

GH132 合金

北京钢铁学院高温合金教研室 主编

国防工业出版社

GH 132 合 金

北京钢铁学院高温合金教研室 主编

国防工业出版社

内 容 简 介

本书概述了GH132合金生产、使用及科学研究等方面的工作成果,对于用作涡轮盘材料的GH132合金的生产加工工艺、成分、组织和性能的研究,以及使用和改进情况作了较为全面和系统的叙述。

此书适于有关单位的工人、工程技术人员及高等学校师生在生产、科学研究及教学工作中参考。

GH 132 合 金

北京钢铁学院高温合金教研室 主编

*

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张14¹/₂ 338千字

1980年7月第一版 1980年7月第一次印刷 印数: 0,001—1,900册

统一书号: 15034·1956 定价: 1.50元

(限国内发行)

前 言

GH132 合金作为 $600\sim 700^{\circ}\text{C}$ 左右使用的铁基高温合金, 目前在我国的国防、航空、发电及其他工业部门得到了愈来愈广泛的应用。为了提高这个合金的使用效果和进一步推广使用, 现在把 GH132 合金的生产、使用及科学研究等方面的工作成果全面地汇编成书, 供有关这方面工作的同志们参考。

针对用作涡轮盘材料的 GH132 合金, 几年来进行了大量的系统的试验研究工作。至此, 对这个合金材料的了解较为透彻, 合金的生产工艺也较为成熟。在这本书中概括了 GH132 合金的冶炼及冷、热加工工艺, 重点讨论了生产质量问题; 合金全面性能的测定结果及疲劳性能的研究; 合金成分、组织、热处理及长期组织稳定性的研究; 涡轮盘使用结果分析及进一步提高合金使用性能的研究等方面内容。并可供其他用途的 GH132 合金及相同类型其他牌号铁基高温合金的生产和试验研究工作参考。

上海第五钢厂、大冶钢厂、马鞍山钢铁公司、四二〇厂、三机部六二一所和北京钢铁学院等单位在 GH132 合金的试制和科学研究工作方面完成了大量的工作。周学瑞、李顺来、谢继莹、李声寿、李光明、鲁承玲、单云芳、江贵藻、王仁智、陈国良、谢锡善、王迪、房晓光、史松度、徐志超、倪克铨等同志直接参加了本书的编写工作, 特此表示谢意。

限于我们的水平, 难免在内容上存在缺点和不当之处, 敬请读者批评指正。

本书的总编和审核工作是由陈国良、谢锡善、王迪同志完成的。

北京钢铁学院高温合金教研室

目 录

第一章	合金的技术条件	1
第二章	合金的冶炼	2
§1	电弧炉冶炼	2
§2	电渣重熔	5
§3	电渣重熔渣系的研究	11
§4	真空自耗重熔	17
第三章	合金的压力加工	21
§1	合金的塑性与变形抗力	21
§2	合金的晶粒度	23
§3	合金锭的开坯	31
§4	合金的锻造、轧制与冷拔	35
第四章	合金的机械加工	47
第五章	合金的性能	69
§1	合金的全面性能	69
§2	合金疲劳性能的研究	77
§3	不同冶炼工艺路线对合金组织和性能的影响	87
第六章	合金中的相	99
§1	合金的基本组织	99
§2	合金的异常组织	111
§3	相分析方法	116
第七章	合金元素的影响	122
§1	应用统计方法研究合金元素的作用	122
§2	合金成分的研究	126
§3	用相分计算方法控制合金的 σ 相形成	142
第八章	合金的热处理	149
§1	合金在热处理过程中的组织转变	150
§2	热处理制度对合金性能的影响	168
第九章	合金在长期时效过程中组织、结构和力学性能的稳定性	177
§1	合金在长期时效过程的力学性能变化	177
§2	合金在长期时效过程的组织、结构变化	190
第十章	合金涡轮盘使用结果分析	204
第十一章	提高合金性能的途径	216
参考文献		227

第一章 合金的技术条件

GH132 合金相当于国外的 A-286 合金, 是以 15Cr-25Ni-Fe 为基组成稳定的奥氏体基体, 以金属间化合物 γ' 相强化的铁基变形高温合金。适于作 600~700℃ 长时使用的高温部件。由于 GH132 合金具有稳定的易于掌握的工艺性能和使用温度下良好的全面性能, 目前广泛地用作涡轮盘、环形件及其他锻件, 也可用作热轧或冷拔棒材的紧固件、板材、管材、丝材、挤压件、铸件等等, 是一个在不太高的温度下使用的多用途高温合金。

在有关部门进行了大量及比较充分的研究分析的基础上, 召开了 GH132 合金鉴定会, 并制定了主要用作涡轮盘材料的 GH132 合金技术条件, 与《高温合金手册》^[1] 相比, 作了适当的修改。GH132 合金技术条件中有关合金的成份与性能的具体内容如下:

GH132 合金饼材技术条件(暂行)^[2]

本技术条件适用于电弧-自耗、电弧-电渣熔炼工艺盘件用锻造圆饼毛坯。

1. 合金的化学成分应符合表 1-1 的规定。

表1-1 GH132合金的化学成分

合金元素	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Al	Ti	Mo	V	B ^①	Fe
含量范围 (%)	≤0.08	1.00~2.00	≤1.00	≤0.02	≤0.03	13.50~16.00	24.00~27.00	≤0.40	1.80~2.35	1.00~1.50	0.10~0.50	0.001~0.01	余

①: B 按计算量加入, 不分析。

2. 合金热处理后的常规机械性能及光滑持久, 应分别符合表 1-2 及表 1-3。

热处理制度:

淬火——980~990℃/保温 1~2 小时/油冷。

时效——710~720℃/保温 16 小时/空冷。

表1-2 室温机械性能

性能指标	抗拉强度 σ_b (公斤/毫米 ²)	屈服强度 $\sigma_{0.2}$ (公斤/毫米 ²)	延伸率 δ (%)	收缩率 ψ (%)	冲击 α_K (公斤·米/厘米 ²)	硬度 HB(毫米)
	≥95	≥63	≥20	≥30	> 3	3.4~3.8

注: 热处理温度仪表误差为 ±10℃。

表1-3 光滑持久性能

性能指标	试验温度 (℃)	应力 (公斤/毫米 ²)	持续时间 (小时)
	650	40	≥100

注: 热处理制度同上。

3. 高温短时拉伸性能 (表 1-4) 积累数据, 供参考。

表1-4 高温短时拉伸性能

性能指标	试验温度 (℃)	抗拉强度 σ (公斤/毫米 ²)	延伸率 δ (%)	收缩率 ψ (%)
	650	≥75	≥15	≥20

注: 热处理制度同上。

第二章 合金的冶炼

目前国内生产 GH132 合金, 除特殊的大部件外, 一般均采用双联的冶炼工艺路线。主要采用的双联工艺路线有两种, 即电弧炉冶炼-真空自耗炉重熔与电弧炉冶炼-电渣炉重熔。实践表明, 两种双联工艺路线各具特点, 所生产的合金都能满足技术条件标准和使用要求。本章简要介绍电弧炉、电渣炉和真空自耗炉熔炼 GH132 合金的工艺及其特点。

§1 电弧炉冶炼

GH132 合金是用电弧炉冶炼母材, 然后再经电渣炉或真空自耗炉重熔。合金母材的电弧炉冶炼, 与其他的 Fe-Cr-Ni 系高温合金一样, 都是采用直接装入法冶炼, 也就是通常所说的不氧化法冶炼。这是由于合金的成分特点所决定的, 这类合金含有较高的 Cr、Ni 和易氧化的 Ti、Al 等元素, 如果用氧化法冶炼势必造成这些合金元素的大量烧损, 同时也难于控制主要强化元素 Ti、Al 等的最佳成分含量范围。因此, 这类合金均采用直接装入法冶炼。这种冶炼方法对原材料有较高的要求, 冶炼工艺也要求合理, 浇注时也要采取保护措施。

一、原材料

电弧炉冶炼的原材料, 包括金属料、脱氧和造渣剂等。对这些原材料总的要求是清洁纯净、干燥和适合的块度, 此外还要求金属料无氧化、不能混炉号和混钢种以及不能混有有害金属。

金属料: 包括镍板、工业纯铁、金属铬、钼、钒及含有微量碳的这些金属的合金、中间合金和本钢种返回料。其中, 镍板要用 H₁ 号以上的, 用前需先经中温退火处理, 以去除镍板所含的氢气。图 2-1 为三种不同的退火温度和保温时间去除镍板氢气的情况。工业纯铁的主要要求是 C、P 的含量低, $C < 0.04\%$, $P < 0.02\%$ 。中间合金与本钢种返回料在使用前一定要先在较高温度进行退火处理, 一般 750℃ 保温 10 小时即可。返回料的用量因各冶金厂的情况不同而有所不同, 一般在 20~30% 左右。

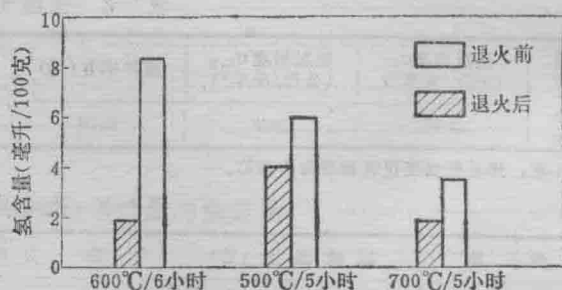


图2-1 三种退火工艺去除镍板氢气含量的情况

脱氧剂: GH132 合金含有少量的 Al, 所以用 Al 粉作为扩散脱氧剂较为适宜。一般用 A₀ 号 Al 粉即可, 粒度在 0.5~2.0 毫米之间, 用前注意防止 Al 粉受潮降低了脱氧能力。此外, 也有用 Ca-Si 块作沉淀脱氧剂 (每吨钢水的用量约 1.8~2.0 公斤), 以及用金属铝块沉淀脱氧来冶炼 GH132 合金。

造渣剂: 主要用石灰和萤石。石灰在空气中存放易吸收大量水份, 所以要用新焙烧的石

灰，临用前烘烤成红色，块度为 20~60 毫米。萤石挑选绿色或白色的使用，要求 SiO_2 、S 等杂质要少，用前在 200~300℃ 干燥处理，块度为 20~40 毫米。

二、设备及炉体

目前我国的 GH132 合金生产，一般是用公称容量为三或五吨的电弧炉，其参数各厂有所不同。但炉体基本上是一致的，炉体和炉坡用卤水镁砂打结，炉墙为沥青镁砂，炉盖用高铝砖砌筑。冶炼 GH132 合金要求炉体状况良好，炉龄接近中期时进行。

