

前 言

本届高温合金学术年会于1983年11月30日至12月5日在江苏镇江举行。这是继1974年在抚顺钢厂召开第一届全国高温合金年会以来的第五届年会。参加本届年会的有高温合金生产厂、使用厂、研究院所、高等院校和有关上级领导机关共54个单位170名代表。会上共收到87篇研究论文。

年会邀请了四篇特约报告。吴大观同志的《航空发动机发展趋势和材料要求的预测》；胡壮麒同志的《快速凝固和定向共晶的发展趋势》；陈国祥同志的《十五年高温合金发展规划设想》；陈石卿同志的《2000年的美国航空发动机制造技术》。这些报告对了解国内外航空发动机和高温合金的发展动向以及我们今后的工作都具有积极意义。

年会论文的内容主要有三个方面。一是有关微量元素(特别是镁)作用和机理的论文，有12篇之多，引起了与会者的极大兴趣，讨论活跃。二是在力学冶金方面的研究，这是近几年来我国开始深入研究的领域。第三方面是激冷技术和机械合金化等新技术、新工艺的研究。这些论文都受到与会者的好评。

根据本届年会决定，由冶金部钢铁研究总院负责将参加年会的论文汇编出版。由于篇幅有限，文集编辑组将论文分为三类。第一类论文全文刊登；第二类刊印论文简介；第三类只登论文摘要。文集中一、二类论文基本按原稿内容，编者只作了必要的少量改动；对曲线图和金相照片进行了删减；明显错误之处予以校正和更改。由于编者经验不足，时间有限，错误，不当之处，敬请读者批评指正。

本文集出版得到了冶全部军工办的大力资助和论文作者的积极供稿，大冶钢厂薛宗源同志为出版印刷事宜作了大量工作，许多有关同志也给予了热情帮助，在此一并表示感谢。

编 者

目 录

·论 文·

- 温度-应力-时间对Mg、Zr镍基合金的力学性能和断裂特征的影响
.....杨锦炎 庄景云 李音波 马福俊 耿庆全 张舒声 李尊武(1)
- GH220合金加镁工艺的研究..... 张俊明 李凤州 金瑾秀 陈淦生 马培立 仲增墉(11)
- GH220合金中的 μ 相..... 徐石斌 杨玉荣 田世藩(16)
- GH698合金在长期时效过程中的稳定性..... 薛宗源(23)
- GH698合金热加工工艺研究..... 耿庆全 张舒生 金维国 张富忱(30)
- Ni-7Al-27Mo定向凝固共晶合金研究..... 孙家华 黄乾尧 杨振凡 薛红梅(36)
- DZ-22定向凝固涡轮叶片合金.....王罗宝 陈荣章 龙鸿建 王玉屏 殷克勤 栗晨虹(44)
- 激光快冷消除高温合金中的 σ 相.....葛龙云 胡壮麒 高 薇 师昌绪
徐晓波 李 章 姜 明 (52)
- 液态金属冷却定向凝固DZ17合金的下浸速度与组织和性能的关系
.....马敦栋 杨忠贤 王文英 何松炯 舒文华 赵瑞诚 王永安 朱国枚 王 贤(58)
- 应力、温度对定向凝固镍基高温合金第一阶段蠕变量的影响
.....姚德良 林栋梁 孙传琪(66)
- 晶界状态对GH220合金的腐蚀-持久影响..... 张源虎 林栋梁 徐志超 叶锐曾(72)
- GH220高温抗氧化性研究..... 汪九万 孙恭宽(76)
- 两种热处理工艺中弯曲晶界形成机理的研究..... 杨月琴 丁文秀(82)
- 一种氧行物弥散强化镍基高温合金的机械合金化研究
.....庄 毅 曾炳胜 佟秀昆 高 良(89)
- 硅对GH220合金组织和性能的影响..... 马培立 张俊明(96)
- 不同弯晶工艺对GH220合金显微组织和力学性能的影响
.....谢严鑫 周景华 马培立 陈淦生 田世藩 徐石斌(106)
- 电渣重熔对一种钴基高温合金晶界碳化物析出的影响.....戴彤孚 王淑荷 师昌绪(112)
- 激光快速凝固对一种铸造Ni基超合金显微组织和耐磨性能的影响
.....葛云龙 胡壮麒 高 薇 师昌绪(118)
- GH698合金长期时效的研究..... 浦惠康(124)
- GH37合金激光熔凝后显微组织与力学性能
.....朱贵增 孟庆林 杜香竹 孙同坤 孙传香 刘诚信 张国礼 孟永年 郑玉环(131)
- GH49合金在蠕变断裂过程中弯曲晶界的作用
.....张亚平 罗 虹 王曰毅 李志云 周 成(137)
- GH220合金涡轮叶片等温热处理研究 俞同丰 张润岗 李力加 叶锐曾 王 迪徐志超(145)

定向工艺和钎含量对一种镍基高温合金的影响.....	王罗室 陈荣章 王玉屏(150)
碳、硼、镁对GH698合金晶界相和性能的影响.....	薛宗源 杨锦炎 马福俊 庄景云(157)
GH698合金中镁的分布及其对碳化物形态的影响	翟国华 蒋次正 孙心室 吴志贤 郭品河(163)
两种铁基和镍基高温合金在复杂应力条件下的蠕变及断裂	谢锡善 徐志超 许经峰 朱金元(166)
镍基铸造 K24 合金中 σ 相的研究.....	甄宝林 张绍津(176)
GH49合金高温奥氏体晶界行为的研究	吕 炎 曲万贵 陈宗霖 穆安普 李书锐 苑 欣(184)
GH33A合金缺口敏感性研究.....	周瑞发 邓 波(190)
奥氏体高温合金在热变形过程中晶粒变化规律及特征常数的研究	李声寿 陶印华(197)
抗热腐蚀无钴镍基铸造合金的发明.....	马华政 邹敦叙 陈振兰 龚凤阶(204)
2000年的美国航空发动机制造技术.....	陈石卿(213)
GH99合金加工硬化特性研究.....	董殿生 徐修善(217)
NiFeCrWMoTiAl合金中的硼和 M_3B_2	李玉清(223)
碳在GH99合金中的存在方式及其对持久性能的影响	杨柁森 魏育环 于万众 董殿生(230)
二辊斜轧穿孔轧辊转速对高温合金毛管质量的影响.....	田 党 王永吉(238)
GH37合金的弯曲晶界及其对蠕变和蠕变断裂的影响	穆志平 叶锐曾 高 良 田树森(247)
固溶冷却速度对GH698合金组织和性能的影响.....	江贵藻 周瑞发 张绍维 藏兰英(253)
一种新型热处理制度对GH698合金组织和性能的影响	江贵藻 周瑞发 张绍维 藏兰英(258)
GH33A合金蠕变特征的研究.....	朱金元(264)
GH33A合金性能改进的研究.....	赵炳璽 黄世贤 吕桂枝 赵光普 吴 晰 王 臣(270)
HK-40钢转化炉管剩余寿命的推算方法.....	曹智本 张俊善 权仁泽(277)
一种镍基高温合金冷轧板材表面纹现象的研究.....	王庆符 郭品河 田志龙 孙世昌(285)
GH220合金成分对组织性能的影响及其数学关系式.....	陈恩普(291)
GH698合金的晶界相.....	刘锦岩(298)
机械合金化的扫描电镜和 X射线研究.....	庄 毅 曾炳胜 韩临光 苏惠芹(305)
弯曲晶界对GH220合金蠕变与断裂的影响	王曰毅 李力加 杜宝权 廖忠义 叶锐曾 葛占英(312)
GH132合金过烧.....	陈正三 郭银才 戚品志 刘公安(318)
热腐蚀对铸造镍基高温合金IN738LC蠕变和低循环疲劳行为的影响	郭建亭 D. Ranucci E. Picco(324)
金属的疲劳损伤与红外发射.....	黄 毅 李守新 林习荣 师昌绪(332)
电渣重熔工艺参数对钢中镁含量的影响.....	任长恕 喻桂英 刘勤学(338)
四种高温合金在液态锂中的腐蚀.....	王嘉敏 周洪贤 董佩环 蒋林根(343)

