DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.09.010

载重125 t矿用车球墨铸铁大轮毂铸造工艺研究

秦鹏鹏,汤　森,谢文博,刘　洋,李　建
(驻马店中集华骏铸造有限公司,河南 驻马店 463000)

摘　要:所述矿用车载重量125 t,其轮毂尺寸较大、壁厚较厚,法兰直径是一般重卡的2倍,重82 kg。在实际设计开发中出现本体屈服强度偏低、热节位置出现缩松缩孔缺陷、厚大部位产生金相石墨漂浮等问题。结合轮毂特点,通过增加Cu元素提高屈服强度,下调碳当量和降低浇注温度根除石墨漂浮,采用自制易隔片缩短补缩距离,降低和消除轮毂内部缩松缺陷倾向,对工艺进行了优化。结果表明,工艺优化后最终实现了轮毂的批量生产。该轮毂与普通商用车轮毂铸造工艺差别较大,需要在材质、工艺参数方面进行优化调整;提高冒口的补缩效率是改善轮毂内部质量关键;合理的补缩工艺不仅能够提高产品质量,还能提高工艺出品率、降低生产成本。

关键词:矿用车轮毂;铸造缺陷;铸造工艺

中图分类号:TG255　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)09-0784-05

Research on Casting Technology of Ductile Iron Large Wheel Hub for 125 Tons Mining Trucks

QIN Pengpeng, TANG Sen, XIE Wenbo, LIU Yang, LI Jian
(Zhumadian CIMC Huajun Foundry Co., Ltd., Zhumadian 463000, China)

Abstract: The load weight of the mining truck is 125 tons, its wheel hub size is larger, the wall thickness of wheel hub is thicker, the flange diameter is 2 times of the general heavy truck, the weight is 82 kg. In the actual design and development, there are some problems such as low yield strength of the wheel hub, shrinkage porosity and cavity defects in the hot spot, and floating of metallographic graphite in the thick part. Combined with the characteristics of the wheel hub, the process was optimized by increasing the yield strength by adding Cu element, reducing the carbon equivalent and the pouring temperature to eliminate the graphite floating, and reducing the feeding distance by using self-made easy inserts to reduce and eliminate the defect tendency of shrinkage cavity inside the wheel hub. The results show that the batch production of wheel hub is finally realized after the process optimization. The casting process of the wheel hub differs greatly from that of ordinary commercial vehicles, so the material and process parameters need to be optimized and adjusted. Improving the feeding efficiency of riser is the key to improve the internal quality of the wheel. Reasonable feeding process can not only improve the product quality, but also improve the production rate and reduce the production cost.

Key words: mining vehicle wheel hub; casting defects; foundry technology

目前国内大吨位矿用车市场逐步拉开序幕,对矿用车自主研发、创新尤为关键。轮毂是载重汽车行走底盘系统关键零部件,内部安装轴承,外部连接制动鼓(盘),中心连接半轴;轮毂的质量直接影响行车安全,属于安保件,对材质、内外部质量要求较高。我公司专业从事汽车轮毂、制动鼓、制动盘、差壳等轮端产品的铸造、加工,但开发过的大型轮毂非常少,批量生产的更少,可借鉴的工艺不多。该产品作为国内著名主机厂的新研发车型,该产品的成功研发并批量生产为拓宽公司业务、提高公司知名度和品牌起着重要作用。

通过对大型矿用车轮毂铸造工艺的研究能发现和了解生产制造过程中常见的铸造缺陷和问题,采取适当的改善措施有效预防、减少大轮毂生产过程的问题,可提高产品质量、降低生产成本。

1　试验设备及检测方法

1.1　熔炼设备、铁液成分检测

利用6 t中频电炉熔炼;铁液成分使用日本岛津PDA 5000直读光谱仪进行检测。

1.2　造型设备、砂箱尺寸

利用德国进口KW静压造型线湿砂造型;砂箱尺寸:长×宽×高=1 100 mm×900 mm×300 mm

收稿日期:2021-05-06

作者简介:秦鹏鹏(1986—),河南周口人,学士,工程师,技术主任.主要从事铸铁铸造工艺方面的工作.
电话:15290152721,Email:qinpeng0394@163.com

