● 特种铸造 Special Casting ●

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.02.014

低频电磁场对半连续铸造 Al-Mg-Si-Cu 合金显微组织的影响

郝建飞[1,2],王顺成[2],农 登[2],李润霞[3]

(1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院,辽宁 沈阳 110870;2. 广东省材料与加工研究所,广东 广州 510651;3. 东莞理工学院 材料学院,广东 东莞 523808)

摘 要:采用低频电磁场半连续铸造工艺制备 Al-Mg-Si-Cu 铝合金铸锭,研究了低频电磁场对 Al-Mg-Si-Cu 铝合金铸锭组织的影响。结果表明,施加低频电磁场可以细化 Al-Mg-Si-Cu 铝合金铸锭的晶粒组织,减轻晶内元素的偏析程度。与常规半连续铸造相比,施加频率为 20 Hz、电流为 120 A 的交变电磁场后,铸锭中的等轴晶组织增多,枝晶状组织减少,晶粒尺寸变得更加细小,铸锭边部和中心平均晶粒尺寸由常规半连续铸造的 170 和 259 μm 分别降至 133 和 187 μm,同时有利于提高溶质元素在晶内的分布,很大程度上减轻了溶质元素的偏析。此外,低频电磁场的电磁振荡使得液穴内部温度场和流动场更趋均匀,溶质元素分配系数增大,结晶区间变小,抑制了树枝晶的生长,促进了 Al-Mg-Si-Cu 合金半连续铸锭中非枝晶组织的形成和溶质元素的强制固溶,并且抑制了溶质元素的偏析。

关键词:电磁振荡;溶质元素;微观组织;宏观偏析

中图分类号:TF777;TG113 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2020)02-0148-05

Effect of Low Frequency Electromagnetic Field on Microstructure of DC Casting Al-Mg-Si-Cu Aluminum Alloy Ingots

HAO Jianfei[1,2], WANG Shuncheng[2], NONG Deng[2], LI Runxia[3]

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangzhou 510651, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China)

Abstract: The Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy ingots were prepared by using low frequency electromagnetic field semi-continuous casting process. The effect of low frequency electromagnetic field on the microstructure of Al-Mg-Si-Cu alloy ingots was studied. The results show that the grain structure of Al-Mg-Si-Cu alloy ingots can be refined by applying low frequency electromagnetic field, and the segregation degree of the elements inside the ingots can be reduced. Compared with conventional semicontinuous casting, the applied frequency is 20 Hz, current is 120 A alternating electromagnetic field, the isometric microstructure increase in ingot casting, dendritic structure, grain size more small, ingot casting side and the center of the average grain size by regular semi-continuous casting of 170 and 259 μm down to 133 and 187 μm respectively, at the same time to improve the distribution of solute elements in the intracrystalline, greatly reduce the segregation of solute elements. In addition, the low frequency electromagnetic field in the electromagnetic oscillation makes liquid hole inner temperature field and flow field more uniformly, solute elements distribution coefficient increases, crystallization range smaller, inhibits the growth of dendrites, promoted the Al-Mg-Si-Cu alloy semi-continuous casting non-dendritic structure formation and forced solid solution of solute elements, and suppress the segregation of solute elements.

Key words: electromagnetic oscillation; solute elements; microstructure; macrosegregation

在普通半连续铸造工艺下,由于空间尺寸效应和铸造环境的影响,在铸造过程中凝固区域的温度场与流动场分布不均匀,往往会造成铸锭在凝固过程中引发体积收缩,造成凝固组织、成分在空间分布严重不均匀,同时晶间富集溶质在熔体压力作用下,沿枝晶间隙向铸锭表面流动,只有少量合金元素在晶内固溶,大量的合金元素则以共晶和化合物的形式存在于晶界,导致溶质元素在铸锭横截面大尺度范围内分布不均匀。20 世纪 60 年代,原苏联铝合金专家 Getselev 发明了电磁铸造技术(EMC 法)[1-3]。由

收稿日期:2019-07-25

基金项目:广东省科学院创新能力建设项目资助(2017GDASCX-0117);广东省公益研究与能力建设项目资助(2017A070701029)

作者简介:郝建飞(1993-),辽宁沈阳人,博士研究生.研究方向:铝合金成形工艺及热处理工艺研究.