GH36合金涡轮盘材料持久缺口敏感性对蠕变、疲劳及其交互作用条件下力学行为的影响.....谢锡善 陈国良 高良等(351)

•论文简介•

761合金的成分研究.....郭守仁 卢德忠 范鹤鸣(370)

GH698合金全面性能总结.....薛宗源(373)

单晶高温合金研究.....赵瑞诚 舒文华 马敦栋 王文英(376)

GH220合金长期时效组织稳定性研究.....陈淦生 马培立 金瑾秀 张俊明(380)

FeCrNiMnMoVNb高温合金晶间 VC 中的位错.....李玉清 刘锦岩(383)

弯曲晶界对GH220合金高温疲劳裂纹扩展的影响.....张志强 陈淦生(386)

GH118镍基高温合金超塑性研究及其应用.....上海第五钢铁厂研究所(389)

热等静压处理对 K17铸造镍基合金疲劳裂纹形成的影响.....于维成 袁金才 黄荣芬 柯伟(391)

一种铁基高温合金的周期蠕变.....谢锡善 徐志超 朱金元 林振通(395)

W、Mo、Al、Ti对GH220合金微量相影响.....孙金贵 叶锐曾 董占英 王惠 杨莲隐 许庆芳(400)

GH698合金 γ' 相中的镁.....李尊武 李平 刘先琪 肖文春(403)

Ni - Cr - Al - V四元定向共晶的条带组织.....张玉生于 洋 唐亚俊 王素坤 张静华 胡壮麒(405)

GH99合金的高温塑性研究.....董殿生 于万众 徐修善 王盛安(408)

GH826合金弯晶热处理及其组织的研究.....程秀峰(412)

高温合金的静态与动态再结晶研究.....明旭光 赵金福 崔玉琴(416)

铸造镍基合金网状 γ' 相的定量测定.....王景楹 王淑媛(419)

影响GH220合金高温塑性因素的探讨.....金瑾秀 李凤州 张俊明 张连录(423)

真空感应熔炼镍基合金时镁的挥发特性探讨.....章锦芝(426)

国产Supertherm上升管的物理冶金评价.....王焕庭 王富岗 于永泗 程蓉娟(430)

PG5331型燃气轮机火焰筒长期运行后各部组织与温度分布关系.....奚淑琴 周福兴 吴长钧 李以圻(433)

GH220涡轮叶片 $\times \times \times$ 小时长试及实物分析.....叶锐曾 董占英 孙金贵 杨莲隐 王曰毅 李莉 徐石斌(439)

•论文摘要•

GH128合金板材大应力持久检验标准的研究.....黄福祥 董云国 王炳林(441)

难变形高温合金管材加工新工艺研究.....上海钢铁研究所(441)

硼对15Cr - 40Ni型合金组织和性能的影响.....上海钢铁研究所 张明等(442)

GH33A合金 η 相析出规律及其对性能影响的研究.....上海第五钢铁研究所(442)

不同冶炼工艺的GH33A合金性能对比.....齐齐哈尔钢厂研究所(443)

GH761高温合金持久极限的探讨.....上海第五钢铁厂研究所(443)

在GH698合金中的Mg相和Zr相.....钢铁研究总院(444)

一种新型的耐热腐蚀合金——GH180.....潘仁 张旭瑞等(445)

一种新的镍基高温合金——GH181.....	傅宏镇 方 开等 (447)
真空感应炉不同脱氮工艺对高温合金中的非金属夹杂物和性能的影响	赵炳堃 黄世贤 赵光普 (448)
HK40钢的不连续析出.....	王永泗等 (449)
GH128合金再结晶图.....	东北工学院高温合金教研室等 (450)
GH99再结晶图的研究.....	东北工学院高温合金教研室 (450)
激凝固镍基高温合金时效过程中的相形成.....	章守华 王乃一 胡本芙 (451)
电子衍射图的束倾斜内标法.....	王 斌 陆玉良 冯艳萍 (452)
GH220合金年轮状偏析的研究.....	金谨秀等 (452)
火箭发动机用GH169合金高压导管的试制.....	上海第五钢铁厂研究所 (453)
GH901高温合金制作大型涡轮盘模锻件质量控制.....	王正轸 顾汝南 (454)
CCY型燃烧台架试验在高温腐蚀研究方面的应用.....	马重辉等 (455)

温度-应力-时间对含Mg、Zr镍基合金的力学性能和断裂特征的影响

杨锦炎 庄景云 李音波 马福俊

(冶金工业部钢铁研究总院)

耿庆全 张舒声 李尊武

(抚顺钢厂)

摘 要

在不同温度、应力和时效时间下微量Mg、Zr对镍基合金的力学性能及其断裂特征有不同影响。

合金中含有适量Mg、Zr可强化晶界,提高合金的等强温度,使晶内和晶界强度相协调,大幅度提高中温光滑和缺口持久寿命及中温塑性,使无Mg、Zr合金的沿晶断口转变为混合或穿晶断口。同时发现Mg、Zr对合金性能的改善作用随应力、温度和时效时间的增加而逐渐减小。

一、前 言

微量Mg、Zr、B对合金的组织 and 性能有重大影响。如在ЭИ437合金中加入0.01%的B而成为ЭИ437Б,即提高了合金的晶界激活能,使合金的等强温度由500℃上升到600~700℃^[1]。

