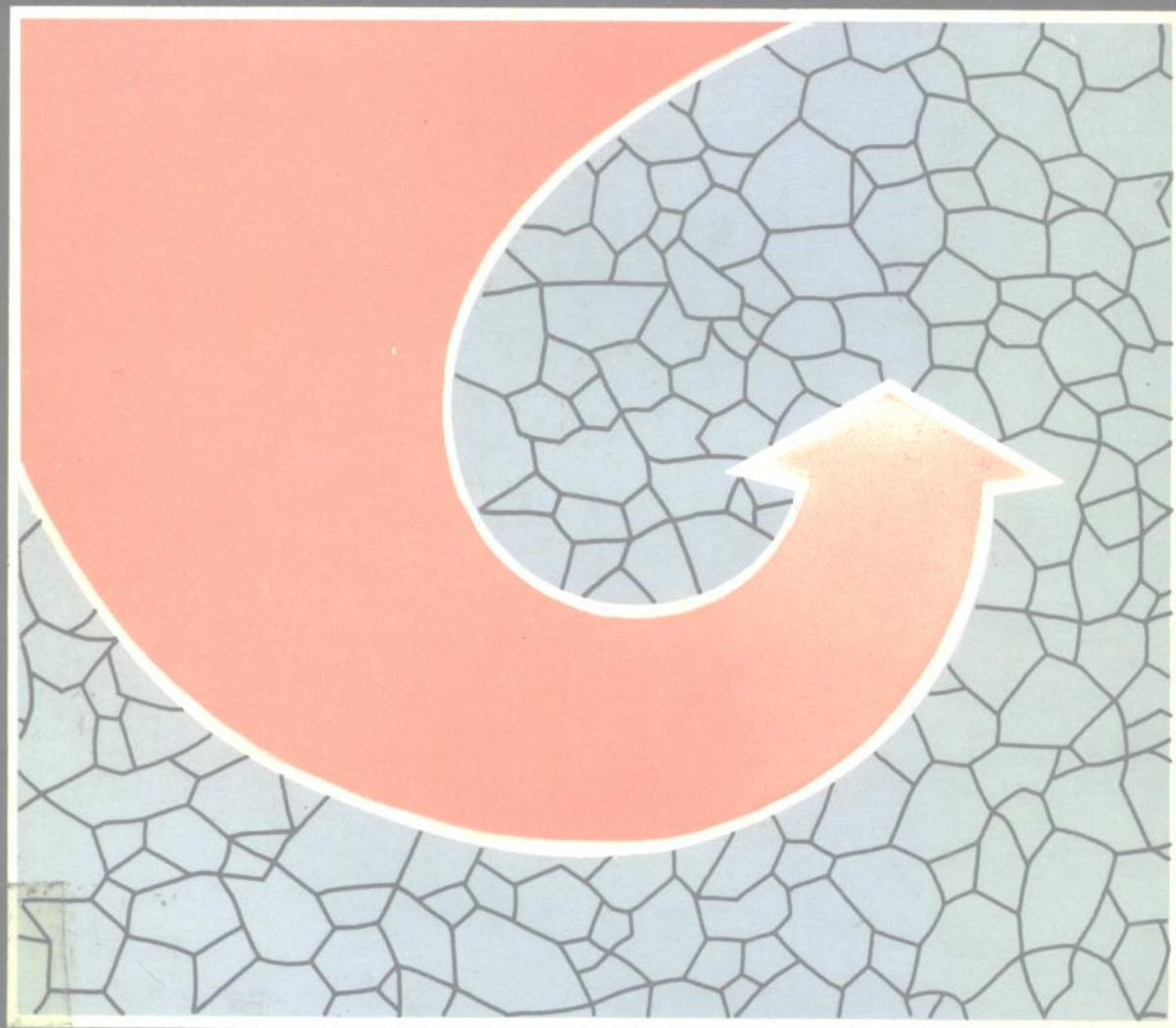


實用金屬材料工藝

PRACTICAL METAL TECHNOLOGY

楊烈宇 等著



大 连 海 运 学 院 出 版 社

实用金属材料工艺

Shiyong Jinshu Cailiao Gongyi

杨烈宇等著

大连海运学院出版社

1989 年 1 月 大连

内 容 简 介

本书是一本面向生产实际的科研成果论文集，它反映了大连海运学院金属材料工艺研究所杨烈宇教授等研究人员的部分科研成果（含获国家发明奖与部、省、市级奖励项目）。主要内容有：耐热球墨铸铁的研制和应用，离子化学热处理与在铝合金上离子沉积硬质膜等工艺的研究及其在水上、陆地、航空发动机、各种其它机械零件和工模具上的应用，钛和钢铁强韧化复合处理在柴油机喷油嘴上的应用，修复材料和修复工艺研究及其在铸铁裂纹扣合和贵重机器零件磨损强化修复上的应用，以及低温新材料的研究和应用等等。

本书各篇基本上代表一个创造性的专题，有具体针对性，内容翔实，数据可靠，工艺成熟，涉及广泛。可供从事材料科学、铸造、热处理、金相检验、金属物理和机械性能测试的科研工作者和在机械、冶金、水运、公路、铁道、航空、国防系统等工业中工作的工程技术人员，以及从事一切机械管、用、养、修方面的专业工作者与高级技术工人阅读，也是高等院校和中专关于金属材料、热处理、铸造、机械设计制造、修理专业师生的一本有益参考书。对于科技情报部门也将是一本必备的技术资料。

