

大型铸锻件文集

德阳大型铸锻件研究所

2

1987

机械委大型铸锻件情报网

目 录

综 述.....	Edward G. Nisbeu (1)
先进的炼钢工艺对转子锻件技术条件发展方向的影响	J. E. Steiner 等 (4)
合金元素和炼钢工艺对大型钢锭中“ A ”偏析的影响.....	J. T. Kim 等 (10)
整锻高低压复合转子锻件的研制.....	M. Yamada 等 (17)
采用区分热处理方法制造汽轮机转子锻件.....	A. Suzuki 等 (26)
压水堆核电站焊接组合转子的制造、最佳钢种选择以及杂质的影响	J. Pisseloup 等 (32)
高压转子用新型 $2Cr-Mo-Ni-W-V$ 钢.....	H. Finkler 等 (43)
用先进工艺生产的 $1Cr-Mo-V$ 钢汽轮机转子锻件的机械性能	V. P. Swaminathan 等 (54)
地热发电站汽轮机转子用 $Cr-Ni-Mo$ 低碳马氏体不锈钢.....	K. Schönfeld 等 (65)
$C-Mo$ 与 $Ni-Mo-V$ 钢汽轮机转子锻件缺陷的冶金分析.....	S. Toney 等 (74)

责任编辑 赵晓东

组版编辑 胡福元

综 述

Edward G. Nisbeu

(美国国民锻造公司, 专题讨论会主席, 本书编辑)

这次锻钢件专题讨论会, 是美国材料试验学会 (ASTM) 主管钢、不锈钢及有关合金的 A01 委员会主办的。讨论会由负责锻钢件和钢坯的 A01.06 分委会具体组织。从论文和出席者两方面看, 这次讨论会都堪称是国际性的。讨论会的目的, 在于反映这个分委会及其四个部门工作领域的情况, 并为介绍铁合金锻件的进展提供论坛。讨论会的预期成果, 将对分委会标准工作适用这些专门技术的范围、动向和特点有重要贡献。不过这本技术专著还可以作为某种基准更广泛地用于锻钢件, 尤其是大锻件。

A01.06 安排的讨论会开法, 反映了这个分委会对锻钢件的多方面兴趣, 因而讨论会包括有一般工业用的锻件、涡轮机和发电机锻件、压力容器和核锻件以及试验方法等方面的会议。负责锻造不锈钢制品的 A01.08 分委会, 对不锈钢锻件方面的会议提供了协助。按照美国材料试验学会各项活动的精神, 论文作者包括生产者、使用者以及锻压设备制造厂中因有附带好处而对锻件一般有兴趣者。论文主题内容涉及锻件制造过程各个具有特点的阶段: 钢的熔炼和精炼工序, 大型专用钢锭的偏析和凝固的控制, 锻造工序。优质锻件的生产就取决于这些制造阶段。论文内容还涉及有助于改善质量以满足使用要求的研究成果。在对锻压能力的要求已经而且仍然在不断减少的时候, 讨论会开

得如此成功, 这是值得称道的。关于锻件热处理的发展方向, 可以从若干篇论文内容中明显看出。由于尺寸的大小范围和外形多种多样, 锻件还存在无损试验方法的特殊问题。论文集中包含有液浸超声探伤和在役检查专门技术方面的参考资料。

Curran 的简要论文, 作为关于涡轮机和发电机转子锻件的开发和现状的概述性文章, 以现代中心发电厂的实际规模为依据, 反映了工业发展过程。发电厂规模大小, 是部分地取决于锻件质量的不断改善的。这篇论文作为作者在贡献出那些最重要的作品, 经历了杰出历程之后退休的里程碑, 的确是很合适的。处在蒸汽室或定子壳体内的锻造合金钢的巨大转子, 要求具有良好的质量, 这通常已不再是辩论的主题。与讨论会安排的最长会期有关的那些论文, 其内容不仅包括转子本身, 而且包括发电机护环, 这应当是不足为奇的。

对制造转子所需大钢锭的偏析控制, 是 Kim 等人论文的主题。它证明了低硅作业的有益影响, 补充了可用于钢锭偏析这个重要课题的资料。电力研究所 (EPRI) 的 Steiner 和 Jaffee 关于制造实验性 Ni-Cr-Mo-V 钢涡轮机转子锻件的文章, 给将来可能用于生产大型转子用的洁净钢的冶炼方法带来了曙光。对这个转子的全面评价正在进行。一个复杂的问题, 是如何把改进的必要

性同制造的经济性协调起来。

高温汽轮机运行的机械性能要求,和同样机组低压运行的机械性能要求不同,用一个合适的方法满足两方面要求为目的进展,最近已经用到正在制造的机组的生产上。有关这个进展和这个汽轮机转子锻件的制造,在Yamada等人的论文和Suzuki等人的论文中都有叙述,它是依赖于一种新颖的双重热处理工序的。与此相似,由于电力研究所进一步的研究,Swaminathan等人报道了采用先进技术的1Cr-Mo-V钢涡轮机锻件。还有Finkler和Potthas报道了高压转子用的新型2Cr-Mo-Ni-W-V钢。这些报道都提供了大量的参考数据。