三、配料

配料的总原则是要考虑电弧炉冶炼过程的合金元素烧损以及在以后重熔过程的合金元素变化，同时根据产品要求来控制合金的最佳成分范围。使用的原料不同，冶炼时合金元素的烧损情况也不同，例如用纯金属钛配料要比用中间合金的钛烧损高一些。这方面，各冶金厂的工人和技术人员在长期生产实践中积累了丰富的经验，是可以控制的。Cr、Ni、Mo、V 等元素的烧损数量，各个工厂的情况稍有不同，大致上都是在 3~5% 左右。因此，两种双联冶炼工艺的 GH132 合金，电弧冶炼时 Cr、Ni、Mo、V 等元素均按中上限含量配入，就能保证最终产品的这些成分合格。C 在电弧炉冶炼过程中会增加，所以 C 的配入量要尽可能低。合金含有少量的 Al ($\leq 0.40\%$)，电弧炉冶炼时 Al 的烧损一般在 30% 左右。真空自耗重熔过程的 Al 挥发很少，可忽略不计。电渣重熔过程的 Al 烧损量随工艺的变化而变化，一般在 10% 左右。Ti 是 GH132 合金的主要强化元素，加入的 Ti 借时效处理析出弥散的 γ' 相，是合金的主要强化手段，Ti 含量的波动，对合金性能的影响极为明显，所以要慎重的控制好合金的 Ti 含量。试验表明，电弧炉冶炼 GH132 合金，如果用中间合金配 Ti，Ti 的烧损只有 15~20%。若用纯金属钛（或钛合金）配入，Ti 的烧损要达 30% 左右。各工厂电弧炉冶炼 GH132 合金的 Ti 烧损量所以不同，原因就在于此。合金在真空自耗重熔时 Ti 的挥发可以不计。但电渣重熔时要密切注意，Ti 的烧损约在 10~15% 左右。Mn 在真空中的挥发很强烈，1600℃ 的蒸汽压高达 25 毫米 Hg 柱，真空自耗重熔时要注意控制 Mn 的挥发。综合以上各个合金元素在电弧炉冶炼的烧损情况及以后重熔时的变化，电弧炉冶炼 GH132 合金母材时的配入成分一般可以按表 2-1 所列加以控制。

表2-1 GH132合金电弧炉冶炼的配入成分

元素(%) 冶炼工艺	C	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Al	Ti	B	备 注
电弧-自耗	0.03	1.64 ~1.72	15.00	25.50 ~26.00	1.30	0.30	0.28 ~0.30	2.70 ~3.00	0.0085	用纯金属 Ti 配 Ti
电弧-电渣	≤ 0.04	1.55	15.00	25.50	1.30	0.30	0.50	2.90	0.009	用中间合金配 Ti

四、冶炼与浇注

电弧炉冶炼 GH132 合金要抓住几个主要环节，如：装料、成分调整、造渣、温度控制、脱氧等。图 2-2 以三吨电弧炉冶炼为例表示了冶炼的全过程。

1. 装料

合理的装料不仅可以缩短熔化期，而且能够减少 Al、Ti 等合金元素的烧损。炉料要装得平而且低，并留有适当的空隙。首先在料斗四周铺一层镍板，沿镍板装金属铬，靠近

金属铬周围装随料炉渣，金属钼放在高温区，中间合金及返回料按块度的小、中、大顺次装入，钽合金放在炉坡下面用大料压住。其余小料均在炉前加入。

2. 炉渣

装入量不同，渣料的用量也不同。若以装入量八吨左右为例，渣料约为炉料重量的6%左右，随炉装入石灰、萤石各60公斤，穿井到底各加40公斤，炉底垫料各170公斤。此外，根据冶炼过程的炉渣情况在炉前及时进行适当的调整，要求炉渣呈泡沫状，流动性良好，在脱氧三、四批之后炉渣变白，并保持在白渣下精炼。

3. 脱氧

铝粉扩散脱氧剂分11~12批加入，前三批每批6~8公

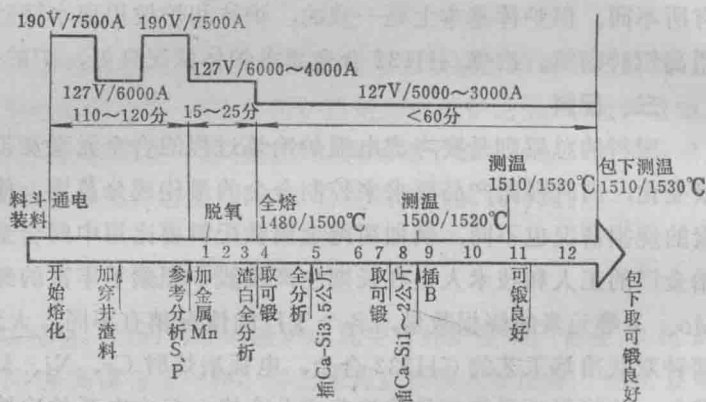


图2-2 电弧炉冶炼 GH132合金的过程示意图

斤，以后每批3~5公斤，全炉平均每吨钢水约用6~8公斤铝粉（见图2-2）。如果用Ca-Si块沉淀脱氧，则分两批加入，在第五批扩散脱氧后插3.5公斤Ca-Si，第八批之后插1~2公斤。根据出钢前的Al含量分析结果，考虑插入适量金属铝块进行沉淀脱氧。

4. 温度

冶炼温度的高低关系到脱氧效果及合金元素的烧损，而且还影响炉渣的好坏。特别是在还原精炼期的温度控制尤为重要。冶炼温度高，氧在钢液中的溶解度增加，脱氧任务加重。但另一方面，冶炼温度高可使钢渣的粘度小，氧的扩散能力强，又对脱氧有好处，所以冶炼温度要控制适当。生产实践表明，还原期的温度太高，合金元素Cr、Ni的烧损量大，因为温度高对下列放热反应进行不利：



电弧炉冶炼GH132合金的经验得出：扩散脱氧八批之后，冶炼温度控制在1500~1520°C。出钢温度在1510~1530°C较为合适。

5. 成分调整

电弧炉冶炼在正常情况下，主要调整Al、Ti、V、Mn等元素含量，Cr、Ni、C等元素含量在熔化末期就基本上成定局。

6. 浇注

电弧炉冶炼GH132合金重熔电极，采用上注法或下注法的均有。例如，上海第五钢厂是采用下注法，每个锭盘浇注四支自耗电极，出钢温度如果是1510~1530°C，则镇静四分钟，锭身注速110秒，帽口在150秒左右。出钢及浇注时采用氩气保护。