电话:13060826011,E-mail:gdhaojianfei@163.com

于使用电磁力维持铸锭上部液态金属形状，不再使用结晶器，从而消除了传统铸造工艺中铸锭与结晶器壁的接触，使铸锭直接受冷却水的冷却而凝固，因此表面光滑，内部质量也得到一定的提高；随后 Vives 提出了电磁细晶铸造技术，金属熔体内部的感生电流与磁场交互作用，使熔体受到 Lorentz 力的作用，CREM 工艺中电磁力的约束作用能够起到减小一次冷却、改善表面质量的作用[4]。本文研究低频电磁场对 Al-Mg-Si-Cu 铸锭微观组织及溶质元素宏观分布规律的的影响，探讨通过采用低频电磁场改善合金的微观组织、消除宏观偏析，提高铸锭的表面质量。采用的 Al-Mg-Si-Cu 合金是可热处理强化的中高强度铝合金，具有优良的成形性、焊接性、耐腐蚀性和氧化性能等，广泛应用于电子电器、交通运输、航空航天、武器装备等领域[5,6]，严重的表面偏析和易开裂等特性极大地影响了成材率，因此通过低频电磁铸造工艺，解决上述问题、改善材料组织性能具有重要的意义。

1　实验材料与方法

实验材料为 Al-Mg-Si-Cu 合金，采用纯铝锭（99.7%，质量百分比，下同）、纯镁锭（99.8%）和 Al-20Si 和 Al-50Cu 合金熔炼配制，经光电直读光谱仪测定，其化学成分 w(%)为：1.12 Mg，0.75 Si，0.36 Cu，0.084 Fe，余量为 Al。

图 1 为低频电磁半连续铸造实验设备示意图。石墨环置于结晶器内，石墨环的内径为 106 mm，壁厚为 4 mm，高度为 20 mm。电磁线圈布置在结晶器四周，电磁线圈的水平中心线与结晶器内石墨环的中心线平齐，电磁线圈的匝数为 160，电磁场频率为 20 Hz，安匝数为 19 200 AT。在铝合金熔炼炉内于 760 ℃加热熔化 Al-Mg-Si-Cu 合金，然后用高纯氩气对铝合金液进行喷吹精炼除气除杂，扒渣后静置 30 min，最后将铝合金液半连续铸造成直径 110 mm 的 Al-Mg-Si-Cu 合金铸锭。为了研究电磁场对铸锭微观组织的影响，在整个实验过程中保持常规工艺参数不变：浇注温度 720 ℃，拉坯速度 180 mm/min，冷却水强度 0.05 m^3/min。实验完成后，分别在 Al-Mg-Si-Cu 合金铸锭横截面的边部和心部取样，试样经磨制、抛光和腐蚀后，在金相显微镜上进行组织观察。在铸锭的横截面上沿半径方向取样，通过化学分析的方法测定不同位置处合金元素的质量分数，分析电磁场对合金元素宏观偏析规律的影响。

