

特殊钢生产技术的发展

译文集

(1)

冶金部钢铁研究总院

1999 年 12 月

序 言

近年来我国钢铁工业获得飞速发展,并于1996年突破1亿t大关。当前,我国钢铁工业正面临新的形势,向着调整品种结构、节能挖潜、改善质量、降低成本、提高产品竞争能力的方向发展。众所周知,特殊钢领域在钢铁工业中占有重要地位。

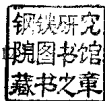
为了配合我国特殊钢行业及时了解国外同行业的发展情况,结合市场需求开发新产品、调整特钢产品规格、建立有竞争性的生产线,并为“十五”期间制定设备更新和技术改造计划提供有价值的参考,钢铁研究总院根据国家冶金局的部署,组织有关专家进行了严格选题,从90年代以来近2000余篇特殊钢文献中精选出有代表性的文章48篇,涉及到不锈钢、耐热钢、结构钢、弹簧钢、轴承钢、工具钢、模具钢等各类钢的生产技术和品种质量,译文总字数约35万字,附有近400张参考图。该译文集反应了当前世界特殊钢领域的生产水平和发展趋势,为国内特殊钢行业领导、管理部门、科技工作人员及特殊钢用户全面、系统地了解国际先进水平提供了有价值的技术资料。该译文集对制定我国特殊钢行业的中长期规划、促进我国特殊钢工业的发展、加强国际合作以及参与世界特殊钢市场的竞争,将起到预期的参考和借鉴作用。

由于时间仓促,在收集和编译本文集过程中,肯定有不妥之处,其中错误也在所难免,希望广大读者予以批评指正。谢谢!

王玉琨赠书

钢铁研究总院《特殊钢生产技术的发展》译文集编辑部

1999年



合金钢新流程系统工程 及软件集成课题组成员

组 长： 翁宇庆

副组长： 杨树森

成 员：	刘嘉禾	王建英	赵先存
	兰德年	张宝琛	谢建国
	葛钦明	王剑志	范广举
	侯树庭	陈宝荣	文 武
	刘 宇	刘羽率	刘来君
	王力民	戴建明	康喜范
	东 涛	高 怀	董 瀚

《特殊钢生产技术的发展》译文集目录

· 综 述 ·	页 码
1 特殊钢的发展	1
2 特殊钢生产的展望及炼钢技术的进步	7
3 特殊钢条材轧制和锻造技术的进步	14
4 特殊钢的控轧和控冷技术	19
5 特殊钢棒线材的精整技术及二次加工技术的进步	24
6 汽车用结构钢的发展趋势	29
7 工具钢的现状和发展趋势	35
8 轴承钢的发展动向	42
9 特殊钢分析技术的进步	46
10 延迟断裂性能评价方法和耐延迟断裂高强度钢的开发	50
11 日本特殊钢行业的发展	55
 · 不锈钢 ·	
1 不锈钢技术的进步及今后的展望	57
2 采用 VOD 精炼高纯净度不锈钢	66
3 川崎钢铁公司生产优质不锈钢的热轧技术	69
4 船舶用高强度不锈钢 (YUS304N、YUS170、YUS350) 的开发	75
5 高纯铁素体不锈钢的冲压性能	81
 · 耐热钢 ·	
1 耐热钢的进步及其支撑科学	87
2 计算机在新钢种开发中的应用	93
3 低合金耐热钢的高强度化和焊接材料	96
4 锅炉用 12%Cr 钢管 (HCM12) 的高温性能	102
5 稀土对耐热钢高温性能的影响及其机理的研究	107
 · 结构钢 ·	
1 非调质钢的最新动向及材料开发的思路	113
2 转向齿条用高强韧性非调质钢	117
3 汽车用齿轮材料的发展动向	122
4 易切削钢	125
5 从钢铁材料的生产技术分析渗碳钢的现状与未来	127
6 简化生产工艺的特殊钢棒线材	132
7 新型耐候钢	139

• 弹簧钢 •

1 弹簧钢的发展动向	140
2 汽车悬架弹簧钢的发展	149
3 改善疲劳特性的弹簧钢的开发	154
4 超纯净弹簧钢	159

• 轴承钢 •

1 航空轴承与齿轮合金	164
2 无铝轴承钢	167
3 中温轴承钢	171
4 轴承钢中夹杂物特征的在线检验	176
5 最新轴承钢的发展动向	179

• 工具钢 •

1 高速钢钢坯的连铸技术	185
2 SKD11 型冷作工具钢强韧性的改善	190
3 高淬透性高速钢 MH88 的开发	195
4 高硬度高耐磨粉末工具材料 DEX81	199
5 温锻工具用的抗蠕变材料	202
6 热加工用工模具材料与技术	

• 模具钢 •

1 模具钢的发展和未来	208
2 模具钢发展概况及中国的对策	214
3 模具使用寿命的预测	218
4 热作模具钢的进展	221
5 新型热作模具钢及其生产技术	225

特殊钢的发展

渡边 敏幸 等

摘要 近 10 年来,特殊钢市场受其它行业的影响,发生较大变化。首先,市场国际化要求特殊产品优质,向多功能化、高强度化、耐腐蚀化方向发展。在改善产品质量的同时,要求节省能源、降低生产成本,并尽可能减少生产工序。

本文就合金结构钢、弹簧钢、轴承钢、不锈钢、工模具钢、耐热钢等的发展现状和今后需要解决的课题,结合实例进行概括性介绍。

1 结构钢

1.1 表面硬化钢

对齿轮等的渗碳部件,除了要求高强度外,还要求减少变形和改善加工性能。针对这些要求,进行材料的开发。为了开发出高强度齿轮钢,采用的基本方法有降低磷等不纯物含量;降低硅、锰含量使渗碳异常层变薄;添加镍、钼使韧性得到改善。采用喷丸硬化,可大幅度提高强度。

随着冷锻工艺的普及,进行了改善加工性和降低成本的材料的开发。对于冷锻加工钢,为了延长模具寿命,防止锻造开裂,通常要进行球化退火处理和退火处理。但是,为了省略这些软化热处理,应该减少硅、锰等合金元素的含量,可将硬度降低到和轧制状态下进行软化处理的钢材同等程度的 75 H_{RC};而且,还开发出添加钼使淬透性能得到改善的冷锻表面硬化钢,已用于轿车的差动齿轮。这种钢如图 1 所示。和已有的表面处理钢相比,具有非常高的韧性。因此,可以作为不使用镍等合金元素的高韧性表面处理钢。而且,对这种钢进行球化退火处理,其硬度可下降到 65HRC,能够制作形状复杂化的冷加工部件。

