 赵磊¹ 秦芳诚¹

(1. 太原科技大学材料科学与工程学院 太原 030024;
2. 洛阳 LYC 轴承有限公司 洛阳 471003)

摘要: 针对目前环形零件生产工艺流程长, 加热次数多, 浪费材料和能源等问题, 提出和研究环形零件短流程铸辗复合成形新工艺。该工艺采用铸造环坯直接辗扩成形, 具有节能、节材和缩短工艺流程等优点。在这种新工艺中, 环坯的铸造质量、组织和力学性能对后续的辗扩工艺和环形零件组织、性能具有重要的影响。以轴承环件常用的 42CrMo 钢为研究对象, 通过理论分析和模拟研究, 提出高质量环形铸坯铸造工艺; 并进行实际工业试验。通过试验研究和性能测试, 表明该铸造工艺生产的环形铸坯具有良好的质量、组织和力学性能, 可以为轴承环件铸辗复合成形提供高质量的铸坯。

关键词: 42CrMo 钢 铸辗复合成形 环坯铸造工艺

中图分类号: TG242

Casting Process and Experimental Research of 42CrMo Ring Blanks Based on Cast-rolling Forming Technology

LI Yongtang¹ QI Huiping¹ LI Qiushu¹ CHEN Guozhen² ZHAO Lei¹ QIN Fangcheng¹

(1. School of Materials Science and Engineering,
Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024;
2. Luoyang LYC Bearing Co., Ltd., Luoyang 471003)

Abstract: Aiming at many disadvantages such as long process, more heating times and wasting materials and energy in technology of manufacturing ring parts currently in use, a new cast-rolling forming technology of ring parts is put forward and researched. A cast ring blank is directly rolled into ring part in this new technology, so it possess many advantages such as saving energy, saving materials and shorten the process. In this new technology, the cast quality, organization and performance of cast blank has important influence to rolling process and the quality of ring part. Take 42CrMo commonly used in bearing ring for example, the smelt and casting process for producing high-quality ring casts is researched by means of theoretical analysis and simulation. The industrial test on blank cast of bearing rings is completed in Luoyang LYC Co. Ltd. It is shown from the results of experiments and tests that the ring blank produced by this cast process possess favorable quality, microstructure and mechanical character and can provide high quality cast blanks for new cast-rolling forming technology.

Key words: 42CrMo steel Casting-rolling compound forming Ring blank casting

0 前言

环形零件是装备制造等工业领域典型的传动、

承载关键机械零件, 品种多, 用量大, 用途广。随着高档机床、港口机械、化工机械、船舶、风电和重大装备的发展, 对环形零件的需求量日益增多, 规格日益加大, 品种不断增加^[1]。例如, 我国轴承产量占世界产量的 1/3 以上, 而以大型环件为主要零件的大型轴承的需求量在不断增加; 风电、石油化工、港口机械和国防工业等需要大量的 $\phi 2\text{ m}$ 以

* 国家自然科学基金重点(51135007)、国家自然科学基金(51174140, 51075290)、高等学校博士点基金优先发展计划(20111415130001)和山西省自然科学基金(2011011025-1)资助项目。20130304 收到初稿, 20130729 收到修改稿

上, 甚至 $\phi 5 \sim \phi 9$ m 的大型或超大型环件。

环形零件的生产, 目前普遍采用的是比较先进的热辗扩成形技术。在辗环机上通过连续地对环件局部加载, 使得环件直径不断增大, 径向壁厚逐渐减小, 在外形和尺寸达到要求的同时, 力学性能得到改善和提高。这种环件辗扩成形工艺由于是一种对工件实施连续的局部加载过程, 因而设备吨位小, 生产效率高, 可生产直径大于 6 m 的环形件。

