

对美国铸造现状的考察综述 \*

兵器工业总公司赴美考察团 \*

一、概况

由 6 人组成的考察团于 1997 年 5 月 13 日至 6 月 2 日在美国进行了以球铁生产及球铁热处理工艺和设备为重点内容的考察。本次考察的铸造厂，基本上是以生产汽车球铁件为主，其生产的概况综合统计在下

表内。尽管这些工厂在生产技术与设备的先进程度上有所差别，但它们都具有生产量大、生产率高、质量好、管理先进的共同特点。它们的许多成功经验，行之有效的技术措施、先进的管理方法与制度，都值得借鉴和参考。

美国几家汽车公司铸造厂生产概况综合统计表

厂 名	GREDE CO. REEDSBURG,WI.	WAUPACA CO. MARINETTE,WI.	FORD CO. CLEVELAND CASTING PLANT	INTERMERT CO. ARCHER CREEK	DONSCO INC. WRIGHTSVILLE, PA.	DONSCO INC. MOUNT JOY,PA.	DONSCO INC. BELLEVILLE,PA.
铸件产量 / (10 <sup>4</sup> t a <sup>-1</sup> )	10	(55) 15	40	(49) 10	(6. 6) 4. 2	1. 2	1. 2
废品率 ( % )	4 ~ 5	2	6. 3	3. 6	9	-	5 ~ 7
造型	1 条 HERMAN 造型线 3 条 DISA 造型线	6 条 DISA 造型线 附 6 台自动下芯机	3 条 SPO 造型线 1 条气冲线 1 条 DISA 线	2 条 OSBORNE 造型线	3 条 DISA 造型线	6 条震压造型机 生产线	4 台 HUNTER 造型 生产线(水平分型 机械加砂压实脱 箱造型生产线)
制芯	5 台制芯机 (全部为冷芯盒)	86 台冷芯盒制 芯机,温芯盒制芯机	12 条制芯线,70 台 冷芯盒机,58 台 热芯盒机,4 台组 芯机,一个机器人 下芯机	冷芯盒制芯机	23 台热芯盒机, 壳芯制芯机, 冷芯盒制芯机	冷芯盒制芯机 壳芯制芯机	5 台热芯盒制芯机 壳芯、温芯盒制芯机
熔炼方法	1. 冲天炉 2. 感应电 + 电炉 炉熔炼 双联熔炼	感应电炉熔炼,附 3 台炉料煤气预热 炉 (412 ~ 554 )	冲天炉 + 感应炉 双联熔炼	冲天炉 + 感应炉 双联熔炼	1. 冲天炉 2. 感应电 + 感应炉 炉熔炼 双联熔炼	感应电炉 熔炼	感应电炉熔炼
脱硫方法	电炉内 不脱硫 多孔塞 吹 N <sub>2</sub> 气 加入 CaC <sub>2</sub> 搅拌脱硫	不脱硫	电炉内连续吹 N <sub>2</sub> , 加 CaC <sub>2</sub> 搅拌脱硫	电炉内连续吹 N <sub>2</sub> , 加 CaC <sub>2</sub> 搅拌脱硫	-	不脱硫	不脱硫
铁液含硫量 ( % )	脱硫前 球化前 0. 03S 0. 025S 脱硫后 球化后 0. 008S 0. 02S	-	-	-	-	0. 012S	球化前 0. 03S 球化后 < 0. 01S
成分化验方法	碳当量仪化验 直读光谱仪化验	碳当量仪化验 直读光谱仪化验	碳当量仪化验 直读光谱仪化验	碳当量仪化验 直读光谱仪化验	碳当量仪化验 直读光谱仪化验	碳当量仪化验 直读光谱仪化验	碳当量仪化验 直读光谱仪化验
球化方法	盖包 转包 冲入法 球化法	盖包冲入法	盖包冲入法 型内球化法	盖包冲入法	盖包冲入法	盖包冲入法	盖包冲入法
球化剂	低稀土 纯镁 硅铁镁 球化剂	无稀土 Si - Fe - Mg 球化剂	低稀土 Si - Fe - Mg 球化剂	Si - Fe - Mg 球化剂	Si - Fe - Mg 球化剂	Si - Fe - Mg 球化剂	Si - Fe - Mg 球化剂
孕育方法	双管喷粉随流孕育	1. 随流孕育 (主要方法) 2. 型内孕育 3. 喂丝法 4. 复合孕育法	随流孕育 型内孕育	随流孕育	随流孕育	随流孕育	随流孕育
铸件检验	超声波检验 球化率	超声波检验 球化率	超声波检验 球化率	超声波检验 球化率	超声波检验 球化率	超声波检验 球化率	超声波检验 球化率
组织检验	常规金相检验, 定量金相检验	常规金相检验, 定量金相检验	常规金相检验, 定量金相检验	常规金相检验, 定量金相检验	常规金相检验, 定量金相检验	常规金相检验, 定量金相检验	常规金相检验, 定量金相检验