Pisseloup等人对欧洲一家制造厂的大型焊接转子的现状作了叙述。与此同时,Kawaguchi等人的一篇论文则提出了Ni-Cr-Mo-V钢大型整体锻件的课题。文中有钢锭偏析控制方面的讨论,有所生产的大型转子的试验数据,包括缺口试样韧性值。

Albrecht等人关于通常用于低压转子锻件的Ni-Cr-Mo-V钢的课题,目标放在同材料淬透性相联结的质量效应上。文章以若干现有转子试验数据为基础,同时有模拟更大锻件的试验材料热处理试验结果。正如别的此类对比所经常注意到的,为大截面尺寸推出的韧性下降程度,似乎同实际检测到的不相一致。这仍然是今后工作中一个明显的研究题目。

许多转子锻件是在象真空脱气和超声波探伤这样的重要进展之前制造的,它们至今仍在使用中。目前对这样的机组,通常尽量用现代试验方法尽快进行检测。Toney等人报道了Cr-Mo钢和Ni-Mo-V钢转子的冶金检验情况,这些转子在经无损探伤后发现裂纹信号,因而退出服役。这个办法有助于决定老设备可否继续使用。发电设备的运行状况,也是Bellows和Walker的论文的主

题。文章提出对大型转子使用超声波探伤和磁粉探伤技术问题,得到的数据被认为涉及与使用有关的诸如裂纹扩展等问题。

在发电设备工业中,电渣重熔法已在制造马氏体不锈钢转子锻件和双联铬不锈钢转子锻件上找到应有的位置。Schönfeld和Potthas叙述了这种合金在地热电站苛刻条件下应用的情况。

如同适用于高铬钢,电渣重熔法还适用于制造发电机无磁护环锻件。这种高度专业化的产品,要求有极好的质量,才经得起强扩成形工序和所需要的操作。Stein的论文和Rambaud与Cazenave的论文,讨论了对所用的材料及其性能的最新看法。

在电渣重熔其他传统应用方面,Watkins和Tihansky对304型奥氏体不锈钢大型核锻件作了叙述,就象Khare和Sikka以及Gelpi对新改进的9Cr-1Mo钢试验性开模锻件进行评价那样。这种材料在ASTM中是锻件用F91级钢。有关后一种锻件的资料,提供了设计者希望采用这种多用途耐热钢所需要的数据。

Stein的文章,在采用氮气和排除可能的氢源方面,叙述了应用压力下电渣重熔问题。有若干迹象表明,这一进展将考虑采用新的含氮的合金钢。但这种方法除加氮外,对氢的控制有很大的重要性。氢的控制始终是高强度低合金钢电渣重熔的一个问题,当应用电渣重熔法可能硫含量非常低时尤其如此。

Javorik关于同材料抗剪力有关的锻造力要求的论文,以及Rut对金属晶粒流向连续的极大型船用曲轴的制造工序的详细说明,从理论和应用两个方面论述了锻造工序。Rut的文章还叙述了这类曲轴锻件制造方法的目前状况。

Kuhlman等人权威地阐述了奥氏体不锈钢耐热钢锻件(包括某些高强度沉淀硬化钢

种)的热形变过程,而Abe和他的同事们则就加州一个熔炼试验室应用深冷技术,阐述了奥氏体不锈钢高强度在基独特锻件上的应用情况。这类特殊钢锻件受到使用者和加工者的欢迎。

在压力容器方面, Bocquet 等人关于所谓“LSD锭”的文章,叙述了用于专门用途的定向凝固钢锭。文章讨论了压力容器筒体用的空心钢锭和大型管板用的圆盘形钢锭,特别是这些类型钢锭的偏析特点。人们怀着很大的兴趣注视着这些工艺的推广。尤其是无冒口的圆盘形钢锭,可能成为未来论文的主题。

海洋石油和天然气工业设备,根据运行经验(包括多次灾难性事故),其质量和结构设计的相互制约性要更加严格。这类设备还面临着深水工作的困难。需要高度完善的材料的先进设计,目前正在出现。Whitehouse的文章就是一个例子,它描述了低合金钢锻件在张力腿钻井平台锚定系统设计中的应用情况。

