

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2019.07.016

# 高韧球墨铸铁离合器飞轮铸造工艺设计与实践

任现伟

(洛阳古城机械有限公司, 河南 洛阳 471023)

**摘要:**研究了在原本一模一铸件的前提下,在不改变造型设备的基础上,采用隔板芯一模两件,设计了满足要求的铸造工艺。结果表明,通过模拟分析和实践验证,生产的铸件符合指定标准要求。

**关键词:**离合器飞轮;工艺设计;铸造

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2019)07-0696-06

## Design and Practice of Clutch Flywheel Casting Process for High Toughness Ductile Iron

REN Xianwei

(Luoyang Gucheng Machinery Co., Ltd., Luoyang 471023, China)

**Abstract:** On the premise of original one mold one casting and without changing the molding equipment, one mold and two pieces of separator core were adopted. The casting process that meets the requirements was designed. The results show that the castings meet the specified requirements through simulation analysis and practice verification.

**Key words:** clutch flywheel; process design; casting

离合器飞轮是汽车传动机构的主要部件之一,承担着发动机与传动系之间正常切断与动力传递的功能。本文研究的离合器飞轮铸件,是某款高档轿车传动系统中的具有适当转动惯量、释放和起贮存动能作用的回转体转动部件,有着非常高的质量要求。因此,在工艺设计和生产过程中存在着较大的难度。

## 1 主要技术要求

(1)球化率 $>85\%$ ,石墨大小:5~7级,不允许有片状石墨,渗碳体和碳化物 $<1\%$ 。

(2)抗拉强度 $\geq 500\text{ MPa}$ ,屈服强度 $\geq 320\text{ MPa}$ ,伸长率 $\geq 12\%$ ,硬度170~230 HB。

(3)需经热处理,保证机械加工后的铸件不发生任何应力变形导致的铸件垂直度、平面度和相关尺寸超差;同时提高铸件伸长率、消除渗碳体和碳化物。

(4)表面不允许有影响机械加工和装配的砂、渣孔等缺陷。

(5)无裂纹、无缩松。

## 2 铸造工艺

### 2.1 铸造工艺设计

#### 2.1.1 铸造工艺设计

本文所设计的铸造工艺过程从砂处理、熔炼等到最终的成品包装入库、交付,共设计了18道加工工序,具体的铸造过程流程图见图1。

采用DISA231垂直无箱造型机造型,型板尺寸为 $650\text{ mm}\times 535\text{ mm}$ 。每模设计为2件,1件位于模具的正压板,另一件位于模具的反压板,两个铸件之间共用一个隔板芯,隔板芯中间放置3段离铸件表面4 mm的成型冷铁,两个铸件共用一个过热冒口。生产过程中主要采用中频感应电炉熔炼,底注式浇注机浇注,台车型热处理炉等设备。

#### 2.1.2 创新的技术

初始设计的铸造工艺见图2所示。由于受到DISA231造型机造型仓室尺寸的限制,它的缺点是每模只能放置一个铸件。同时,由于铸件各部位的壁厚差异较大,特别是外圆和盘面连接处的拐角部位厚度仅有5 mm,(见图3铸件截面图所示)这个拐角部位因为尺寸太薄,严重制约了冒口的补缩效率,造成铸件内部缩松严重,无法得到根本解决。