注： —— 括号内数是公司总产量,括号外数字是所考察厂的产量。

本文由南京理工大学 (南京 210014) 刘光华执笔,清华大学柳百成校阅,考察团成员还有李瑞、詹刚生、付南和、陆明; 1998 年 5 月 20 日收稿。

## 二、铸造生产达到了高度的专业化

美国的铸造生产已达到了高度的专业化,这不仅表现在毛坯制造工艺的专业化,即把铸件的生产集中于少数的企业进行大批量生产,使公司总的年产量多数都达到了几十万吨的生产水平。专业化还表现在铸件品种的专业化,不少的铸造厂都以汽车铸件为主要产品。例如, GREDE CO. REEDSBURG, WI, 年产 10 万吨球铁件,其中 75 % 为汽车铸件, INTER-MET CO. ARCHER CREEK 铸造厂的汽车铸件,占 97.19 %。最后,专业化还表现在专业化的内涵随着生产的发展而进一步深化。福特公司的克利夫兰铸造厂,是一个生产福特汽车铸件的专业化铸造厂,但该厂并不生产福特汽车的所有铸件,仅仅生产如气缸体、气缸盖、水泵体、飞轮、曲轴、凸轮轴等几种主要汽车铸件。对铸件的品种又进一步集中,于是专业化程度就更高了,铸件的产量更大了。

铸造生产实行高度专业化的结果,首先是大大提高了生产率并达到了相当高的水平,处于世界领先地位,表中所列铸造厂的生产率均超过 100t/ (人·a)。据资料介绍,到 1995 年,我国的铸造厂(点)共 24000 多家,从业人员约 120 万,铸铁件年产量 1100 万吨,但平均生产率仅有 9t/ (人·a),国内最好铸造厂的生产率也只有 30t/ (人·a) 左右,与美国相比相差 4 (最好) 至十几倍。我国铸件生产专业化处在很低的水平。改变我国铸造专业落后状态,必须认识到专业化的重要性。生产率提高了,铸件的成本必然下降,经济效益就会增加。在美国,可以明显看到,各个铸造厂的生产和销售都呈现一派繁忙景象。

专业化的第二个结果是各个铸造厂在不同程度上实现了现代化和自动化,计算机被广泛应用。最能说明这一结果的事例是克利夫兰铸造厂在 90 年代中期建成了一条垂直分型无箱射压生产线(DISA 生产线)。该生产线采用机械手和机器人制芯、组芯、下芯,生产过程达到了高度的机械化和自动化,技术水平处于当前世界领先地位。在一般铸造厂的造型也都实现了机械化,不少铸造厂的砂处理已采用计算机控制,实现了配料、检验、输送自动化。另外,由于大批量生产,有的厂熔炼—脱硫—球化—孕育—浇注,实现了生产工序连续化、机械化、自动化操作。

专业化的第三个结果是,铸造工艺稳定、铸件质量可靠、废品率低,成本下降,经济效益提高。

专业化是一种社会劳动分工形式,也是一种组织社会化大生产的科学方法,专业化一方面充分表现了社会生产力发展的水平,另一方面又是社会生产现代化的基础。长期以来,我国铸造行业一直处于落后状态,要改这种状态,关键在于专业化,必须认识到专业化是我国铸造行业实现现代化的必由之路。