总之，国内生产GH132合金的实践表明，电弧炉冶炼能够为真空自耗炉和电渣炉重熔提供合格的母合金。电弧炉冶炼时，合金元素Cr、Ni、Mo、V等按中上限含量配入能获得比较好的成分范围；Al、Ti元素的控制，需要有合理的装料和供电制度。一般Al的烧损可稳定在

30%左右。Ti的烧损,用中间合金配料为15~20%,用纯金属Ti配入为30%左右;冶炼温度的控制,全熔时1480~1500°C,脱氧八批之后为1500~1520°C,出钢前及包下为1510~1530°C;出钢及浇注均要氩气保护。严格控制好上述各因素对于保证产品质量是十分重要的。

§2 电渣重熔

电渣重熔这一较新的冶炼方法,近十多年来在我国的发展速度很快。由于电渣重熔之后能显著地改善金属的性能,而被广泛地应用于高温合金和其他合金钢的生产。现在我国有相当部份的高温合金是采用双联工艺由电渣重熔生产的。

金属的纯度与结晶,是冶金质量的两个关键问题,现代一切提高冶金质量的手段大都不外乎从提高液态金属的纯度和改善结晶条件这两个方面着手。电渣重熔时,金属的熔化、精炼、结晶同时在结晶器内进行,金属呈薄层形式熔化,形成熔滴经过熔渣向金属熔池过渡。并在金属熔池表面发生电毛细振动,使液态金属与熔渣接触的比表面特别大,具备了较好的精炼条件。同时,熔池温度高达1700°C左右,而且单位重量的金属与熔渣作用的时间又长,保证了金属与熔渣之间的反应可以强烈而充分地进行,使金属材料被有效地精炼,气体、杂质和非金属夹杂物被大量去除,得到较高纯度的钢锭。电渣重熔时,熔化的金属以较快的速度沿轴向结晶,钢锭的低倍组织大为改善,组织致密,缩孔较小,没有疏松及皮下气泡等缺陷,并且在很大程度上减少了合金成份和夹杂物的偏析,获得轴向的柱状晶,对合金的性能及难于加工的金属材料的塑性有明显的改善。此外,电渣重熔的设备简单,操作方便,钢锭热加工时不需扒皮,金属的成材率高。所以电渣重熔是生产优质特殊钢及高温合金的比较适宜的方法之一。

采用电渣重熔工艺生产的GH132合金各种规格饼材、棒材、环材、异型件等,质量比较稳定,成材率在58%左右。下面以大冶钢厂为例简要说明GH132合金的电渣重熔工艺。

一、主要设备

炉型:1.2吨单臂单相固定式电渣炉。

变压器容量一千千瓦,一次电压6600伏,二次电压有55、60、63、65、68、70及75伏。

结晶器为方拱型,容量1.2吨,其尺寸为410/450(上口/下口)×1420毫米,锥度为1.405%。

二、电渣重熔工艺

1. 渣系与渣量

渣系为 $\text{CaF}_2:\text{Al}_2\text{O}_3=80:20$,另加入5%的 TiO_2 (CaF_2 用精选萤石, SiO_2 含量在0.68%左右)。渣量在65公斤左右,渣层厚度约150毫米。

2. 引燃方式

可采用液渣或固渣引燃。液渣引燃时用炉外化渣法,由结晶器上口经渣槽倾入结晶器内。固渣引燃时所用固体导电渣成分为 TiO_2 40~45%, CaF_2 35~40%, CaO 10~15%, MgO 2~4%。

3. 电制度

冶炼电流为9500安培。炉口电压在开始冶炼的前2.5小时控制在46~50伏,此后控

制在 43~46 伏，炉口电压超过上述范围时调为低一级电压。操作过程中注意保持电 流 和 电压的稳定。

4. 熔化速率

保持在 4 公斤/分 左右。

采用上述电渣重熔工艺，可以得到如图 2-3 所示的质量良好的合格产品。

三、工艺参数对电渣重熔 GH132 合金质量的影响

1. 电渣重熔过程中合金元素 Ti 的烧损

控制 Ti 的烧损，是这类高 Ti 低 Al 含量铁基合金电渣重熔所遇 到的共同问题之一。表 2-2 列出了大冶钢厂 1971 年电渣 重 熔 268 炉 GH132 合金的 Ti 烧损情况统计结果，Ti 的平均烧 损 约 0.33%，钢 锭 头 部 与 尾 部 的 Ti 烧 损 量 大 体 相 同，大多数在 0.25~0.45% 之间。

用两种不同的渣系，比较 GH132 合金电渣重熔后 Ti 含量的变化 情况，分析结果见表 2-3、表 2-4、表 2-5 及表 2-6。从分析 结 果 看 出，用两种渣系重熔的 Ti 平均烧损约在 0.30~0.37% 之间，钢 锭 的 头 部 和 尾 部 Ti 烧 损 量 基 本 上 是 均 匀 的，I 渣 系 的 尾 部 Ti 烧 损 一 般 比 头 部 要 大 一 些。

关于电渣重熔过程 Ti 烧损的原因。电渣重熔时，金属中氧 的 来 源 不 外 有 三 个 主 要 方 面，一个是渣料中的不稳定氧化物，再一个是金属 电 极 表 面 的 铁 锈 及 重 熔 过 程 电 极 表 面 氧 化 形 成 的 氧 化 物，第三个是大 气 中 的 氧 通 过 熔 渣 中 的 变 价 氧 化 物 的 传 递 进 入 金 属。GH132 合 金 的 抗 氧 化 性 能 较 好，且合金 电 极 重 熔 前 先 经 打 磨，电渣重熔过程中由于自耗电 极 表 面 氧 化 物 导 致 Ti 烧 损 的 数 量 极 其 微