本部分最后两篇文章大量谈到热处理:一篇是 Bateau 等人的,涉及石油化工容器筒体用的 $2\frac{1}{2}\text{Cr}-1\text{Mo}$ 钢;另一篇是 Skamletz 和 Grimm 关于 ASTM A508Cl. 3 型钢大型核电系统管板的文章,讨论了应用亚温热处理来提高韧性的问题,技术标准正式采纳这种热处理,目前看来已为时太晚。还有一篇文章是欧洲的 Austel 和 Körbe 以及日本的 Kawaguchi 等人的,它叙述了核反应堆和泵用的专用部件的大型复杂开模锻件的开发情况。这些论文,把可以使以后在役检查的焊缝最少、质量高度完善的零件的锻造能力,完全告诉了设计人员。如同 Curran 的文章概述了转子锻件的状况一样, Bernabei 等人关于壳体管段锻件的文章,也极好地概述了核锻件的状况。

由于锻件的大小、形状、横截面尺寸的多样性,对试验方法提出了种种特殊要求,加以种种限制。这种情况,对于轧制型材和板材这样形状、大小比较规则的产品来说,是碰不到的,或者是不需要的。对锻件液浸超声波探伤法的开发,在 Gensure 等人于试验方法会上发表的论文中可以看到,文章叙述了这样一种 A338⁽¹⁾、A418⁽²⁾、A456⁽³⁾、A745⁽⁴⁾ 目前尚未涉及的方法的应用。A338 等标准都是有关超声波探伤方法的。Murphy 和 Steiner 关于锻钢件的氢的最新资料,也已收入这次会议论文中,它是作为对这一重要课题当前看法的述评而收入的。失效分析通常不是这类综合性讨论会的论题,然而 Ebara 和 Kubota 关于锻模失效评定的文章,根据断裂力学,引进了同锻件生产厂家直接有关的各种因素。Kramarow 的文章则叙述了对目前普遍使用的锻造设备进行的工艺考察情况,指出各种工艺方法的局限性和具有的能力,因而同样使锻件的生产者和使用者感到浓厚兴趣。

这些论文的质量和文章内容的丰富,充分证明了召开这次专题讨论会的决定是正确的,而且的确表明这次讨论会开得太晚了。这次关于锻钢件的首次专题讨论会的记录,包括论文和直率的讨论,都有助于给工业指出哪些方面是已经达到的,提醒注意那些可能令人烦恼的方面,并作为参考资料为进一步开发和应用服务。

一个值得注意的方面是:哪里有真正的需要,哪里就有制造工艺和制造方法的惊人进展,就象在有关大型涡轮机转子锻件和核反应堆锻件的叙述中可以看到的那样。相反,哪里缺乏需求,哪里进展就小,这是可以理解的。这一点在美国已被证明是正确的。美国的锻造团体,对着在锻钢件方面正在变成技术追随者而不是技术领先者,必须有所警惕。

先进的炼钢工艺对转子锻件技术条件发展方向的影响

J. E. Steiner R. I. Jaffee

【提要】 本文详细介绍了生产转子锻件所用的先进炼钢设备和工艺状况。美国电力研究所 (EPRI), 已经研制出了高压转子锻件用的硫含量为 0.001~0.002% 的 1Cr-Mo-V 钢。这种钢是用一般的真空碳脱氧方法和电渣重熔方法冶炼的。对低磷、低氢和残余元素的控制也列入了这个项目的研究课题。

实验研究表明: 同时降低 Mn、P、Si 及残余元素含量, 可以改善转子钢的韧性并提高其抗回火脆性的能力。在美国电力研究所和德国的联合特殊钢厂共同研究的最新方案中, 他们采用碱性电弧炉初炼, 钢包炉精炼以及真空处理的方法, 成功地制造了一根 25t 重的模拟转子。其成分为: Mn 0.02%, P 0.002%, S 0.001%, Si 0.04%, Al 0.005%, 和 O 27ppm。

本文还说明了要求在高纯度转子钢中降低 Mn、Si 和 S 含量的意义。

蒸汽汽轮机和发电机转子锻件用钢的质量在不断提高。目前的转子钢中, S、P 等一些微量有害元素的含量与 20 年前的转子钢相比, 只占其最低含量的很小比例。在这期间材料的致密性、纯洁度特别是析出的非金属夹杂和聚集性气孔问题也得到了明显改善。

50 年代初, 几起转子断裂事故促进了炼钢工艺的发展, 出现了一些设计原理和工艺与以往完全不同的装置, 比如: 钢水的真空除气, 真空碳脱氧, 氢元素分析方法, 超声波检查, 断裂力学, 电渣工艺, 钢包精炼, 特殊保温帽以及吹氩工艺等。应用这些方法, 目前才能够生产出高质量的产品。

这些成果不可避免地出现了质量方面诸如“怎样才算足够了?” 的问题。现在大多数的厂家和用户, 针对产品成分可能存在较大的不均匀性和韧性有可能不够好的问题, 提出应该制定一个较严格的质量标准。并且