《铸造》1998.9

## 三、造型与制芯

在生产量 100kt 以上的几个铸造厂,采用垂直分型无箱射压造型(DISA)生产线的占 60 % 左右。在威斯康星州的 MARINETTE WAUPACA CO. 共有 6 条造型生产线,全部采用 DISA 造型机,并且在每条生产线上都配自动下芯机构。垂直分型无箱射压造型线在各铸造厂得到广泛地应用,DISA 造型机的型号包括 DISA2070 (模板尺寸为 800mm × 950mm)、DISA2013 (模板尺寸为 505mm × 650mm、560mm × 865mm)、DISA2032 (模板尺寸为 710mm × 865mm、675mm × 825mm)。

各铸造厂中制芯全部都采用树脂砂,制芯方法有 4 种:壳芯法、热芯盒法、冷芯盒法和温芯盒法。

由于冷芯盒法的芯盒不需要加热,无加热元件,芯盒的设计和制造比较简单,此外,因无需加热节省了能源,改善了劳动条件,易于机械化和自动化。因此,冷芯盒的应用不断扩展,成为制芯工艺发展的方向。冷芯盒法的催化剂为 DMET,用 N<sub>2</sub> 气做载体,粘结剂是一种合成树脂,其商品名称为 ISOCURE (艾索居里)。

ISOCURE 粘结剂属于酚醛脲烷系树脂,是美国阿什兰化学公司生产的产品。催化剂 DMEA 的化学名称为二甲基乙基胺。

## 四、熔炼

各铸造厂对铸铁的成分规定与控制十分严格,不同的铸铁牌号都规定了不同的 %C、%Si 以及 %CE。对于球铁件,含硫量限制的很严,如 FORD CO. 生产的球铁曲轴,规定最大的 %S < (0.013 % ~ 0.015 %),与国内相比,该要求就十分严格了。对成分之所以如此严格的要求,是为了确保铸铁的质量。特别值得指出的是,各铸造厂生产的球铁件大部分都不进行热处理,除用户指定要进行热处理的以外,大多数是铸态供货,这对成分的要求就更严了。在原材料、熔炼设备和工艺,化学成分的检验等一系列生产环节上,采取了许多切实可行的技术措施,并制定了严格的生产管理制度。

在各铸造厂里,再看不到单一冲天炉熔炼铁液的方法,多数工厂采用的都是冲天炉 + 电炉双联熔炼,少数厂采用单一电炉熔炼的方法,或两种方法兼用。

冲天炉常用的结构形式为水冷无炉衬、外热式热风,富氧通风和喷粉,以强化熔炼过程,出铁温度达到 1450 ~ 1550 °C。冲天炉向着大型化熔炉方向发展,有的冲天炉直径达 2.4m ~ 2.8m,熔化率达 30t/h 以上。

## 五、脱硫处理

只用电炉熔炼时,不作脱硫处理,依靠配料控制

原铁液的含硫量，球化处理前的含硫量约为 0.025 % ~ 0.03 %S，球化后的含硫量约为 0.01 %S，最高不超过 0.02 %S；采用冲天炉 + 电炉双联熔炼，必须进行脱硫处理，脱硫有以下两种方法：

(1) 摇包脱硫 在 INTERMET CO.，铁液从直径 2286mm (90 ) 的冲天炉流入摇包，进行脱硫，脱硫后再倒入 40 吨感应电炉保温，调整成分，然后出铁，进行球化处理。

(2) 连续脱硫 冲天炉的铁液连续流入保温感应电炉用多孔塞吹入  $N_2$  气，同时加入  $CaC_2$  脱硫剂搅拌脱硫，脱硫过程是连续的进行，脱硫后的含硫量为 0.008 %S，脱硫效果良好。但这种方法仅适用于大批量生产。

## 六、球化处理

GREDE CO. REEDSBURG, PA. 是这次唯一见到的采用转包球化处理的铸造厂。转包处理法又称 GF 法，其球化反应速度平稳，提高了镁的吸收率，球化效果良好。镁的用量减少，球化处理前铁液不进行脱硫处理，球化前含硫量为 0.025 %S，球化后含硫量  $< 0.02$  %S。