（上下箱都是 300 mm）。

1.3 铁液处理、浇注设备

采用恒利来喂丝球化站处理铁液，倒包后采用 1.5 t 浇包，半自动浇注机浇注。

1.4 探伤检测

采用 XYD-450XX 射线实时成像检测系统检测，检测方法参考 ASTM-E466。

1.5 金相检测

采用奥林巴斯 GX51 型金相显微镜观察金相组织，金相制样的制取和检测参考 GB/T《金属显微组织检测方法》和 GB/T9441《球墨铸铁金相》。

1.6 硬度检测

利用 TH600 型布氏硬度计检测硬度，检测方法参考 GB/T231.1《金属材料布氏硬度试验》。

1.7 性能检测

利用 WAW-300 型微机控制电液伺服万能试验机测试拉伸力学性能，检查方法参考 GB/T228《金属材料室温拉伸试验方法》和 GB/T1348《球墨铸铁件》。

2 轮毂的材质选择

2.1 轮毂结构说明

图 1 是一种矿用车大轮毂铸件三维示意图。该大轮毂毛坯最大直径 ϕ481 mm，油包直径 ϕ286 mm，轴承孔直径 265 mm；总高 264 mm，法兰厚度 30 mm，筒体壁厚 35 mm；毛坯重 82 kg，成品重 66 kg。

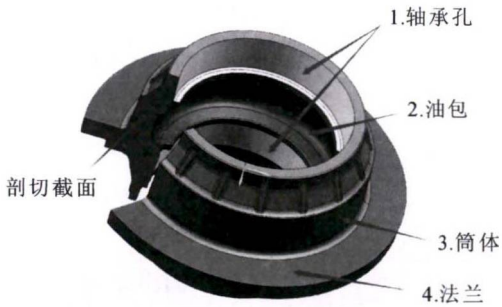

图 1 载重 125 t 矿用车大轮毂铸件三维示意图
Fig.1 3D schematic diagram of the large wheel hub casting

2.2 轮毂本体要求

球墨铸铁是通过球化和孕育处理得到球状石墨，有效地提高了铸铁的力学性能，特别是提高了塑性和韧性。珠光体型球墨铸铁具有中高等强度、中等韧性和塑性、综合性能较高、耐磨性和减振性良好、铸造工艺性能良好等特点，广泛应用于重型车和矿用车的轮毂[1]。

根据该载重 125 t 矿用车大轮毂的使用工况，选用高强度球墨铸铁材质，轮毂本体力学性能和金相组织设计要求见表 1。

表1 轮毂本体力学性能和金相组织设计要求
Tab.1 Design requirements for mechanical properties and metallographic structure of hub body

指标名称	指标要求
抗拉强度 / MPa	500
屈服强度 / MPa	335
延伸率（%）	7
布氏硬度（HBW）	170~220
石墨	石墨均匀分布，球化率 80%以上，石墨大小 5~8 级
基体组织	珠光体 50%~70%，碳化物≤3%，不允许存在莱氏体组织和网状渗碳体

2.3 成分设计

化学成分选取靠近共晶点附近的高碳当量，可以减少铸件的缩松、缩孔的产生，同时提高铁液的流动性，提高铸造性能[2]。碳含量控制在 3.5%～3.7%；硅含量炉前控制到 1.3%～1.6%，出炉过程中包内加入一定量的 75 硅铁，炉后硅含量控制到 2.2%～2.6%。由于该材质要求珠光体含量较高且范围较窄，伸长率要求 7%，如何既保证高珠光体的含量又保证伸长率合格是关键。为了提高珠光体的含量，采用包内加锡的方法。Sn 是重要的微量元素之一，能强烈促进珠光体形成；当 Sn 含量 $w(\%)<0.1$ 时能强烈促进珠光体的形成，因为 Sn 在共晶凝固过程中富集在与石墨片相邻的奥氏体中；共析转变时，阻碍奥氏体中的碳向石墨片扩散，从而使珠光体数量增加。Sn 在金属基体中的溶解度有限，加入量不可过多，否则铸铁容易脆化，冲击韧度也会下降，同时会增加成本；本次 Sn 设计加入量控制到 0.030%~0.045%。