实用金属材料工艺

杨烈宇等著

大连海运学院出版社出版

（大连市凌水桥）

大连海运学院出版社发行

大连海运学院出版社印刷厂印装

开本：787×1092 1/16 印张：19.5 字数：486千

1989年1月 第1版 1989年1月第1次印刷

责任编辑：鲁振厚 王铭霞

封面题字：喻志成

封面设计：边峰光 刘之敏

印数：1—2000册 定价：精装 11.50元 平精装 7.00元

ISBN 7-5632-0000-2/T G·1

编 者 的 话

本书是我院杨烈宇教授及其研究所的同志们在金属材料和零件表面强化、修复方面的论文集。全书共25篇。其中“灰口铸铁加钛离子软氮化研究及其在柴油机气缸套和活塞环上的应用”和“4Cr14Ni14W2Mo 奥氏体钢加套低温离子氮碳共渗研究及其在内燃机排气阀上的应用”两篇论文曾获国家发明奖；在铝合金上离子沉积氮化钛铝、无外加热源离子渗碳、镀铁加离子轰击等方面的论文曾在国际会议上发表；其余各篇也是近年来科研成果的总结，大都荣获省、市各级科研成果奖。这些论文的突出特点是理论密切联系实际，注重生产应用实效。据不完全统计，其科研成果投用于生产所得的直接经济效益以亿元计。

论文除具有独特的理论见解外，尤为注重技术和经验的传授，因而能满足广大技术人员对知识之渴求，故深受他们的欢迎和称赞。近年来该研究所创研的离子轰击热处理新技术已输出国外，主要论著已传播到国际学术界，并获得盛誉。离子轰击热处理是金属表面强化的新技术，七十年代中期在国外初露端倪时，杨烈宇教授抓住时机着力研究，并筹建现代化的科研基地，招收硕士、博士研究生，几年来科研硕果累累，蔚为大观。

本书还辑录了杨烈宇教授早期的科研著作。有些论著是他在身处逆境之中所作，当时他不具备科研条件，而是在深入工矿企业，协助解决生产中的实际问题时所进行的科学研究。因而早期论文中的数据多从实践中所得，虽不如现代科学仪器所测的精确，但考虑到仍有实用价值，故一并辑录。

编者水平有限，经验不足，但有本社十余同志的大力协助和作者的密切配合，群策群力，终于使之付梓问世。在此，谨向付出辛勤劳动和给予支持的同志们表示感谢！

由于我们的编辑水平有限，疏漏、错误之处在所难免，敬祈读者批评指正。

编 者

1988年11月

目 录

· 耐热铸铁及其生产工艺 ·

1. 高铝耐热片墨铸铁的冲天炉生产实践杨烈宇 (1)
2. 稀土高铝耐热球墨铸铁的研制.....杨烈宇 (4)

· 钛和钢铁的等离子表面处理 ·

3. 工业纯钛TA 2的离子氮化杨烈宇 (24)
4. 离子软氮化的研究和应用杨烈宇 (35)
5. 灰口铸铁加钛离子软氮化研究及其在柴油机气缸套和活塞环上的应用
.....杨烈宇 杨道正 (66)
6. 4Cr14Ni14W2Mo 奥氏体钢加套低温离子氮碳共渗研究及其在内燃机排气阀
上的应用杨烈宇 杨道正 (109)
7. 低碳钢横机针板离子软氮化工艺的研究李国卿 杨烈宇 (131)
8. 38CrMoA1A 钢离子氮碳共渗工艺研究及其在塑料挤出机套筒螺杆上的应用
.....刘承仁 杨烈宇 (138)
9. 3Cr2W8V 钢模具离子软氮化的研究顾卓明 杨烈宇 (149)
10. 不锈钢2Cr18Ni8W2A 表面深层离子N -C 共渗工艺研究及其在飞机发动机
分油衬套上的应用杨道正 李一力 史雅琴 杨烈宇 (158)
11. 离子N -C 及N -C -Ti 加S 多元共渗的研究
李一力 冯广勤 王富山 杨烈宇 (165)
12. 在普通离子氮化炉中进行离子渗碳工艺研究杨烈宇 刘世永 (175)
13. 丙酮——氨气离子渗碳工艺研究.....李国卿 杨烈宇 (183)
14. 钢铁表面离子镀Cu-Pb 合金固体润滑膜的研究顾卓明 蒋成海 杨烈宇 (188)
15. 铝合金表面离子沉积(Ti-Al)N 膜的研究顾卓明 蒋成海 杨烈宇 (197)

· 复合处理工艺 ·

16. 船用柴油机喷油咀热处理新工艺的研究冯广勤 孙长礼 杨烈宇 (203)
17. 离子氮碳共渗后氮对GCr 15 钢复合处理组织的影响
.....孙俊才 杨烈宇 冯广勤 (212)
18. 低碳钢波形键研究及其在金属扣合修复上的应用杨烈宇 (218)
19. 离子轰击渗扩技术在低温镀铁修复工件上的应用
.....倪 暹 杨道正 杨烈宇 (233)

20. 无刻蚀镀铁新工艺及实用可靠性的研究
.....董玉华 (251)

· 新 材 料 ·

21. 材料科学与材料工程的现状和发展
.....关德林 (260)
22. 低碳 8 % Mn 钢低温强韧化工艺的研究
.....顾卓明 (270)
23. 高阻尼减振材料 Mg—Si 合金的研究
.....关德林 (278)