作为表面处理钢的品质课题,有晶粒的粗大化和渗碳后的变形。在渗碳部件上发生的晶粒粗大化,不仅降低部件的强度,还引起局部变形;为了防止晶粒粗大化,在高温下,使碳氮化物颗粒细小均匀地分布于基体中,是有效的方法。钢中除了添加钼之外,还可添加铌和钒,使钢中析出氮化物和碳氮化物。SCr420 钢和在该种钢中添加微量钼的钢,进行 70% 的冷加工后,在各种温度下加热,晶粒粗化与加热时间的关系示于图 2。可以看出,在同样加热温度下含钼钢晶粒粗化的加热时间,是 SCr420 钢晶粒粗化加热时间的 3 倍以上。

此外,除了防止晶粒粗化之外,还可以从钢材的制造方面入手研究降低变形。以前,从降低变形的观点出发,多半注重化学成分的严格控制等;而现在,尝试采用垂直园型铸坯的连续铸造。用这种方法铸造时,由于钢坯的断面是园形的,因此,比从前的矩形断面的连铸钢材,可减少成品断面内的成分偏析;还可减轻部分变形,从而省略了研磨工序。

1.2 高频淬火钢

高频淬火热处理,便于实现连续化。在汽车部件的热处理中常常采用。现在,主要用于中碳钢,但也开发了用硼改善淬透性的钢,同时减少硅、锰等合金元素,使冷锻性得到改善,成为冷锻高频淬火钢。

随着高频淬火技术的进步,材料的开发也在不断进行。在一般的高频淬火热处理时,使用从几千 Hz 到

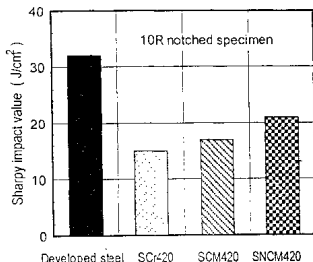


图 1 开发的钢和通常的硬化处理钢的冲击性能

几万 Hz 的频率,但是,使用 10 万 Hz 以上的频率和 500kW 以上的高功率,从 0.1 秒到 0.3 秒的超快速加热,沿着部件的轮廓进行淬火的高频轮廓淬火技术,已被开发。用从前的高频淬火处理法处理小尺寸的齿轮时,齿轮全部硬化,使疲劳强度和韧性下降。但是,开发的高频轮廓淬火技术可望用于小型齿轮的淬火。

高频轮廓淬火处理,因为加热时间极短,若基体中含有多量铁素体,在奥氏体化时,碳不能充分扩散,淬火后出现硬度和组织的不均匀现象。因此,现在使用中碳钢的调质材料。但是,为了改善切削性和耐蚀性能,研究了珠光体型的高频轮廓淬火钢。图 3 中比较了高频轮廓淬火齿轮和渗碳齿轮的疲劳强度。图中示出的添加钒的钢,热锻后空冷,内部硬度为 300HV;另一方面,热锻后进行正火处理,内部硬度降为 220HV。如图 3 所示,高频轮廓淬火齿轮,具有和渗碳齿轮同等的疲劳强度,特别是添加钒的钢,进一步提高了疲劳强度。而且已经确认,这两种钢比 SCr420 渗碳齿轮具有更高的韧性。高频轮廓淬火时,加热并淬火的表面层厚度仅达 1mm,因此,热处理变形小。这一点比渗碳齿轮优越,适于制作齿宽小的齿轮。而且,高频轮廓淬火的齿轮,比较氮化齿轮具有较高的强度。因此,可以期待今后会增加高频轮廓淬火的应用范围。

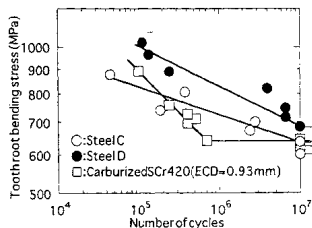


图 3 高频淬火齿轮和渗碳齿轮的疲劳强度

(□)普通渗碳齿轮, (●)高频淬火齿轮

面,也进行了进一步降低中碳非调质钢价格的试验:不含钒的热锻中碳钢,也成功地用作曲轴。碳当量的控制和热锻条件的适当选择,使热锻后硬度比较稳定,是这种钢实用化的关键。调节碳含量在 0.15 ~ 0.25% 范围,并添加锰、铬和钼等合金元素,在热锻造后的空冷中,生成贝氏体。这种所谓贝氏体型的非调质钢已被研究、开发。贝氏体型非调质钢,不能用作采取高频淬火制成的部件,但是,即使冷却速度较慢,也具有较高的韧性。这一特征适于制作要求韧性的大型部件,因此被用于制作卡车的驱动轴等部件。

碳含量控制在 0.1% 以下,在热锻后直接水冷,使形成贝氏体和马氏体组织的锻造淬火型钢材,也已实用化。因为不进行回火,可以认为是一种非调质钢。锻造淬火型非调质钢,即使硬度为 30HRC,也具有约 200J/cm² 的高冲击值,因此被用于制作转向节轴;其贡献是在于省去热处理。转向节轴从前是用强韧钢制作的。

1.4 弹簧钢

为了悬架弹簧的轻量化,开发并应用了成分为 0.4C-2.5Si-2Ni-0.8Cr-0.4Mo-0.2V 的高强度弹簧钢。最近,

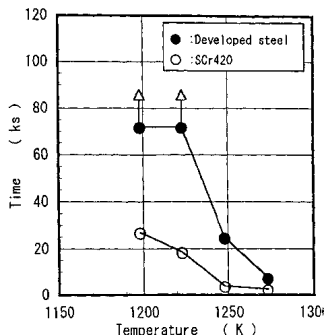


图 2 钢种和加热温度对异常的晶粒成长的影响

1.5 非调质钢

中碳钢中添加微量钒的非调质钢开发以来,约已有 20 年历史;现在,这种钢作为产量大的结构钢,占据着重要的地位。近年来,开发出韧性高的非调质钢,并已获得应用。关于中碳的铁素体-珠光体型的非调质钢,由于增加锰和铬的含量,促进晶粒内铁素体的生成,并选择最合适的热加工条件等,已开发出了提高韧性和疲劳强度的钢材。图 4 (略) 示出了 1.1Mn-0.5%Cr 钢中碳和钒含量对硬度和冲击值的影响。由图可知,随硬度的上升冲击值下降,加钒比加碳的韧性下降程度要小些。因此,增加锰、铬和钒含量的非调质钢,被用于连杆和转向齿条等部件,发挥了削减调质费用的效果。另一方面,