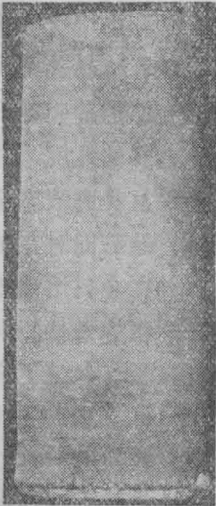


图2-3 电渣重熔工
艺冶炼的1.2吨锭型
GH132合金

表2-2 大冶钢厂电渣重熔GH132合金Ti烧损情况统计

分析部位	Ti烧损(%)		统计结果		0.10~0.24		0.25~0.45		0.46~0.50		0.51~0.65	
					炉 数	%	炉 数	%	炉 数	%	炉 数	%
钢 锭 尾 部					61	22.6	180	67.1	12	4.6	15	5.7
钢 锭 头 部					50	18.6	189	70.6	16	5.9	13	4.9

表2-3 两种渣系的化学组成

渣 系	CaF ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	另加 TiO ₂ (%)
I	70	30	5
II	80	20	5

表2-4 用两种渣系重熔 GH132合金的钢锭头部和尾部Ti平均烧损量

渣 系	头部 Ti 烧损(%)	尾部 Ti 烧损(%)	头尾Ti烧损差(%)	统 计 炉 数
I	0.32	0.37	0.05	30
II	0.32	0.30	0.02	89

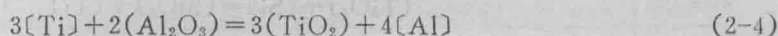
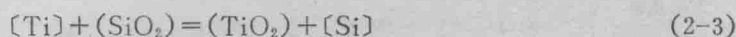
表2-5 用两种渣系重熔的GH132合金钢锭尾部Ti烧损量差别

渣 系	头尾 Ti 烧损差(%) 统 计 结 果	0.01~0.05		0.06~0.10		0.11~0.15		0.16~0.20	
		炉数	%	炉数	%	炉数	%	炉数	%
I		19	45	15	36	7	17	1	2
II		84	51	43	26	23	14	10	9

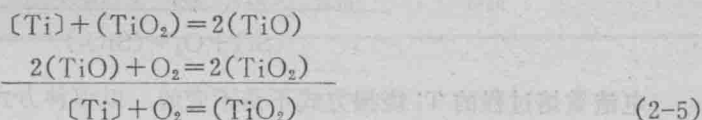
表2-6 用两种渣系重熔的GH132合金钢锭尾部Ti烧损量比较

渣 系	炉 数	其中尾部比头部Ti烧损大的炉数	占 %
I	43	38	88.3
II	163	95	56.5

少。所以说 Ti 的烧损主要是通过第一和第三个途径进行的, Ti 烧损可能的两种方式是:



以及



Ti 的第一种氧化方式〔即公式 (2-3) 与 (2-4)〕有如下试验根据:

(1) 采用的渣系为 $\text{CaF}_2:\text{Al}_2\text{O}_3=70:30$, 另加 5% TiO_2 的 22 个炉号电渣重熔钢锭中, 钢锭尾部 Si 含量增多的炉数达 17 炉之多, 约占 77.3%, 钢锭中部的 Si 含量较之母合金高出 0.01~0.23%。

(2) 仍用上述渣系的 43 炉 GH132 合金电渣重熔钢锭, 尾部增 Al 的炉数为 17 炉, 占 39.5%, 增 Al 范围为 0.01~0.10%。

(3) 根据北京钢铁学院在实验室设备上用氩气保护电渣重熔 GH136 合金的试验结果表明, 炉渣中的 Al_2O_3 对合金中的 Ti 起氧化作用。试验所用渣系为 $\text{CaF}_2:\text{Al}_2\text{O}_3:\text{MgO}=80:11:9$, 密封式电渣炉抽真空至 10^{-2} 毫米 Hg 柱后通一个大气压的氩气。重熔 GH136 合金的试验结果见表 2-7。可看出, 电渣重熔后的合金, Ti 烧损, 而 Al 含量增加。从钢锭尾部至头部, Ti 烧损量逐渐减少, Al 含量的增加量也相应减少。其它电渣重熔工艺也有类似现象, 与此同时炉渣中 TiO_2 数量增多, 使重熔后期 Ti 的氧化受到抑制。

表2-7 氩气保护下电渣重熔GH136合金的Al、Ti含量变化情况

分析部位	炉 号 元 素	189		190	
		Ti (%)	Al (%)	Ti (%)	Al (%)
自耗电极		3.47	0.32	3.32	0.33
钢锭尾部		2.72	0.68	2.70	0.65
钢锭中部		3.00	0.59	2.95	0.58
钢锭头部		3.23	0.49	3.24	0.50

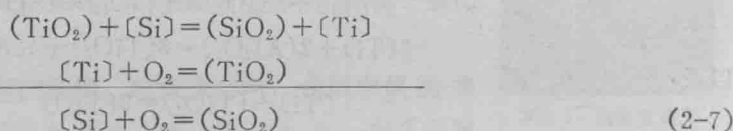
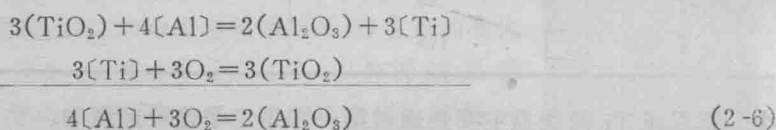
以上现象均说明渣料中的不稳定氧化物造成了电渣重熔过程的 Ti 烧损。