· 其 它 ·

24. W_6Mo_5CrVa 高速钢真空渗碳淬火的研究
.....马永庆 (284)
25. 中国古代劳动人民在金属及合金应用上的成就
.....杨烈宇 (293)

1. 高铝耐热片墨铸铁的冲天炉生产实践

杨烈宇

在高温下工作的构件，过去主要系采用高镍—铬钢，为了节约镍，近年来研制成功铬—锰—氮钢，但仍然需要稀缺的铬铁和含氮铬铁等铁合金为原料。非镍—铬系的耐热材料如铝—锰—硅、铁—铝—锰等耐热钢，高硅耐热铸铁等又不能满足超过 900℃ 以上的需要。这样，人们便注意到耐热度高达 1100℃，加工性能良好，含 Al 为 20~24% 的高铝铸铁的生产应用。但是为了防止铝对高碳铁水造成的严重石墨漂浮等影响，对这种高铝片墨耐热铸铁的成分一般推荐为：C 1.2~2.0%；Si 1.3~2.0%；Mn 0.6~0.8%；S 0.01~0.03%；Al 20~24%。显然，要在冲天炉内直接控制这种成分是有困难的。因此，国内大多采用焦炭或燃油坩埚炉或感应电炉熔化低碳铁水冲混铝液的方法，辅以其他注意事项进行小量中小件的生产。即使这样，也尚未形成一整套克服裂纹、变形、气孔、偏析、氧化结皮、断面疏松、柱状晶、冷隔、氧化物和石墨夹杂以及金相组织不稳定等缺陷的可靠工艺，因而至今尚未获得大范围的推广生产。

为着重认识以冲天炉铁水生产这种高铝片墨铸铁可能性的规律，我们采取了一系列克服上述缺陷的措施，曾利用 2t/h 密筋炉胆热风酸性冲天炉配上 20~30% 废钢的铁水，进行了对盐浴坩埚和炉底板的生产试验。经过反复实践和认识，终于生产出成分质量合格、使用效果较好的这两种铸件。其中盐浴坩埚经一昼夜煤油浸检，未发现渗漏。这样，使我们增强了对用冲天炉铁水生产高铝片墨铸铁的信心，现介绍要点如下：

第一、保证原铁水质量的措施：(1) 控制配料比，使原铁水成分为 C 2.8~3.5%；Si 1.5~2.0%；Mn 0.6~0.9%；S <0.06%；P <0.1%，经混铝处理后，镇静，捞净析出漂浮上来的石墨，铸件成分都能达到上述推荐成分的要求；炉内降碳措施，加适量 (20~30%) 锈迹少厚度大于 5mm 的废钢；如硫高应有炉内和炉外 (如加 0.5% 烘干苏打等) 脱硫措施，否则会出现较多 Al_2S_3 渣子影响铝分。(2) 控制风量，严禁铁水氧化、含气。(3) 控制出炉铁水温度必须大于 1380℃，一以减少混铝时出现过量氧化渣，二以保证有足够镇静脱碳 (石墨析出) 时间，三以防止冷隔。遇用次焦时的措施，是在层焦上加入不小于 2% 的电石碎块，对提温和脱硫均有效。

第二、保证铝液质量的措施：(1) 尽可能使用 0~3 号的铝锭 (含不小于 99.5% Al)。(2) 固定专用坩埚，严禁混入杂质。操作时用在 400℃ 下干燥 1h 的食盐或 66.5% NaCl+33.5% NaF 的熔剂覆盖下快速熔化，其量为铝液重的 0.5~2%。冲混前再用有孔漏瓢将熔渣刮去。(3) 铝液温度以 750℃ 为上限，以尽量减少吸气，因铝在 680℃ 即开始吸气，其量与温度成正比。(4) 冲混前必须用临时重熔至绿色后凝固，即彻底排出结晶水的干燥 $ZnCl_2$ 以铝箔包好，用多孔钟罩压入脱气。其量干燥天气为铝液重的 0.1~0.15%，潮湿天气为 0.2~0.25%。

第三、保证合金液质量的措施：处理合金液的程序为：（1）将铝液倒入放在磅秤上的赤热浇包内，秤准所需用量（因铝的烧损一般为10~15%左右，取合金总量的25%即可满足含量20~24%的要求）。（2）将出炉经过扒渣覆盖保温草灰的高温铁水缓慢冲入铝液内，充分搅拌，二次用予热钟罩压入 ZnCl_2 脱气、清脏。合金液先因铝的吸热降温，继因铝的强烈氧化放热使温度跃升超过出炉铁水温度，一般约为1450℃左右。此时迅速扒除氧化渣，在覆盖草灰下，第三次用予热钟罩边压入 ZnCl_2 边搅拌合金液，一面使合金液进一步均匀，一面使生成的 AlCl_3 在合金液内的沸腾状气泡迅速上升，把合金吸收的残存气体和氧化物夹渣带至表面，并促使大量析出的石墨上浮，甚至飞出或蹦出（第二、三次 ZnCl_2 用量均为0.1%）。

（3）再次扒渣后，用合金液重的0.2~0.3%的冰晶石粉，在十分干燥和予热到高温条件下，覆盖在合金液表面，随即镇静，取样，待浇。加冰晶石粉的作用在于：①熔解合金液面的氧化膜，使不致在浇注时带入铸件，在1000℃时即可熔解19.77% Al_2O_3 ；②保护铁水不再继续氧化，在大于1101℃时冰晶石将分解出 AlF_3 气体（ $\text{Na}_3\text{AlF}_6 \xrightarrow{\geq 1101^\circ\text{C}} 3\text{NaF} + \text{AlF}_3 \uparrow$ ）

它在1260℃时的蒸气压达到101 325Pa（一个大气压），能阻止空气的浸入；③可使其他夹杂物熔点降低，易与合金液分离；④使合金液表面散热慢，有较长的静置时间，让石墨充分析出上浮，达到脱碳的目的。合金液在静置期间，约每隔2min取样一次观察是否上涨或下凹，稍见下凹，即表示石墨的析出上浮已告終了。一般总的静置时间为10min左右即可浇注。