大家都认为, 目前材料的致密性和机械性能标准都能保证转子安全运行。

本文将讨论一些炼钢工艺, 这些工艺目前都能很好地用于生产并且也是很有前途的。对某些感兴趣的元素本文也作了讨论, 这些元素影响钢水的质量水平, 在大型转子中必须考虑它们的影响。

一、概述

专门从事工程材料和机械工艺研究的美国电力研究所发表了一篇题为“转子锻件先进的炼钢工艺”的报告。报告主要论述了大型转子锻件在炼钢工艺, 特别是在精炼和浇注方面的进展。如氩-氧脱碳 (AOD)、钢包喷射冶金、钢包精炼炉 (LRF)、电渣重熔 (ESR)、电渣热冒口 (ESHT) 和发热保温帽等, 这些工艺引起了一些炼钢厂和锻造厂的极大兴趣。

参考文献

- (1) ASTM “大型锻钢件超声波检验推荐方法” (A388-84)
- (2) ASTM “涡轮机和发电机钢质转子锻件的超声波探伤法” (A418-77 (1982))

- (3) ASTM “大型曲轴锻件磁粉探伤规程” (A456-83)
- (4) ASTM “奥氏体钢锻件超声波检验推荐方法” (A745-84)

颜一琴 译

此外，一些炼钢、锻件生产厂和汽轮机生产厂家已研究出了含S量更低的转子用钢。不久前，制定出碱性电弧炉钢水硫含量的标准范围为0.004%~0.008%。此硫含量标准，实际上就是没有进行二次精炼的碱性电弧炉（BEF）所能达到的质量水平。

在过去的十年中，二次精炼的时代已经到来。它的主要形式是钢包冶金。在喷射冶金、电磁搅拌和钢包精炼工艺中，不论用哪种工艺都能把硫含量稳定地控制在0.001%~0.002%的范围内，这已被一些厂家所证实。另外，电渣重熔和氩-氧处理等工艺也能得到较低的硫含量。在美国电力研究所的调查报告，提供了这些工艺的图片并详述了这些工艺与其他工艺的不同之处。

所有这些工艺都能生产出低硫、低磷的高质量钢。至于具体选用哪种方法，这要取决于产品大小（锻件尺寸）、工厂的生产能力、成本控制和基本投资的多少等。

随着技术条件中S、P和O含量的降低（这是必要的），以及Si和Mn含量的降低（这也许会使用性能好一些），这就需要强化精炼过程。正如上面所说，一些锻件生产厂家有许多较成功的工艺，不论采用哪种工艺都能生产出含S量很低的各种质量等级的钢。运用这些工艺可以取消碱性炉内的精炼过程，这样可以提高工厂的冶炼能力并降低成本。

对于较小的转子，可用一根由先进的二次精炼工艺浇注的钢锭锻成几根转子，这主要是从经济的方面和最大程度地满足实际生产能力方面来考虑的。但当生产高纯度钢锭方面的竞争较激烈时，应当选用哪种生产方式就很重要了。高纯度是指：Mn、P、S、Si、Al、O、N和H的含量较低且控制范围狭窄。具有真空特性的钢包精炼炉一般被认为是质量控制过程的主要手段。

对于大型转子，锻造时要求多次加热整

根钢锭。钢包精炼炉在钢水再加热和保温方面更具有其优越性。所以，对于大的转子产品，比较合适的工艺应是碱性炉初炼、钢包炉精炼，然后真空除气浇注。

对于各种较大的转子钢锭，最好应采用真空除气浇注，尤其是对裂纹敏感的转子钢。为提高锻件产量，改善均匀性和致密性，电渣热冒口，尽管未广泛用于生产，但在转子钢锭的生产过程中已开始得到应用。

二、高纯度转子钢

在奥地利Kapfenberg德国联合特殊钢厂（VEW）借助美国电力研究所的RP140-3方案，已经推广发展了先进的高纯转子钢生产工艺。在这个方案中，联合特殊钢厂使用碱性电弧炉初炼，钢包真空吹氩除气、电磁搅拌和氩气搅拌的钢包精炼工艺，生产了一根33t重的Ni-Cr-Mo-V转子钢锭。其化学成分如表1所示。这些炉生产的转子锻件是按工艺要求进行生产的，其结果将由德国联合特殊钢厂和美国电力研究所在以后报道。

三、讨论

在生产了25t重的钢锭以后，要设计生产更大的钢锭时，问题就转移到“下一步还存在哪些方面的问题”上了。

在美国电力研究所的RP2060方案“实用成分的高纯钢”中指出：实验研究表明，降低转子钢中Mn、Si的含量甚至在Ni含量较高的情况下，也有利于提高其抗回火脆性的能力。此外，非常低的S含量也允许降低Mn的含量（没有晶间铁素体硫化的危险），这样大大改善了钢的断裂韧性和延展性。研究结果还表明：Cr-Mo-V转子钢中含量较低的S与Mn和Si配合适当，则能成倍地提高其室温下的断裂韧性。这些成果使汽轮机生产厂家很感兴趣，并且使人们对转