在ЭИ617、Эп220、Waspaloy等合金中加入Mg或B、Zr能显著改善合金的持久寿命,中温塑性和缺口敏感性^[2~5]。但是这些微量元素,特别是Mg究竟在什么温度-应力-时间范围内才对合金性能起最佳影响?本文就是研究在不同温度、应力和时效时间下微量Mg、Zr对一种镍基合金的力学性能及其断裂特征的影响。

二、试验方案

试验选用两炉(未加Mg、Zr的19炉和添加Mg、Zr的04炉)经双真空冶炼的锭重2t的

镍基合金锭，其化学成分列于表1。钢锭锻至90方，经1120℃8h空冷+1000℃4h+775℃16h空冷处理，取样进行20~1000℃的瞬时拉伸、550~940℃持久试验、不同应力下的持久试验（650℃时74、80和85kgf/mm²；700℃时55、60和65kgf/mm²及750℃时42、45和50kgf/mm²）和750℃不同时效时间（0、100、300、600h）的试验。

用MEC-2型立体显微镜、EM-400电子显微镜、PSEM-500扫描电镜观察断裂后的瞬时和持久试样断口，确定试样断裂起断面的性质和表面变形状态。用X光衍射仪测定长期时效后的γ'相尺寸和分布密度。

表1 试验料化学成分，%

炉号	Mg	Zr	Cr	Mo	Nb	Al	Ti	B	Ce	C
19	/	/	15.09	3.02	2.03	1.59	2.53	≤0.005	≤0.005	0.047
04	0.005	0.037	15.13	2.99	2.05	1.60	2.64	≤0.005	≤0.005	0.046

三、试验结果

1. 温度对合金瞬时性能和断裂特征的影响

瞬时试验结果表明，Mg、Zr的加入对合金的 σ_b 、 $\sigma_{0.2}$ 没有影响，但显著提高700℃以上的延伸率，而无Mg、Zr的则出现低塑性区（图1）。从拉断试样表面和断口观察发现，

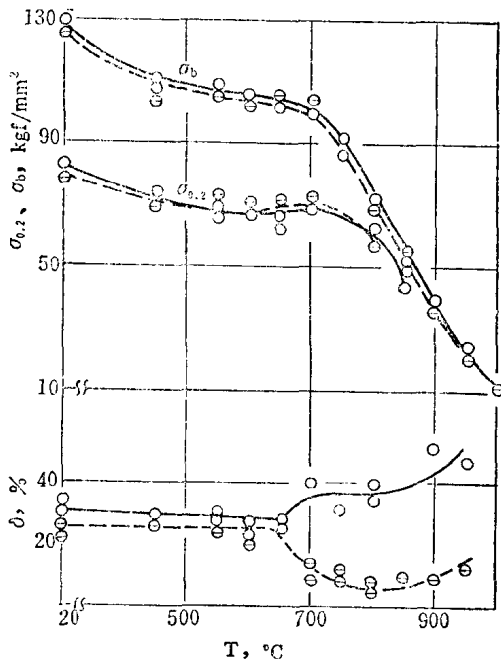


图1 Mg、Zr对合金瞬时性能的影响

——19炉 ——04炉

700℃间的持久寿命比19炉可提高一倍多，800℃以后Mg、Zr的作用逐渐减小，但仍比无

04炉合金在试样断裂时均有缩颈产生，低温时轻微，750℃以上明显；19炉合金在20~650℃间有轻微缩颈，700~900℃间无缩颈，950~1000℃又有缩颈（图2）。04炉合金在所试验温度下试样断裂后，在试样表面均有均匀分布的“桔皮”和二次裂纹，断口是穿晶韧性断口，19炉合金在20~650℃断裂后试样表面有“桔皮”现象，700℃以上就没有了，断口在700℃以下是穿晶断裂，700℃开始过渡到沿晶起断，800℃以上断口全是沿晶断裂，“二次”裂纹集中在断口附近（图3、4）。