第四、保证铸造质量的措施：（1）造型用焦粉砂、造芯用焦粉木屑砂全部彻底烘干，使具有良好的透气性、退让性和无水性；（2）采用封闭式底注浇注系统、多层挡渣、设置能全容铸件合金液总量并带浇口堵头的大浇口箱，待倒入合金液停留浮渣后，再拔堵头，使合金液连续平稳进入铸型并快速注完，以最大限度地避免出现氧化夹渣；（3）浇注后5~15min内松箱松芯，至少8h后打箱，以尽量减少铸造应力的危害。

通过试验与生产实践，我们验证了有关高铝片墨铸铁的某些文献数据和生产上的一些必要的认识：

化学成分：一般为C：1.25~2.0%；Si：1.3~2.0%；Mn：0.6~0.8%；P<0.1%；S：0.01~0.03%；Al：20~25%。

金相组织：除粗大片状石墨相外，基体中可能出现其他三种相，即含铝铁素体（ α 相），显微硬度为Hm350~500；铁铝碳复杂化合物（ Fe_3AlC_x ——或称 ϵ 相），呈块状，显微硬度为Hm650~850；三碳化四铝（ Al_4C_3 ——或称K相），一次的呈长方形、多角形或粗长条，二次的呈细长条或针状，显微硬度为Hm850~920。这四种相，因控制成分和生产条件（冷速和偏析等）的影响，可以构成 α +G（石墨）、 α + ϵ +G、 α + Al_4C_3 +G、 α + ϵ + Al_4C_3 +G四种组织，一般地是当有碳化物相存在时，合金硬而脆，适量时热稳定性和热强度则略高。高铝片墨铸铁的断口常呈柱状晶，此时必有大量 Al_4C_3 出现，导致高脆性。

物理性能：密度5.4~6.0kg/m³； $\sigma_b \approx 88.26 \sim 166.7\text{MPa}$ ； $a_k < 9.8\text{J/cm}^2$ ；HB $\approx 170 \sim 240$ 。

铸造性能：熔化温度较普通灰口铁略高，流动性好，1250℃可浇成大件，1300℃可

浇成薄壁件。总收缩率大，约为 1.8~2.2%，长向为 2.1~2.4%，径向为 1.8~2.35%，但液态和凝固收缩不大，一般不出现集中缩孔。氧化和吸气性严重，残留应力和裂纹倾向很大。

合金液的处理损失：用冲天炉铁水冲混铝液后最终可以浇注的合金液中的元素和合金液的损失情况是：合金液总损失为 20%左右；Al 的相对烧损为 10~15%（个别到 20%）；C 的相对烧损为 35~40%；Si、Mn、S 均有减少，而以 S 为最大。

普通高铝片墨铸铁虽有较好的热稳定性，也能用冲天炉铁水冲混铝液铸出铸件，但机械性能太差是其基本弱点。至于理想成分及相应的金相组织之难于控制，易出铸造缺陷，废品率高等等也影响了它的推广应用。

2. 稀土高铝耐热球墨铸铁的研制

杨烈宇

内 容 提 要

本文介绍了稀土高铝耐热球墨铸铁的生产实践、化学成分；探讨了稀土作用及其用量和控制；论述了稀土和铝加入方式以及冷却速度对金相组织的影响；并对铸造工艺、铸铁缺陷及分析、耐热性能与使用效果作了阐明。试验和使用证明：稀土高铝耐热球墨铸铁在 $1050\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 长时间工作不起氧化皮，热强度 800°C 时为 $137.3\sim 186.3\text{MPa}$ ， 900°C 时不小于 130.4MPa ，室温强度近于 HT30-54， $a_k\approx 19.6\sim 58.8\text{J}/\text{cm}^2$ ，锤击铸件或浇冒口，很难碎裂，并能机械加工。可以认为是以我国富产资源为原料，能用各种炉子熔炼、耐热和综合机械性能（特别是韧性）均较高硅、中硅中铝球铁、高铝片墨铸铁为高的一种耐热铸铁，也是镍铬系耐热材料较好的替代品。

一、前 言

高硅耐热铸铁不能满足温度超过 900°C 以上的需要，高硅和中铝中硅耐热球墨铸铁，抗氧化和抗生长性能虽然分别可以达到 950°C 和 1050°C ，但无论常温强度和热强度都很低；特别是常温脆性大（冲击值 $< 2.75\text{J}/\text{cm}^2$ ），甚至在运输中略加碰撞即将碎裂；限制了它们的应用。

铝铸铁具有很好的热稳定性（见图 1），但含铝 $8\sim 18\%$ 的很难进行机械加工（见图 2）。选用耐热度高（达 1100°C ）、加工性能良好、含 Al 为 $20\sim 24\%$ 的成分时，又由于铝对铸铁中含碳的影响（图 3），高碳铁水将发生严重石墨漂浮和在凝固过程中因石墨大量析出体积增大，出现冒口上涨，铸件发泡以及集中石墨夹杂等情况，只能推荐把含碳量控制在 $1.25\sim 2.0\%$ 的范围，这就给在冲天炉内直接控制这种成分带来很大困难。而且即使采用多方面措施可以用冲天炉铁水和用坩埚炉熔化低碳铁水冲混铝液铸出完好的铸件，但其机械性能很差（ $\sigma_b\approx 58.8\sim 166.7\text{MPa}$ ， $a_k < 9.8\text{J}/\text{cm}^2$ ），仍然是个最基本的弱点。至于理想成分及相应的金相组织之难于控制、易出铸造缺陷、废品率高等等，也影响了对这种铸铁的推广应用。