盖包球化法是除采用 GF 法以外的所有厂都采用的方法，盖包球化法是对冲入法的改进，其优点在于加盖后，包内铁液液面受到一定的气体压力作用，减少了沸腾，提高了球化元素的吸收率，强化了球化效果。另外，蔽住了球化时的闪光，改善了劳动条件，盖包的结构和操作都十分简单，值得在我国推广应用。

除了上述两种球化处理方法以外，还看到了某些球铁铸件采用型内球化处理的方法。由于美国铸造生产中普遍采用陶瓷过滤网或泡沫陶瓷过滤器进行挡渣，因此，少数厂把球化剂放在位于直浇道下部的过滤网上即可进行型内球化。采用此法，球化剂用量少、吸收率高，减少球化衰退；石墨圆整，组织细密，力学性能好，但工艺控制严格，不易普遍应用。

## 七、孕育处理

各铸造厂对选用孕育方法及严格孕育工艺操作十分重视。综合各铸造厂的孕育方法计有随流孕育法、喂丝法、型内孕育法及复合孕育法 4 种。

(1) 随流孕育法 这是主要的孕育方法，被广泛采用。由于浇注是在生产线上进行，多数铸造厂应用塞杆式底注浇注机。随流孕育方法是在浇包底部、铁液出口附近，正对铁液流安置一喷管，用压缩空气把粉状孕育剂吹向浇入铸型的铁液流，孕育剂随流进入铸型内的铁液中，产生孕育作用。由于孕育剂的密度小于铁液，容易漂浮在浇口杯的铁液上面而造成分布均匀性差。但此法简单、容易控制、成本低，所以被广泛应用。值得注意的是，GREDE CO. REEDS-

BURG, PA 对这种方法进行了十分认真地改进，把一根喷管改为互成 120 夹角的两根喷管，同时吹粉，目的是改善孕育剂在铁液中的均匀性。所用的孕育剂为含 1.2 % ~ 2 %RE 的 75Si - Fe。

与美国相比，国内厂家浇注很少采用塞杆式底注浇注机，多数浇注还是手工操作，随流孕育方法是人工控制漏斗的方法，孕育剂的加入量不稳定，均匀性也差。对此，有必要进行改进，设计出适用于手工浇注的随流孕育并简单可行的装置，以提高孕育效果。

(2) 喂丝法 WAUPACA CO. 采用的孕育丝是一种截面六边形的空心薄壁钢管，对边尺寸约为 12mm，管内充满粉状 75SiFeCa 孕育剂。孕育丝由一个安装在浇注机上的专用送丝机构，连续地将孕育丝插入浇包的铁液内，避免了孕育剂漂浮，提高了孕育效果。容易定量控制，易于机械化、自动化操作，但孕育丝成本较高。

(3) 型内孕育法 由于美国铸铁厂普遍采用过滤网挡渣的工艺措施，为型内孕育创造了条件，把孕育块放在位于浇注系统中的过滤网上面即可，采用此法时，孕育元素在铁液内并分布均匀，能够最有效地避免孕育衰退，孕育效果良好。目前，国内已有过滤网商品销售，并逐步被采用，为采用型内孕育创造了条件。对于某些重要的、质量要求高的球铁件，采用型内孕育是提高铸件质量的一个有效措施。

总之，美国各铸造厂对孕育处理是十分重视的，孕育处理工艺控制很严，以保证球铁件质量。特别是这些铸造厂生产的普通球铁件，出厂前大部分是不进行热处理的，因而必须严格控制孕育处理，避免出现白口，影响铸件机械加工。

## 八、检验

### 1. 化学成分检验

(1) 碳当量测定仪检验 为保证球铁件质量，首先要控制球铁的化学成分。美国各个铸造厂生产不同牌号的铸件，不但规定了机械性能指标，而且对化学成分也有规定，特别值得注意的是还规定了 CE 指标，强调 CE 化验。

C、Si 和 CE 的化验属炉前化验，各厂都采用了碳当量测定仪，这是一种炉前快速化验的方法，数据的采集、处理、输出和资料管理，全部由计算机控制，测试的数据用于成分调整。