2. 温度对合金持久性能和断裂特征的影响

在550~940℃（不同应力）范围内持久试验结果表明：04炉在600~

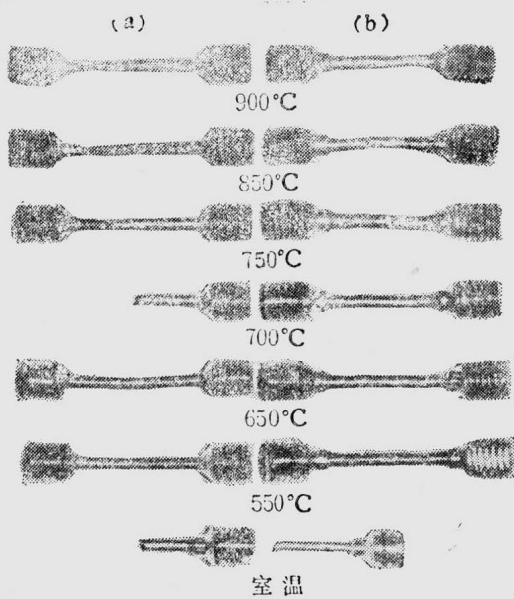


图2 瞬时拉伸断裂后的试样
1:1/2
(a) 04炉 (b) 19炉

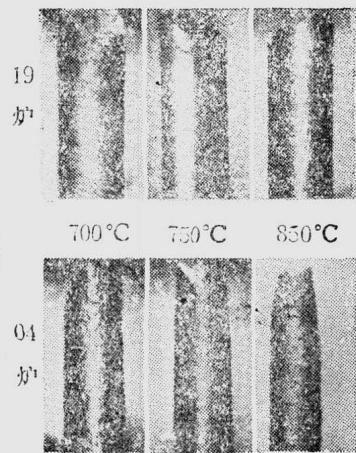


图3 瞬时高温拉伸断裂试样表面的
“二次”裂纹和“桔皮”现象
1:4

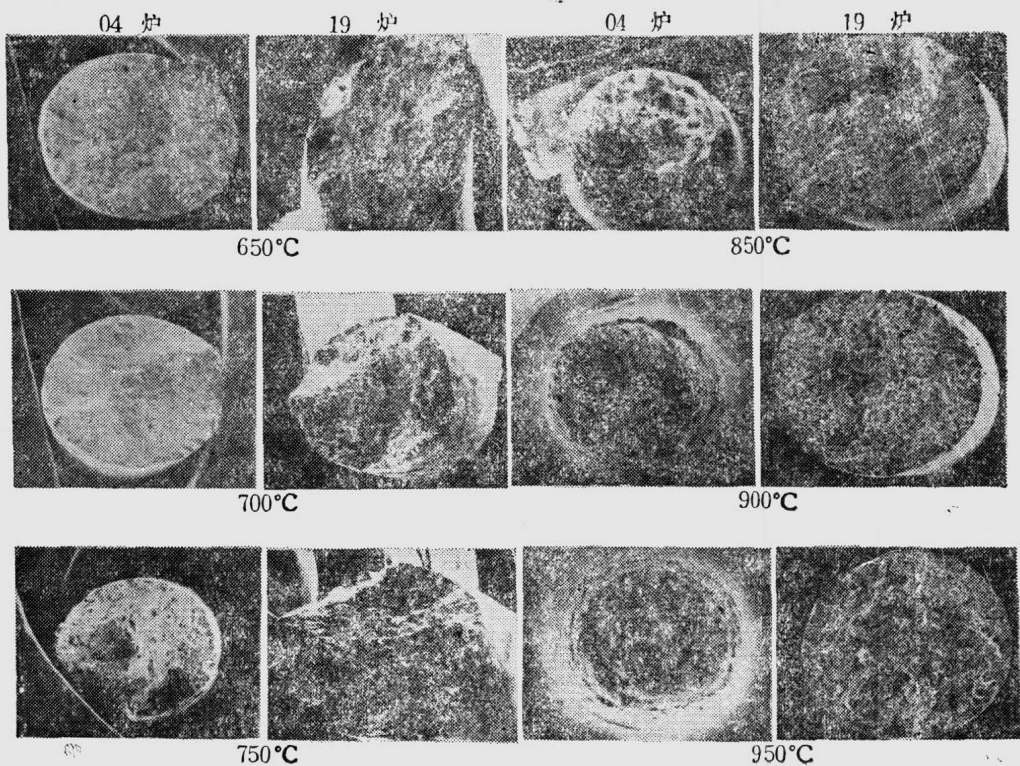


图4 瞬时拉伸断裂后的试样断口

Mg、Zr合金的持久寿命提高20%左右(图5)。断口观察表明，Mg、Zr能改变持久断裂断口的性质，由无Mg、Zr合金的沿晶脆断断口转变为以穿晶断裂为主的混合断口(图6)。

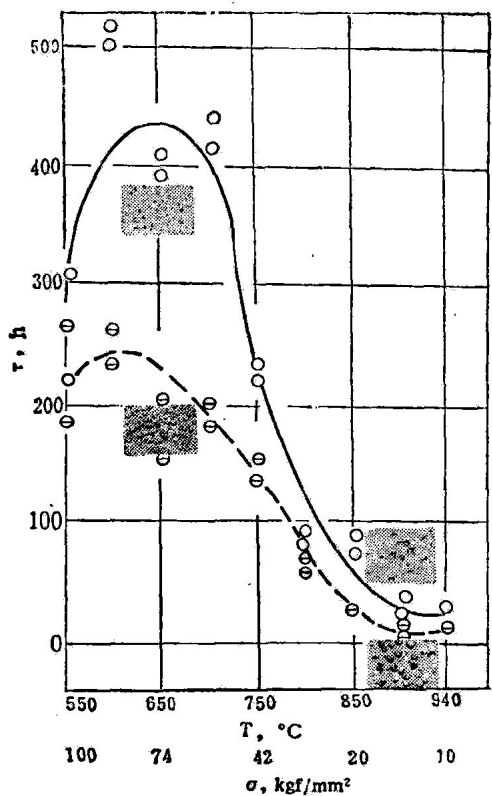


图5 温度、应力与持久寿命的关系
——04炉——19炉

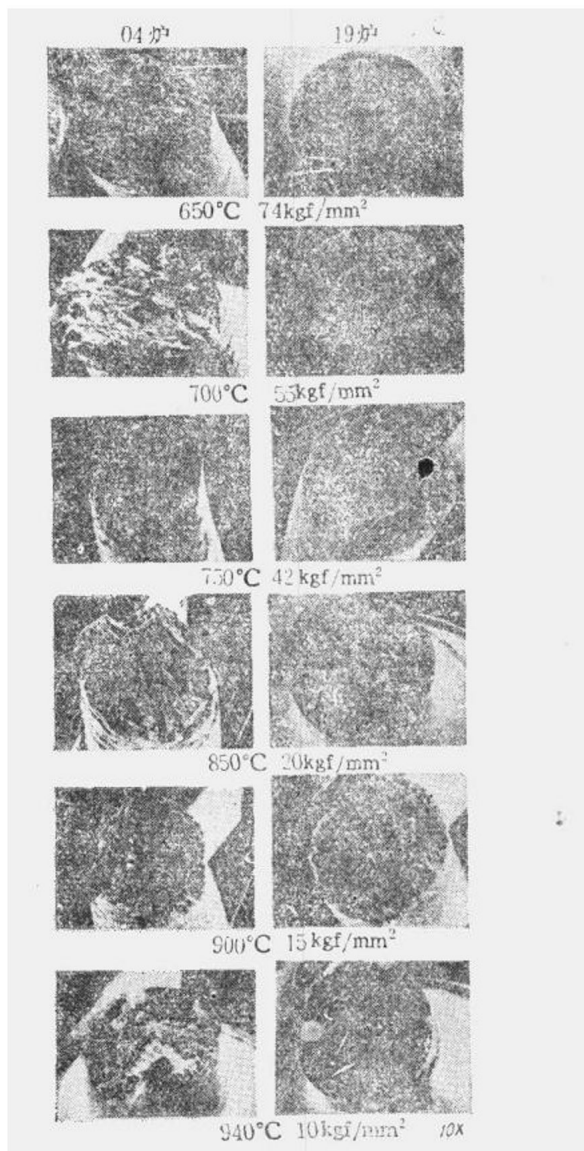


图6 不同温度、应力下的持久断裂断口的扫描电镜照片

3. 应力对持久性能和断口特征的影响

在650、700、750℃三个温度各取三个应力作持久试验，结果表明：随着应力的增加、Mg、Zr对合金持久寿命的影响逐渐减小，但仍高于无Mg、Zr合金的持久寿命(图7)，观察断口表明，无论合金含Mg、Zr与否，随应力的增加，试样断口表现沿晶断裂的特征愈明显(图8)。