重新设计新工艺是考虑到:①通过使用冷铁,利用冷铁的激冷效果解决因为补缩通道不畅导致的铸件内部缩松缺陷;实现同时充型、顺序凝固,预防缩

收稿日期:2019-03-15

作者简介:任现伟(1980-),河南洛阳人,工程师。主要从事铸造工艺和材料的研究、开发与应用方面的工作。

电话:13525453437, E-mail: lyrenxianwei@163.com

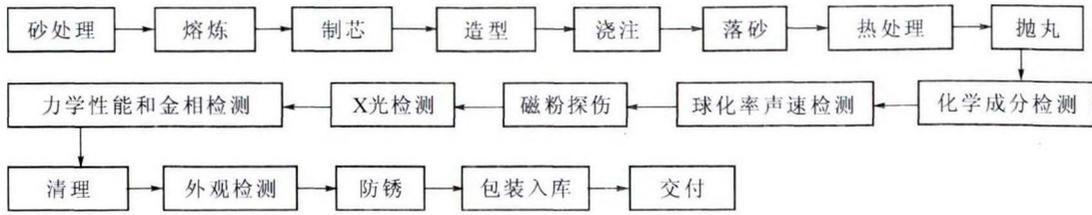
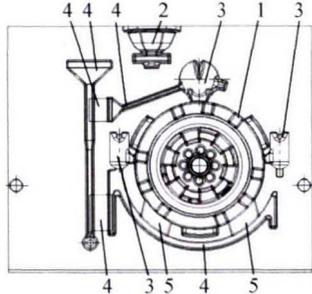


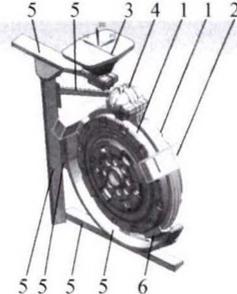
图1 铸造过程流程图  
Fig.1 Flow chart of casting process



1- 铸件;2- 浇口杯;3- 冒口;4- 浇道;5- 内浇道

图2 初始铸造工艺图

Fig.2 Initial casting process drawing



1- 铸件;2- 砂芯;3- 浇口杯;4- 冒口;5- 浇道;6- 内浇道

图4 新的铸造工艺图

Fig.4 New casting process drawing

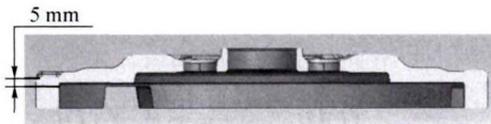


图3 飞轮铸件截面图

Fig.3 Cross-section drawing of the flywheel casting

松缺陷的产生;②为了提高单位时间内的生产效率,将之前的一模一件更改为一模两件,在提高生产效率的同时,大幅提高铁液利用率;③通过采用避渣浇注系统,辅以厚度为2 mm的内浇道,减小充型压力,改善捕渣效果,解决铸件砂、渣孔缺陷。

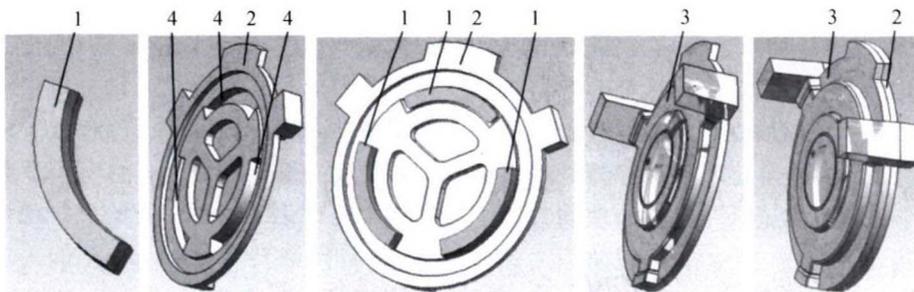
本文所述飞轮铸件的总体壁厚都较薄,热节部位较多,并且形状较为复杂,为了能够解决缩松和砂、渣孔缺陷,提高铁液利用率和生产效率,在试图改变传统惯性思维模式的前提下,重新设计了新的铸造工艺。具体如图4。新的工艺使用的砂芯,是在制芯工序采用覆膜砂热芯盒方法制成的,将经过干燥处理的冷铁,放入从热芯盒中取出并冷却至室温的砂芯下砂芯冷铁窝内,然后在组合胎具上将上砂

芯和放过冷铁的下砂芯进行组合,组合后形成一个整体砂芯。组芯过程如图5;造型过程中使用这种带有冷铁的覆膜砂砂芯;将浇注系统设计为减压浇注系统,连接过热冒口的浇道厚度设计为2 mm,同时也起到了减压和缓冲的作用。