表1 33tNi-Cr-Mo-V 高纯度转子钢的化学成分(%)

化学成分	最大含量	目标值	经钢包精炼后的含量	化学成分	最大含量	目标值	经钢包精炼后的含量
C	—	0.25~0.27	0.30	V	—	0.10	0.08
Si	0.05	0.02	0.04	Al	0.005	LAP*	0.005
Mn	0.05	0.02	0.02	Sb	0.002	0.001	<0.005
S	0.002	0.001	0.001	As	0.005	0.002	0.002
P	0.005	0.002	0.0024	Sn	0.005	0.002	0.003
Ni	—	3.50	3.44	O (ppm)	25	LAP	27
Cr	—	1.65	1.68	N (ppm)	50	—	44
Mo	—	0.45	0.41	H (ppm)	0.5	LAP	0.7

* 低于LAP标准允许的值。

子运行时的可靠性和安全性更加信任。抗回火脆性的提高,对设计使用温度高或冷却效果不好的大型低压转子尤为重要。除以上这些情况之外,据统计,由于通用转子的质量足以保证其安全运行,所以汽轮机和锻件生产厂家常从成本的角度考虑怎样生产更高质量的产品。

就发展趋势来看,将成本和质量一起考虑,企业才有前途。应适当降低高纯转子锻件和其他一些特殊锻件的成本,以便在本行业具有较强的竞争能力。大多数汽轮机厂家主要从他们的技术指标中看其成本是否合适。这些厂家将对S、P、As、Sb和Sn的含量进行抽样检查,并研究低Mn、Si转子的工作情况。那些对机械性能和强度极限感兴趣的厂家对高纯转子钢的硬度也很重视。正如过去一样,这将是一个很难解决的复杂系统,这些难题与不断提出的愈来愈严格的技术要求有关。

下面对可能会影响技术性能的几种元素进行讨论。

1. 锰

Pennsylvania大学的McMahon认为,在影响Ni-Cr-Mo-V钢的回火脆性方面,Mn和Si起着重要的作用。见图1。美国电

力研究所的RP2060工作报告中说:甚至在P、Sb、As和Sn含量较高的钢中,只要Si、Mn含量甚微则该钢的回火脆性都会很小。RP2060的研究工作是在Mn含量小于0.05%和Mn含量在0.10~0.15%的范围内进行的。美国电力研究所和联合特殊钢厂用33t钢锭锻造的几根转子一起进行了分析研究,得到了Mn的最佳含量值。

降低或消除Mn含量会影响钢的淬透性。在Ni-Cr-Mo-V钢中,Mn对回火脆性的影响很大,因而,Mn对淬透性的影响就可以忽略不计了。例如在1Cr-Mo-V钢中,即或已经证明了Mn对淬透性有影响,但仍允许该钢中可以含有中等含量的Mn。

这样,人们所期待的是在不影响1Cr-Mo-V钢的淬透性的情况下,在实际生产中尽量消除Ni-Cr-Mo-V钢的含锰量,或者是只限定Mn的最大含量而不要给出其值的范围。

2. 磷

最近几年没有强调减少P含量,这可能是因为在目前生产中只要维持P含量低于0.01%,或将Sb、As和Sn控制在一定范围,在热处理时就足以保证Ni-Cr-Mo-V钢的回火脆性保持在一个令人满意的范围

内。在二次精炼中使用氧化渣可以将P含量很容易地降到0.002%~0.001%的范围,比较起来减少Sn、As和Sb则很困难。大家总是希望减少P和S的含量,因为它们能引起回火脆性。要再将P含量降低到比目前水平低很多是不必要的(除非要求Mn、Si的含量非常低或要最大限度地减小P、Sn、As和Sb对回火脆性的影响),这样就可以降低炼钢成本,因为这样可能缩短碱性电弧炉的熔化脱磷时间。

或许一方面可预期到P对韧性和回火脆性的有害作用对标准发展趋势的影响;另一方面,在达到较低的Mn、Si含量的情况下,能适当地放松对低P的要求。一种对P的严格适度的规范是可望的。