根据铸件结构特点以及性能和金相要求，设计的大轮毂的原铁液化学成分见表 2。

2.4 成分优化

根据原铁液化学成分生产试验时轮毂强度、硬度、珠光体含量都达到要求，但是屈服强度偏低（328～340 MPa），达不到要求的性能指标。Cu 是一种稳定并细化珠光体的合金元素，可以增加和稳定基体中的珠光体组织，改善球墨铸铁的力学性能；同时 Cu 的加入可以有效提高球墨铸铁的耐磨性、耐腐蚀性，也可以提高铁液的流动性，显著改善铸造性

表 2 载重 125 t 矿用车大轮毂原铁液化学成分 w(%)
Tab.2 Base iron chemical composition of large wheel hub of 125 t mining trucks

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Sn	Mg	Al	Fe
3.50~3.70	2.20~2.60	0.40~0.80	≤0.04	≤0.02	≤0.10	≤0.08	0.030~0.045	0.04~0.06	0~0.02	余量

能[3]。加入 0.2%~0.4%的 Cu 后，屈服强度明显提高，达到 360～380 MPa。湿砂造型厚大轮毂的冷却速度较慢，加入一定量的铜合金，可稳定珠光体含量、细化晶粒；同时要保证硅元素的比例，2.2%～2.6%的硅可以对铁素体形成固溶强化，提高屈服强度[4]。

样件加工后法兰表面出现圆形深色斑点，见图 2 所示，初步判定为石墨漂浮，经取样金相分析确定为石墨漂浮。石墨漂浮是球墨铸铁特有的缺陷，对球铁的力学性能不利[5]。经查看铸件流水号，对应为铸件浇注前期产品。分析原因一是铸件厚大，二是前期浇注温度偏高，三是碳当量偏高。对应改善措施一是浇注温度由 1 380～1 400 ℃降低至 1 360～1 380 ℃，二是碳含量 w(%)由 3.5～3.7 降低至 3.4～3.6。

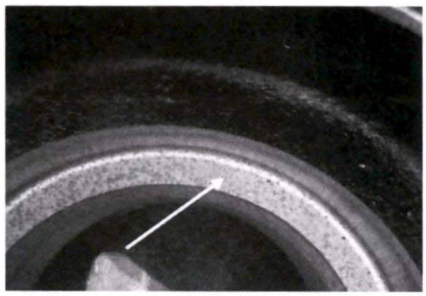

图 2 轮毂轴承台加工面石墨漂浮形态
Fig.2 Graphite floating on machining surface of hub bearing platform

根据前期生产试验的检测情况对化学成分进行优化调整，调整后大轮毂的化学成分见表 3。

3 轮毂的铸造工艺分析

3.1 原铸造工艺

该产品采用 KW 静压造型生产线，湿砂造型工艺。砂箱尺寸：长×宽×高 =1 100 mm×900 mm×300 mm；型板尺寸：长×宽×高 =1 040 mm×840 mm×40 mm。根据轮毂尺寸、结构采用一型 2 件，沿型板角向布局；从轮毂法兰面、沿轮毂轴线上下分型。上砂箱和下砂箱高度均为 300 mm，上箱铸件高度 135 mm，下箱铸件高度 131 mm。直浇道最小截面 ϕ50 mm，横浇道截面尺寸:高×宽 =30 mm×25 mm。每个铸件 2 个内浇道，为便于去除，内浇道设计厚度不大于 6 mm，并设计断裂槽；内浇道截面尺寸：宽×高 =80 mm×6 mm。浇注系统选用半闭合半开放式结构，浇道截面比例为 $S_{直}:S_{横}:S_{内}$ =1.3:1.0:1.3。

铁液熔炼处理采用 6 t 中频电炉熔炼，出炉温度 1 470～1 510 ℃。选用 1.5 t 球化包出炉后喂丝球化处理；球化处理完成后，铁液倒入 1.5 t 浇注包。为了便于加入包内的锡快速熔化吸收，提前将含量 99.5%的锡锭加工成厚度 1～2 mm 的锡片。浇注温度 1 380～1 400 ℃，单箱浇注重量 230 kg，单箱浇注时间 23 s。浇注过程中用螺旋给料器进行随流孕育处理。每包铁液浇注 6 箱，剩余铁液回炉处理。为保证铁液球化孕育效果，防止球化孕育衰退，球化处理完成至浇注结束的时长控制在≤8 min。

