● 试验研究 Experimental Research ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.04.001

树脂渗透对砂型 3D 打印成型精度影响机理研究

李 征[1],单忠德[2],孙启利[1],张学良[1],余洛生[1]
(1. 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司 先进成形技术与装备国家重点实验室,北京 100044; 2. 南京航空航天大学,江苏 南京 211106)

摘 要:研究了树脂渗透对砂型 3D 打印成型精度的影响,提出对应的理论模型,并进行实验验证。结果表明:树脂渗透通过树脂加入量、水力半径和铺砂厚度影响砂型打印成型精度,与成型尺寸无关。随着树脂加入量的增大,树脂渗透压力增大,尺寸误差增大;固化剂含量与型砂颗粒直径的增大均会导致型砂水力直径增大,进而导致尺寸误差变大;铺砂层厚的增大导致树脂渗透阻力的增大,进而导致尺寸误差减小。

关键词:砂型 3D 打印; 成型精度;树脂加入量;水力半径;层厚
中图分类号: TG242 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2021)04-0247-05

Influence Mechanism of Resin Penetration on Molding Accuracy of Sand 3D Printing

LI Zheng[1], SHAN Zhongde[2], SUN Qili[1], ZHANG Xueliang[1], YU Luosheng[1]
(1. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, Beijing National Innovation Institute of Lightweight Ltd., Beijing 100044, China; 2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The influence of resin penetration on the molding accuracy of sand mold 3D printing was studied, and the corresponding theoretical model was put forward and verified by experiments. The results show that the resin penetration amount, hydraulic radius and sand thickness affect the precision of sand printing, and have nothing to do with the molding size. With the increase of resin content, the resin penetration pressure and dimensional error increase. The increase of the content of curing agent and the diameter of molding sand will lead to the increase of the hydraulic diameter of molding sand and the dimensional error. The increase of sand layer thickness leads to the increase of resin penetration resistance and the decrease of dimensional error.

Key words: sand mold 3d printing; molding dimensional accuracy; resin addition amount; hydraulic radius; layer thickness

砂型 3D 打印是增材制造在铸造领域的一种应用,是通过增材的方式将砂型一层层粘接成型的技术,是有别于传统砂型翻模铸造的 1 种无模铸型制造工艺 (Patternless Casting Manufacturing, 简称 PCM)[1-2],是近些年铸造领域的新型热点技术。目前对于砂型打印技术的研究多集中于砂型强度、发气量等性能指标[3-4],对于砂型精度的研究较少[5-6]。然而作为“近净成型”技术的一种,有必要研究砂型打印的成型精度,以达到提高最终铸件精度的目标[7]。影响砂型打印精度的因素有:打印设备运动精度和树脂扩散范围[8]。本文作者主要研究树脂扩散对砂型精度的影响,结合多孔介质渗透模型研究了砂型打印过程中树脂加入量、固化剂加入量、型砂粒径、层厚以及成型尺寸对砂型精度的影响机理。

1 理论模型

假设砂型的理论尺寸为 L_t,实际成型尺寸为 L_r,则砂型打印精度可以用砂型实际尺寸与砂型理论尺寸的误差来表征即[8]:

$$\Delta L=L_r-L_t \tag{1}$$

砂型 3D 打印是通过喷头将树脂选择性的喷附在预混固化剂的型砂表面,树脂与固化剂产生交联反应,将型砂粘结成指定形状。因此,砂型的最终尺寸即为树脂在砂层内的渗透(扩散)范围。其可以表示为:

收稿日期:2021-02-24
基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(51525503);军委科技委基础加强项目(2019-JCJQ-ZD-317-00);机械科学研究总院技术发展基金资助项目(312101Q9)
作者简介:李 征(1985—),河南郑州人,博士,高级工程师.主要从事砂型 3D 打印技术及装备研究.
电话:15010096906,Email:lizheng0330@163.com
通讯作者:单忠德(1970—),山东高密人,博士生导师,研究员,中国工程院院士.研究方向:数字化绿色制造工艺及智能装备.Email:Shanzd@nuaa.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$L_R=v_p t \tag{2}$$