为了改善高铝铸铁的机械性能和铸造性能，几年来我们通过反复实践和认识，研制成功利用冲天炉、坩埚炉和感应电炉单一或联合熔炼配以合理的铸造工艺，成功地、稳定地生产了热稳定性、热强度和常温机械性能都比较满意的稀土高铝耐热球墨铸铁件多种，包括国标各种功率的箱式电炉和实验电炉炉底板、盐浴坩埚、煤气耐热阀部件以及气体渗碳炉和可控气氛炉中的耐热件。 $1050\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 间断工作十个月未起氧化皮， 800°C 时抗拉强度为 $137.3\sim 186.3\text{MPa}$ ， 900°C 时不小于 130.4MPa ，室温下静强度近于 HT30-54，冲击值 a_k 为 19.6

~58.8J/cm²，用大锤锤击浇冒口和铸件本体，很难碎裂，一般硬度为 HB260~292，可以机械加工，似可认为是利用国产丰富资源生产成本不高、综合性能较好的一种耐热铸铁，也是高镍—铬系耐热材料较好的替代品。

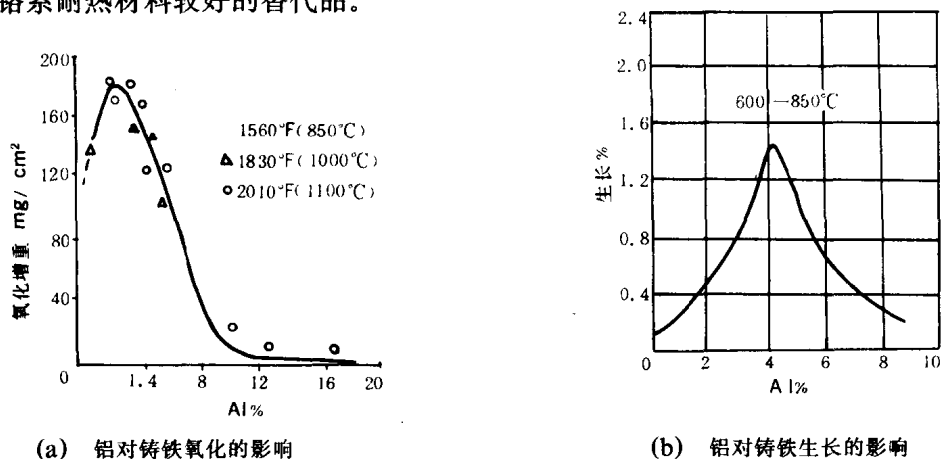


图 1 铝对铸铁热稳定性的影响

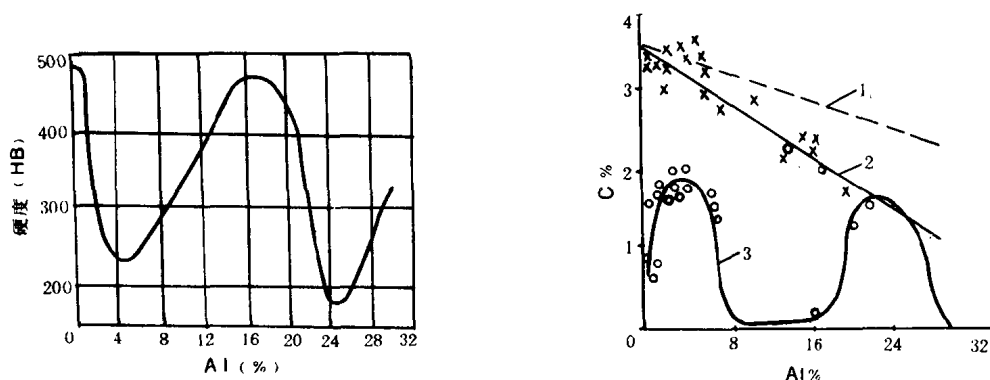


图 2 铝对铸铁硬度的影响

1. 铝作用下理论含碳量
2. 铝作用下实际留存含碳量
3. 铝作用下的石墨含量

图 3 铝对铸铁含碳量的影响

二、生产实践方法及典型结果

在生产实践中用带有前炉的 2t/h 密筋炉胆热风酸性冲天炉一座，KGPS100-1 型 150kg 容量可控硅中频感应炉一座，燃油坩埚炉两座，作为熔炼设备。冲天炉铁水温度 1380~1420℃，中频炉铁水温度控制在 1520℃，坩埚炉熔铝温度要求不大于 750℃。

稀土是选用成本较低、来源较易的包钢稀土硅铁合金，即 1 号合金。我们实际大量使用的是 1 号 2 级，其成分及有关性能见表 1。

表 1

稀土合金的成分及有关性能

品种名称	代号	品级	化学成分 (%)							密度 g/cm ³	熔点 ℃	来源
			Re	Si	Ca	Mg	Ti	Al	Fe			
稀土硅 铁合金	1# 稀 土	2	20.53	40.95	3.84~4.32	微量	1.03~1.08	<0.1	21~27	约 4.7	约 1082 ~1089	包钢
		2	20.5~21.5	38~40						同上		包钢
		2	24.65	43.89	0.55	0.68	1.37			同上		包头东风钢铁厂

铝用含大于 99.5%Al 的 0~3 号铝锭，生铁选用含锰较低的本溪、鞍山、大连产的 Z15、Z20 或炼钢生铁。辅助用料有低碳废钢和 75 硅铁。

因使用设备以及加铝加稀土方式的不同，总的获得稀土高铝耐热球墨铸铁的方法，分为冲天炉法，冲天炉—中频炉双联法和中频炉法三类。

(一) 冲天炉法

1. 先冲稀土，后冲铝：原则是铁水温度较低，冬天散热快，或者铁水用量少用液态稀土，反之，用烘干的合金粒（5~10mm）。先放在红热的包底，然后将所需铁水按量冲入搅拌、静置、清脏，用草灰覆盖保温备用。