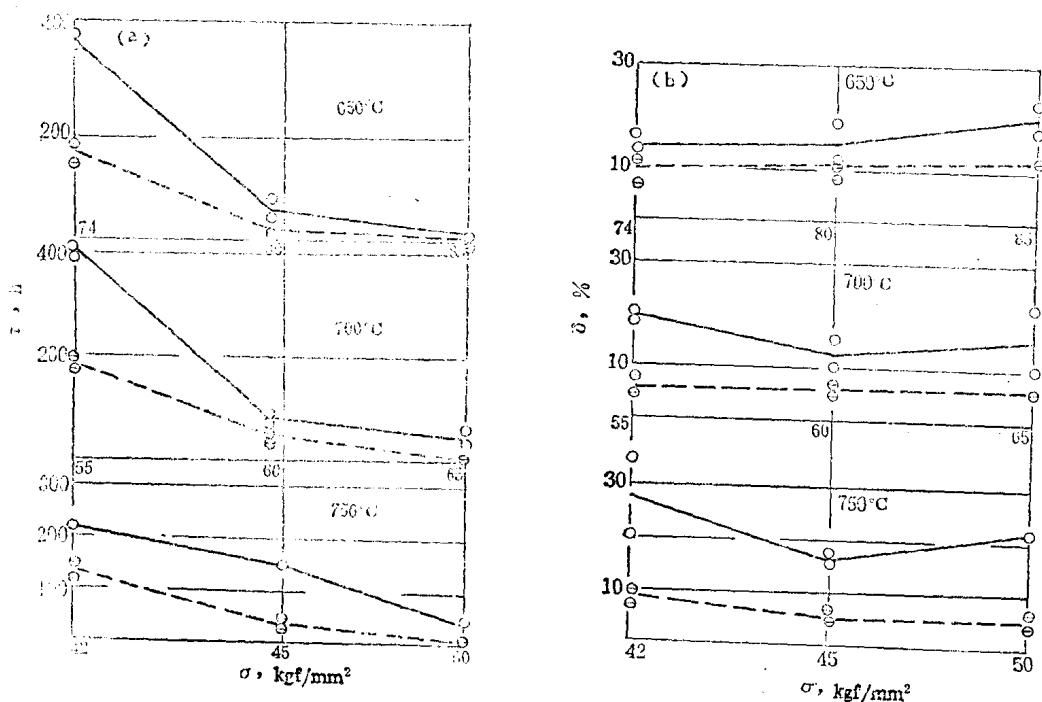


图7 应力(温度)与持久性能的关系
 (a) 持久寿命 (b) 持久延伸率
 ——04炉 ——19炉

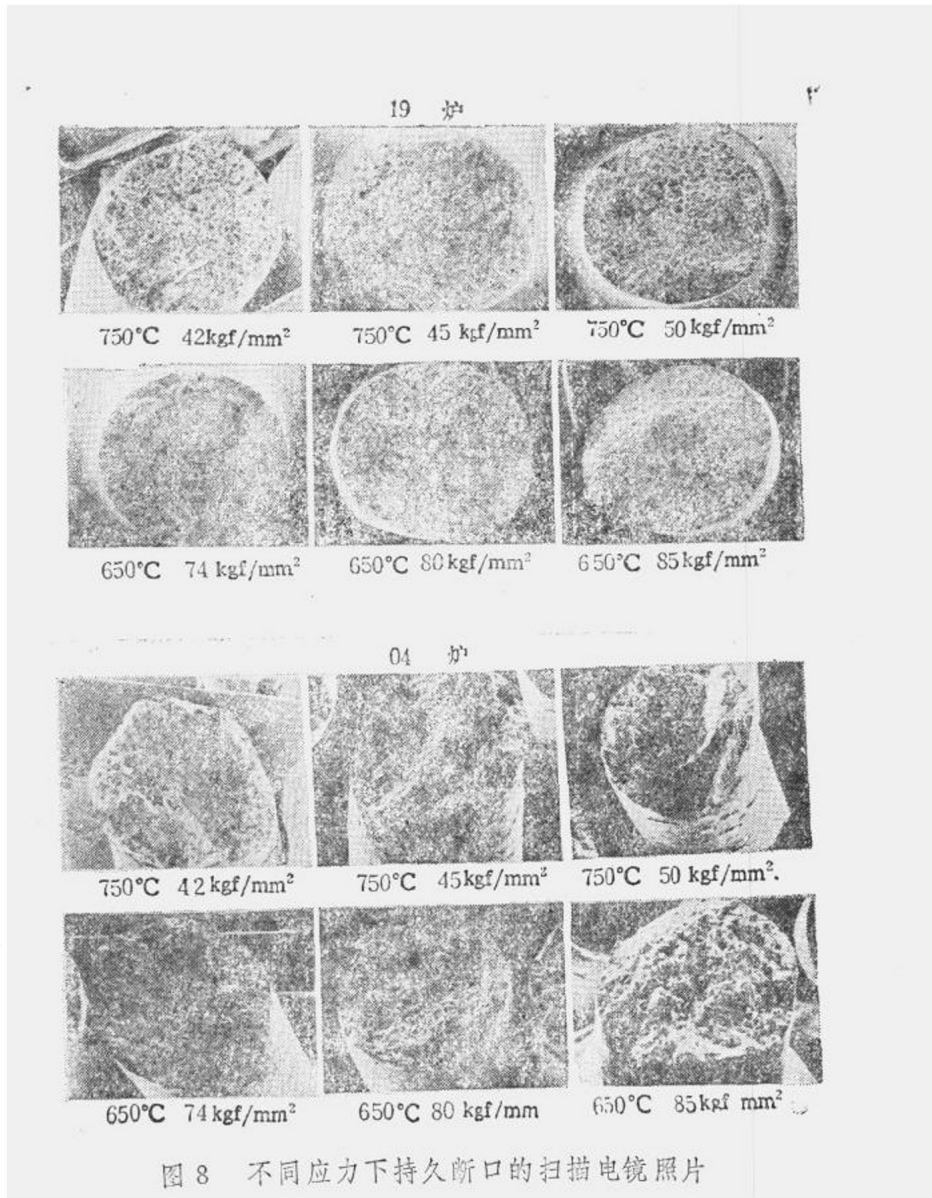
4. 时效时间对合金持久性能和断裂特征的影响:

在750°C经100、300、600、1000h长期时效后,在750°C,42kgf/mm²下进行持久试验结果表明,时效至600h前,Mg、Zr的加入能大幅度地改善合金的持久性能。时效至600h后,Mg、Zr的作用逐渐减小,但绝对数值仍高于无Mg、Zr合金的持久寿命(图9)。750°C63kgf/mm²的缺口持久试验结果表明,含Mg、Zr合金在不同时效时间下对缺口持久性能的改善作用与光滑持久的趋势相似,但提高性能的幅度要比光滑持久的大(图10)。从扫描电镜观察持久断口时看到,随时效时间的延长,断口处晶粒被拔长得愈明显(图11)。

四、讨 论

1. 关于Mg、Zr提高持久,瞬时性能和影响断口特征的原因分析

首先分析一下Zr的作用,根据^[6,7]指出:Zr含量小于0.05%时对合金的性能的影响远不如Mg的作用大。又根据相分析^[8]指出:合金中的Zr大约有60~70%进入 γ' 相中,提高 γ' 的溶解温度,因此Zr在本合金中主要作用是对 γ' 相的影响,而对晶界的影响是次要的。Mg的原子半径较大(1.60 Å),进入基体所需的能量高,而晶界原子排列缺陷多,与基体相比较,Mg就易偏聚在晶界附近的一些空位中,并与一些低熔点杂质元素化合,