轮毂类球墨铸铁件是汽车底盘的重要安保零件，此类零件壁厚不均匀、热节分散、冷却速度快，存在严重的缩孔、缩松倾向[6-7]。这款产品由于铸件厚大，法兰直径大，缩松、缩孔倾向更加严重。铸件补缩工艺采用两个 ϕ100 mm 压边冒口+单个 ϕ140 mm 边冒口双补缩工艺，冒口颈模数取铸件模数的 0.70~0.85 倍。

原模板工艺布局及浇冒系统示意图分别见图 3 和图 4，砂芯设计简图见图 5。

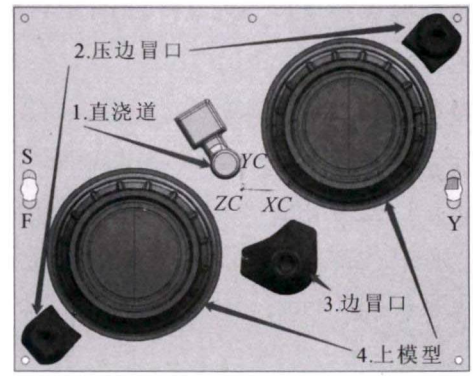

图 3 原上模板模样及浇冒口布局图
Fig.3 Initial pattern layout, gating and risering system on the top plate

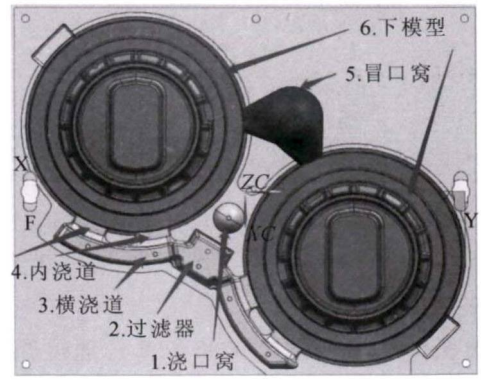

图 4 原下模板模样及浇冒口布局图
Fig.4 Initial pattern layout, gating and risering system on the bottom plate

该轮毂由于油包内凹无法采用自带砂芯工艺，

表 3 载重 125 吨矿用车大轮毂调整后的化学成分 w(%)
Tab.3 Chemical composition of large wheel hub of 125 ton mining vehicle after adjustment

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Sn	Mg	Al	Fe
3.40~3.60	2.20~2.60	0.40~0.80	≤0.04	≤0.02	0.20~0.40	≤0.08	0.030~0.045	0.04~0.06	0~0.02	余量

图 5 轮毂砂芯设计简图
Fig.5 Schematic design of wheel hub sand core

小轮毂内孔直径小自带芯不易起型，容易断型而影响砂型质量和生产效率，一般整体采用热法覆膜砂芯成型。因为该轮毂内孔较大，如全部采用覆膜砂成型，砂芯较重、生产成本较高；并且该轮毂的内孔尺寸高度小、直径大，起型方便，所以砂芯设计时采用上下均局部自带，不能自带的油包部位采用热法覆膜砂芯成型，这样既能保证内孔成型质量，又减少覆膜砂芯重量、节约生产成本。

3.2 生产过程遇到的问题及改善措施

(1)铸件热节处的缩松、缩孔　在前期生产试验过程中，按照上述工艺有效控制，铸件清理、抛丸后进行 X 射线探伤检测和剖切检测，验证轮毂内部质量情况。我司的 X 射线探伤机最大探测厚度为 40 mm，铸件厚大部位无法探测；对于无法探测部位，采用纵、横剖切，重点检查铸件热节位置。剖切后发现铸件在热节位置存在明显的缩松、缩孔缺陷，且缺陷比例较大；热节和厚大部位热容量大，凝固晚，由于得不到足够的铁液补充而形成缩孔、缩松[8]。虽然前期采用了边冒口＋压边冒口的双补缩工艺，但是由于冒口离铸件热节位置较远，冒口补缩距离有限，不能有效对铸件进行补缩。