上述新工艺的主要优点在于:①因为冷铁的合理利用,彻底解决了铸件缩松、缩孔类缺陷;②采用每模两件,产能从每小时只能生产400件提高到每小时生产800件,同时可将铁液利用率从之前的38%提高到目前的55%;③大幅度地减少了铸件因砂、渣孔导致的铸件报废率居高不下的状况,同时也有利于浇、冒口的分离;④在生产同样数量铸件的情况下,大量节约了湿型砂的使用量和生产成本。

### 2.2 计算机模拟分析铸造工艺

采用模拟分析软件,使用大型工作站计算机对设计的铸造工艺进行铸造模拟分析<sup>[1]</sup>。该方法是利用有限元分析技术对所转换为 STL 格式的三维 CAD 模型进行数值化模拟,主要是对充型过程、凝



1- 冷铁;2- 下砂芯;3- 上砂芯;4- 冷铁窝

图5 组芯工艺图

Fig.5 Core assembly process drawing

固过程和冲砂、缩松、缩孔等缺陷的过程和结果的模拟分析。在模拟软件中,定义了 DISA231 垂直无箱造型线的模板尺寸,输入浇注条件、孕育方式、落砂时间等设备参数条件后,将所有导入的 STL 文件进行网格化的剖分,剖分后的网格数量达到 980 多万。输入设计的浇注温度、浇注时间、金属液化学成分等初始条件,定义各组元之间的热物理参数、材料边界条件和换热系数等参数后,开始进行历时约为 8 h 左右的模拟分析过程。模拟结束后的温度场分布和铸件缩孔缩松状况见图 6 和图 7。



图 6 温度场  
Fig.6 Temperature field



图 7 缩孔缩松分布  
Fig.7 Shrinkage and porosity distribution

### 3 熔炼工艺

#### 3.1 熔炼工艺设计

为了满足相关的力学性能要求,因此必须设计合适的合金化学成分,参照以往类似产品的生产经验,将处理前 Si 含量控制在 1.70%~1.90%,一次孕育剂加入 0.30%,二次孕育剂加入 0.30%,瞬时随流孕育加入 0.20%。通过适量加入合金化元素,使得化学成分的配置更趋合理,使铸件达到热处理前所需的铸态工艺要求。由于该材质在满足力学性能的同时,客户还要求必须要经过热处理来消除铸件的残余应力,因此铸件必须在铸态下、在热处理前其力学性能就要超过指定牌号的 20%左右,以防因为热处理降低或削弱铸件的抗拉强度和屈服强度。为了提高球化率,选用高 Mg 低 RE 喂丝球化线,必须严格控制球化前金属液中的 S 含量不大于 0.025%。严

格控制喂丝球化线的加入时机和加入位置,加入量必须严格控制在 0.65%,由于铸件热节部位厚大,预防残留 Mg 超标引起的铸件内部缩孔类缺陷的产生,还必须严格控制球化反应温度、反应时间和浇注时间,球化温度控制在 1 460~1 470 °C,反应时间在 45~60 s,浇注温度控制在 1 415~1 365 °C。球化过程中尽量盖严包盖,减少富含 Mg 元素的金属液在球化反应过程中溅出包外,保证残余 Mg 含量控制在 0.030%~0.045%。此外,还必须注意确保每包的出炉温度、出炉量和金属液周转时间的一致性。

由于客户对铸件伸长率的要求偏高,必须在熔炼过程中加入合适的、适量的合金元素方能全面在保证铸件强度的同时,大幅地提高铸件的伸长率。由于 Cr 和 C 结合后生成碳化物,所以它们的含量越高,在稳定强度的同时,可大幅度地削弱铸件的韧性,因此必须尽量地压低 Cr 含量或根据实际的金属液计算和选取合适的 C、Cr 比,如果 C、Cr 比选取合适,可以在保证强度的同时,不削弱铸件的韧性。由于 S 和 Mn 结合后易合成硫化锰,导致铸件皮下气孔缺陷的产生,该缺陷往往在机械加工后暴露出来,有时也会在铸件皮下发现含有少量硫化锰熔渣形成的铸件内部渣孔,因此必须严格控制 Mn、S 比。