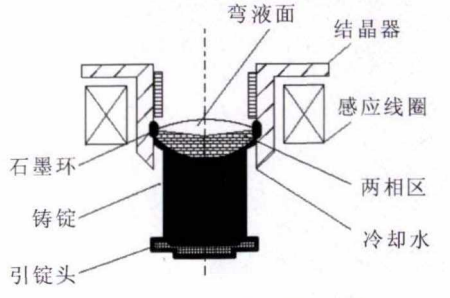


图 1　低频电磁铸造装置示意图

Fig.1　Schematic diagram of low frequency electromagnetic semi-continuous casting

2　实验结果与分析

2.1　Al-Mg-Si-Cu 铸锭微观组织的分析

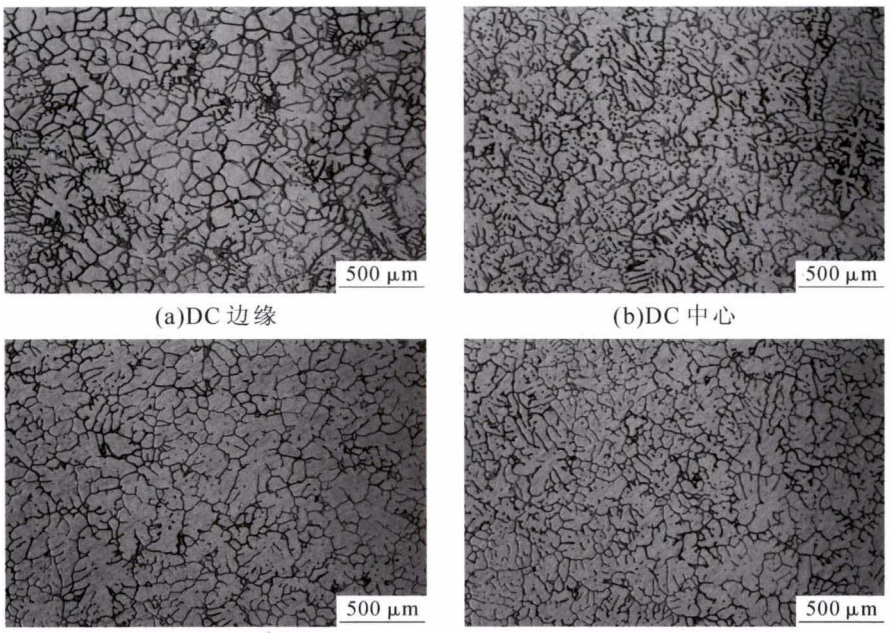
图 2 为常规半连续铸造铸造（DC）和电磁半连续铸造（EC）工艺下铸锭心部和边部的微观组织。可以看出，在普通半连续铸造工艺下，铸锭的边部和心部存在混晶，粗大的晶粒和细小的晶粒混杂在一起，铸锭的边部和心部晶粒组织有较大的差异；在电磁半连续铸造工艺下，观察铸锭的微观组织发现，混晶尺寸差异减小，铸锭边部和心部的组织均得到不同程度的细化，且组织分布更为均匀，微观组织的形貌由粗大的柱状晶转变为细小的等轴晶。说明在低频电磁场的作用下，电磁振动对铝合金铸锭的整个截面内凝固组织均有很好的细化效果。图 3 为不同工艺条件下合金的平均晶粒尺寸。可以看出，采用普通半连续铸造时，接近铸锭表面激冷区的晶粒尺寸较为细小，晶粒尺寸为 158~170 μm，越靠近铸锭中心，铸锭的冷却速率越慢，晶粒尺寸越大，在铸锭中心区，晶粒尺寸为 237~259 μm，计算得到铸锭各区域晶粒尺寸分布不均匀度为 39.0%。采用低频电磁半连续铸造后，铸锭内各个部分的晶粒均得到细化，从铸锭边部到中心，晶粒尺寸在 133~187 μm 范围内，在此工艺条件下，铸锭晶粒分布更加均匀，其尺寸不均匀度减小至 28.9%。

图 4 为不同铸造工艺条件下 Al-Mg-Si-Cu 合金铸锭的显微组织，其能谱定量分析结果见表 1。Al-Mg-Si-Cu 合金在平衡凝固条件下，首先从熔体中析出 α-Al 枝晶，在枝晶生长的过程中，固液界面前沿 Al 的含量不断增多，富集 Al 的残余液体在枝晶间隙发生共晶转变，进而在晶间形成了 Mg_2Si 相

表1 组织中各相能谱定量分析结果 w(%)

Tab.1 Results of EDS analysis of phases shown in Fig.3

点	Mg	Al	Si	Fe	Cu	第二相
A	3.87	63.15	0.83	-	32.15	Al_2Cu、Mg_2Si
B	3.52	64.97	0.89	0.72	29.88	Al_5FeSi、Al_2Cu
C	3.23	96.77	-	-	-	Mg_2Al_3
D	6.10	53.73	0.92	-	39.25	Al_2CuMg
E	0.49	99.07	-	-	-	α-Al 基体