式中，v_p 为树脂在砂层内的渗流速度，t 为渗透时间。渗透时间由树脂与固化剂的反应特性决定，因此对于给定的树脂和固化剂，其渗透时间不变，因此树脂在砂层内的渗透范围主要由渗流速度决定。树脂在砂层内部的流动可以视为多孔介质内的渗流流动，将砂层内部的孔隙简化为多束直径相等的毛细直管的组合[9]，如图 1。

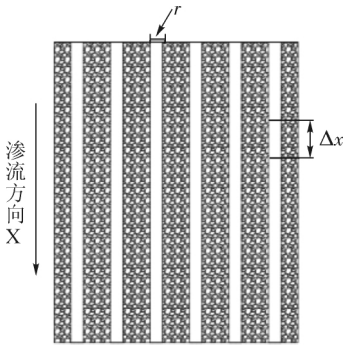


图 1 树脂渗透简化模型
Fig.1 Simplified model of resin permeation

则由哈根–泊肃叶定律可得，单个毛细直管微小单元内的树脂渗透流量为：

$$\Delta q=\frac{\pi}{8}\frac{\Delta p}{\Delta x}\frac{r^4}{\mu} \tag{3}$$

式中，r 为毛细管半径，在本文中为砂层平均孔隙半径；μ 为树脂粘度，Δp 为毛细直管微小单元前后的渗透压力，设渗透压力沿渗透方向上的分布满足，则，将其带入式(3)中可得：

$$\Delta q=\frac{\pi}{8}\frac{f(x+\Delta x)-f(x)}{\Delta x}\frac{r^4}{\mu}=\frac{\pi}{8}f'(x)\frac{r^4}{\mu} \tag{4}$$

则单根毛细直管中的树脂渗透流量为：

$$q=\int_0^x \Delta q=\frac{\pi}{8}f(x)\frac{r^4}{\mu} \tag{5}$$

则树脂在砂层内的平均渗流速度 v_p 为

$$v_p=\frac{q}{A}=\frac{1}{8}f(x)\frac{r^2}{\mu} \tag{6}$$

式中，A 为毛细直管横截面积。

式(6)中，r 为毛细管半径又称水力半径，在本文中为砂层平均孔隙半径，根据 Schultze 的研究[9]，水力半径 r 可以表述为：

$$r=\frac{V_m}{S_m} \tag{7}$$

式中，为 V_m 为毛细管容积，在本文中为孔隙体积，则单位截面渗透距离为 x 的砂层中的孔隙体积为：

$$V_m=x\varepsilon \tag{8}$$

式中，ε 为砂层孔隙度；S_m 为毛细管表面积，在本文中为孔隙表面积，则：

$$S_m=n_p\pi d^2 \tag{9}$$

式中，n_p 为单位截面渗透距离为 x 的砂层中砂粒数量；d 为砂层内砂粒平均直径。当假设砂层中砂粒为直径统一的球形颗粒时，其为：

$$n_p=\frac{x(1-\varepsilon)}{1/6\pi d^3} \tag{10}$$

将式(8)- 式(10)带入式(7)可得水力半径 r 为：

$$r=\frac{\varepsilon d}{6(1-\varepsilon)}=\frac{d}{6\left(\frac{1}{\varepsilon}-1\right)} \tag{11}$$

将式(11)带入式(6)中，可得树脂在砂层内渗透的平均流速

$$v_p=\frac{1}{288}\frac{f(x)}{\mu}\left(\frac{d}{\frac{1}{\varepsilon}-1}\right)^2 \tag{12}$$

在式(12)中，$f(x)$为渗透压力沿渗透方向上的分布函数。树脂在砂层内的渗透是在多孔介质的毛细作用下进行，渗透压力由树脂量产生。因此渗透压力主要受到以下三方面因素的影响：第 1，当树脂在砂层孔隙内流动时，由于没有后续补充，随着渗透距离的增大，树脂量逐渐减少；第 2，由于树脂在渗透的过程中与砂层内的固化剂发生反应，树脂数量减少，从而导致渗透压力降低；第 3，由于受到沿程阻力的影响，树脂在渗透过程中的渗透压力降低。因此树脂在渗透方向上的渗透压力是一个逐渐降低的复杂过程。