然而目前的环件热辗扩成形工艺, 都是以锻坯为原料, 通过锻造-冲孔-辗扩工艺来实现环件的成形, 其工艺流程如图 1 所示。

图 1 现有的环件生产工艺流程

由图 1 中可以看出, 现有环件生产工艺流程中包括钢厂的金属冶炼, 生产出钢锭, 然后在钢厂的锻锤或其他设备上开坯, 生产出圆坯或方坯。运到环件生产企业后要通过锯床下料, 获得环件所需的坯料, 再由大型液压机或其他锻压设备锻造, 制成圆坯, 再通过冲孔工艺获得环形毛坯, 然后通过辗环机辗扩成形。这个工艺流程冗长; 开坯、锻造、冲孔工艺都是热加工, 需要对坯料加热; 钢厂开坯、锯床下料、锻造、冲孔都需要大型设备, 不仅投资大, 而且消耗能源动力; 冲孔工艺和多次加热造成了材料浪费; 存在能源动力消耗大、材料浪费严重、效率低、成本高、增加排放和污染环境等问题。因此, 太原科技大学与洛阳 LYC 轴承有限公司等单位合作研究开发金属环件短流程铸辗复合成形工艺。该工艺与传统工艺相比, 利用铸造环坯直接辗扩成形环形零件, 省去了现有工艺中的下料、锻造和冲孔工序, 减少了坯料加热次数, 提高了生产效率, 节约了能源、人力和设备投资, 有利于缩短工艺流程、提高生产效率、实现节能减排和清洁生产, 具有重要的理论意义和实用价值。

环形零件短流程铸辗复合成形技术是一种全新的理论与工艺, 涉及冶炼、铸造、辗扩等主要工艺过程, 其中冶炼和环坯铸造凝固过程是确保环件综合性能的关键环节, 只有在该阶段消除缩孔、缩松、偏析等组织缺陷, 并细化晶粒, 才能保证辗扩成形工艺和环件的质量及性能要求。铸造工艺过程涉及结晶、溶质的传输、晶体长大、气体溶解和析出、非金属夹杂的形成等多方面因素, 对铸造工艺进行研究, 控制铸件的凝固过程, 获得无缺陷、晶粒细化, 可满足辗扩成形性能需求的高质量铸坯, 对于环件短流程铸辗复合成形技术的开发研究和推

广应用具有重要意义。

在环形钢坯砂型铸造理论与工艺方面, 国内外学者从理论、数值模拟和试验研究等方面进行了许多卓有成效的工作。TSUI 等^[2]提出液态金属在凝固时的固液两相区分为裂纹敏感区和液相填充区, 即准固相区和准液相区, 为铸件裂纹的研究提供了理论依据。刘小刚等^[3]对某水轮机下环铸件的凝固成形和冷却过程中易产生的热裂纹和冷裂纹进行研究, 用数值模拟方法进行热应力分析, 揭示了下环铸件的低温变形趋势, 提出降低落砂温度能够有效改善铸件不均匀变形, 增大下端温度梯度能有效缓解热裂倾向。杨林^[4]对砂型铸造条件下不同内径、不同壁厚的环形铸钢件进行了研究, 通过数值模拟分析了凝固时间分布规律与凝固系数的变化关系。在铸造凝固过程细化晶粒方面, 翟启杰等^[5]基于热力学原理提出了温度扰动和成分扰动促进金属液生核的构想, 采用碳钢和轴承钢进行的试验表明温度扰动、成分扰动和二者同时扰动均可细化钢坯的凝固组织, 显著增加等轴晶数量; 脉冲电流和脉冲磁场可以显著细化不锈钢组织。在离心铸造凝固过程研究方面, IL'INA^[6]研究了离心铸造工艺及缺陷控制方法。符寒光等^[7]研究了离心铸造高速钢轧辊的成形机理, 铸造缺陷形成与控制技术, 偏析、裂纹控制技术。

以上学者的研究理论、方法对于高质量环坯的铸造工艺、凝固过程和质量控制具有很好的参考价值。然而由于环形零件铸辗复合成形技术是一项全新的理论和工艺, 要求铸造环坯不仅具有良好的尺寸精度和外观质量, 而且要有良好的组织和内在质量。因此对于环坯的冶炼、铸造工艺、凝固过程和质量控制提出了更严格的要求。

本文以 42CrMo 钢材料为研究对象, 通过理论分析与数值模拟, 探讨了适合于轴承环件短流程铸辗复合成形技术的环坯铸造工艺, 并进行了工业试验和组织、性能测试分析。