(a)DC 边缘　(b)DC 中心

(c)EC 边缘　(d)EC 中心

图 2 铸造工艺对 Al-Mg-Si-Cu 合金铸锭显微组织的影响

Fig.2 Effect of casting process on Microstructure of Al-Mg-Si-Cu alloy ingots

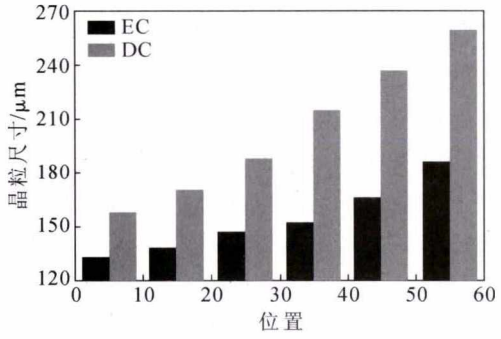


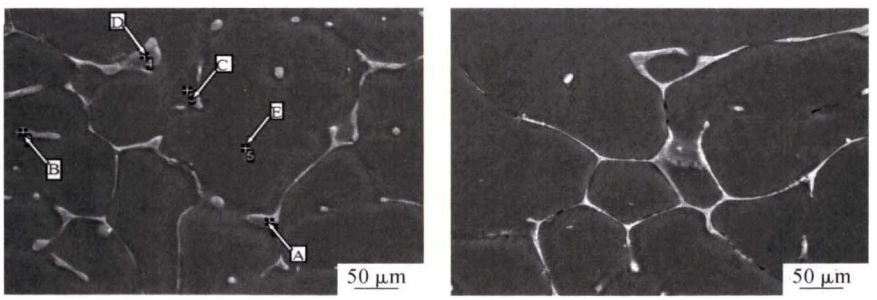
图 3 不同工艺条件下晶粒尺寸分布

Fig.3 Grain size distribution under different process conditions

(见图 4 中的点“A”)、棒状的 $\theta(Al_2Cu)$相(见图 4 中的点“B”)、圆点状的 Mg_2Al_3 相(见图 4 中的点“C”)和骨骼状的 $S(Al_2CuMg)$相(见图 4 中的点“D”),同时合金中含有少量的 Fe 元素,与 Al、Si 元素反应生成 Al_5FeSi 相,富集在棒状的 $\theta(Al_2Cu)$相周围。

在不同的铸造工艺下,枝晶间隙处的第二相分布有较大的区别。普通半连续铸造工艺下,铸锭组织主要有 α-Al 基体，基体中的第二相分布不均匀，且较为粗大,主要分布在枝晶间隙;低频电磁半连续铸造工艺下，在电磁场作用下粗大第二相化合物开始变得细小,基体上的圆点状的第二相基本消失,第二相化合物较为细小且分布均匀。

合金组织的细化和非枝晶化，可归结为熔体中结晶核心的增加和枝晶生长条件的消除。电磁振荡之所以能增加形核核心，是由于此法所具有的电磁搅拌作用使得晶粒从结晶器壁游离数量增多，以及电磁振荡力的反复拉伸与压缩作用，增加了熔体对高温固相化合物及准固相原子团簇的润湿，减少了以它们为基底的异质形核临界自由能，在高的过冷度下,大量晶核依附其上,异质瞬态形核而生[7,8]。此外,振荡有着与搅拌相同的作用,使熔体产生相当大的扰动,起着弥散合金元素、均匀温度场、加大熔体整体过冷度、增加并弥散形核核心、抑制枝晶生长的作用，同时低频电磁场的电磁振荡使得初凝壳高度



(a)DC　(b)EC

图 4 不同工艺下 Al-Mg-Si-Cu 合金铸锭的 SEM 图

Fig.4 SEM images of Al-Mg-Si-Cu alloy ingot under different processes

和液穴深度降低，溶质元素分配系数增大和结晶区间变小，抑制了树枝晶的生长[9]。这样就使得结晶过程能够围绕着分布于整个液穴范围内的大量形核核心同时进行，而促进了 Al-Mg-Si-Cu 合金半连续铸锭中非枝晶组织的形成和溶质元素的强制固溶，几个因素综合作用的结果，使得晶粒尺寸减小，组织细化。