形成高熔点化合物起到晶界的局部微合金化效果，改变了晶界的一些特性。在本合金中，Mg所以能改变沿晶脆性断口为穿晶或混合断口，其原因就在于Mg净化了晶界，提高等强温度，如图12所示，缩小了高温下晶内强、晶界弱的矛盾，使晶内强度和晶界强度得到适当配合，因而提高了合金强度，表现在无Mg的19炉合金在700℃出现低塑性区，断口由低温下的穿晶断裂过渡到沿晶断裂，而加Mg的04炉合金在700℃以上出现高塑性区，断口一直是穿晶断裂。这正是由于Mg的加入改善了晶界强度，使晶内、晶界强度得到合适的匹配，充分发挥了合金的强度，因而导致持久寿命和塑性的提高。

2. 关于在高应力、高温和长时效中Mg、Zr的作用分析

2.1 应力的作用：合金的等强温度随变形速度的提高而提高，在同一温度下增加试验应力，即提高变形速度，导致等强温度的提高。在650℃和700℃的试验中，随着大幅度地增加应力，而晶界强度的提高不足以经受试验应力的增加，故晶界仍先开裂；而在750℃，

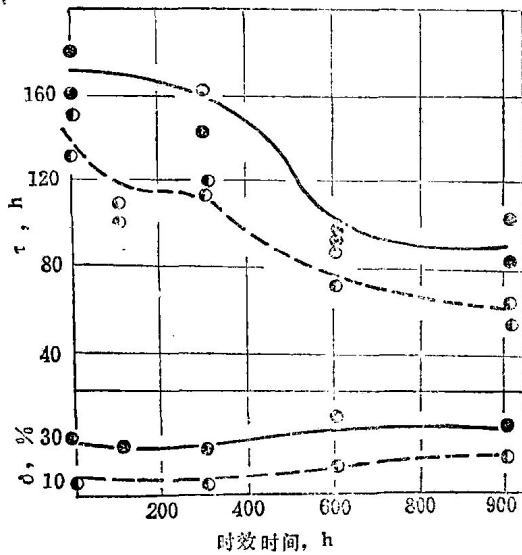


图9 750℃时效时间对持久性能的影响
 ——0.005% Mg, 0.037% Zr
 ---无Mg, Zr

试验应力的增加幅度较小, 从断口上能看到晶界参与变形, 持久寿命下降幅度也小, 当应力增加到 50kgf/mm^2 时, 沿晶起断特征明显, 晶界面也光滑, 表明晶界已不能参与变形, 因而持久寿命下降, 幅度随之增大。另从图8中看到, 由于Mg的加入, 改善了晶界塑性, 因而04炉全部试样的塑性均比无Mg的19炉好, 但随着试验应力的提高, Mg对合金持久性能的贡献就相应降低。

2.2 高温和长期时效的作用: 合金的高温性能主要取决于 γ' 相的量和其尺寸大小。本合金组织中有大、小两种 γ' 相, 合金的高温强度取决于小 γ' 相的尺寸和分布密度, 合金的塑性取决于大 γ' 相的尺寸和分布密度。当位错要通过小 γ' 相时, 必须切割小 γ' , 需要的能量就大。在长期时效过程中, 由于 γ' 相集聚长大, 大 γ' 相间距达一定值时, 位错能绕过大 γ' 相形成位错环(图13、14)。当大、小 γ' 相适当配合时, 可获得良好的综合性能。图5中04炉和19炉合金在 800°C 以上的持久性能水平差距的减小, 就在于 γ' 相尺寸长大, 大、小 γ' 相的分

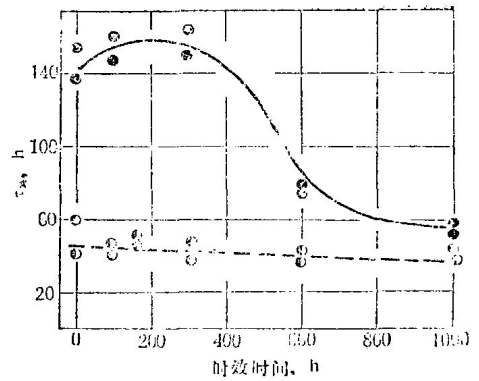


图10 750℃时效时间对缺口持久性能的影响
 ——0.005% Mg, 0.037% Zr
 ---无Mg, Zr

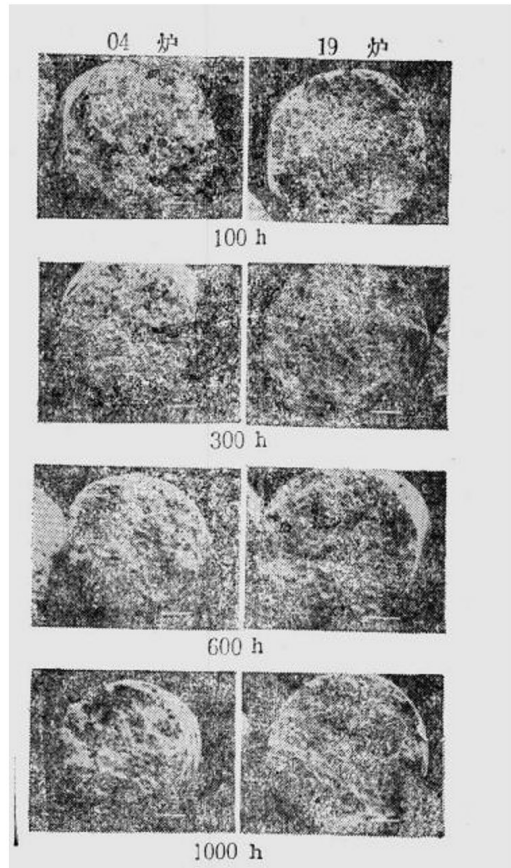


图11 750℃长期时效对持久断口的影响 $\times 10$
 (750°C , $\sigma = 42\text{kgf/mm}^2$)