1 环件铸辗复合成形工艺

洛阳 LYC 轴承股份有限公司的中、大型轴承环件的制造目前采用图 1 所示的热辗扩成形工艺。针对该生产工艺存在的流程冗长、生产效率低、浪费能源和材料等问题, 作者提出和研究了环形零件短流程铸辗复合成形新工艺^[8-9]。该工艺流程如图 2

所示。

图2 环件铸辗复合成形新工艺流程

与现有的环件生产工艺相比，铸辗复合成形新工艺具有以下优点。

(1) 缩短了工艺流程，提高了生产效率。通过金属冶炼、浇注凝固制造环形铸坯，由环形铸坯直接辗扩成形，省去了原工艺中钢厂开坯制造圆坯或方坯、锯床下料、锻造镦粗、冲孔等工艺，大大缩短了工艺流程，提高了生产效率。

(2) 节约能源，减少排放。减少了开坯、锻造工艺的两次加热，减少了开坯、锻造、冲孔和下料工艺的动力消耗。仅从冶炼和加热工序方面，新工艺比现有工艺节约能源消耗和减少排放约 60% 以上，符合国家工业生产节能、减排的要求。

(3) 节约材料，降低成本。省去了冲孔工艺，减少了材料损耗。以直径为 1.2 m 的轴承套圈成形工艺为例，可节约材料 25%~30%，同时由于减少了两次加热和锻造工艺所造成的氧化皮损失，可节约材料 3%~4%。此外机加工等废料经重熔冶炼可以用于制造环坯，可进一步降低成本。

(4) 节省设备投资。省去了开坯、锻造、冲孔和下料工艺，节省了大型锻造液压机、下料锯床、开坯用锻压设备或轧钢设备，大大节约了投资和动力消耗。

然而这种轴承环件短流程铸辗复合成形新工艺是一项全新的理论与工艺，国内外尚无这方面的研究，面临诸多技术挑战和关键科学问题需要解决。例如研究和确定 42CrMo 钢环坯的铸造工艺，控制和消除铸造缺陷，为后续的辗扩工艺提供高质量的环形铸坯；研究铸态 42CrMo 钢的热塑性变形行为和各种变形工艺参数对材料组织演变的影响规律等。其中研究环坯冶炼铸造工艺和凝固过程，获得高质量的环形铸坯，是保证环件成形质量的关键。

2 冶炼、铸造工艺设计

轴承环件要有高的硬度和耐磨性、高的抗压强度和疲劳接触强度，还需要有良好的韧性、良好的尺寸稳定性和工艺特性。而 42CrMo 钢是轴承套圈常用材料，因此本项目以 42CrMo 钢为研究对象。试验研究的轴承环件即轴承内外套圈辗扩件的尺寸如下：外圈尺寸为 $\phi 1\ 356\ \text{mm} \times \phi 1\ 189.5\ \text{mm} \times 231\ \text{mm}$ ；内圈尺寸为 $\phi 1\ 248\ \text{mm} \times \phi 1\ 045\ \text{mm} \times 225.5$

mm。根据选用的辗扩比设计的环形铸坯尺寸如下：外圈尺寸为 $\phi 837.5\ \text{mm} \times \phi 500\ \text{mm} \times 242\ \text{mm}$ ；内圈尺寸为 $\phi 858\ \text{mm} \times \phi 500\ \text{mm} \times 234\ \text{mm}$ 。

环坯的铸造工艺和凝固过程直接关系到铸坯质量，而高质量的环形铸坯又是环件辗扩成形质量和性能的前提和保障，因此确定合理的铸造工艺、控制铸造凝固过程是轴承环件生产的关键。

影响铸坯质量的因素很多，包括冶炼过程、浇注工艺、凝固过程、添加剂和涂料的选用等。适当提高浇注温度、加快冷却速度都有利于改善铸件的组织，细化晶粒。对于本项目研究的 42CrMo 钢轴承环件，通过对各种冶炼、浇注工艺设计和各种工艺参数的计算，并结合企业的生产实际，经过对比、分析，确定了如下的铸造工艺方案。