图 5 为 Al-Mg-Si-Cu 合金铸态 XRD 衍射图谱。可以看出，在电磁场作用下基体 Al 的(111)(200)面的衍射峰强度均高于常规半连续铸造作用下的各个晶面的衍射峰，表明电磁场有效的消除了铸锭内部的织构，通过电磁场的强烈对流和搅拌作用，减轻铸锭内部织构的程度。

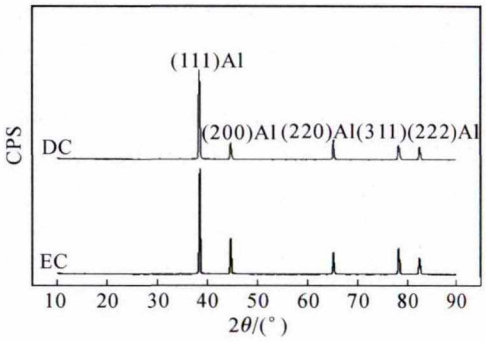


图 5 不同工艺下铸锭 1/2 半径处的 X 射线衍射谱

Fig.5 XRD patterns of ingot 1/2 radius under different processes

2.2 电磁场对合金元素宏观偏析的影响

金属熔体在交变电磁场的作用下产生感应电流，感应电流与磁场交互作用，使熔体受到洛伦兹力的作用，熔体内部任一点所受的电磁体积力由下式给出[10,11]：

$$F=J\times B=\frac{1}{\mu}(B\cdot\nabla)B-\frac{1}{2\mu}\nabla(B^2) \qquad (1)$$

洛伦兹力由两部分组成，式中的第一部分为有旋力场，可在熔体中产生强迫对流，把铸锭中心过热的熔体输送至铸锭边部，从而获得理想的流场形态并有效降低液穴深度；第二部分是有熔体静压力梯度平衡的有势力，可以减少熔体与结晶器之间的冷却强度与摩擦力，以上这些影响均可有效减少铸锭中的宏观偏析。

图 6 为普通半连续铸造和低频电磁半连续铸造条件下，各溶质元素在横截面上的分布图。可以看出，在普通半连续铸造工艺条件下，Mg、Si、Cu 元素均产生了较为严重的逆偏析现象，溶质元素在铸锭表面富集同时贫化了内测临近区域。低频电磁工艺条件下，各溶质元素在铸锭横截面的分布，由图可知，在交变电磁场存在的情况下，合金元素宏观分布不均匀的现象得到了明显的改善，一方面在感应线圈中产生的交变电流，使熔体受到了强迫对流的作用，同时由于电磁力的水平分量对熔体的约束作用，使熔体与结晶器的接触线高度减小、初生凝固壳形成位置下降，这一过程减弱了表面渗出效应，使铸锭表面附近的合金元素质量分数明显下降，表面偏析得到了有效控制。

在交变电磁场作用下，合金的液相线温度和固相线温度均升高，且固相线温度升高幅度大，结晶温度区间变小。液固相线提升幅度不一致，导致合金中各溶质元素平衡分配系数 k_0 增大，若此时液穴中某一溶质元素含量为 w_0，则凝固相中该种溶质元素的含量 k_0w_0 随之提高；液固两相中溶质元素含量上的差异可表示为[3,9]：

$$\frac{k_0w_0}{w_0/k_0}=k_0^2 \qquad (2)$$

当上述差异减小时(k_0<1)，反偏析程度降低[9]。同时，随着低频电磁场的加入，结晶温度区间减小，在一定程度上相当于强化了二次冷却，加快了凝固速度，缩短了凝固时间，使得溶质元素在较短时间内难以析出，起到了弥散合金元素和强制固溶的效果。促进了固溶，同时抑制了富含溶质熔体的远程流动，弱化了反偏析程度[12,13]。