#### 3.2 熔炼工艺过程

采用碱性炉衬的中频感应电炉熔炼。废钢全部采用无油污、无锈迹的低 Mn、低 Cr,冲压钢板边角料。为了预防在熔炼过程中 Mn 含量超标导致的调质困难问题的发生必须使用低 Mn 废钢,一般废钢块度不超过 250 mm。使用牌号为 Q10 的生铁。采用 QT500-7 的浇注系统和废品铸件作为回炉料,回炉料需在抛丸机中经完全抛丸处理,未经抛丸的回炉料也可在落砂滚筒中,采用相互碰撞的方式去除表面粘砂。使用吸收率高、低 S 的石墨增碳剂。配料比例为:50%废钢+45%回炉料+5%生铁+增碳剂,增碳剂随炉料一起加入电炉,以确保彻底溶解和充分吸收<sup>[3]</sup>。

当熔炼温度达到取样温度时,取样检测原铁液的化学成分,C 含量以碳硅热分析仪检测结果为准,其他化学成分采用直读光谱分析仪检测。化学成分合格并达到出炉温度后,开始出炉操作,出炉过程中加入粒度为 2.8~4.0 mm 的一次孕育剂。铁液运转到达指定球化工位后,开始进行球化。待球化结束后,将金属液转入浇注包,在倒入的同时,随金属液流进行二次孕育,二次孕育剂的粒度为:0.5~2.0 mm。经测温枪测量满足浇注温度后,开始对铸型进行浇注,浇注的同时,随金属液流进行瞬时孕

育,瞬时孕育剂的粒度为:0.2~0.6 mm。单箱的浇注时间控制在7~9 s,避免浇注断流、二次浇注等异常浇注情况发生,严防铁液溢入未浇注的下一箱铸型,球化完毕后整包的浇注时间控制在8 min之内。主要的熔炼过程要求如表1。出炉前金属液的化学成分控制范围如表2。喂丝球化过程控制要求如表3。

表1 熔炼过程参数  
Tab.1 Melting process parameters

取样温度 /℃	静置温度 /℃	静置时间 /min	出炉温度 /℃	出铁量 /kg
1 400~1 490	1 530~1 540	2~4	1 510~1 520	595~605

表2 出炉前化学成分 w(%)  
Tab.2 Chemical composition before tapping

状态	C	Si	Mn	Cu	P	S
出炉前	3.70~3.85	1.70~1.95	≤0.40	≤0.40	≤0.05%	≤0.025

表3 球化过程参数  
Tab.3 Spheroidizing process parameters

喂丝前温度 /℃	喂丝长度 /m	喂丝速度 /(m/min)	反应时间 /s	喂丝后温度 /℃
1 465~1 485	14.2±0.15	120±0.15	45~60	1 430~1 450

## 4 热处理

### 4.1 热处理工艺设计

为了消除铸造应力,分解铸件内圆薄壁边角部位上的渗碳体和碳化物,得到更多塑性高的铁素体组织,同时细化珠光体晶粒,在退火后获得不含碳化物和渗碳体的石墨+铁素体+珠光体的铸件组织。

设计热处理退火保温温度为600℃,保温2 h。因为该退火工艺的目的在于消除铸件残余应力和微量渗碳体的同时,获得更多的铁素体并使其成分更为均匀化,所以将保温温度设置为低温退火温度。待保温时间到达之后,关闭加热电源,随炉冷却<sup>[2]</sup>,采用缓冷是为了保证渗碳体充分分解和避免再次产生新的应力。随炉冷却降温速度为每小时60~80℃,当温度降至300℃的时候,出炉空冷。具体见图8热处理工艺所示。