采用碱性电弧炉氧化法冶炼，冶炼温度为 $1\ 680 \sim 1\ 700\ ^\circ\text{C}$ 。按比例添加各种合金元素。为促进钢液中脱氧产物和出钢时混入钢液的炉渣、耐火材料等的上浮排除，适量调节浇注温度，钢液浇注前镇静时间约 10 min。

为保障铸件的表面质量，在铸型工作表面使用涂料。本项目造型材料选用水玻璃砂，因此使用水玻璃砂醇基涂料，这种涂料非常适合于 42CrMo 环件铸造的水玻璃砂造型。耐火材料为锆英粉，黏结剂选用酚醛树脂，质量分数控制在 2%~4%；悬浮剂采用有机膨润土，质量分数为 1.5%；添加质量分数为 0.1%~1.0% 的二氧化钛作为助剂。

根据 42CrMo 钢冶炼、凝固特性和环形铸坯的尺寸要求，在设计铸造工艺时要保证充型快而平稳，有利于铸件顺序凝固和冒口的补缩。通过计算铸造工艺参数，确定了包孔直径、浇注时间、液面上升速度和冒口尺寸等参数和铸造工艺，即砂模造型和外加冷铁的底注式浇注系统。浇注温度为 $1\ 550 \sim 1\ 560\ ^\circ\text{C}$ ，浇注速度为 $65 \sim 70\ \text{kg/s}$ ，浇注时间约 15 s。整个铸件带砂型保温 22 h，以消除残余应力。

3 铸造工艺数值模拟

为了进一步分析铸造工艺和凝固过程，研究铸造凝固过程各种物理量如流场、温度场、应力场等的变化规律，作者用 ProCAST 软件对 42CrMo 钢轴承环坯铸造工艺和凝固过程进行了数值模拟^[10]。图 3 是隐去了砂箱部分的三维铸造工艺造型。

以 42CrMo 钢轴承外圈铸坯为例，利用 ProCAST 软件进行网格划分，节点和网格单元总数分别为 259 903 和 1 437 712。输入相应的工艺参数，可以模拟出浇注充型的动态过程、充型过程的速度-时间曲线、凝固过程的温度场变化以及铸件凝固后

缩孔、缩松分布情况等。图 4 是环坯铸件的缩孔、缩松分布的模拟结果,可见缩孔、缩松出现在冒口部分。

图 3 隐去砂箱的铸造工艺造型

图 4 缩孔、缩松分布切面图

通过对数值模拟结果进行分析可以看出以下几点。

(1) 在浇注过程中,浇道口和铸件填充用时很短,而冒口部分填充用时较长。说明冒口填充时,金属流动阻力加大,上端金属液的重力加大了浇道口所受的负荷。由 ProCAST 软件计算所得填充速度-时间坐标图也显示了同样的结果。

(2) 在铸件的凝固过程中,铸件是由外而内、自下而上顺序凝固。而冷铁的使用大大提高了冷却速度。由于是自下而上的凝固,未凝固部分始终靠近冒口,因此冒口部分的钢液可以起到凝固过程补缩的作用。

(3) 通过仿真得到的凝固过程结束后的缩孔、缩松分布情况的切面图可以看出,由于采用冷铁等措施,铸件实现了自下而上顺序凝固;由于冒口的补缩作用,铸件内部没有出现缩孔、缩松,而缩孔、缩松只出现在冒口内。这也是设计时所希望的。

通过数值模拟和分析,说明了该铸造工艺具有先进性和可行性,可以消除 42CrMo 钢轴承套圈环坯的铸造缺陷,保障环坯的铸造质量。

4 环坯铸造试验与性能测试

通过冶炼、浇注工艺分析、环坯铸造及凝固过程数值模拟,得到了理想的冶炼、浇注工艺参数。针对 42CrMo 轴承环件铸辗复合成形工艺技术要求,为减少环坯铸造过程中缩孔、缩松、偏析等缺陷和尽可能使晶粒细化,结合企业生产实际,在洛阳 LYC 轴承有限公司采用砂型铸造工艺进行了工业试验。试验件是实际轴承产品的内外套圈,具体尺寸如前所述。