我国的大部分铸造厂一直以力学性能作为球铁的验收依据，而且只控制下限，认为只要大于一定值就合格。对 CE 的化验在国内绝大多数铸造厂未予重视。这是因为对 CE 的重要性认识不足，缺乏化验 CE 的要求，炉料、炉况不稳定，测量的数据波动大，国产碳当量化验仪器的可靠性差，进口仪器的价格又昂贵等原因造成的结果，从而直接影响了碳当量仪在生产中的应用和推广。

碳当量是影响铸件组织和性能稳定性的一个重要因素。当今,国内外通过大量试验,确定的抗拉强度 $\sigma_b$ 与碳当量CE之间的关系式如下:

$$\sigma_b = a + bCE$$

式中a、b为两个系数,由试验确定。在生产中为获得质量高而稳定的铸件,就必须严格控制CE。

(2) 直读光谱仪检验 成分化验除采用碳当量测定仪以外,美国各铸造厂都采用直读光谱仪,除碳以外,其它成分以直读光谱仪化验数据为准。直读光谱仪要放在紧靠熔化工部附近,直接快速地进行铁液成分化验。每包铁液都取样化验,尽管工作量很大,但都严格按照规定执行,以确保铸件质量。

## 2. 金相组织分析

美国各铸造厂的金相组织分析方法有两种:快速制样光学金相显微镜分析;定量金相仪分析。多数厂采用的是定量金相显微镜,有的铸造厂利用普通光学金相显微镜改装,选配一个摄像头,并与计算机联接,用以进行定量金相分析。定量金相分析结果可以减少操作者主观因素的影响,其结果更加客观可靠。用普通光学金相显微镜改装并不难做到,比较适合我国许多小型铸造厂。

## 3. 球铁件球化率的超声波检验

本文提到的美国铸造厂生产的球铁件,多数是汽车铸件,其中有一些是保安件如曲轴等,为了保证这些球铁件的质量要求,在生产线上要求对这些铸件进行100%的检验其球化率,这种检验只能采用无损检验的方法,考察的各铸造厂都采用超声波检验方法。超声波检验球化率的方法具有简便、快速、不损坏被检测件等特点,该方法还可对铸件不同部位进行检测,从而比较真实地反映出整个铸件的球化情况。这种方法尤其适用于生产大批量相同铸件的检测和分选。WAUPACA CO. 在生产线上共使用了7台美国产NDT超声波检验仪,其中1台可检验14种铸件,另6台检验6种铸件,在克利夫兰铸造厂,看到了用超声检验仪对曲轴进行在线检验。

# 九、计算机在铸造中的应用

## 1. 铸造过程计算机模拟分析或计算机辅助工程(CAE)

考察中看到的计算机在铸造中的应用有:计算机在热分析测试中的应用,在冲天炉熔炼中的应用,在型砂处理控制中的应用;在感应炉熔炼中的应用,在炉温控制中的应用,在散料称量中的应用等等。但是,计算机在铸造中最杰出的应用,具有划时代意义的应用,还是铸造过程的计算机模拟分析或称计算机辅助工程,它表明计算机等高新技术促进传统的铸造工业改造和发展,它的应用使得铸造生产从主要依靠经验走向用科学理论指导生产。利用计算机预测金属

《铸造》1998.9

液充型过程、凝固过程中流场、温度场和应力场;利用计算机进行铸造工艺参数优化设计,从而有效地保证了铸件质量,缩短了生产周期,增加了经济效益。

## 2. CAE进入实用阶段

考察中,几乎在所有铸造厂的设计部门都可以看到对铸件产品应用计算机进行凝固过程的模拟分析和工艺参数的优化设计。例如,福特汽车公司铸锻部,有四组工程技术人员从事铸造CAD/CAE技术工作,其中一个小组从事三维几何造型,一个小组从事充型及凝固过程分析,一个小组专门从事应力场分析,一个小组从事压铸件的CAD/CAE研究。该公司的硬件系统全部配备高功能的工作站,软件为MAGMA及PROCAST,他们认为这两种软件各有特点。又如,DONSCO公司工程技术人员,选用FIDAP铸造模拟软件从事CAD/CAE技术研究。