冲铝的操作顺序是：将热包放磅秤上→倾入 Al 液称重至计算量→用预热多孔钟罩将铝箔包好的干燥 $ZnCl_2$ 压入脱气→徐缓冲入已处理好稀土合金的铁水→用预热工具充分搅拌→扒渣→覆盖草灰→再用 $ZnCl_2$ 脱气→扒渣→用干燥冰晶石粉覆盖→静置→取样→清脏→覆盖草灰→浇注。

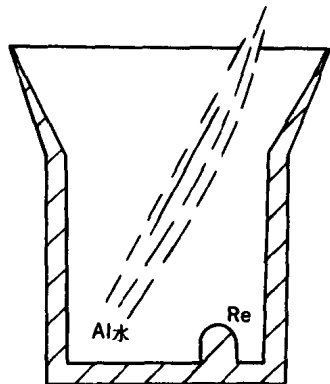


图 4 铝和稀土同时冲混示意图

以上总的处理时间不得超过 12min，以免出现球化衰退。

2. 稀土和铝同时冲混：选用液态或固态稀土合金的原则同前，但需要处理的铁水量大时，便可在包底筑坝，将铝液和稀土分装堤坝两边（图 4）同时进行冲混。其余程序同第一法。

3. 先冲铝后压入固态稀土：原铁水含碳过高，出炉温度在要求的上限，可先冲铝使铁水析出部分石墨而脱碳。趁铝氧化反应放出大量热将铁水温度提高时，快速扒渣，随即将充分预热的稀土合金粒压入包底，充分搅拌，达到稀土被吸收，发挥稀土球化石墨和抑制石墨发泡的作用。其他手续同前。

(二) 冲天炉—中频炉双联法

此法用高温低碳中频炉铁水与冲天炉铁水混合后进行加铝处理，其主要优点是：可以

保证原铁水有更高的温度 ($>1420^{\circ}\text{C}$) 以及容易控制含碳量和其他成分。

基本配比为: 中频炉低碳铁水 (30%废钢+46%生铁) 配足其余需要量的 HT20-40 冲天炉铁水, 外加定量的 1 号稀土合金和铝量。

稀土和铝的加入及总的处理方法有两种:

1. 在中频炉内将铁水过热到 1500°C 后, 加入铁水总量 (包括应混入的冲天炉铁水之和) 所需的稀土合金。快速提温到 $1520\sim 1540^{\circ}\text{C}$, 放出铁水与冲天炉铁水混合, 作为原铁水, 然后进行冲入铝液的操作。

2. 先将预热好的 $2/3$ 的应加稀土粒放在铁水包内, 用过热到 $1520\sim 1540^{\circ}\text{C}$ 的中频炉铁水冲入后, 再混足冲天炉铁水覆盖草灰搅拌, 然后把热至 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ 的铝锭压入铁水中熔化、搅拌、扒渣, 再将其余预热好的 $1/3$ 稀土压入搅拌并使之充分排气后, 清脏、覆盖草灰。

(三) 中频感应炉法

在中频感应炉内熔炼, 有成分掌握易、温度高并便于炉前控制、调整成分处理回炉料等优点。在 300kg 以下的铸件, 我们均用此法生产。按铝及稀土加入方法的不同, 分两种处理工艺:

1. 炉内全程处理: 即先将钢铁原料投入炉内熔化过热至 $1500\pm 20^{\circ}\text{C}$ 后, 加入铝锭, 最后将 1 号稀土合金粒加入, 待到全熔翻腾一、二分钟匀化后, 便停电出炉浇注。

(在炉内加铝的缺点是因为铝的比重轻, 要占去大量容积; 生产能力很低。)

2. 炉内熔化铁水, 炉外加稀土和铝: 操作程序是: 将中频炉过热到 1520°C 的铁水, 冲入放有预热好的 $2/3$ 稀土合金粒的红热包内, 搅拌后加盖草灰, 再将预热到 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ 的铝块插入熔化, 在草灰下再次充分搅拌, 然后将其余 $1/3$ 预热, 并用纸包好的稀土用钟罩压入、搅拌, 留渣静置 2—3min, 测试温度降到 $1420\sim 1380^{\circ}\text{C}$ 时, 取样、浇注。(本工艺较前一种工艺提高生产能力三倍, 是生产小件的最基本处理方式。)

(四) 典型结果

铸件均在干砂型中铸出, 并同时在干砂型中铸出抗拉试棒 ($\phi 20\times 150$ 及 $\phi 30\times 150\text{mm}$)、抗弯试棒 ($\phi 30\times 360\text{mm}$) 和无缺口冲击试块 ($12\times 12\times 55\text{mm}$)。直径和厚度公差为 $\pm 0.1\text{mm}$, 超差者作废, 然后进行试验, 其典型结果见表 2。