型砂配方采用不同比例的石英砂、水玻璃和膨润土,按工艺要求混制和出砂造型,在 200~250 °C 温度下烘干铸型,合箱时将铸型中的余砂全部处理干净。

采用碱性电弧炉氧化法进行冶炼,冶炼温度为 1 680~1 700 °C,采用热电偶接触测量法测量温度,冶炼时间为 3.5~4.0 h,按照成分要求添加合金元素,并完成炉前快速分析化学成分。

冶炼的钢液在浇注前镇静时间不低于 3 min,浇注温度为 1 550~1 560 °C,浇注速度为 65~70 kg/s,浇注时间约为 15 min。

按上述工艺要求制造出环形铸件,并进行了正火回火和调质热处理。为了检验试验铸件的力学性能,对试件进行了各种组织和性能检测试验。检验标准使用 JB/T5000.6-2007《重型机械通用技术条件(铸钢件)》和 GB1979-2001《结构钢低倍组织缺陷评级图》等标准。

对上述工艺生产的 8 个铸件按 JB/5000.14 II 级技术要求进行超声波探伤,其中 6 件无缺陷,只有两件有轻微疏松和点状波形,但符合标准要求,经过后续的辗扩成形可以消除缺陷。

化学成分检验结果如表 1 所示,可见化学成分符合标准值。

表 1 化学成分检验结果(质量分数) %

元素	C	Si	Mn	S
标准值	0.38~0.45	0.30~0.60	0.60~1.00	≤0.035
检验值	0.39	0.33	0.86	0.011
元素	P	Cr	Ni	Mo
标准值	≤0.035	0.80~1.20	≤0.03	0.20~0.30
检验值	0.023	1.19	—	—

按检验标准在铸件的不同部位进行取样,分别进行了力学性能测试和组织金相分析,力学性能测试结果如表 2 所示。铸件的低倍照片如图 5 所示,铸件经正火回火和调质处理后的金相组织如图 6 所示,铸件正火回火组织主要为片状珠光体+托氏体+少量铁素体(图 6a),调质后组织则为索氏体+托氏体+少量片状珠光体(图 6b)。

表 2 力学性能检验结果

热处理状态	试件编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率(%)	断面收缩率(%)	室温冲击吸收功平均值/J	硬度 HBW
正火	11	690	385	4.5	5.5	6.16	229
	12	745	350	6.5	7.5	5.58	222
	13	665	315	10.0	6.0	10.8	200
回火	21	1020	875	9.5	13	23.2	298
	22	1040	930	9.5	19	36.8	337
	23	970	830	6.5	9	27.8	298

图 5 铸件的低倍组织

(a) 铸件正火回火金相组织

(b) 铸件调质金相组织

图 6 铸件的金相组织

从上述的检测结果可以看出，铸件具有良好的组织、性能和质量，达到了铸钢件标准要求。对照 Q/LYC C(B)0014-2009《风力发电机轴承用 42CrMo 钢制环锻件订货技术条件》的要求，环形铸坯经调质处理后，抗拉强度、屈服强度、室温冲击吸收功和硬度都达到了锻件标准，而伸长率和断面收缩率两项指标通过辗扩成形工艺也会达到锻件标准的要求。

5 结论

(1) 针对目前环件生产工艺流程冗长、浪费材料和能源等问题，笔者提出和研究了环件短流程铸辗复合成形新工艺，该工艺与传统的环境生产工艺相比，缩短了生产流程、节约材料、减少加热次数、节约能源和减少排放，具有显著的经济效益和良好的发展前景。

(2) 在环件铸辗复合成形新工艺中，制造高质量的环形铸坯是保证环件成形性能和质量的关键。作者通过理论分析和数值模拟，探讨和研究了高质量环坯冶炼与铸造工艺，确定了型砂配方和冶炼铸造工艺参数，提出提高冶炼温度、降低浇注温度和控制浇注速度，以及加入冷铁等措施可以有效控制铸件凝固过程、实现晶粒细化和消除铸造缺陷，保证铸件质量。