### 4.2 热处理工艺过程

使用台车型热处理炉,计算机控制程序控制炉内热电偶的温度,确保炉内温度均匀性,保证热处

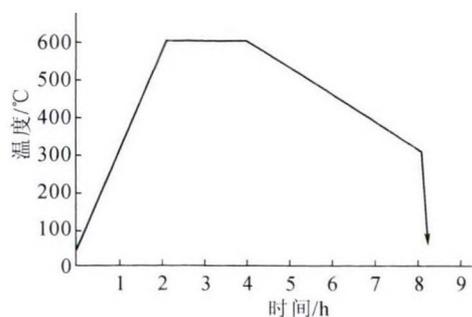


图8 热处理工艺图  
Fig.8 Heat treatment process chart

理时候的升温温度、保温温度以及降温速度、降温温度、降温时间。关闭炉门后,应使炉门与炉体密封处的密封状态符合最小间隙范围要求,避免间隙过大,导致温度严重丧失。送电升温后,应通过计算机输出显示屏,注意观察炉内各个部位的炉温变化;出炉后,在铸件降至室温前,做好防护处理,避免接触到比环境温度更低的任何物体。

## 5 化学成分及力学性能检测

### 5.1 化学成分

采用光谱分析仪对生产的铸件本体试样进行了化学成分检测。实际检测结果如表4所示。

### 5.2 力学性能

使用微机控制电液伺服万能试验机对热处理后的铸件进行力学性能检测,力学性能检测结果如表5所示。

### 5.3 金相组织

依据ASTM1245-2003标准,使用金相显微镜对铸件本体金相进行检验,图9结果显示:石墨球化率为90%,石墨大小:5~6级。图10结果显示:金相组织主要为铁素体+珠光体,未发现渗碳体和碳化物存在。

## 6 外观检查和内部质量

### 6.1 外观检查

对热处理后的铸件,采用通过式悬挂抛丸机,使用粒度为0.6~1.2 mm的切丝钢丸对铸件进行抛丸。抛丸后,对铸件进行100%目视检查,以防表面

表4 化学成分检测结果 w(%)  
Tab.4 Chemical composition results

序号	C	Si	Mn	Cu	P	S	Cr	Ni	Ti	V	Al	Mg 残
1	3.625	2.573	0.386	0.351	0.043	0.016	0.020	0.011	0.020	0.010	0.010	0.039
2	3.885	2.554	0.380	0.349	0.042	0.011	0.021	0.010	0.015	0.009	0.011	0.040
3	3.690	2.523	0.387	0.362	0.051	0.012	0.020	0.011	0.017	0.010	0.012	0.039
4	3.602	2.544	0.382	0.345	0.043	0.015	0.022	0.013	0.021	0.011	0.010	0.041
5	3.647	2.538	0.384	0.357	0.044	0.014	0.024	0.012	0.019	0.011	0.012	0.042

表 5 力学性能检测结果

Tab.5 Test results of mechanical properties

序号	抗拉强度 $R_m$ /MPa	屈服强度 $R_{p0.2}$ /MPa	伸长率 $A_s$ (%)	表面硬度 (HB)	心部硬度 (HB)
1	545	396	15	210	192
2	540	392	14	205	189
3	550	400	15.5	215	198
4	555	405	13	219	201
5	545	395	14	204	187