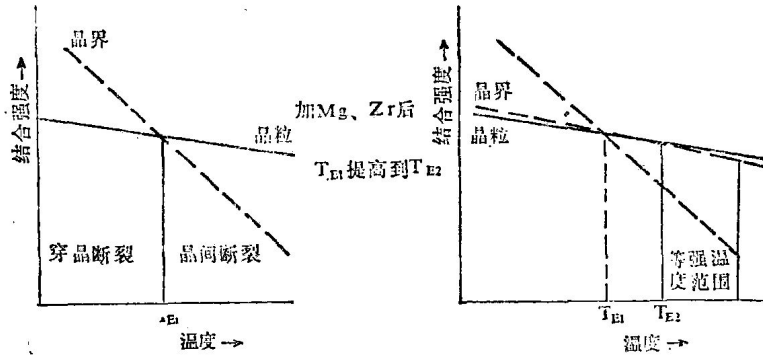


图12 Mg对合金等强温度影响的示意图

布密度失去最佳匹配，基体极度软化，对有Mg、Zr合金的晶界强化的作用相对减弱的结果，表现在断口上04炉和19炉都出现晶粒被拔长的现象。在750℃长期时效过程中，当 γ' 相的尺寸超过临界值（在本合金中约为1000 Å），分布密度（大、小 γ' 相所占面积比）超过60:40时，基体就开始发生软化，强度会出现迅速下降的现象（见表2和图15、16）。这就是为什么长期时效由300小时到600h时，合金持久性能出现大幅度下降的原因。

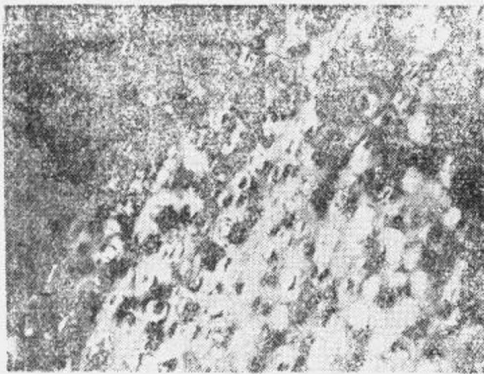


图13 小 γ' 阻碍位错通过 48000×



图14 大 γ' 周围的位错 37000×

2.3 关于Mg、Zr提高缺口持久寿命的原因分析：Mg、Zr所以能大幅度提高缺口持久寿命，乃是由于晶界强化后与晶内强度有适当的配合，在高温蠕变过程中，晶界的滑移变形与晶内变形有良好的协调，降低了三晶边界处的应力集中，延缓了裂纹的产生和扩展，又因合金有良好的塑性，由局部应力集中引起的裂纹在向前扩展过程中，易受到裂纹尖端处所发生的塑性变形而松弛掉，随后在外力作用下，应力再发生集中，再松弛或应力

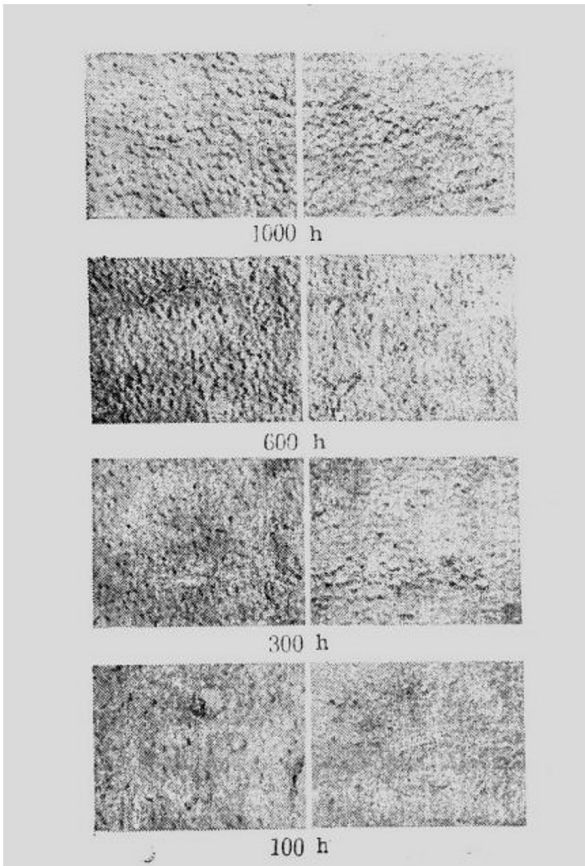


图15 750°C长期时效对合金显微组织的影响
(左)19炉 (右)04炉

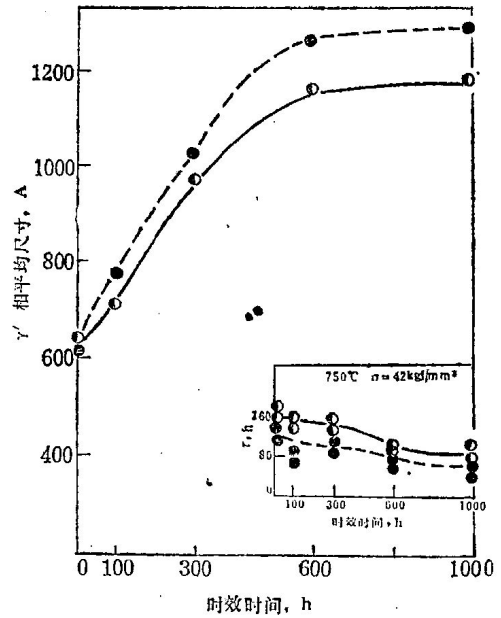


图16 750°C时效时间对 γ' 相尺寸的影响
——04炉 ---19炉

表 2 750°C时效时间对大、小 γ' 相组成和持久寿命的影响

时效时间 h	小 γ' 相占 γ' 相总量, %	大 γ' 相占 γ' 相总量, %	持久寿命(750°C, 42kgf/mm ²), h	
			04炉	19炉
正常处理	62	38	172	145
100	54	46	150	105
300	39	61	150	116
600	23	77	96	81
1000	21	79	91	58

集中地区发生转移, 这种连续发生的过程延缓了裂纹的扩展, 从而提高了缺口持久寿命。而在不加Mg、Zr的合金中, 晶界相对是薄弱的, 晶界发生滑移时与晶内变形没有合适的

配合，由缺口部位引起的应力集中得不到松弛，因此一旦产生裂纹，就极易通过薄弱的晶界通道连续不断地向前扩展，直致断裂，所以缺口持久寿命就低（图17）。

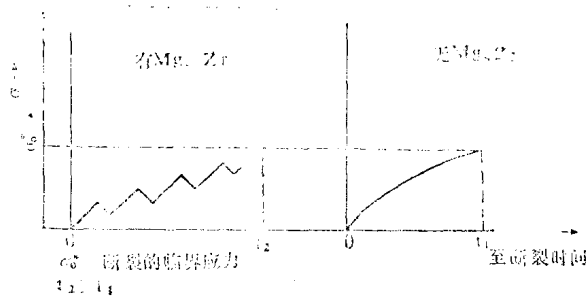


图17 Mg、Zr改善缺口持久性能机理的示意图

五、结 论

1. 合金含微量Mg、Zr，可以大幅度提高中温持久和缺口持久寿命以及中温塑性。
2. Mg、Zr能提高合金等强温度，使无Mg、Zr合金的沿晶断裂断口过渡到混合或穿晶断裂断口，导致力学性能的提高。
3. 随应力、温度和时效时间的增加，Mg、Zr对合金性能的改善逐渐减小，但其数值仍高于无Mg、Zr合金的性能。
4. 合金中含适量的Mg、Zr可强化晶界，使晶内和晶界强度相协调，以获得最佳的综合性能。