(3) 根据洛阳 LYC 轴承有限公司的实际轴承套圈产品，按上述工艺进行了环坯铸造的工业试验，并对试件进行了成分、组织和力学性能检测和分析。检测和试验结果表明：环形铸坯具有精确的尺寸精度、良好的组织、性能和质量，其中部分力学性能指标达到了锻件的质量标准。

(4) 以该环形铸坯为坯料，进行了后续的辗扩成形工艺试验和性能检测，检测结果表明所成形的轴承套圈环形零件的力学性能达到了风力发电机轴承用 42CrMo 钢制环锻件技术条件的标准要求。证明该环件铸辗复合成形新工艺是可行的。

参 考 文 献

- [1] 利俊峰. 中国风电发展报告 2011[M]. 北京：中国环境科学出版社，2011.
LI Junfeng. The development report of China's wind power 2011[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011.
- [2] TSUI Y C, HOWARD S J, CLYNE T W. The effect of

- residual stresses on the debonding of coatings-II[J]. *Acta Metallurgica et Materialia*, 1994, 42(8): 2837-2844.
- [3] 刘小刚, 黄天佑, 康进武. 基于凝固过程数值模拟的水轮机下环件微裂纹成因分析[J]. *铸造*, 2009, 58(10): 1034-1037.
- LIU Xiaogang, HUANG Tianyou, KANG Jinwu. Analysis on micro cracks defect of francis turbine band casting based on solidification process simulation[J]. *Foundry*, 2009, 58(10): 1034-1037.
- [4] 杨林. 套类铸钢件凝固特性的数值模拟[J]. *机械研究与应用*, 2008, 21(5): 38-40.
- YANG Lin. Study on the solidification characteristics of sleeve steel casting[J]. *Mechanical Research & Application*, 2008, 21(5): 38-40.
- [5] 翟启杰, 赵沛. 钢的凝固细晶技术研究[C]//中国钢铁年会论文集, 成都: 中国金属学会, 2007: 20-22.
- ZHAI Qijie, ZHAO Pei. Techniques of solidification structure refining of steel[C]//CSM Annual Meeting Proceedings, Chengdu. The Chinese Society for Metals, 2007: 20-22.
- [6] IL'INA V P. Effect of the purity of the metal on the susceptibility of steel 38Kh5MSFA to brittle fracture[J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2000, 42(3): 111-114.
- [7] 符寒光, 邢建东. 离心铸造高速钢轧辊铸造缺陷形成与控制技术研究[J]. *铸造技术*, 2004, 25(11): 859-861.
- FU Hanguang, XING Jiandong. Study on defect formation and controlling of centrifugal casting high speed steel roll[J]. *Foundry Technology*, 2004, 25(11): 859-861.
- [8] 李永堂, 齐会萍, 杜诗文, 等. 一种金属环件短流程铸辗复合成型的方法: 中国, ZL201010132486.6[P]. 2010-09-01.
- LI Yongtang, QI Huiping, DU Shiwen, et al. A method of casting-rolling compound forming of metal rings: China, ZL201010132486.6[P]. 2010-09-01.
- [9] 李永堂, 齐会萍, 刘志奇, 等. 一种利用铸坯辗扩成形大型环件的方法: 中国, ZL201010132491.7[P]. 2010-09-08.
- LI Yongtang, QI Huiping, LIU Zhiqi, et al. A method of rolling forming large-scale rings use casting blank: China, ZL201010132491.7[P]. 2010-09-08.
- [10] 赵磊. 42CrMo 环件铸造凝固过程的数值模拟与实验研究[D]. 太原: 太原科技大学, 2011.
- ZHAO Lei. Numerical simulation and experimental Research of 42CrMo ring blanks during the casting solidification process[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2011.
- [11] QI Huiping, LI Yongtang. Metadynamic recrystallization of the as-cast 42CrMo steel after normalizing and tempering during hot compression[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 25(5): 853-859.
-
- 作者简介: 李永堂(通信作者), 男, 1957 年出生, 教授, 博士研究生导师, 太原科技大学副校长, 材料科学与工程学科首席学科带头人。主要研究方向为材料加工先进制造技术, 发表论文 150 余篇。
- E-mail: liyongtang@tyust.edu.cn