还开发出强度处在这种钢与 SUP7 之间的弹簧钢。图 5（略）比较了其中两种钢（图中的高强度弹簧钢 Steel A 和 B）和 SUP7 钢腐蚀后的疲劳强度。Steel A 和 B 显示出优良的强度。特别是高强度弹簧钢具有极优的切口冲击抗力，被用作轿车的钢强度悬架弹簧。

1.5 螺栓钢

汽车用的螺栓中，要求各种强度，但是，10.9 级以上的螺栓，通常使用 SCM435 等低合金钢。螺栓几乎都是用冷加工方法制造的，所以，作为前处理的球化退火等热处理是必要的。但是，为了省去这种软化处理，开发出了 10.9 级螺栓用的硼钢。在主成分 0.25C-1.0Mn-0.3Cr-B 中，由于控制 Si、P 和 S 含量，因而降低了轧制状态下铁素体+珠光体组织的硬度；加入微量硼，防止了淬火加热时晶粒的粗大化。图 6（略）中比较了硼钢和 SCM435 钢的拉伸强度与延迟断裂强度比之间的关系。由图可知，它具有与 SCM435 钢同等的性能。

1.6 易切削钢

钢的强度和易切削性，存在相反的特征。一般随着强度的提高，存在易切削性下降的倾向。但是，易切削性是部件加工时最重要的特性。为了改善易切削性，进行了各种各样的开发。现在，硫易切削钢、铅易切削钢和钙易切削钢等是易切削钢的主流；从切屑的破碎性和使用工具的耐磨性等选定材料。

近年来，从环保的观点出发，开始开发不含铅的易切削钢。例如，采用 6 方晶体的氮化硼的 BN 易切削钢，以及将硫易切削钢作为基本钢，加入钙控制硫化物、氧化物形态的易切削钢等。

2 轴承钢

2.1 概要

关于轴承钢，在本世纪初确立的高碳铬轴承钢（JIS SUJ2，SAE52100），现在还是作为主流使用。图 7 示出了用于轴承的钢铁材料消费情况。高碳铬轴承钢的比率，在近 10 年间几乎不变，但是，其制造方法有较大的变化。

2.2 制造方法的改善

用连铸法大量生产高碳铬轴承钢，1983 年开始用于制造轴承钢的外圈和内圈。用于制作滚动体（辊柱、滚珠、滚针）时，因中心偏析，质量不理想，应用较晚。但是，由于连铸技术的革新（垂直型式，轻压下技术等），1995 年开始更大量地生产。现在，日本 80% 的高碳铬轴承钢是用连铸法制造的。

生产棒材和线材时，采取精密轧制（尺寸公差 $\pm 0.1\text{mm}$ ）的方法，因此不仅改善了棒材的表面质量，还省略了扒皮（表面切削）工序；生产线材时，可省略粗拉工序、直接进入二次拉丝模。

轴承内、外圈的制造方法，也由以往的圆棒切削的生产方法，改为使用管材，通过热成形和冷轧成形的组合加工方法。已经考察了由圆棒精密成形的加工方法。这种方法简化了加工工序，并降低了加工费用。

2.3 高性能、特殊环境用的轴承钢

2.3.1 高洁净轴承钢

日本国内各轴承钢制造厂，由于原材料的管理，精炼脱气和连铸技术的开发，改善了轴承钢的洁净度，因而提高了轴承的转动疲劳寿命。以便盘驱动用的轴承为代表，高精度微型轴承的滚珠，有必要降低旋转时的噪音。因此，已采用夹杂物进一步微细化的钢材。

2.3.2 特殊环境用轴承钢

（1）准高温用的轴承钢

随轴承转动速度的提高，研究了耐温度上升的准高温用（200℃以下）的材料。与 SUJ2 相比，这种材料中添加了更高的硅或钒、钨。

（2）耐蚀轴承钢

要求耐蚀性的场合，从前主要使用 SUS440C，但是，存在因一次碳化物引起的噪音问题。最近，通过低碳高氮化，开发出耐蚀性和噪音低的马氏体不锈钢。

轴承被用于产业机械的各个部门，随着用途的多样化，对特殊环境用的轴承钢的需求，今后会进一步扩大。

3 不锈钢

3.1 高性能不锈钢

3.1.1 高氮不锈钢

为了提高不锈钢的强度、耐蚀性，确保韧性和生物用无镍化等目的，积极开发高氮不锈钢。在 1988 年召开第一次高氮钢国际会议，在 1998 年召开了第五次会议，进行了世界规模的高氮钢开发和研究。关于高氮钢的制造方法，有大气熔炼铸造法、加压熔炼铸造法和粉末固化法等。在大气熔炼铸造时，有必要确保钢水中氮的溶解度，并抑制凝固时组分的吹失。用加压熔炼铸造时，这些制约得到缓和，成分的自由度变大，还可以增加氮的添加量。

图 8 示出了高氮不锈钢开发的年代和含氮量。在氮固溶量大的奥氏体镍-铬系钢中，用大气熔炼铸造法，已开发出含 0.5% 氮的钢种。图中 RS561(0.02C-6Mn-10Ni-23Cr-2Mo-0.5N)，是大同特殊钢公司开发的钢种，其加工性也是良好的，可加工成棒、线和冷轧带等；如图 9（略）示出的那样，它具有接近双相不锈钢的强度以及与从前的超低碳不锈钢同等的耐蚀性。

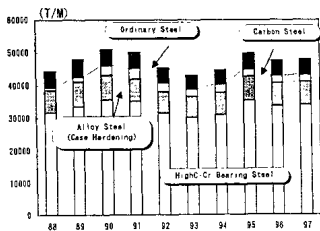


图 7 在日本轴承钢的消费量

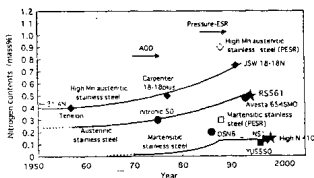


图 8 不锈钢中最高氮含量的历史变化

以欧洲为中心，进行加压熔炼铸造钢材的开发。用加压电渣精炼法开发出含近 1% 氮的锰-铬系无镍不锈钢，一部分已实用化。

马氏体系不锈钢强度高，但耐蚀性比奥氏体系不锈钢差。正在开发用氮置换碳，保持强度、提高耐蚀性的高强度耐蚀钢。采用大气熔炼铸造法时，在凝固过程中，容易发生氮的流失，氮的添加量有一定的限度。已经开发出由于添加氮使耐蚀性提高的高氮 410 钢（0.16C-14Cr-1Mo-0.12N）。采取加压熔炼铸造法，用氮大幅度置换碳，已开发出具有和 SUS304 同等耐蚀性的钢种，并开始用于高价的、特殊用途的高耐蚀轴承。