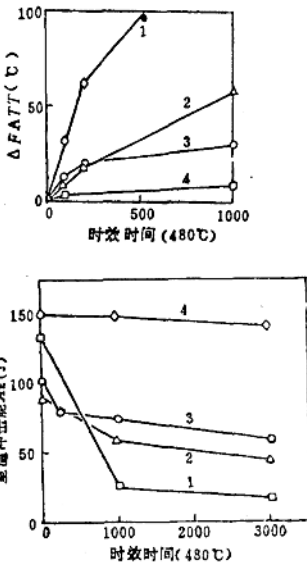


图1 Mn和Si含量对HY130钢(480℃时效以后)室温下的冲击功和 $\Delta FATT$ 值的影响

%					
炉次	Si	Mn	炉次	Si	Mn
1	0.03	0.01	3	0.35	0.02
2	0.03	0.92	4	0.35	0.90

3. 硫

采用各种先进的二次精炼工艺都能很容易地进行脱硫处理,因此应保证S含量一直控制在规定的限值内。为了降低Mn含量,特别是有时要消除Mn,这就要求把S含量降至0.002%甚至更低。就一种合格产品而言,其经济指标将是很重要的,在目前的Ni-Cr-Mo-V转子产品中S含量在0.004%~0.008%的范围就能充分地满足其韧性要求了,没有必要为了提高韧性指标而再去降低S的含量。

将Ni-Cr-Mo-V钢中的S含量控制在0.001%~0.002%的范围内是很有必要的。但只要能达到机械性能指标就可以放松对S的控制。

现代炼钢工艺水平使S含量的技术指标日趋严格,由于消除Mn、Si会得到许多好处的论据增多,也使S含量的指标日趋严格。

4. 硅

目前,在美国和世界其他许多国家,转子锻件用钢都用硅脱氧。在推广采用真空处理之前和之后,硅的含量都在0.15%~0.35%之间。在1960年VCD推广采用之后,利用VCD所能达到的低Si含量大大改善了Ni-Cr-Mo-V钢的韧性。充分利用VCD降低硅含量的另一个优点是,能缩小Ni-Cr-Mo-V钢锭凝固时的晶粒尺寸并使马氏体晶带增厚。这个优点使钢锭的条状偏析倾向降低,使钢锭的组织成分更加均匀。在Swaminathan的工作报告中指出:使用VCD熔炼1Cr-Mo-V钢把Si含量控制在0.02%~0.05%的范围,改善了持久蠕变断裂韧性,这个结果是很有意义的。见图2。

我们并不需要无谓地降低Ni-Cr-Mo-V转子钢中Si的含量。不过,利用VCD降低钢中Si含量的方法将会更有效地用于1Cr-Mo-V转子钢的熔炼。

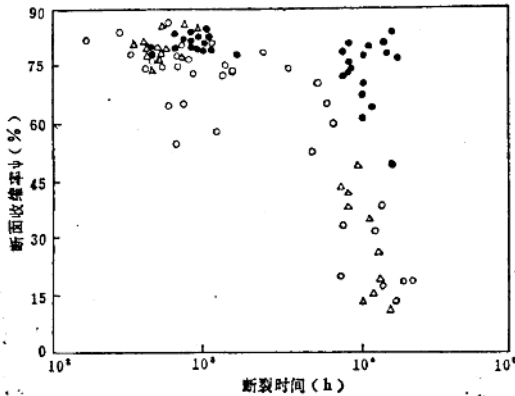


图2 脱氧处理对1Cr-Mo-V钢
蠕变减缩范围的影响

- 0.05%Si (VCD)
- 0.19%Si (ESR)
- △—0.23%Si (低S)

5. 残余(微量)元素: Sb、As、Ti

先进的炼钢工艺能精确地控制钢中微量元素Sb、As和Sn的含量。这些微量元素即使含量很少,也会增加转子钢的回火脆性。然而,降低Mn、Si含量和把P控制在很低的范围之后,即使这些微量元素含量较高,也可不必考虑其危害性。这对那些生产纯净的、含有害残余元素低的钢很困难的厂家是很有利的。先进的炼钢工艺有可能使技术规范中对Sb、As和Sn的要求继续降低。

6. 铝

在美国和世界其他的一些地方已经很慎重地在转子钢中使用Al。他们规定在汽轮机转子钢中Al含量不得超过0.010%,这是因为,他们认为在提高1Cr-Mo-V钢断裂韧性温度范围方面,Al具有不利的影响。一些在钢包喷射工艺中使用Al、Ca合成渣的工厂和一些用Al降低氧含量以便除S的工厂证明,尽管Al对1Cr-Mo-V钢是适用的,但它对Ni-Cr-Mo-V钢是不必要的。此外,随着钢包氩处理工艺的发展,Al在钢中的含量将越来越少。并且,随着先进炼钢工艺方法

的发展,VCD工艺将提供一个很好的、能够不用Al脱氧的方法。

我们希望,在保证Cr-Mo-V钢质量的同时,能放松在Ni-Cr-Mo-V钢中对Al的控制,使厂家能够不很困难地达到Al含量标准。

7. 氢

大多数转子锻件,尤其是对那些大型转子钢都要进行真空除气处理。真空处理适用于各种转子锻件的生产过程,这样,我们希望先进的真空处理炼钢工艺能保证转子的各项技术指标符合要求。