根据文献资料对比稀土高铝耐热球铁与片墨高强度铸铁抗拉强度的数据如表 3。

室温和高温硬度数据如表 4。

表 2 几种典型铸件的成分、组织及机械性能对照表

铸件名称	处 理 方 法 ①	化 学 成 分 %						金 相 组 织	机 械 性 能			
		C	Si	Mn	S	P	Al	残余 Re ^②	σ_b MPa	σ_{bb} MPa	a_k J / cm ²	HB
耐热阀体	冲天炉铁水→冲 2.3%1 号合金→冲 25%铝	2.70	2.10	0.59	0.0238	0.068	21.85	0.101	274.6	493.3	38.2	278
耐热阀盖	冲天炉铁水+已加 2%1 号合金中频炉铁水→冲 25%铝	2.24	1.615	0.58	0.0112	0.081	21.625	0.088	295.2	608.0	44.1	288
炉底板 (45kW)	中频炉铁水+24%铝+1.2%1 号合金	2.10	1.344	0.427	0.015	0.076	22.32	0.034	296.2	632.5	60.0	282
炉底板 (45kW)	中频炉铁水→冲 1%1 号合金→加 24%铝块→压入 0.5%1 号合金	2.04	1.64	0.372	0.0145	0.0785	22.48	0.107	308.9	620.8	67.7	260
炉底板 (60kW)	同上	2.05	1.23	0.332	0.0135	0.057	22.5	0.115	294.2	627.6	60.8	285
炉底板 (75kW)	同上	2.03	1.275	0.494	0.125	0.084	22.37	0.105	292.2	592.3	63.7	277
耐热阀门口	冲天炉铁水+已加 2%1 号合金中频炉铁水→冲 25%铝	2.06	1.88	0.70	0.026	0.0388	21.86	0.120	287.3	529.6	28.2	292
耐热阀盖	同上	2.12	1.72	0.521	0.021	0.065	22.15	0.112	295.2	513.9	30.4	290

① 中频炉铁水配料均为 46% 生铁(Z15、Z20) + 30% 废钢。

② 因 Al 对稀土的干扰，化学分析可能有误差，数据仅供参考。

表 3

项目 温度 材质	抗拉强度 (MPa)					
	20	200	400	600	800	900
高强度铸铁	305.0	424.6	370.7	298.1	131.4	86.3
稀土高铝球铁	>294.2	—	—	—	142.2~186.3	>130.4

表 4

试样号 温度℃	硬度	维氏硬度 (Hv ₃)		
		1 号	2 号	3 号
室温*		241*	247*	269*
650		186.06	186.06	188.58
700		143.30	144.80	141.90
800		72.00	74.60	72.00
900		29.30	29.10	28.70
1000		12.70	12.40	12.30

* 室温检测铸态试块采用 29.4kN 负荷测得的 HB 值。

三、化学成分、稀土用量及其控制

据资料和我们的实践,高铝片墨铸铁的金相组织,除粗大片状石墨相外,基体中可能出现其他三种相,即含铝铁素体(α 相),显微硬度为 Hm350~500;铁铝碳复杂化合物(Fe_3AlC_x —或称 ε 相),呈块状,显微硬度为 Hm650~850;三碳化四铝(Al_4C_3 —或称 K 相),一次的呈长方形、多角形或粗长条,二次的呈细长条或针状,显微硬度为 Hm850~920。这四种相,因控制成分和生产条件(冷速和偏析等)的影响,可以构成 α +G(石墨)、 α + ε +G、 α + Al_4C_3 +G、 α + ε + Al_4C_3 +G 四种组织。一般地是当有硬脆的 ε 相、 Al_4C_3 相单一或同时存在时,将使此种铸铁的机械性能降低,加工性能变坏,随它们数量的增加,终致出现高硬高脆性,而以 Al_4C_3 相的影响更严重,量多时还伴随出现柱状晶断口。

显然改善金相组织,从而在保持和提高耐热性能的前提下,获得较佳的机械性能,其主要途径应在于:①使石墨球化、细化并合理分布以减少对基体的破坏作用;②控制基体为单相的铝铁素体(α),最大限度地排除 Al_4C_3 相和 ε 相的存在;③尽可能使晶界净化以提高冲击值。

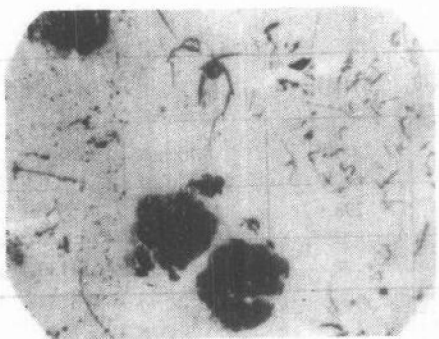


图 5 2.70%C,2.10%Si,21.85%Al,0.69%Mn,
0.023%S,0.068%P,0.101%残余 Re,100%冲天
炉生铁水加 2.3%1 号稀土合金。(与耐热阀体同铸
试棒上取样)400×, 15%硝酸酒精腐蚀

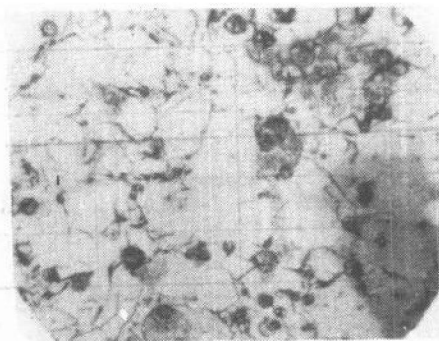


图 6 2.19%C,1.615%Si,21.25%Al,0.58%Mn,
0.011%S,0.0818%P,0.088%残余 Re,冲天炉与
中频炉铁水混合后处理加 1.5%1 号稀土合
金。(与盐浴坩锅同铸试棒上取样)
400×,15%硝酸酒精热腐蚀
(照片中的直线是制片磨痕)