3.1.2 高耐蚀易切削铁素体系不锈钢

（1）对镍过敏症的表带用易切削不锈钢

着眼于从前一般使用的 AISI316F 的无镍铁素体系易切削钢。

开发的 RS466（0.01C-0.2Mn-0.2S-20Cr-2Mo）是不含铅的硫易切削钢，但锰比从前的添加量低，其特征是 Mn/S 比变小。在这种情况下，成为腐蚀起点的硫化物的金属组成，由锰变成以铬为主体，使硫化物本身的耐蚀性接近母相，因此，提高了耐蚀性（图 10 略）。

（2）硬盘驱动用易切削不锈钢

硬盘驱动的盘心部位，使用通用的 SUS430F 和 DSR6F（0.01C-1.2Mn-20Cr-S、Pb、Te）。但是，在钝化处理时，以及在高温湿润的环境中，随着硫化物的溶解，存在因放气使铜和银的接线与接点差的问题，因此，要求改善易切削性及能克服放气的钢材。DHS1(19Cr 系)和 DHS2(20Cr-2Mo 系)是避免放气的钢材。钢材的特性示于图 11（略）。采用上述的降低 Mn/S 比的方法，抑制了硫化氢的发生。DHS1 是解决通常的 SUS430 钢放气的材料；DHS2 进一步改善了耐蚀性，所以是解决 DSR6F 钢放气的材料。因为材料

自身的耐蚀性极优，所以使用时不必进行钝化处理。

3.1.3 超洁净不锈钢

从材料中放出气体造成污染的半导体制造装置以及真空机械部件，已经使用由真空熔炼等特殊精炼法制造的超洁净不锈钢。采用电渣精炼、真空精炼等特殊精炼技术，生产出高水平的超洁净不锈钢，达到了近乎极限的洁净度；其 C、N、O 和 H 等含量，分别是 60、65、5 和 1.6ppm（图 12 略）。

而且，用于印刷线路的金属丝网，是用直径 20 μm 的不锈钢超细丝制成的。为了拉拔细丝到直径 20 μm ，而且不断线，成为断线起点的夹杂物尺寸必需控制在细丝直径的 1/2 至 1/3 以下。上述超洁净不锈钢符合这一要求。

3.1.4 高强度弹簧用不锈钢

制作弹簧用的不锈钢，一般是用 SUS304 的硬丝，但是，在特殊环境下使用时，要用具有 SUS304 以上的强度和 SUS316 以上的耐蚀性的高强度高耐蚀性弹簧钢。这种钢中含有氮和铌；氮可提高强度和耐蚀性；生成的碳氮化铌可使晶粒细化。

3.2 土木建筑用不锈钢

土木建筑是使用能够耐长时间大气暴露的高耐蚀不锈钢。在近十年里，除了应用从前的 SUS444 和 447J1 外，还使用奥氏体体系的不锈钢 SUS317J4L 和双相 SUS329J4L 两种高耐蚀高强度不锈钢。作为钢结构材料用 SUS304 等钢，其材料的衔接采用 SUS630 制作的高强度紧固件。而且，上述的高氮不锈钢 RS561 也可望用于海滨环境的土建用钢。

3.3 改善冷加工性的不锈钢

同结构钢相比，不锈钢的冷加工性能较差。为了降低加工费用，对以前的钢进行各种各样的改善。特别是奥氏体体系不锈钢，加工硬化倾向大，冷加工较为困难。对于冷轧 SUSXM7 钢，把 N + C 减少到 0.02% 程度，就能省去线材的中间拉伸一退火工序。这是降低费用的一个实例。

在 SUS630 钢的基础上，降低碳含量和适当平衡 Nb-N 的含量，可显著提高冷加工性能，即使不进行时效处理，在同溶处理的状态下，也可以进行冷加工。前面提到的高强度紧固件和传感器的高强度部件，可用冷锻法加工，今后还需开发钢板用途。

在中碳马氏体系不锈钢中，降低固溶强化元素硅，而且调整其中的 C-Cr 平衡，抑制一次碳化物的生成，可提高球化退火状态的断裂临界值，并降低变形抗力。开发该钢的实例有 CAM 钢（0.47C-0.2Si-10Cr）、EX50 钢（0.53C-0.2Si-10.5Cr-0.4Mo）和 DSR7 钢（0.7C-0.4Si-11.5Cr）。

4 模具钢

4.1 冷作模具钢

冷作模具钢中，12%Cr 系的 SKD11 是主流。但是，目前在确定韧性优良的高温回火型 8Cr 系钢。由于钢丝放电加工的普及，以抑制加工变形为目的，高温回火型钢种的优点已被充分发挥。由于高速化、自动化和高精度化等成形技术的进步，以及针对被加工材料的不锈钢化、高强度化，采用减少一次碳化物的方法，使韧性得到提高，因此，延长模具寿命的希望不会落空。

另一方面，象已被指出的高温回火型材料的缺点那样，在用于精密传递型设备等场合，和从前的 SKD11 低温回火型钢相比，长期使用后的变化较大。由于高温回火，微量残存的奥氏体不稳定，而且与马氏体回火引起的变化发生重叠。这种情况与钢种无关，是高温回火特有的现象。补加低温处理或稳定化处理，大体上可以解决。

粉末系材料也开始用于冷作模具。因为碳化物细小、均匀，切削性和耐破碎性优良，热处理变形小，因此，DEX20 和 40 等粉末高速钢材料已被用作冷锻模具。而且，在模具钢系列中，提高钨的含量，均衡耐磨性和韧性，使综合性能更为合理的钢种，也已被开发出来。

高性能模具材料和模具制造技术还在不断发展，铸钢模具是一个例子。由于铸造成初步的形状，省略了模具的加工工序，因此，在冷压用的模型中，火焰淬火用的铸钢得到有效的利用。最近，还开发出改善耐破

裂性和热处理变形的模具钢系铸钢，不仅用于金属板的挤压，而且可望今后用途会扩大。

仅在模具的刃口部位，用火焰加热淬火的火焰淬火钢，在近 20 年一直采用。但是，为适应近年的小批量需求，从缩短交货期的观点出发，开发出了改型钢。

由于切削工具和高速切削技术的进步，以及高硬度加工机器的增加等，也对超过 50HRC 的高硬度钢的切削加工进行了试验。

4.2 热作模具钢

主要用于制作汽车部件的压铸铝合金用的压铸模具，由于铝合金的高强度化压铸等铸造技术的进步，以及制品外观品质的提高等，希望模具应该具有较高的性能。压铸模具最大寿命的决定因子是热裂。耐热裂性能优良的 5Cr-3Mo 系钢材正在被确定下来。这种钢提高了贝氏体的淬透性，确保大型材料回火后的韧性，而且由于洁净化，因此提高了耐热裂性。