后期对冒口颈大小、冒口大小、浇注温度、碳当量等进行了一系列调整，铸件的缩松、缩孔缺陷均没有明显改善。最后判定补缩工艺不合适，决定对补缩工艺进行优化改善。

经过我司技术人员的共同研究、商议，采用缩短冒口补缩距离的方案。具体为增加一个自制冒口窝易割片，放到轮毂法兰上面，将冒口颈正对铸件热节位置；该方案可将冒口颈与铸件热节的距离由 85 mm 减小到 20 mm，冒口中心与热节中心的距离由 188 mm 减小到 93 mm，显著改善冒口的补缩效率。在热节处设置冒口可以实现顺序补缩，有利于彻底消除铸件的缩松、缩孔缺陷。合理选择浇冒系统的形式是消除球铁轮毂铸件缩松、缩孔缺陷的关键[9]。由于加冒口窝易割片后冒口补缩效率提升，因而可以去除压边冒口。采用单冒口补缩，提高了工艺出品率。经测算该工艺单箱浇注重量 215 kg，每箱减少 15 kg 铁液，工艺出品率提高 5%。

图 6 和图 7 所示是加冒口窝易割片后的补缩工艺简图。

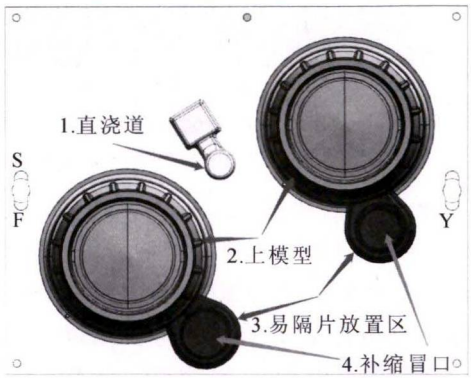

图 6 改善后的上模板浇冒系统
Fig.6 Improved gating and risering system on the top plate

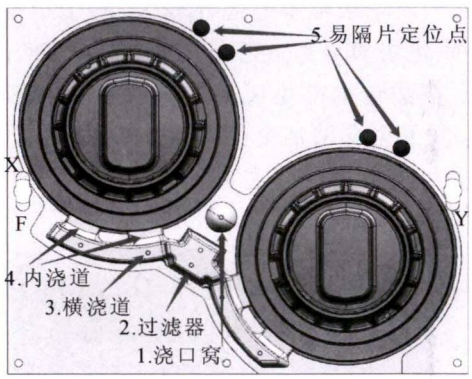

图 7 改善后的下模板浇冒系统
Fig.7 Improved gating and risering system on the bottom plate

原工艺生产的铸件按照剖切面 1 剖切验证（图 8）发现，内部缩松、缩孔严重(4-5 级)，实物缩松情况见图 9。工艺改善后，沿原位置按照剖切面 1 剖切未发现无缩松、缩孔，继续按照剖切面 2 剖切验证圆周方向的内部质量，剖面 2 也未发现明显缩松、缩孔缺陷。小批量、批量生产加工验证，结果表明该工艺补缩效果稳定，具备批量生产条件，样件在客户处台架试验及装机试验效果完全达到预期。

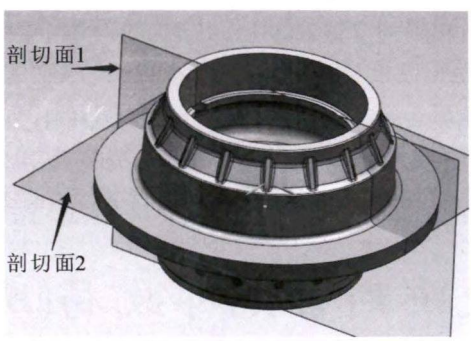

图 8 轮毂剖切面示意图
Fig.8 Schematic section planes of the wheel hub casting

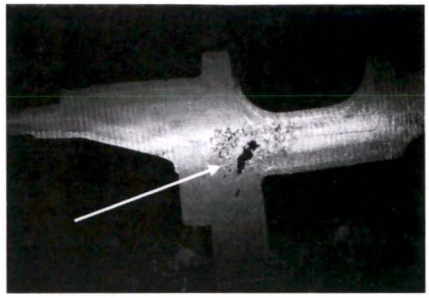

图 9 改善前轮毂内部质量(剖切面 1)
Fig.9 Shrinkage on section plane 1 before gating and riser system improvements

(2)铸件覆膜砂芯成型部位的脉纹、飞边　轮毂内腔油包虽然是毛坯面，但油包是全密封的，油包内清洁度要求较高。如果使用过程中有飞边、毛刺脱落会影响行车安全，且轮毂油包内凹不易打磨；因此预防油包内产生飞边、毛刺、脉纹等缺陷非常关键。