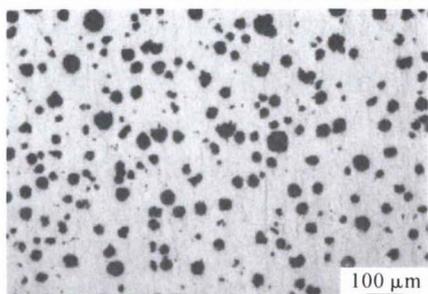


图 9 球化率和石墨大小

Fig.9 Nodularity and graphite size

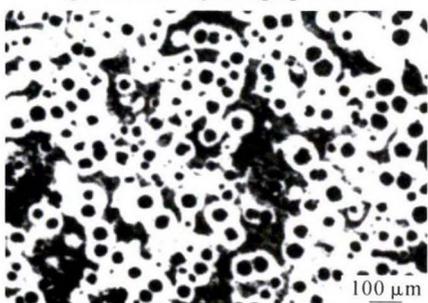


图 10 试样的金相组织

Fig.10 Microstructure of sample

带有砂、渣孔缺陷的铸件发往客户。

### 6.2 球化率声速检测

声速测定仪又称球化率仪，是利用超声波原理，通过已知被测铸件部位的实际厚度，声速测定仪就会测出声波穿过铸件的具体速度，这个速度即是我们通常所说的声速，我们利用声速值推导出实际铸件的球化率。由于文中所说的飞轮铸件壁厚差异较大，通过所测部位测试结果数据分析对比，确定将声速值范围控制在：5 530~5 680 m/s，声速值在这个范围内，即表示该铸件的球化率达到了 85%以上。

### 6.3 X 光检测

采用通过式 X 光设备，对铸件进行无损探伤，检测结果表明所测铸件内部缺陷均符合 ASTM-E689 标准中 ≤2 级的要求，实际铸件内部缺陷均能达到该标准的 1 级要求。X 光检测结果如图 11。

### 6.4 磁粉探测

采用通过式磁粉探伤机，针对铸件所有边缘部位进行检测，主要是用来检测肉眼无法识别的裂纹

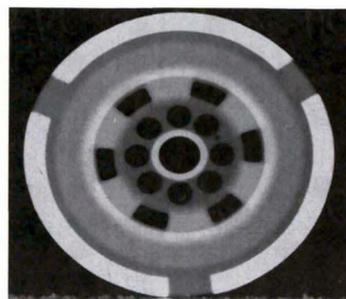


图 11 X 光检测结果

Fig.11 X-ray inspection result

类缺陷，不管是凝固过程中产生的热裂纹还是应力等因素导致的热裂纹，都能得到有效的识别，从检测结果表明所有铸件均未发现有裂纹和其他裂痕类缺陷。磁粉检测结果如图 12 所示。

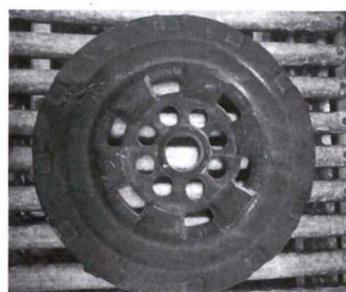


图 12 磁粉检测结果

Fig.12 MPI result

### 6.5 着色探伤

着色探伤是将着色剂涂在铸件所测部位的表面，着色剂可渗入缺陷部位。然后将表面的着色剂冲洗掉。在已清洗干净的表面涂上显影剂，缺陷部位因为着色剂渗入其中从而可以非常清楚的观测到缺陷的位置和大小。它主要是用来检测肉眼无法准确识别的微观疏松缺陷。按照作业指导书的要求，将铸件从易发生疏松的热节部位中间切开，每批均通过抽检的方式，使用着色检测法进行破坏性检测试验。从实际生产中被检测铸件的结果来看未发现有任何缩松和疏松类缺陷。着色检测结果如图 13。

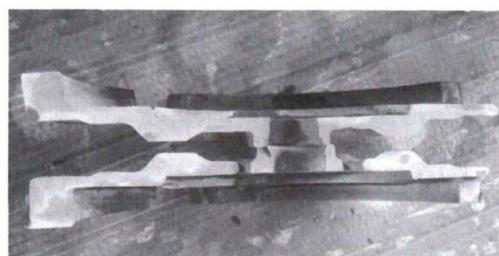


图 13 着色检测结果

Fig.13 Color detection result

- 代铸铁,2017(1):67-69.
- [3] 张锦萍,舒希勇,张孟群,等. 镁在球墨铸铁中分布状况的研究[J]. 铸造技术,2010,31(12):1572-1575.
- [4] 李小兵,李玉克,曹二兵,等. 使用废钢合成铸铁生产球墨铸铁管的工艺[J]. 铸造,2017,66(11):1227-1229.
- [5] 宁玉宏. 铸态 QT700-2 的生产实践[J]. 铸造技术,2010,31(12):1680-1681.
- [6] 田永维,刘延平,李磊,等. 柴油机用轴体承瓦 面点状锈蚀研究[J]. 铸造技术,2018,39(11):2605-2607.
- [7] 程凤军,高顺,莫俊超,等. 球墨铸铁中碎块状石墨的形成原因及改进措施[J]. 现代铸铁,1995(3):29-34.
- [8] 万晓明,齐浩,苏培强,等. 制动卡钳铸件皮下气孔缺陷的防止[J]. 现代铸铁,2016(1):69-73.