另外值得注意的是,在一定条件下,电渣重熔 GH132 合金,在 Ti 烧损的同时 Al 和 Si 也有烧损,表 2-8 的统计结果说明了这种情况。这是由于电渣重熔时渣中 Ti 的氧化物起

表 2-8 电渣重熔 GH132 合金的 Al、Si 含量变化情况

分析情况	Al			Si		
	增 多	烧 损	不 变	增 多	烧 损	不 变
炉 数	15	154	12	32	27	3
%	8.3	85	6.7	52	44	4

的“桥梁”作用,导致合金的 Si、Al 元素氧化,可能存在的反应如下:



电渣重熔过程的 Ti 烧损方式不是不变的,以那种方式为主随重熔条件的不同而异。在氩气保护下,避免了大气的影 响, Ti 的烧损显然主要通过第一种方式进行,即 (2-3) 和 (2-4) 式反应,这也可以较好的解释重熔过程烧 Ti 增 Si 和钢锭自下而上增 Ti 降 Al 的现象。在大气条件下重熔,熔炼前期由于渣料中的不稳定氧化物(如 SiO_2 、 FeO 、 Al_2O_3 等)含量较高,而 TiO_2 含量较低, Ti 的烧损主要以第一种方式进行。同时,在熔炼初期结晶器内渣液面的位置很低,加以挥发的炉气不断逸出,在结晶器内腔造成正压,不利于大气向炉渣液面供氧。重熔后期,渣中 TiO_2 数量不断增多(见表 2-9 及图 2-4),使 Ti 的第一种氧化方式受到抑制。随重熔过程的进行,熔渣温度不断上升,如表 2-10 所示。同时熔渣液面不断提高到靠近结晶器上口,由于合金中 Ti 的烧损使渣中 TiO_2 含量逐渐增多,自耗电极的长度也随重熔过程的进行而缩短,电压降减小,使自耗电极插入渣池的深度减小,均促使大气中的氧向钢中转移。上述重熔条件的变化,使 Ti 的烧损改 变成主要通过第三种途径进行,即 (2-5) 式。

目前大冶钢厂的生产情况,钢锭头尾部的 Ti 含量大致相近,这是由于重熔过程的前后期一、三两种 Ti 的氧化方式的综合影响大体相近。采用 $\text{CaF}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = 70:30$ 渣系重熔时,钢锭尾部的 Ti 烧损较大,是由于渣料 Al_2O_3 含量较高, Ti 的第一种氧化方式较占主要地位。如果 Ti 的第三种氧化方式起主要作用,就有可能重熔钢锭头部的

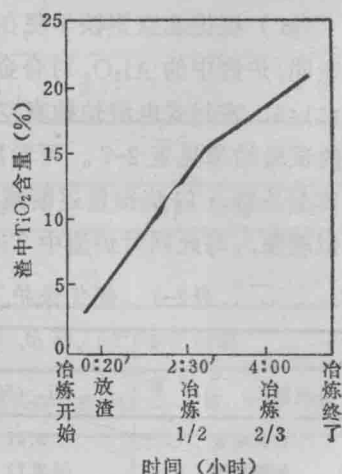


图 2-4 电渣重熔 GH132 合金过程中炉渣 TiO_2 含量的变化

表2-9 电渣重熔GH132合金过程中炉渣成分分析

(渣系为 $\text{CaF}_2:\text{Al}_2\text{O}_3=80:20$, 另加入5% TiO_2)

渣样子	取样位置	取样时间 (小时:分)	炉渣成分(%)				渣熔点 (℃)
			Al_2O_3	CaF_2	CaO	TiO_2	
44-247-1	化渣, 加 TiO_2 之前	0:00	16.11	73.94	1.79	0.38	
44-247-2	渣槽	0:20	13.15	72.07	1.23	4.68	1315~1358
44-247-3	渣池	2:30	13.05	68.60	0.92	13.93	1324~1374
44-247-4	渣池	4:00	12.95	62.40	0.96	17.00	1386~1391
44-247-5	冶炼終了	5:00	10.91	57.72	1.01	20.18	1386~1399
44-247-6	凝固渣头边缘		10.20	53.66	0.81	22.69	
44-247-7	凝固渣头中心		9.29	62.40	0.81	19.51	

表2-10 电渣重熔GH132合金过程的熔渣温度变化

测温时间 (小时)	熔炼开始 0:00	1:27	3:30	4:00	5:00	熔炼終了 5:15
熔渣温度(℃)		1605	1620	1630	1680	

注: 用W-Mo热电偶测温。

Ti烧损比尾部大。

如何控制电渣重熔过程的Ti烧损。在现有条件下, GH132合金经过电渣重熔, Ti总会有一定程度的烧损, 所以主要任务是如何降低和稳定Ti的烧损量, 并使钢锭的头、中、尾部Ti含量尽可能均匀。这就要进一步摸索出适合这类合金电渣重熔的渣系和重熔工艺制度, 力求使两种氧化方式的综合影响相近。