对于大型的热作模具，为了确保韧性，在淬火冷却时，应尽量急冷。为了减少变形，最近还开发出保持与从前钢同等韧性，但变形更小的热处理方法。此方法可将变形量减少 1/2，节省模具加工工时 30%。

马氏体时效钢由于相变点低，在使用中表层附近发生奥氏体转变，耐热裂性差。最近，根据镍含量的试验，开发出提高相变温度的马氏体时效钢，可以省略淬火，减少变形，并可缩短生产周期。此外，热挤压模具和温锻模具，已选定抗软化性能优良的 3Cr 的 SKD7 系材料；热挤压铝的模具，采用淬透性和高温强度比 SKD61 更高的新材料。

关于热作模具的热裂问题，根据共同研究进行了基础分析，明确了热裂发生的机构、化学成分的影响、组织因子的影响等。

4.3 塑料模具钢

在模具的总产值中，塑料模具占最大的比例。近年来，根据树脂和制品的种类，开发出各种各样的模具材料。实际上，使用了从碳素钢系到耐蚀钢和马氏体时效钢等多种材料。到目前为止，中、小型模具，使用以 NAK 钢为首的易削性和镜面性优良的 40HRC 系钢材。

对比之下，汽车和家电用的大型材料，从前分别使用 S50C 系的碳素钢、JIS SCM440 和 AISI P20 等强韧钢。最近，根据市场需求，开发出了大幅度改善易切削性和可焊性的低碳系塑料模具钢。例如，代替 S50C 的 30HS 钢，和代替 PXZ 以及 30HRC 强韧钢的 PZ5 等。

随着信息机器的发展，需要采用高强度、高镜面模具用钢。为了确保镜面，需要 53HRC 以上的硬度。而且，为了减少非金属夹杂物和抑制偏析，已经使用重熔钢材。

模具的冷却是精密模具的重要课题。从前，这些模具的阴模曾使用 S50C 等钢，但为了防止生锈，冷却很难充分。对此，开发并采用 35HRC 级的 16Cr-1Mo 钢。

4.4 高速工具钢

高速工具钢（以下简称高速钢）被用于切削工具和模具。首先，从切削工具的观点分析，作为切削加工高速化和保护环境的对策，应采用干式切削；根据加工方法的变化，模具的高硬度化以及被加工材料的变化，为了得到较高的切削性能，从采用现有的高速钢，向粉末高速钢，进而向硬质合金转化。粉末高速钢，同样可以采用弥散硬化，并通过添加特殊元素、洁净化、表面处理等方法，进行性能的改善。已开发出用作立铣刀的粉末高速钢 10Cr-5 系，进行 TiCN 和 TiAlN 的复合表面处理，可望延长寿命。

高速钢淬透性较差，但随着真空热处理的普及，在真空炉中，用气体冷却，开发出十分硬的高淬透性的高速钢 MH88。在 6bar 大气压力下淬火时，即便在 $\phi 300\text{mm}$ 的中心，回火后的硬度仍能达到 64HRC 以上，抗弯力也比 SKH51 高，可期待用于难加工材料用的冷作模具和温作模具。

粉末高速钢也用于挤压模具、切削刀具、钻头；用于冲孔、冲切、冷压、热锻、冷挤压模具等的数量也在增加。特别是作为模具使用时，为了提高韧性和强度，开发出马氏体钢系的粉末高速钢。

5 耐热钢

5.1 汽车用耐热钢

在汽车中，用于高温的发动机阀门和排气系统的部件，要使用耐热钢。

在进气阀门钢中, 广泛使用节约铬的 HR28 (Fe-0.5C-1.8Si-5Cr)。这种低合金化的潮流进一步发展, 在部分车辆中, 已经使用 SNB16(Fe-0.4C-0.3Si-0.5Mn-1Cr-0.6Mo-0.3V)和不加铬的 SAE1547(Fe-0.47C-0.23Si-1.5Mn)钢。在排气阀门钢中, 从改善以前的 SUH35(Fe-0.55C-9Mn-4Ni-21Cr-0.45N)的高温疲劳强度考虑, 开发了添加铌、钨的 21-4-3 系(Fe-0.5C-9Mn-4Ni-21Cr-2.2Nb-1.2W-0.5N)钢。另一方面, 为了代替高价的高强度的镍基高温合金 Inconel 751, 开发并应用了以大量铁代替镍的高强度 Fe-Ni 基奥氏体析出强化型耐热钢 NCF4015D(Fe-42Ni-16Cr-2.65Ti-0.85Al-0.8Nb)、NCF3015D(Fe-32Ni-16Cr-2.65Ti-1.10Al-0.8Nb)。特别是以 Fe 置换 Ni, 会析出 η 脆化相。但是, 在这些钢中, 适当控制 Ti/Al 比, 即使在假想苛刻的发动机试验的 800 °C 和 400h 长时间加热后, 也能抑制 η 相的析出, 确保了高温疲劳强度等良好的特性。

排气部件逐渐不锈钢化, 开发出用 Nb 和 Mo 改善热疲劳强度的 SUS444, 被用于排气管; 耐高温盐蚀优良的含 3%Si 的 SUSZM15J1, 用作软管。而且, 在高温部位, 用 SUH660 作高温螺栓; 还开发、应用针对高温化的高强度 RS308(Fe-25Ni-16Cr-3.5Ti-0.35Al-0.6Nb)钢、以及价格便宜的 RS307(Fe-20Ni-11Cr-2.75Ti-0.25Al)钢。从前的 SUH660 在高温中因为析出脆化相 η , 因此使用的上限温度是 650 °C, 但是 RS308 可使用到 700 °C。

5.2 发电机用耐热钢

为了提高发电效率, 用超超临界压蒸汽发电(主蒸汽压力 240MPa/566 °C 以上), 已开发出可在 600 °C 使用的锅炉和涡轮机材料。

铁素体系耐热钢中, 用 W 替换 M。可大幅度提高蠕变强度。已开发出作为代表的锅炉钢在 600 °C $\times$ 10⁵h 蠕变断裂强度达 140MPa (第三代)级的 NF616(Fe-0.07C-0.06Si-9Cr-0.5Mo-1.8W-0.2V-0.05Nb-0.004B-0.06N)钢; 作为涡轮机用钢, 已开发出 600 °C $\times$ 10⁵h 蠕变破断强度为 230MPa 级的 TAF650(Fe-0.11C-0.01Si-11Cr-0.2Mo-2.6W-3.0Co-0.2V-0.08Nb-0.015B-0.02N)等钢种。