(上接第 700 页)

## 7 结论

从模拟分析和铸件本体检测结果表明:采用新设计的铸造工艺所生产的飞轮铸件,符合客户指定的标准要求。通过对铸件本体的相关测试验证和可靠性分析,使得该工艺已经能够投入批量生产。因为客户对这种 QT500-12 材质的伸长率和热处理有特别要求,我们还需要在保证其他相关力学性能和质量指标不受影响的前提下,通过调整目前的化学成分和热处理工艺,在不改变抗拉强度的同时,进一步提高伸长率,以适应客户未来对材料牌号的不断

升级,在客户将 QT500-12 材质升级到 QT500-18 之前,通过充足的试验验证,确保材料牌号升级后能够直接用于生产,提前做好前期准备。

### 参考文献:

- [1] 刘晨,米国安,王有超,等. 基于 ViewCast 的顶盖砂型铸造工艺数值模拟及优化[J]. 热加工工艺,2017,46(19):92-95.
- [2] 《热处理手册》编委会. 热处理手册:第 2 卷[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [3] 陈淑惠,魏兵,龙礼贤. 增碳剂在铸铁生产中的应用[J]. 铸造技术,2008,29(6):823-826.

## 《铸造技术》杂志优秀企业、先进人物专访通告

《铸造技术》杂志开展专访活动,旨在通过专访这一内涵深邃、读者喜闻乐见、欣赏韵味独特的交流方式,深度挖掘铸造界人文财富,倾心打造行业精深资讯,进而从独有的精神与文化之角度施力,推动中国铸造业的科学振兴和健康发展。

《铸造技术》基于“榜样的力量是无穷的”以及“益言可以兴邦”的基本理念和初衷,《铸造技术》杂志社记者与业界企业家、专家学者、工程技术人员等先进人物近距离接触、多层面无障碍恳谈,从而接地气地见识与领略中国铸造业界深邃浩瀚的人文资源、鲜活生动的真人与实事,在第一时间得到启迪与感悟,进而把这发自心灵的收获通过专访报道奉献给读者朋友。

《铸造技术》专访笃信“唯有真情可以感人”。能感动人的专访报道,必然是被访者真实生活的经历、体验和独特感受,高尚人格的彰显。专访报道中的所有感人之处,无不源于被访者独有的生活经历加上独到的见解。不可复制的人生阅历之润养、对生活的挚爱、对事业的全身心投入,是每一位被访者能够超越现实与自我而永葆充沛生命力的秘诀。从自己挚爱的事业那里领悟人生的真谛,激发爱与美相交融的情感。被这真实的情感所感染,使人情不自禁地用看似清淡的笔墨,仰仗倾情产出令人心颤的专访报道。

《铸造技术》专访对“说理”情有独钟。信奉“唯有讲理可以服人”。因“至”即无限趋近高端,故“至理”系高度符合科学规律的道理。“科学”乃说理的学问,科学是迄今全人类生产及社会实践的顶级智慧结晶,科学是全人类的共同财富,科学是人类从必然王国走向自由王国的桥梁。唯科学之理能使人们正确认识世间万物、尤其包括认识者自己。《铸造技术》专访已延续多年,读者不难发现,所有被访者的感人之处无不根源于其自觉或不自觉地遵循了科学的思维与行为的准绳。

《铸造技术》专访所追求的是,以优秀传统文化底蕴为基石,以高尚道德操守与精神境界为标杆,倾力打造铸造专访的精到内涵和独特风格,倾心为读者朋友打造理性思考的空间,竭力实现被访者一读者的理性与情感的惊人共鸣。