2 实验结果与分析

为验证上述理论模型，在机械科学研究总院开发的砂型打印设备上进行了实验研究，分别研究了不同打印参数(树脂加入量(树脂与型砂质量比)、固化剂加入量(固化剂与型砂质量比)、砂粒直径、层厚和成型尺寸）对砂型精度的影响。设备型号为：CAMTC-SMP-600，所用树脂为 3D 打印专用呋喃树脂，所用固化剂为 3D 打印专用固化剂(主要成分为对甲苯磺酸)，型砂为 3D 打印专用石英砂，打印速度 50 mm/s，铺砂速度 120 mm/s，后处理温度为室温 25 ℃，后处理时间为 36 h。实验工况如表 1，打印样件如图 2。

2.1 树脂加入量对砂型精度的影响

按照表 1 中的工况进行样件打印，得到不同树脂加入量的条件下砂型样件尺寸变化规律如图 3 所示，随着树脂加入量的从 0.73%增大到 3.88%，X 方向（水平方向）尺寸误差从 -0.06 mm 增大到 0.445 mm，Y 方向(水平方向)尺寸误差从 -0.02 mm 增大到 0.527 mm，Z 方向(垂直方向)尺寸误差从

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 砂型打印精度实验方案

Tab.1 Experimental scheme of sand mold printing accuracy

打印参数	树脂加入量(%)	固化剂加入量(‰)	砂粒直径(目)	层厚 /mm	成型尺寸 /mm
树脂加入量	0.73,1.60,2.28,3.17,3.88	3	140/270(0.065)①	0.5	X:50,Y:50,Z:10
固化剂加入量	3.17	2.0,2.5,3.0,3.5,4.0	140/270(0.065)	0.5	X:50,Y:50,Z:10
砂粒直径	2.28	3	140/270(0.065),100/200(0.124),70/140(0.152),50/100(0.232)	0.6	X:50,Y:50,Z:10
层厚	3.88	3	140/270(0.065)	0.3,0.4,0.5,0.6,0.7	X:50,Y:50,Z:10
成型尺寸	3.17	3	140/270(0.065)	0.5	X:30,40,50,60,70;Y:30,40,50,60,70;Z:5,10,15,20,25;