奥氏体系耐热钢被用于锅炉过热器、再热器管。已经开发出适当调整了 AISI321H 中 Nb 和 Ti 含量的 Tempaloy A-1(Fe-0.12C-0.6Si-10Ni-18Cr-0.10Nb-0.08Ti)钢以及利用奥氏体相中富铜相的析出强化的 Super304H(Fe-0.10C-0.2Si-3Cu-9Ni-18Cr-0.4Nb-0.1N)钢。

5.3 高铝铁素体系耐热钢

要求在 1000 °C 以上具有优良抗氧化性能的电热线, 以及汽车的触媒换能器的金属蜂窝, 是用高铝铁素体系耐热钢作成的。这些部件由于形成氧化铝保护膜, 确保了抗氧化性。

电阻高的高性能电热线 FCH1(Fe-24Cr-5Al), 加工性较差, 从前卷重至多仅 300kg, 但是, 由于改善了钢锭和钢坯的热处理等工艺, 可生产出单重 1t 的盘卷。

在性能方面, 添加稀土类元素, 可改善钢材的抗氧化性。为了提高抗氧化性, 增加铝含量是有效的, 但不易加工, 因此采用添加微量 La、Ce 等稀土元素和添加微量 Y 的方法, 改善钢材的抗氧化性。

吴文森摘译自《电气制钢》, 1999, 70, No. 1, 43 ~ 62; 王玉砚校

特殊钢生产的展望及炼钢技术的进步

富山 卓山

1 前言

1950 年以后日本钢的总产量和特殊钢产量的变化如图 1 (略) 所示。由图可知, 随着日本经济的高速发展, 钢产量有了惊人的增长, 但 1973 年的石油危机后, 其发展势头就完全停止了, 徘徊在年产 1 亿 t 左右的状态下。

另一方面,如果看一下特殊钢产量的情况,第一次石油危机后,受汽车业及机械产业增长的影响,自80年代开始各特殊钢厂都大幅度地增加投资,扩大生产能力,一直到1985年都保持了顺利增长的势头。但是,以后由于遇到日元升值以及1991年以后的泡沫经济的影响,1991年达到2024万吨/年的峰值后就停顿,处于低迷不景气状态。

近10年来特殊钢的趋向是由扩大产量到追求质量的变革时期,也就是说面对以汽车业为中心的高质量,低成本的市场需求,各公司都面对产量上不景气的背景下,大力确保成本的市场竞争力,进入了实现最佳生产工艺及新技术的开发研究时期。本文主要介绍近10年间的炼钢技术方面的进步,最近的技术动向以及今后的展望。

2 冶炼、精炼技术的进步

表1列出了我国电炉炼钢的发展过程。

电炉炼钢随着炉子的大型化、采用超高功率(UHP)操作、富氧喷碳粉技术等,另外电炉自身操作工艺的进步,以及以LF为代表的钢包精炼炉的导入,推进了电炉冶炼功能的分工等的技术开发和进步,电炉的生产能力获得了很大的提高,操作工艺也获得了极大的改善。

2.1 冶炼技术

LF炉导入以后,电炉功能变成了熔化废钢、氧化脱磷了。为了进一步节能,提高生产率,又热衷于新设备,新工艺的开发研究,先后开发成功直流电弧炉炼钢新工艺、新技术、EBT出钢方式的采用,底部气体搅拌,电炉废气余热的有效利用等,加上原有电炉的高效技术,电炉的节能效果、生产能力获得了进一步提高。

表1 电弧炉炼钢的技术进步

	1950 ~	1960 ~	1970 ~	1980 ~	1990 ~
炉容量	50t (18.75MVA)	70t (20MVA) 80t (25MVA) 200t (40MVA)		130t DC炉	150t DC炉
UHP 变压器		Dr. W. E. Schwabe UHP 计划 120t (0.35MVA/t) 70t (0.8MVA/t)	70t (0.6MVA/t) 120t (0.5MVA/t) 60t (1MVA/t)	85t (0.8MVA/t) 80t (0.9MVA/t) 130t DC炉 (0.8MVA/t)	150t DC炉 (1.2MVA/t)
炉体 结构	旋转炉盖 炉顶装料 感应搅拌 AC/DC电炉转换	炉端的水冷箱 二次水冷电缆 的三相平衡	斜电极 水冷炉盖	EBT DC炉	A1导电臂 全钢型 双炉型 竖炉
电极控制装 置	直流功率放大器 控制	用SCR原电压控制 涡流耦合控制		VVVF矢量式控制 液压式控制	
辅助设备		连铸机 DH脱气 RH脱气 油烧嘴	电炉配套用 VOD、AOD、LF 等精炼设备	特殊钢连铸机	VCR
操作	氧气精炼		富O ₂ -C喷吹 操作	底部气体搅拌	热装铁水
节约劳动力和 自动化	熔剂和合金 供给系统	最佳功率控制系统 熔剂和合金自动 加料系统	自动分析 电极自动连接装置 在线计算机炼钢	最佳动力 估算法	水冷枪

2.1.1 直流电弧炉

传统的交流电弧炉(AC炉)随着大型化、大功率化,闪烁和炉壁的热点变成了大问题。另一方面,近几年可控硅整流器或二极管的快速进步,极大地支持了DC炉的开发研究,DC炉作为解决AC炉存在的问题

的手段,十分引人注目。本公司于1990年在星崎厂的旧钢厂中,进行了15t DC炉的开发研究,根据其试验结果和国内各公司引进的DC炉生产实践来看,DC炉具有降低闪烁和电极消耗、电弧电流流入钢水的电磁搅拌作用,使热能集中在炉子中心,确保废钢的快速熔化等特点。现在由于炉底电极获得了高寿命、高可靠性,该技术可以说已经完全成熟。

另外,DC炉由于炉子上方有足够的空间,在其上方可容易地安装竖炉式予热装置,预计今后DC炉将成为电炉炼钢的发展主流。

2.1.2 底部气体搅拌

底部气体搅拌是通过装在电炉炉底的喷嘴,将Ar或N₂吹入钢液中,用以防止残留未熔废钢,使钢液温度和成分均匀,促进反应,提高合金收得率等目的的技术。电炉的条件下,为了从冷废钢到完全熔化为止进行吹气,喷嘴的寿命、最优化气体吹入的条件等尚有待解决,另外,由于熔池深度低,搅拌效果不好,引入该技术较晚,1980年末才被实用化。