参 考 文 献

- 〔1〕 Н. П. БУЛЫГИН И ДР., МТОМ, №11, 1956.
- 〔2〕 张红斌，镍基高温合金译文集，1983，4.
- 〔3〕 W. J. PENNINGTON, Metal Progress, March, 1958.
- 〔4〕 В. А. ПАННРАМОВ, КОНСТРУКЦИОННЫЕ И ЖАРОПРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ НОВОЙ ТЕХНИКИ, 1978
- 〔5〕 高温合金冶金学和生产，上海科学技术文献出版社，1980，3.
- 〔6〕 镁、锆对GH698合金力学性能和热塑性的影响 钢铁研究总院、大冶钢厂、抚顺钢厂、长钢三分厂，1981，7.
- 〔7〕 微量元素对GH698合金性能和组织的影响
第二部分——Mg、Zr的影响，钢铁研究总院、大冶钢厂、抚顺钢厂、上钢五厂、长钢三分厂，1983，8.
- 〔8〕 微量元素Zr、Mg对GH698合金相组成的影响，钢铁研究总院，1983，8.

GH220合金加镁工艺的研究

张俊明 李凤州 金谨秀

(抚顺钢厂)

陈淦生 马培立 仲增墉

(钢铁研究总院)

摘 要

本文根据GH220合金冶炼工艺的研究及镁对GH220合金组织和性能的影响,探讨了关于GH220合金在220kg真空感应炉冶炼镁的收得量与输入炉内氩气压力、钢水温度及加镁后距离出钢时间之间的关系,并结合生产实践,初步找到了该炉冶炼GH220合金时,镁的收得量的经验计算公式。

一、前 言

近十余年来,世界上生产超级合金加入一定量的镁,使合金的工艺性能和机械性能得到了明显的改善,大量的试验结果表明,使一些合金的抗氧化性能、抗腐蚀性能、合金的高温塑性及高温持久性能等方面都有了明显的改善和提高,特别是在近些年来试制出的新合金中,在微量元素添加剂方面对硼、稀土及碱土金属进行了调整,特别突出了镁的应用,使新一代的合金具有更加优良的综合性能。合金中镁含量必须控制在一定的范围。镁做为合金的添加剂,过去国内曾做过一定的工作,可是镁做为正式添加剂没有被正式采用。在国外近十多年对镁做了大量的试验研究工作,在一些新老合金上得到了广泛的应用。但是,关于镁的加入方法及其工艺控制的研究成果未见报导,这反应出镁在超级合金使用中的重要意义和冶金上的难度。为使我国镍基高温合金的生产水平大幅度的提高,赶超世界先进水平,对微量元素镁的加入方法和工艺控制的研究就显得十分迫切。我们在GH220合金的研制期间,对镁的加入方法和工艺控制进行了研究,取得了一定的进展。

二、试验方法

1. 镁的工艺控制原则

GH220合金是制造发动机一级涡轮叶片材料,合金中含镁量为0.005%左右。这样的镁含量在当前被认为是较合适的。可是如何获得这样的镁含量,必须弄清楚,添加镁的数

量、镁在真空感应及真空自耗炉重熔过程中的变化规律。生产实践表明，镁在真空自耗重熔过程中的绝对烧损量对合金性能的影响也是十分重要的。所以，我们在研制GH220合金时，不仅探讨了镁含量的工艺控制问题。而且，也探讨了电极中、镁在重熔过程中的绝对烧损量与合金最终性能之间的关系。从而解决了真空感应炉冶炼GH220合金时镁的合适加入量及电极棒中镁含量的最佳控制问题。

2. 真空感应炉冶炼特点

GH220合金采用200kg真空感应炉冶炼，当炉体冷态漏氧 $\leq 1\mu\text{m}\cdot\text{l/s}$ 时，方准修炉，进入新一轮冶炼周期。冶炼真空度要求稳定在 $1\sim 3\times 10^{-3}\text{mmHg}$ 。除金属铝、金属钛、硼铁及镍镁合金外，其他所有原材料均一次装入炉内。原材料全熔后，进入合金的精炼期。为了使合金进行充分的脱气、夹杂物充分上浮去除、有害元素充分挥发以及严格控制金属坩埚反应。精炼期应该严格控制精炼期的温度及冶炼时间，合金经过精炼后，进入合金化期，由于加入大量的铝钛，故合金迅速升温，因此，必须恰当的控制输入功率及合金化时间，以防止钢液温度过高，为加入镍镁合金及出钢创造条件。

在合金化末期，当温度合适时，往炉内输入氩气，氩气纯度 $>99.99\%$ ，然后加入镍镁合金，经过搅拌后出钢，浇注成 $\phi 130\text{mm}$ 电报，在真空下保持30min（图1）。

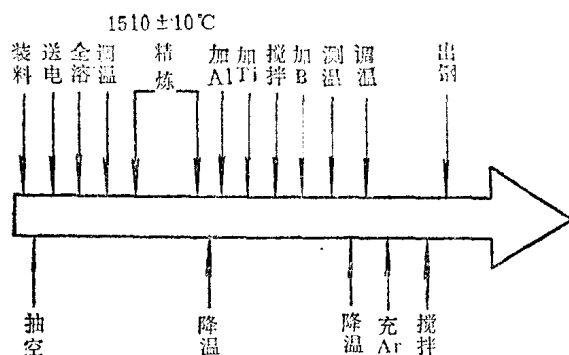


图1 200kg真空感应炉冶炼GH220程序

三、试验结果和讨论

为确保合金中最佳镁含量及其电极在真空自耗重熔过程中镁的绝对烧损量，必须对电极中的镁含量进行最佳控制。为此，研究了影响镁收得量（即：残余量，下同）的工艺参数与镁收得量之间的关系。取得了一些规律性的东西，不但比较好的对镁的收得量进行控制，而且也为GH220合金真空感应炉冶炼加镁经验计算公式的提出奠定了基础。

1. 镁收得量与输入炉内氩气压力之间的关系

众所周知，镁在真空下挥发性很强。因此，采用元素镁作为添加剂收得量很低，而且难以控制。为了稳定镁的收得量及在合金中的均匀分布，采用镍镁合金的形式加入。为限制和减少气相中镁原子的自由行程，以降低镁在真空下的挥发速度，在真空中输入高纯氩