考察的事实表明,计算机辅助工程应用已在铸造厂的实际生产中开始普及,达到了实用阶段。

## 3. 应用计算机对铸件组织及性能进行预测

福特公司技术人员对一种由锻造钢曲轴改为铸造球铁曲轴的组织 and 性能应用计算机进行的预测,应该说这是一项高技术水平的应用研究。

## 4. 应用模拟分析铸件的热疲劳寿命

福特汽车公司的技术人员利用计算机对气缸盖的进、排气孔交界处的热疲劳寿命进行的模拟分析,预测其热疲劳寿命,这是一项难度很高的应用研究。

# 十、关于等温淬火球铁(ADI)

据介绍,目前在美国和北美等温淬火球铁的年产量为35kt,日本为12kt,欧洲为5~6kt。美国的APPLIED PROCESS CO. 是一个专门对球铁件进行等温淬火处理的工厂,其ADI的年产量为16kt,占美国及北美总产量的45.7%,产品有一千多种,主要产品是载重汽车、轻型汽车及轿车的保安件,工程机械、农业机械及矿山机械上的耐磨件,如发动机的曲轴、凸轮轴、齿轮、吊钩、牵引架、转向座支架等。众多的ADI产品表明,在美国等温淬火球铁这种新型工程结构材料,已从理论及工艺研究进入到实际应用阶段。在美国ADI的产量预计每年以15%速度增长。在球铁总产量中,ADI的产量所占比重不大,但在世界的ADI总产量中,美国及北美所占比例很大,为66%,APPLIED PROCESS CO. 占30%,因此美国是应用ADI领先的国家。

大量的工艺研究成果是ADI应用的基础,在美国对ADI工艺研究投入了大量人力、物力和资金,工艺的研究十分深入和系统。以APPLIED PROCESS CO. 为例,该厂以7000多个试验数据为基础,开发了一个系统工艺软件并获得了专利。应用这个软件,对于一个新的ADI产品,只要输入铸件的重量和壁厚两个参数,就可设计出化学成分、热处理工

艺，并可预测产品的力学性能，大大地减少产品正式投产前的设计和试制周期，加快了投产速度。

在美国，等温淬火球铁（ADI）的生产有非常明确地专业分工，铸件由 GREDE CO.，WAUPACA CO. 和 INTERMET CO. 生产，等温淬火处理由 APPLIED PROCESS CO. 完成。为了保证等温淬火球铁件的质量，APPLIED PROCESS CO. 要求铸造厂提供的球铁件要满足三个要求：严格稳定的化学成分，其中合金元素 Cu、Ni、Mo、Mn 的波动范围为  $\pm 0.025\%$ ；稳定的珠光体/铁素体比例，为此在等温淬火前要进行预处理；石墨球的数量  $> 100$  个球/ $\text{mm}^2$ 。APPLIED PROCESS CO. 为了保证等温淬火处理后的球铁件的质量，他们采取了以下措施：

计算机设计工艺，并按照该工艺进行试制和调整，然后投入正式生产，这样就大大地减少了产品试制周期，加快了产品投产速度；采用专用的等温淬火处理设备。在工艺已经制定的条件下，严格控制工艺对等温淬火球铁件的组织、性能有决定性的意义。等温淬火是一种要求严格控制工艺的热处理方法，工艺参

数的波动对 ADI 的性能高低以及性能的稳定性有重要的影响。因而球铁件在进行等温淬火处理时，应尽可能不采用手工操作，以避免人为的、主观因素的影响，为此使用机械化自动化程度较高的专用等温淬火处理设备是十分必要的，对于 ADI 质量稳定性，设备是关键，这对汽车保安件尤为重要。

APPLIED PROCESS CO. 等温淬火处理所用的热处理炉是 ATMOSPHERE FURNACE CO. 制造的。该设备是一个封闭系统，在该系统内完成奥氏体化加热和保温、等温淬火及保温全过程，并采用可控气氛保护处理，由计算机程序控制、机械化操作，奥氏体化保温的温度波动范围为  $\pm 5^\circ\text{C}$ ，等温淬火槽的温度波动范围为  $\pm 2^\circ\text{C}$ ，在炉内工序转换的时间为 45 秒。由于采用了专用的热处理设备，保证了 ADI 性能的稳定性。这种专用等温热处理设备，国内目前还不能制造，这对于等温淬火球铁（ADI）的推广应用也带来了一定的影响，有待解决。

（编辑：郭桂林）