本公司知多厂在冶炼不锈钢的电炉上,采用了底部吹气搅拌,取得了提高合金收得率、生产效率和降低吨钢电耗的效果,此外,还证实了由于防止残留废钢,可缓和冶炼钢种的限制和促进大块废钢熔化的效果。

2.1.3 新电炉工艺

电炉废气的有效利用是电炉节省的对策之一。1970年石油危机以后,利用电炉废气斗式废钢予热装置获得(SPH: Scrap Preheater)实用、普及,但是,由于料斗的热变形,使用寿命及切屑等的沾结等问题,导入的废气温度的上限受到制约,这样就得不到十分理想的予热效果,另外,存在冒白烟,恶臭等环境问题,现已基本不使用了。

在这种背景下,通过废钢的高温予热,最大限度节能为目的的新型电炉的开发、实用化正在全世界展开。如双炉座、竖炉等类型,其特点都是与电炉直接连接的预热装置。

本公司成功开发在DC电炉的上方安装其多段式的预热装置(MSP: Multistage Super Preheater)的多段式竖炉。图2为多段式竖炉的示意图。MSP由上下2室的预热槽构成,各槽与熔炼电炉间具有托住废钢的水冷钢板制成的可动式机械手。除了刚装入的几分钟外,几乎整个操作过程都实施预热,可以对各种轻、重废钢等都实施预热。

另外,由于在炉子上方的直接预热,获得了极高的预热效果,据实际生产的结果,废钢预热效果达到降低电耗80KWA/t, Tap-Tap达到50min/炉。

2.1.4 其它

最近,位于炼铁厂内的电炉为适应原料、电力需要或价格的变动,使用高炉铁水的操作已经实用化。随着铁水使用比的增加,使吨钢电耗降低,可以说使传统的电炉具备转炉功能,使电炉钢的生产可以降低熔炼电耗,提高生产率,减少钢中夹杂物,它是电炉炼钢的新尝试、十分引人注目。

2.2 精炼技术

电炉的特殊钢冶炼工艺自从LF出现后,发生了很大变化。LF炉外精炼不仅使产品高级化,同时有利于提高电炉的生产能力以及同CC工序间的匹配调节,1982年本公司的知多厂作为大量特殊钢的工艺率先引入了AF-LF-RH-CC(ELVAC)工艺,投产以后,本复合精炼工艺被各公司所采用,作为大量生产特殊钢工艺一直采用直至今天,近10年是该工艺提高、完善的时期。为了适应高洁净度的需要,对操作工艺

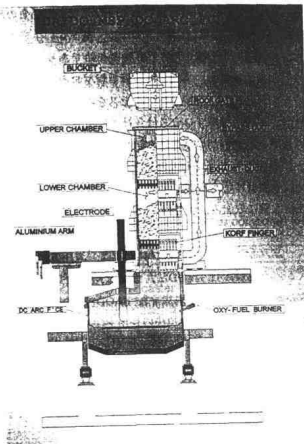


图2 大同特殊钢公司MSP-DC电炉炉示意图

进行了改善,可满足轴承钢为代表的高质量产品的生产。

其次,不锈钢精炼工艺中将普遍采用真空下进行吹 O_2 脱C的VOD法,用吹入Ar等惰性气体稀释 O_2 进行脱C的AOD法。近几年开发成功将其二者的优点在一个精炼炉可以实现的AOD-VCR (Vacuum Converter Refiner)法。

2.2.1 轴承钢的质量改善

为了使轴承钢获得高度的可靠性,要求延长其转动寿命并提高稳定性。氧化系夹杂物采用轧制也不变形,在与基体间会产生间隙,成为应力集中源,引起剥离。为了减轻其影响,降低氧含量、细化夹杂物是重要的途径。

图3示出了本公司轴承钢的纯净度和转动寿命改善的状况。LF炉导入以后,[O]含量减低至10ppm以下,转动寿命稳定,达到了 10^7 级。其后,随完全去除前工序的渣,合适的耐火材料,无污染的浇注技术上的进步,[O]含量进一步减低,现在达到了6ppm的水平。

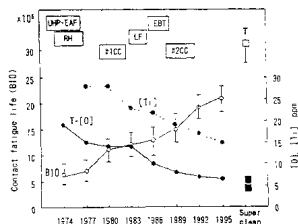


图3 大同特钢公司生产SUJ2轴承钢的冶炼工艺随时间的变化及轴承疲劳寿命同O、Ti含量的关系

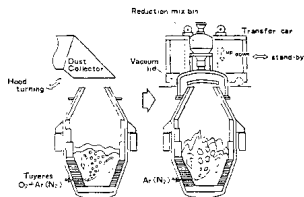


图4 知多厂VCR设备示意图

转动寿命随低[O]化、低[Ti]化而提高,实行超纯净精炼处理后的转动寿命提高到 3×10^7 。现在,围绕着完善的夹杂物的细化、数量的减少、性能的改善为目的的精炼-浇注技术进行开发研究。

2.1.2 不锈钢新的精炼法 (AOD-VCR法)

AOD法作为大量生产不锈钢,拥有极优良的性能,但由于在大气下精炼,存在极低碳范围的脱碳问题。为此,AOD增设了减压精炼功能,一面采用AOD的强搅拌的特征,一面在减压下不吹 O_2 ,利用溶解氧及渣中的氧化物等,获得了在低碳范围改善脱碳功能的方法,此法是AOD-VCR法。本法在本公司涉川厂20t AOD炉上开发,应用成功后,知多厂的大型生产设备(70t)也获得成功。

图4示出了知多厂的70吨VCR设备示意图。原来的AOD设备上,装备了其减压精炼的功能。AOD容器的锥体周围设有水冷法兰,由上方将移动式真空盖合上,内部就可实施减压操作。

图5表示出奥氏体系不锈钢采用AOD法和AOD-VCR法生产的典型精炼模式。AOD-VCR法,C到10%左右是采用通常的AOD法的稀释气体脱C,相当于AOD法的第4阶段时,只用惰性气体(Ar或 N_2)的搅拌减压处理,获得最终目标[C]。

作为VCR法的精炼效果,低C范围内的脱C速度与AOD法相比,提高2倍以上,与AOD法比,还原剂Si的单耗、Ar单耗有了大幅度的降低。由于处理时间的缩短,对提高生产率、降低生产成本作出了巨大的贡献。另外,与AOD相比,短时间内容易实现极低C、N含量,即使没有VOD设备,极低[C+N]不锈钢的生产也是可能的。