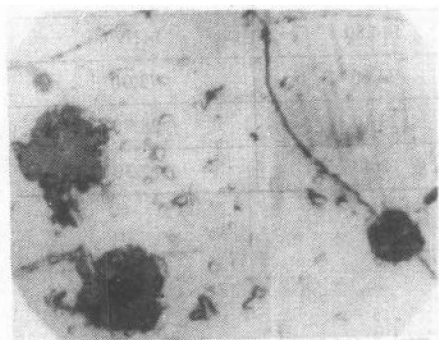


图 7 2.10%C,1.344%Si,22.32%Al,0.427%Mn,
0.015%S,0.076%P,0.034%残余 Re,中频炉内
熔炼加 1.5%1 号稀土合金
(与气体渗碳炉炉栅同铸试棒上取样)
400×, 15%硝酸酒精溶液热深腐蚀

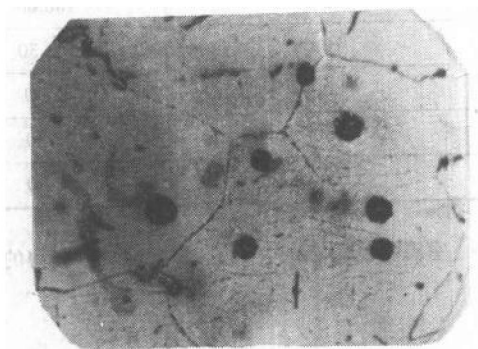


图 8 2.04%C,1.64%Si,22.48%Al,0.37%Mn,
0.0145%S,0.078%P,0.107%残余稀土 Re,中频
炉炉外处理加 1.5%1 号稀土合金。
(炉底板上取样)400×,15%硝酸酒精热腐蚀

图 5、6、7、8 便是我们实践把高铝片墨铸铁改造为稀土高铝耐热球墨铸铁的典型组织，即铝铁素体 (α) + 球墨 + 细片石墨。除了一些辅助的生产条件之外，它们主要是靠控制化学成分和稀土加入量来决定的。

(一) 关于铝量的确定

铝是一个强烈的石墨化元素，如图 3 所示，高铝铸铁是处于第二个石墨化区域内 (20~26%Al)，它的存在最终还将使铸铁中的碳量大大减少，具体数据是：含 20%Al 时， $C < 2.5\%$ ；含 30%Al 时， $C < 1\%$ 。文献指出：含 25%Al 时，共晶 $C \approx 1.6 \sim 1.7\%$ ；同时含 Si 高时，则溶碳更少。可见 Al 的成分应当与 C、Si 含量相配合，才能避免出现石墨漂浮。

资料和我们的试验证明：当铝铸铁中加 1~1.5% 的 1 号稀土合金，含不大于 20%Al

时, 出现大量 ε 相 (图 9), 机械性能明显下降。($\sigma_b \approx 208.9\text{MPa}$, $\sigma_{bb} = 454.0\text{MPa}$, $\text{HB} > 300$)。

含 25%Al 时, 有较多 Al_4C_3 相出现 (图 10), 也导致机械性能降低 ($\sigma_b \approx 262.8\text{MPa}$, $\sigma_{bb} = 500.1\text{MPa}$, $a_k \approx 23.5\text{J}/\text{cm}^2$, $\text{HB} = 298$)。

含 27%Al 时, 将在除铁素体基体外, 大量满布 Al_4C_3 相 (图 11), 机械性能很低 ($\sigma_b \approx 152.0\text{MPa}$, $\sigma_{bb} = 274.6\text{MPa}$, $a_k \approx 18.1\text{J}/\text{cm}^2$, $\text{HB} \approx 365$), 并伴随有柱状晶断口, 质地硬而脆。

由此可见, 只有得到较为理想的金相组织, 才能得到较优的机械性能和加工性能。Al 的成分还应与稀土的加入量配合考虑。在上述稀土加入量的范围内, Al 的成分应以 21~24%为宜。文献的推荐和我们的实践都证明了这一点。图 8 便是我们生产的箱式电炉炉底板的典型组织 (铝铁素体+球墨+细片石墨), 其机械性能为 $\sigma_b = 308.9\text{MPa}$, $\sigma_{bb} = 620.8\text{MPa}$, $a_k \approx 67.7\text{J}/\text{cm}^2$, $\text{HB} \approx 260$)。



图 9 1.98%C, 1.68%Si, 20.16%Al,
0.343%Mn, 0.058%P, 加 1 号稀土
合金 1.5%

400×, 15%硝酸酒精热腐蚀

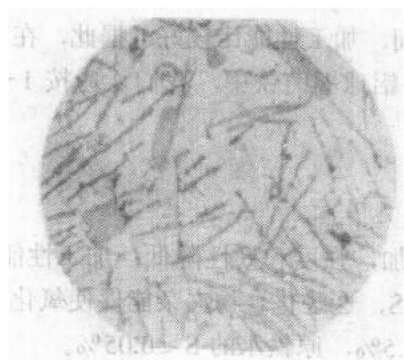


图 10 2.01%C, 1.8%Si, 25.4%Al, 0.49%Mn,
0.094%P, 0.02%S, 加 1 号稀土合金 1.2%

600×, 15%硝酸酒精热腐蚀



图 11 1.81%C, 1.23%Si, 27.5%Al, 0.7%Mn,
0.02%S, 0.05%P。加入 1 号稀土合金 1%

600×, 15%硝酸酒精热腐蚀

显然只有在适当改变 C、Si 含量和 1 号稀土合金的加入量时, 才能变动 Al 的这一成分范围。为了节约用铝, 我们是按 21~23%掌握的。

(二)关于碳和硅量的确定

碳也是一个石墨化能力很强的元素, 在普通高铝片墨铸铁生产中, 根据铝的含量, 要求限制 C 在 1.25~2%范围内, 以防止石墨漂浮。我们在冲天炉铁水试验时, 利用较长时间