另外, GH132合金电渣重熔的Ti烧损还与母合金Ti含量的多少有关, 母材的Ti含量高, 烧损也要大一些, 见表2-11和图2-5。

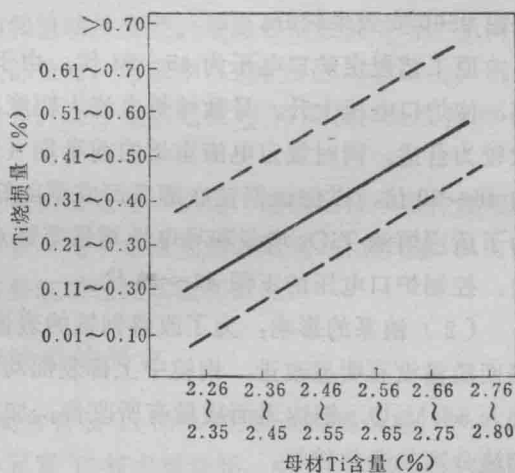


图2-5 GH132合金母材Ti含量与电渣重熔过程Ti烧损量的关系

表2-11 GH132合金母材Ti含量与电渣重熔过程Ti烧损量的关系

统计炉数	37	62	28	20	18
母合金Ti含量(%)	2.26~2.35	2.36~2.45	2.46~2.55	2.56~2.65	2.66~2.75
Ti平均烧损(%)	0.26	0.30	0.33	0.39	0.51

2. 钢锭的表面质量问题

GH132 合金电渣重熔出现的另一个比较突出的问题是钢锭表面成型存在的缺陷。其特征是在距钢锭底部约三分之二以上的表面渣疤（陷入钢锭表面一定深度的夹渣）和在钢锭头部缩孔的端面上附集的“钢豆”（补缩时滴落的熔滴）与熔渣粘附在一起。从钢锭表面的颜色来看，钢锭三分之二成型良好部位的表面呈深黄色，另外三分之一成型不好出现渣疤的表面呈铁青色。

高温合金电渣重熔的生产实践表明，所有含高 Ti 低 Al 的铁基高温合金（如 GH132、GH136 等合金）表面成型均较差。某些高温合金的熔点较低，约 1360~1400℃，比碳钢、低合金钢的熔点低 80~100℃（如 45 钢熔点为 1495℃、GCr15A 熔点为 1455℃、1Cr13 熔点为 1503℃），而与渣系的熔点相接近（ $\text{CaF}_2:\text{Al}_2\text{O}_3=70:30$ 渣系熔点在 1300℃左右），很容易因钢渣不分造成钢锭表面成型困难。为了解决 GH132 合金电渣重熔钢锭的表面质量问题，曾在重熔工艺上进行了大量的试验摸索工作，初步归纳为以下几点。

（1）电参数的影响：电渣重熔的电参数主要是熔炼电流与熔炼电压（接近渣层的炉口电压），以及输出功率。能否正确地选择和控制电参数，对于重熔过程的稳定、钢锭质量、表面成型、生产率及电耗等均有很大影响。

原工艺规定熔炼电流为 8500 安，炉口电压控制在 45~54 伏。这个工艺的电渣重熔过程电流波动较大，特别是重熔中后期，熔渣富集的 TiO_2 不断增多，渣的导电性增强，粘度增加，使熔炼电流的波动更大，钢锭表面成型开始变坏，出现结疤等缺陷。根据 GH132 合金电渣重熔的特点，分别进行 8500 安、9000 安、9500 安、9800 安等熔炼电流的试验，结果以 9500 安效果较好。

原工艺规定炉口电压为 45~54 伏，由于重熔后期自耗电电极的长度缩短，熔渣温度升高，使炉口电压上升，导致熔炼电流大幅度波动。经过实践摸索，炉口电压降低为 43~50 伏较为合适。同时规定电渣重熔的前半期（熔炼开始的前 2.5 小时）炉口电压控制在上限的 46~50 伏，以保证钢锭底部表面成型良好，重熔的后半期（2.5 小时以后至熔炼完了）为了适应熔渣 TiO_2 增多和导电性增强等特点，并使自耗电电极插入深度适当和熔炼电流稳定，控制炉口电压的下限 43~46 伏。

（2）渣系的影响：为了改善钢锭的表面质量，选用不同渣系进行重熔试验，结果钢锭表面质量没有明显改进，钢锭中上部表面均有不同程度的渣疤存在。在前述渣系的基础上加入 5% MgO ，钢锭表面质量有所改善。加入少量的 MgO ，渣的熔点降低，流动性改善，钢渣分离的条件较好。

（3）渣层厚度的影响：在电参数和渣系一定的条件下，采用不同的渣量进行试验，所用渣量分别为 72、67、65、63、61、59 公斤等。试验结果表明，随渣量的减少和渣层厚度的减薄，钢锭表面成型有不断改善的趋势。也就是说，使用导电能力较好的渣系，由于渣层减薄，渣池散热体积减小，单位体积熔渣的热量增多，渣池和金属熔池的温度相应提高，对钢渣分离有利，使钢锭表面质量改善。但由于渣层过薄会造成重熔过程 Ti 的烧损有增加的趋势，见表 2-12 所列出的统计结果。Ti 的烧损增多，是由于渣温升高流动性变好，而且渣层厚度又薄，使大气中的氧易于进入金属熔池。为此，综合考虑改善钢锭表面质量和控制 Ti 的烧损，将渣层厚度控制在 150 毫米、渣量约 65 公斤左右较为合适。

表2-12 GH132合金电渣重熔时渣量与钢锭表面质量及Ti烧损量的关系

渣 量(公斤)	Ti 烧 损 量 (%)			表 面 质 量
	尾 部	头 部	头 尾 差	
70	0.37	0.35	0.02	渣疤较多
63	0.38	0.27	0.11	渣疤较少
61	0.47	0.30	0.17	渣疤较少
59	0.51	0.47	0.04	渣疤较少

(4) 锭型大小及自耗电电极与结晶器直径配比的影响: GH132 合金在小批量电渣重熔试生产时使用较小锭型 ($\phi 230/\phi 95$), 钢锭表面成型较好。合金大批量生产扩大了锭型, 重熔后出现了钢锭表面成型不良, 见表 2-13 所列情况。说明锭型大小、自耗电电极与结晶器尺寸的配合对钢锭的表面质量是有影响的。