注:①()内为砂粒平均粒径,单位为 mm。

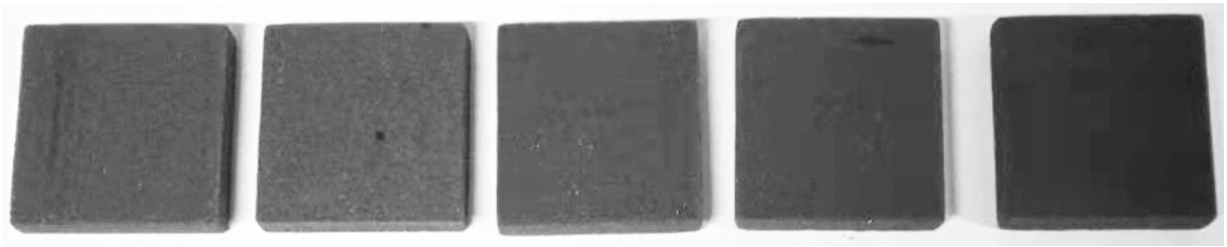


图 2 砂型打印精度实验样件

Fig.2 Sample of sand mold printing accuracy experiment

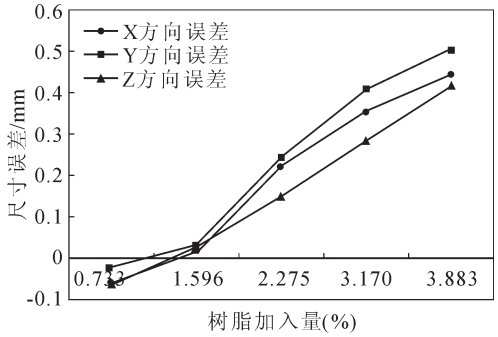


图 3 不同树脂加入量下的砂型尺寸误差

Fig.3 Dimensional error of sand mold with different resin content

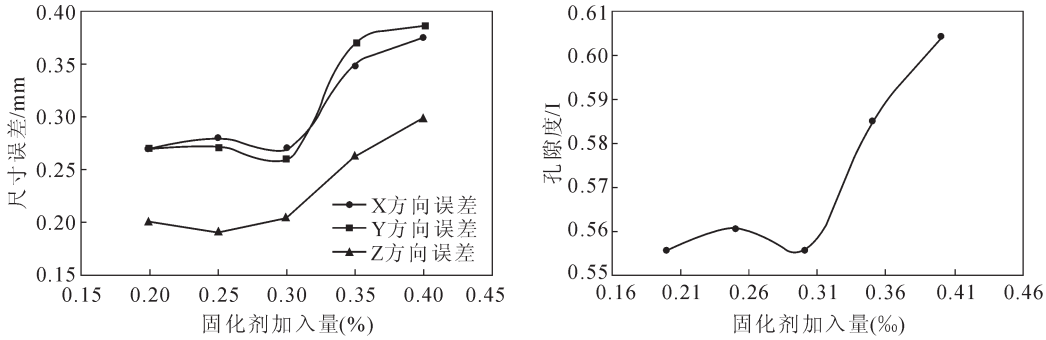
-0.06 mm 增大到 0.415 mm.各个方向尺寸误差均随树脂加入量的增大而增大。其原因在于随着树脂加入量的增多,树脂在砂层孔隙内的渗透压力得到整体提升,从而提高渗透速度,增大尺寸误差。同时,从图中数据可以看出,当树脂加入量低于 1.6%时,各方向尺寸误差接近于 0。

2.2　固化剂加入量对砂型精度的影响

仅改变固化剂加入量,得到砂型样件的尺寸变化规律如图 4(a),随着固化剂加入量的从 2‰增大到 4‰,X 方向(水平方向)尺寸误差从 0.27 mm 增大到 0.375 mm,Y 方向(水平方向)尺寸误差从 0.271 mm 增大到 0.387 mm,Z 方向(垂直方向)尺寸误差从 0.2 mm 增大到 0.299 mm. 各个方向尺寸误差均随固化剂加入量的增大而增大。

进一步分析其原因,根据孔隙度定义由式(13)计算得到不同固化剂加入量下砂型孔隙度。

$$\varepsilon=1-\frac{m_m-m_r-m_c}{V_n\rho_s} \tag{13}$$



(a)砂型尺寸误差　　(b)孔隙度

图 4 不同固化剂加入量下的砂型尺寸误差与孔隙度

Fig.4 Dimensional error and porosity of sand mold with different amount of curing agent

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中，m_m 为砂型质量，m_r 为砂型中树脂质量，m_c 为砂型中固化剂质量，V_m 为砂型体积，ρ_s 为型砂绝对密度，石英砂的绝对密度为 2 650 kg/m^3。经过计算，砂型孔隙度随固化剂加入量变化趋势如图 4(b)。从图中可以看出，随着固化剂加入量的增加，砂层孔隙度增大，且其变化趋势与尺寸误差变化趋势一致。这表明，随着固化剂加入量的增大，型砂流动性变差，从而改变型砂堆积方式，导致砂层孔隙度增大。根据式(11)可得，砂层孔隙度的增大会导致水力半径的增大，进而导致树脂渗透速度的增大，最终造成砂型尺寸误差变大。

2.3 型砂颗粒直径对砂型精度的影响

选用不同目数的型砂，研究型砂粒径大小对砂型精度的影响，结果如图 5 所示，随着型砂颗粒直径从 140/270 目（平均直径 0.065 mm）增大到 50/100 目(平均直径 0.232 mm)，X 方向(水平方向)尺寸误差从 0.28 mm 增大到 0.943 mm，Y 方向（水平方向）尺寸误差从 0.32 mm 增大到 1.017 mm，Z 方向（垂直方向）尺寸误差从 0.065 mm 增大到 0.971 mm，各个方向尺寸误差均随型砂颗粒直径的增大而增大。其原因在于，根据式(11)型砂粒径的增大同样会增大水力半径，最终导致砂型尺寸误差增大。

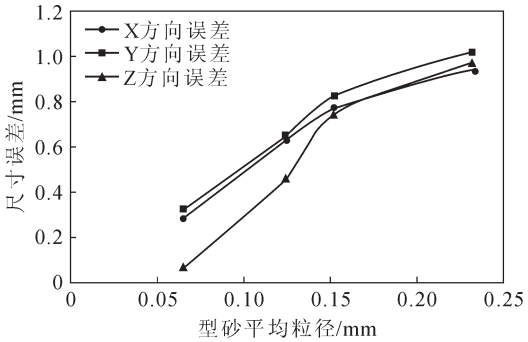


图 5 不同颗粒直径型砂下的砂型尺寸误差
Fig.5 Dimensional error of sand mold with different grain diameter