四、结 论

在转子炼钢工艺方面出现的这些成就是很令人兴奋的。如钢包精炼、钢包喷射冶金、电渣重熔、氩-氧脱碳等一系列先进的工艺,已经能够将硫含量控制在0.001%~0.002%的范围。这些工艺当然都是很吸引人的,但对于大型转子锻件产品来说,控制成分的最佳方法似乎应该是:用碱性电弧炉初炼和脱P、再用具有真空能力的钢包炉精炼并真空除气。

目前这种先进的炼钢工艺能合理地控制成分,以便更好地满足甚至超过高纯度钢技术性能的要求。如果通过减少Mn、Si含量能改善钢的回火脆性的话,则那些工艺将不再只是停留于实验室之中。美国电力研究所和德国联合特殊钢厂认为:这些工艺在生产实际中基本上能满足高纯度转子钢的成分要求。这个结论对高纯度转子钢的生产方法能否得到人们的信任和工厂能否对它起着重要作用。

在改进转子钢和高纯度钢生产方法的研究中,对工艺提出了许多特殊的要求,而大多数厂家都能很容易地满足这些要求。许多厂家已安装了或正在考虑安装便利的钢包精炼装置,他们对钢包精炼炉很感兴趣。

参考文献

- (1) Bush, S. H., "Failures in Large Steam Turbine Rotors" in Workshop Proceedings: Rotor Forgings for Turbines and Generators, EPRI WS-79-235 Proceedings, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Sept, 1981, pp. 1-1 to 1-27.
- (2) Hagaman, R. T., "Failure Experience with Generator Rotors" in Workshop Proceedings: Rotor Forgings for Turbines and Generators, EPRI WS-79-235 Proceedings, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, pp. 1-32 to 1-39.
- (3) Schabtach, C., Fogleman, E. L., Rankin, A. W., and Winne, D. H., "Report of the Investigation of Two Generator Rotor Fractures" in Transactions ASME, Vol. 78, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, Oct. 1956, pp. 1567-1584.
- (4) DeForest, D. R., Grobel, L.P., Schabtach, C., and Seguin, B. R., "Investigation of the Generator Rotor Burst at the Pittsburgh Station of the Pacific Gas and Electric Company," ASME paper 57-PWR-12, ASME Power Division Conference, Allentown, Pa., Oct. 21-23 1957, American Society of Mechanical Engineers, New York, NY.
- (5) Steiner, J. E., Busby, P. E., Jaffee, R. I., Murphy, E. L., Newhouse, D. L., and Wriedt, H. A., "Advanced Steelmaking Processes for Rotor Forgings," EPRI RD-3336, Contract 82-628, final report, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Dec. 1983.
- (6) McMahon, D. J. et al., "Elimination of Impurity-Induced Embrittlement in Steel. Part I: Impurity Segregation and Temper Embrittlement," EPRI Report NP-1501, Sept, 1980 and EPRI Report CS-3248, Nov. 1983, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- (7) Newhouse, D. L., "Discussion on Temper/Hydrogen Embrittlement," Workshop

Proceedings: Rotor Forgings for Turbines and Generators, " EPRI WS-79-235, Proceedings, Sept. 1981, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, pp. 5-80 to 5-82.

- (8) Takeda, Y. and McMahon, C.J., "Effects of Compositional Variations and Aging Treatments on the Fracture Behavior of HY130 Steel in Air and Hydrogen," Metallurgical Transactions of AIME, 13A (1982) III.
- (9) Swaminathan, V. P. and Jaffee, R. I., this publication.

【讨论】

J. Enald 书面意见: 预计将来, 在转子锻件钢中铜的含量要有所增加, 但不知最近有没有关于铜在1Cr-Mo-Ni-V钢和3%~3.5%Ni-Cr-Mo-V钢中允许含量的论文。

作者J. E. Steiner和R. I. Jaffee回答: 大家知道, 关于在转子钢中铜的极限含量问题, 还没有最新的研究结果。在目前的转子钢中铜和其他微量元素的含量都是用加入精选的金属碎块来适当控制的。我们认为在将来这些碎块的利用将不会很普遍。无论如何, "纯净钢"将是低Mn、低S, 而P含量可以高一点, 微量元素的含量也可稍微高一些。

G. Hartman书面意见: 我对Jaffee先生的"碱性炉炼钢工艺能够很容易地生产出低锰含量的钢"的观点谈几点看法。为了使钢中锰含量降低到0.02%左右, 必须将熔池内的碳几乎完全氧化使其含量降到0.03%以下, 这必须大量地吹氧或者使用大量的铁矿造成非常高的熔池温度并充入过量的氧(1000ppm)。脱碳和低锰将使渣中氧化亚铁的含量提高, 这些渣得小心地在继续加热前从炉中放出, 加热时应至少增加10个碳, 使出钢时磷含量高于0.25%, 以便再氧化。并使熔池在精炼前进入恰当的气氛和温度范围。