表2-13 锭型大小与GH132合金电渣重熔钢锭表面质量的关系

根据上述电渣重熔工艺参数对钢锭表面成型质量的影响可归纳为: GH132 合金及这类含有高 Ti 低 Al 的铁基合金难于成型的主要矛盾, 在于合金中的 Ti 在电渣重熔过程不断地烧损, 熔渣的 TiO_2 不断增多, 至熔炼结束时渣中 TiO_2 高达 20% 以上, 成为渣的主要组成之一。熔渣富集大量的 TiO_2 ,

结晶器尺寸(毫米)	自耗电电极尺寸(毫米)	钢锭表面情况
430(方)	180(方)	不 良
375(方)	180(方)	有 改 善
$\phi 375$	$\phi 170$	较 好
$\phi 230$	$\phi 95$	良 好

其物理化学性能恶化, 如熔点升高, 粘度增加和流动性变差, 导电性能提高等等, 从而导致钢渣难以分离。电渣重熔进行到钢锭的中上部位时, 熔渣中 TiO_2 已达 15% 以上, 钢锭表面出现渣疤等缺陷。因此, 摸索出合适的渣系, 稳定重熔过程的 Ti 烧损, 是改善钢锭表面成型质量的重要途径。

采用电弧-电渣双联工艺生产的 GH132 合金的质量基本稳定, 能满足技术条件和使用要求。今后为进一步稳定和提高重熔合金的质量, 对于电渣重熔的渣系、合金元素 Ti 的烧损控制以及钢锭表面成型质量等问题, 均还需要继续进行试验和研究。

§ 3 电渣重熔渣系的研究

采用电渣重熔工艺生产 GH132 合金等这类含有高 Ti 低 Al 的铁基高温合金, 产生了一系列的新问题, 例如: 电渣重熔过程中合金元素 Ti 被大量烧损, 而且烧损数量不稳定; 由于重熔过程的各个时期 Ti 烧损数量不一样, 使钢锭各部位 Ti 含量波动较大, 从而造成合金的性能不均匀; 母合金中的 Ti 氧化后生成 TiO_2 进入熔渣, 改变了炉渣的物理化学性能, 特别是在重熔后半期, 影响钢锭上半部的表面成型质量等等。这些问题的存在严重地影响了产品的质量, 为了解决上述生产当中存在的问题, 我们在改进电渣重熔渣系方面进行了试验研究工作。

关于电渣重熔的渣系研究工作, 主要是结合属于同一类型的 GH132 及 GH136 合金进行的。初步实践表明, 采用含有 CaF_2 、 TiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 的四元渣系, 电渣重熔上述两种合金有较好的效果。选定的适用渣系成分为: 9% MgO , 7% Al_2O_3 , 5% TiO_2 其余为

CaF_2 。在选用这一新渣系的同时要相应地调整电渣重熔工艺,调整工艺的原则是适当降低炉口电压,提高熔炼电流和增大渣量。在进行试验以及在生产当中均发现,设备的绝缘条件影响很大,结晶器和底水箱之间,底水箱和地之间的良好绝缘,是保护合金中 Ti 较少氧化的一个重要条件。

目前,采用这个新渣系,并适当调整电渣重熔工艺,使电渣重熔此类合金的 Ti 烧损量降低到 0.2% 以下,钢锭头尾部 Ti 含量差别降低到 0.15% 以下,能够控制钢锭 Ti 含量在较小范围内波动。同时,钢锭表面的成型质量也得到改善。

一、试验条件

工业性试验是在抚顺钢厂、大冶钢厂、本溪钢厂和西宁钢厂,在生产用 1~2 吨单臂或双臂交换电极的电渣炉上进行的,选用的锭型有二百、一千、一千二百公斤三种。

1. 电渣重熔用试验渣系为四元渣系,如表 2-14 所示。

表2-14 电渣重熔GH132、GH136合金试验用渣的化学组成

组 成	CaF_2	Al_2O_3	TiO_2	MgO
含 量(%)	79	7	5	9

(1) CaF_2 : 一般选用经 Fe-Al(6% Al) 电极提纯的工业用萤石,提纯后的 CaF_2 成分为含 92~97% CaF_2 , 3~5% Al_2O_3 和小于 0.5% SiO_2 。大冶钢厂曾用精选萤石进行试验(SiO_2 含量在 0.6% 左右)也获得了良好的效果。

(2) MgO : 一般选用 0.5 毫米电熔 MgO 。大冶钢厂用一级工业镁砂,效果也可以。

(3) Al_2O_3 : 一般工业用 Al_2O_3 粉。

(4) TiO_2 : 工业用 TiO_2 粉。

上述渣料在使用前均先经 600℃ 以上,大于二小时焙烧。其中 CaF_2 配入按 79% 的纯 CaF_2 计算。

2. 不同锭型的渣量见表 2-15 所列。

表2-15 电渣重熔试验用锭型大小与渣量的配合

锭 型 (公 斤)	200	1000	1200
电极尺寸 (毫米)	φ 90	φ 180	180×180
结晶器尺寸(毫米)	φ 230	φ 360	420×420
渣 量 (公斤)	16	48	76
渣头厚度 (毫米)	120	150	200

3. 化渣工艺

首先用石墨电极化渣,渣料混合均匀后徐徐加入,全熔之后保持一定时间以利于 MgO 充分溶入渣中,并保持足够的温度和时间促使渣中 TiO_2 还原变价的反应充分进行。各锭型的化渣工艺见表 2-16 所示。化渣工艺对于四元渣系的 MgO 是否全溶和化渣过程的电化学反应的进行程度,以及电渣重熔钢锭的下部表面质量和钢锭的化学成分影响很大,是一个不可忽视的工艺环节。