2.4 层厚对砂型精度的影响

研究砂型打印过程中的关键参数铺砂层厚对打印精度的影响，探索其对砂型尺寸误差的影响规律，结果如图 6，随着层厚从 0.3 mm 增大到 0.7 mm，X 方向(水平方向)和 Y 尺寸误差变化小于 0.08 mm，Z 方向（垂直方向）尺寸误差从 0.836 mm 减小至 0.175 mm。其原因在于随着层厚的增加，树脂在 Z 方向(垂直方向)的渗透距离增大，而水平方向上的渗透距离不受铺砂层厚的影响。根据第二小节的分析，树脂渗透压力沿渗透方向会逐渐减少，在树脂加入量相同的条件下，Z 方向渗透距离越大，则渗透压力越小，最终导致尺寸误差的减小。

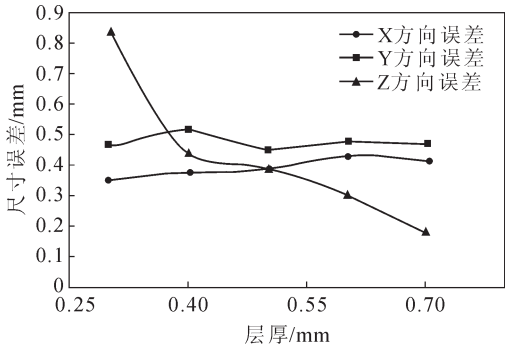


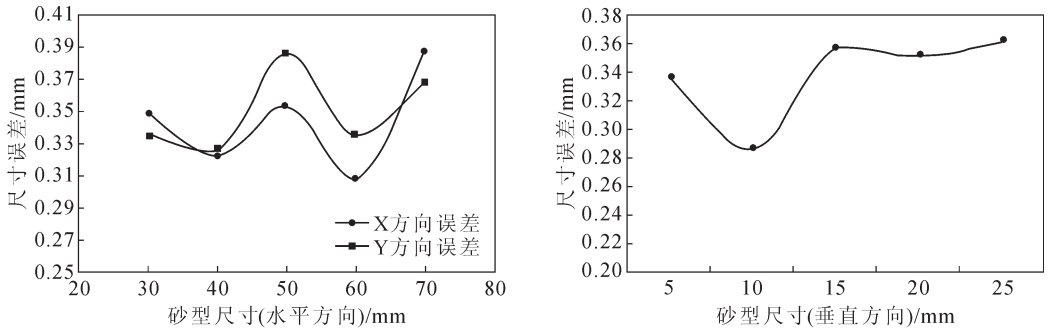
图 6 不同铺砂层厚下的砂型尺寸误差
Fig.6 Dimensional error of sand mold with different layer thickness of sand laying

2.5 成型尺寸对砂型精度的影响

砂型成型尺寸的变化会造成树脂总量的变化，为研究成型尺寸变化对尺寸精度的影响，打印了不同尺寸的砂型样件，其尺寸误差变化规律如图 7 所示，随着成型尺寸增大，砂型各方向尺寸误差变化小于 0.05 mm。其原因在于，虽然随着成型尺寸的增大树脂总量增大，然而树脂分布区域也在增大，单位区域内的树脂量并不发生变化，因而并不对渗透压力产生影响，从而不影响砂型精度。

3 结论

(1)根据本文提出的理论模型可得：树脂渗透通过树脂粘度、渗透压力、水力半径影响砂型精度，而水力半径则受到孔隙度和型砂颗粒直径的影响；在



(a)水平方向　　(b)垂直方向

图 7 不同成型尺寸下的砂型尺寸误差
Fig.7 Dimensional error of sand mold under different molding dimensions