由于该轮毂覆膜砂芯比较大，芯子结构设计不合理、固化层薄易造成芯子内跑火，导致产品报废；也容易在油包内部生成横向脉纹、飞边，影响产品外观质量和油包清洁度(图 10)。所以在设计覆膜砂芯结构和制定覆膜砂芯制作工艺时需要注意以下几个方面。

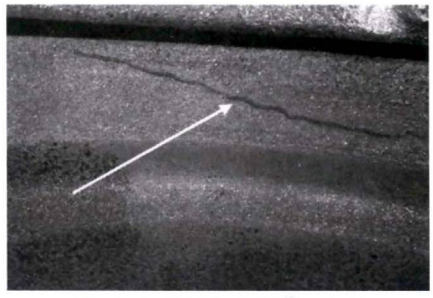

图 10 轮毂油包内脉纹、毛刺
Fig.10 Veining and burring defects on the inside of wheel hub casting

(1)覆膜砂芯固化层厚度由原来的≥7 mm增加到≥9 mm，保障有效固化层厚度，加强芯子的强度。

(2)覆膜砂芯固化参数设定由原来的 250～280 ℃调整为 230～260 ℃，固化时间由 30 s 调整为 40 s；固化温度太高容易固化不均匀，温度太低影响制芯效率。

(3)设计芯子时要设计防跑火槽，防止芯子内部跑火；砂芯设计时充分考虑砂芯减重、有效厚度，同时砂芯厚度要均匀，防止局部尺寸过薄或过厚，影响芯子的固化和强度。

(4)选用合适粒度的覆膜砂，70/140 目为宜；选用耐火度高的覆膜砂原料，同时在制芯完成后喷涂耐火涂料，加强芯子耐火度[10]。

(5)在保证产品质量的前提下，适当降低浇注温度。

4 结论

(1)湿砂造型厚大轮毂的冷却速度较慢，加入一定量的铜合金，可以稳定珠光体含量、细化晶粒，从而提高屈服强度。

(2)由于矿用车大轮毂法兰盘直径较大，边冒口和压边冒口补缩距离有限，不能对热节部位进行有效补缩；采用带冒口窝易割片的补缩工艺，可以有效缩短冒口、冒口颈与铸件热节的距离，提高了冒口补缩效率，既能改善缩松、缩孔缺陷，还能提高工艺出品率、降低生产成本。

(3)轮毂内腔油包位置基本都是靠热法覆膜砂芯成型，覆膜砂质量、制芯参数、砂芯结构设计等因素对产品质量都有影响。要合理设计作业参数，调整固化层厚度≥9 mm，同时在砂芯表面喷涂耐火涂料有利于提高产品表面质量。

参考文献：

[1] 范金辉，华勤. 铸造工程基础[M]. 北京：北京大学出版社，2009.
[2] 王智平. 造成球铁件缩孔缩松缺陷因素的研究 [J]. 铸造技术，2002 (5)：298-300.
[3] 孙少纯. 高碳当量高强度低铬铜合金灰铸铁的试验研究 [J]. 铸造设备研究，2000 (4)：25-28.
[4] 陈思夫. 铜和硅对铸态球墨铸铁力学性能得的影响规律 [J]. 铸造技术，2006 (4)：344-346.
[5] 王丽萍. 石墨漂浮对球铁机械性能的影响 [J]. 哈尔滨理工大学学报，2001，6(5)：99-103.
[6] 陆文华. 铸铁及其熔炼[M].北京：机械工业出版社，1986:63-68.
[7] 魏兵，袁森，张卫华. 铸件均衡凝固技术及应用[M]. 北京：机械工业出版社，1998.
[8] 王留新. 大型球铁管件缩孔和缩松的防治 [J]. 铸造技术，2001 (6)：19-20.
[9] 吴和保. 轮毂类球铁铸件缩孔缩松缺陷的形成机理及防治措施 [J]. 中国铸造装备与技术，2003(5)：14-16.
[10] 秦鹏鹏. 商用车制动盘铸造工艺研究 [J]. 铸造技术，2019(9)：934-937.

欢迎到当地邮政局(所)订阅 2022 年《铸造技术》杂志
国内邮发代号：52-64　国外发行号：M855　国内定价：25 元/本　海外定价：25 美元/本