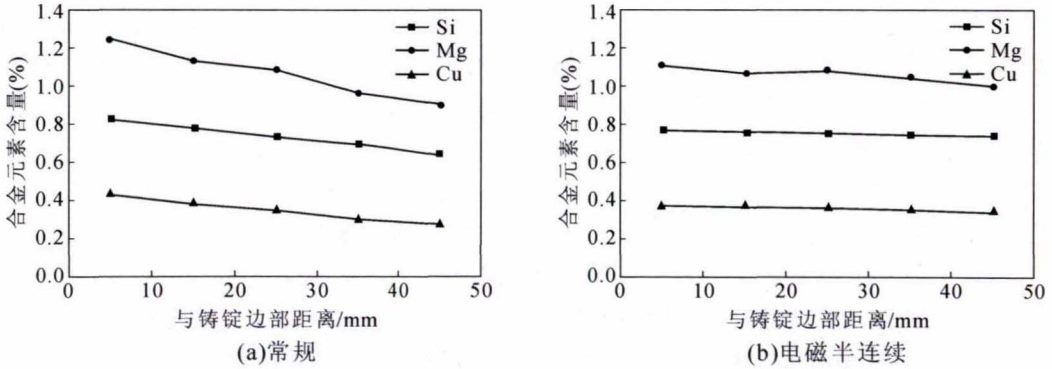


图 6 常规半连续和电磁半连续铸锭合金元素分布规律

Fig.6 Distribution of alloy elements in conventional semi-continuous and semi-continuous casting ingots with electromagnetic stirring

3 结论

(1)电磁半连续铸造工艺能够改善合金的显微组织,细化晶粒,与普通半连续铸造相比,铸锭中近球形组织增多,蔷薇型组织减少,晶粒整体尺寸变得更加细小和均匀。

(2)电磁半连续铸造工艺能使合金成分更加均匀,减低 Mg、Si、Cu 等合金元素的偏析程度,溶质元素的晶界含量减少,晶内含量显著增加,固溶程度提高,宏观偏析现象在很大程度上得到抑制和消除。

参考文献:

[1] 李金柱,农登,郑开宏,等.镁合金半连续铸造技术的研究与展望[J]. 铸造技术,2013,34(3):334-337.

[2] 李建超, 王宝峰.半连续铸造铝合金圆锭冷却过程传热研究[J]. 铸造技术,2012,33(5):569-571.

[3] 张勤,崔建忠,路贵民,等.电磁振荡法半连铸 7075 合金的微观组织及溶质元素分布 [J].中国有色金属学报,2003,13(5):1184-1191.

[4] 冀焕明,罗天骄,杨院生.AZ80 镁合金低压脉冲磁场半连续铸造过程的数值模拟和实验研究[J].中国有色金属学报,2017,27(3):468-476.

[5] ZUO Y, CUI J, ZHAO Z, et al. Effect of low frequency electromagnetic field on casting crack during DC casting superhigh strength aluminum alloy ingots [J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 406(1): 286-292.

[6] LIU X, CUI J, WANG E, et al. Influence of a low-frequency electromagnetic field on precipitation behavior of a high strength aluminum alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 402(1): 1-4.

[7] 王娜,周志敏,路贵民,等. Al-Mg-Si-Cu 合金近液相线半连续铸造组织研究[J]. 材料与冶金学报,2009,8(2): 135-139.

[8] QIN F, ZHAO J Z, CUI J J, et al. Effect of low-frequency electromagnetic field on the as-casting microstructures and mechanical properties of hdc 2024 aluminum alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008,21(3):205-210.

[9] ZUO Y, ZHAO Z, ZHANG H, et al. Mechanism of grain refinement of an Al-Zn-Mg-Cu alloy prepared by low-frequency electromagnetic casting [J]. Journal of Materials Science, 2012, 47(14): 5501-5508.

[10] 张志强,王占坤,尹思奇,等.复合物理场对 AZ61 镁合金半连续铸造凝固组织的影响 [J].稀有金属材料与工程,2016(9): 2385-2390.

[11] 陈丹丹.低频电磁铸造铝合金锭坯中的合金元素偏析研究[D].沈阳:东北大学材料科学与工程学院,2012.

[12] 赵志浩,崔建忠,左玉波,等.低频电磁水平半连续铸造中磁场的分布及其对宏观偏析的影响[J].铸造,2005, 54(3):241-245.

[13] 潘冬,许庆彦,叶小刚,等.铝合金半连续铸造过程中的液穴温度分布[J].清华大学学报:自然科学版,2009(2): 206-209.

《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—读者的理性与情感的惊人共鸣。