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

树脂量不变时，可以通过提高砂层紧实度的方式同时减小砂层孔隙度和水力半径,进而提高砂型精度。

(2)实验结果表明:随着树脂加入量的增大,树脂渗透压力增大,导致尺寸误差增大,当树脂加入量≤1.6%时,尺寸误差接近于 0;层厚的增大会导致垂直方向渗透压力减小,从而减小尺寸误差,当层厚为 0.7 mm 时,树脂加入量为 3.88%时,垂直方向尺寸误差降低到 0.175 mm;成型尺寸的增大并不改变单位区域内的树脂量，对渗透压力没有影响,进而并不改变尺寸误差。

(3)固化剂加入量和型砂粒径的增大均会导致砂层水力半径的增大,最终增大尺寸误差;各打印参数中，型砂粒径对砂型尺寸误差的影响最大,当从 140/270 目增大到 50/100 目时,尺寸误差增幅最大超过 0.9 mm。

(4)根据本文实验数据,当树脂量为≤2.28%,固化剂含量≤3‰，型砂目数为 140/270 目,层厚≥0.5 mm 时,砂型尺寸精度≤±0.15 mm,满足工程使用要求。

参考文献:

[1] 单忠德. 无模铸造[M]. 北京:机械工业出版社, 2017.

[2] 单忠德,李新亚,战丽,等. 无模铸型的数字化快速铸造技术新进展[C]//2007 年中国机械工程学会年会论文集. 2007:771-775.

[3] 鲁云，郭永斌. 3D 打印砂型性能各向异性研究 [J]. 现代铸铁. 2020, 40(6):62-64.

[4] 陈志平,叶福源. 树脂和热处理对 3D 打印成形砂型抗拉强度的影响[J]. 特种铸造及有色合金. 2020, 40(12):1380-1384.

[5] 林凯强,孟庆文,张景豫. 铸造 3D 喷墨打印砂型尺寸精度测量评定方法研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2020, 55(1):28-31.

[6] 王军伟. 砂模 3D 打印尺寸精度控制方法浅析[J]. 铸造设备与工艺, 2019(6):40-41.

[7] 徐丹,颜永年,杨伟东. PCM 工艺中喷射过程的研究[J]. 中国机械工程,2002,13(23):2001-2004.

[8] 王君衡,张全艺,周荣光. 铸造砂型 3D 打印技术应用及选型分析[J]. 铸造技术, 2020(7):660-883.

[9] A E 薛定谔,王鸿勋,张朝琛,等. 多孔介质中的渗流物理[M]. 北京:石油工业出版社, 1982.

盖包球化产学研协同创新与技术合作交流座谈会在常州华德机械有限公司召开

2021 年 3 月 3 日,由华东铸造协会专家委员会沈金源副主任倡议,在常州华德机械有限公司召开了盖包球化产学研协同创新与技术合作交流座谈会。华东铸造协会沈金源主任,西安理工大学徐锦锋教授,苏州市花锦铸造设备有限公司冯勤伟总经理,常州华德机械有限公司丁建中总经理、丁杰副总经理、滕宣中经理和赵金权工程师,禹州市恒利来合金有限责任公司王迎战总经理、闫启栋副总经理和童建伟部长,合肥合力股份有限公司合肥铸锻厂程兆虎部长和钱冬冬工程师参加会议。

盖包球化产学研协同创新与技术合作交流座谈会

会议就“通过产学研用协同创新方式,形成集盖包球化技术、工艺、装备和材料一体化成套技术，加速我国盖包球化工艺技术迈上新台阶”的可能性进行了交流研讨。

会议由沈金源主任主持。沈主任首先介绍了本次会议的背景、议题、宗旨和后续工作的构想,希望通过大家的通力合作,共同推进我国盖包球化技术的快速发展。徐锦锋教授介绍了西安交大陆文华方直基金项目的研究进展,重点讲述了盖包法出流水力模拟研究结果及包盖设计基础理论,华德丁总和合力程部长分别介绍了盖包球化工艺在本单位的应用情况和一些关切问题,包括球化工艺、球化合金和筑包材料及球化稳定性等。花锦冯总从盖包的设计制造视角分享了盖包装备生产经验、用户反馈信息和新品研发设想等，恒利来王总和闫总针对盖包球化工艺特点,就盖包球化用球化剂在制备及供给方面谈了各自的想法。大家一致认为,沈主任的倡议正当其时,有助于推动球铁产业技术进步,值得大家共同努力去做。会议在热烈友好的气氛下圆满结束。

(《铸造技术》杂志社)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net