本公司知多厂1991年引入本工艺,现在不锈钢月产量达到15,000t,1995年本公司的星崎厂的炼钢厂完全停产,将不锈钢的生产完全移到了知多厂,完成了不锈钢生产部门的合理调整。

3 连铸技术的进步

与传统的模铸法相比,连铸法的最大优点是生产率高。特殊钢领域如何提高连铸比,是作为提高工厂的活力,提高市场竞争力的重要手段,成为各企业第一位的课题。

为了提高连铸比,一方面当然是力求连铸作业的稳定化。尤其是特殊钢,关键是获得满足产品特性的质量保证。换言之,相对传统的模铸,特殊钢连铸应如何克服连铸坯所具有的质量上的缺点,这已经成为近几年连铸化技术的最重要的焦点。

其次,连铸法与模铸法相比,要克服成本上的弱点。在多品种、小批量为主流的特殊钢领域里,最大限度地抓住连铸化的优点以适应小批量的技术开发被各公司指定为近几年的课题。

3.1 连铸化技术

1980年本公司在国内率先将特殊钢专用的大钢坯 No. 1 连铸机设置在知多厂,以后在电磁搅拌等当时世界上最先进技术驱动下,有力地推动了特殊钢的连铸化。1992年在知多厂设置了圆形断面的完全立式型的大钢坯 No. 2 连铸机。No. 2 连铸机与 No. 1 连铸机的参数比较汇总于表 2。

表 2 No. 2 CC 与 No. 1 CC 主要参数的比较

	No. 2 CC	No. 1 CC
型 号	立式圆钢坯连铸机	弧形巨形坯连铸机
能 力	57,000t/月	60,000t/月
流 数	4	2
尺 寸	φ350mm	370mm × 510mm
铸机长度	25.3m	29.5m
铸机高度	43.5m	16.8m
弧形半径	—	16.5m
大包容量	80t	80t
中间包容量	20t	20t
拉 速	0.65m/min	0.8m/min
电磁搅拌器	结晶器和一流	结晶器和二流
二次冷却	气雾混合喷嘴	喷水和气雾混合
中间包加热	等离子加热器	—
轻压下装置	2个压下辊	—

如前所述,与模铸钢锭相比,连铸坯的弱点之一是中心质量问题,如高碳钢的中心偏析,低碳钢的中心缩孔等。连铸坯质量的优点相对钢锭质量是在长度方向上的均匀性,但是作为中心的绝对质量,有的品种非模铸法不可,这是连铸化的最大课题。No. 2 连铸机应当解决该课题,为改善铸坯的中心质量,采用有利的完全立式型,且采用带液芯压下技术。

铸坯带液芯压下技术是近几年连铸化技术发展的代表技术,其种类有银压式大压下法、大辊径压下法、盘形辊压下法等。

通过铸坯带液芯压下,中心质量的改善是显著的,但特殊钢中有许多含[S]等易切削成分的钢种,该技术是否适用于特殊钢产品的关键,在于如何抑制由于液芯压下在凝固界面上的内部裂纹。

本公司的液芯压下技术的研究自始至终寻找不使铸坯内部发生裂纹的条件,在 No. 2 连铸机上采用平面辊的圆断面的压下技术,抑制了内部裂纹,确立了实现中心质量改善的技术。

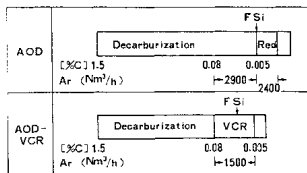


图 5 知多厂 VCR 设备的 AOD 和 AOD-VCR 精炼模式

图6表示铸坯压下设备的参数,图7表示高C轴承钢(1%C-Cr)的中心偏析改善效果。图8表示为抑制内裂的最佳压下条件。

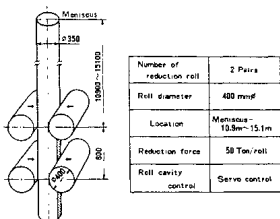


图6 压下辊的规格图

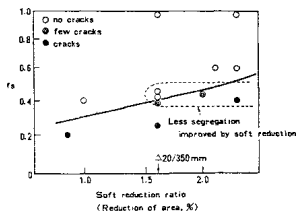


图8 轻压下、凝固率和中间裂纹之间的关系

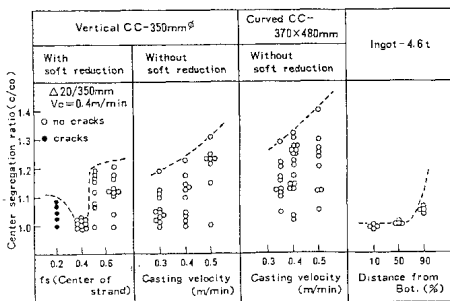


图7 轧制方坯中心的碳偏析

压下设备为升降式,可以根据钢种的需要,在最适宜的位置下压下。现在,从高C钢到不锈钢的高质量的特殊钢的稳定生产发挥了重要作用。

3.2 小批量生产的相应技术

连铸法适应于大批量品种的生产方式,与模铸法相比需要中间包,故浇注用耐火材料的成本决不比模铸法廉价。所以,一个中间包如何延长连浇炉数,已成为成本上重要的影响因子。各公司热衷于利用中间包加热装置是经中间包加合金,通过设置倾动装置,实施中间包排渣的反复利用等技术的开发研究。

本公司很早就开发成功热态反复利用中间包技术,获得了改善成本的目的。其内容如图9所示。中间包热态反复使用时技术关键是如何有效地除去浇注水口的粘着物。在本公司中间包开浇到结束时使用的塞棒端部,开发成功用 O_2 清扫技术,克服了该问题,现在操作过程非常稳定。其次,与模铸相比,连铸坯成本上的优势在于切头、切尾量减少,收得率高,但是小批量生产由于连浇炉数的减少,收得率高的效果就消失了。

本公司作为适应小批量技术,根据钢种批量,开发成功将使用浇注流数分开的技术,已经应用在 No.2 连铸机上。连铸机一般是一种钢多流浇注(1机4流),该连铸机具有两种钢同时浇注(2机2流)的功能。其操作的示意图示于图10。对于4流设备,不仅要设置2台大巴车,而且中间包车也要设置4台。二钢种同时浇注时,也可以更换中间包。为实现以2流为单位的连续作业,对流间距离、中间包形状等的设计、液面控制等系统进行了开发,并已实用化。