合金元素和炼钢工艺对大型钢锭中“A”偏析的影响

J. T. Kim M. R. Pyo Y. S. Chang H. S. Chang

【提要】 南朝鲜的韩国重工业和工程公司分别对13t、25t、54t、104t、180t、210t和430t的各种尺寸钢锭进行了偏析试验研究。

试验结果揭示了硅脱氧碳素钢锭比真空脱氧低合金钢锭的偏析大得多。在210t硅脱氧碳素钢锭中，总的碳偏析是41%，而在430t和104t真空脱氧低合金钢锭中分别是38%和21%。这些结果表明，在两种钢锭中，当碳偏析比低于30~40%时，均未发现“A”偏析。在凝固期间，由于硅和锰增加了钢液密度的变化，而钼减少了钢液密度的变化，因而在规定范围内，通过增加钼的同时减少硅和锰，有可能使宏观偏析减至最小。

随着钢锭尺寸增加，显微偏析和宏观偏析是不可避免的。因此，人们特别注意控制宏观偏析。在大型钢锭中，有时认为“A”偏析是不可避免的，到现在还未曾报道过令人满意的结果。

Scupi等人⁽¹⁾研究了凝固过程、高径比(H/D)、冒口体积和浇注温度对锻造钢锭内部致密性的影响。他们发现凝固前沿的斜率越小，抑制中心缺陷的可能性越大。为获得良好的锻造钢锭，其最佳条件如下：

- (1) 高径比小于1.20；
- (2) 冒口最小容积为28%；
- (3) 浇注温度高于1580℃。

Tashiro等人⁽²⁾研究了垂直凝固速率

和致密的锻造钢锭之间的关系。他们指出：垂直凝固速率与锭模设计有关，即 H/D 和冒口直径对钢锭直径之比 ζ 。他们发现，随着 H/D 的减少和 ζ 的增大，垂直凝固的临界速率降低了，从而最有效地抑制了内部缺陷的产生。

Common等人研究了合金元素对钢锭偏析的影响^(3,4)，发现合金元素（如碳、镍、铬、锰、铜和锡）的含量对碳的偏析程度没有任何显著的影响。他们的详细分析报告指出：钼和钒抑制了碳的偏析。

然而，Miyamoto和Suzuki⁽⁵⁾证明钒不会影响碳的偏析，但会促进钢锭中缩孔的形成。

在美国，所应用的汽轮机转子钢熔炼操作规范与上述的控制氧极限含量的方法是相矛盾的。那些操作规范熔炼时间长，对炉壁的侵蚀加深，损失大，明显地使炼钢成本提高。当采用多炉次（三炉、四炉、五炉）浇注钢锭时尤其是这样。

低锰钢可在碱性炉生产，但锰的允许含量需达到其经济性和可行性。在实际生产中应当充分估计所必须的锰含量，例如：最大

含量为0.10%、0.06%或0.02%。

作者J. E. Sfeiner和R. I. Jaffee回答：在碱性炉内除了脱P以外，同时还可除掉Mn和Si，确实，要把Mn和Si的含量降到0.01%的水平是困难的，但使用常用的工艺将其降低到0.05%的水平还是容易的。这样，大家所期望的低P、Mn和Si含量的纯净钢就可在碱性炉内生产。

肖红原译 赵晓东校

Suzuki等人^(5,6)通过对14kg钢锭进行水平和单向凝固,研究了合金元素对“A”偏析的产生以及对枝晶组织的影响。此外,由于多元系中,热、物质和动能的传输,Fujii等人⁽⁷⁾开发了一种将宏观偏析理论用于预测沟槽型偏析的形成,并提出了通过调整化学成分,以避免沟槽型偏析形成的合金结构方案。

但是,他们的偏析理论⁽⁷⁾在大型钢锭方面的应用,尚无试验结果报道。本文中,作者发现Fujii的宏观偏析理论⁽⁷⁾适用于大型真空碳脱氧合金钢锭。同时还研究了钢锭尺寸和炼钢工艺对偏析的影响。

一、试验方法

表1示出所研究钢锭的形状。钢锭重量小于25t的,是在大气中用氩气保护底注方式浇注的;重量大于25t的,是在真空滴流脱气系统中用上注法浇注的。重量不足25t的钢锭,在钢包炉中取样进行化学分析;重量超过30t的钢锭,在中间包中取样进行化学分析。

表1 所研究钢锭的重量和形状

重量(t)	图形尺寸(mm)				
	H	D _L	D _U	D	H/D
13	1852	849	1034	942	1.97
25	2256	1140	1320	1230	1.83
54	2323	1747	1933	1840	1.26
104	2887	2195	2425	2310	1.25
180	3195	2590	2850	2720	1.18
210	2980	2530	2850	2690	1.47
430	4370	3398	3740	3568	1.23

注: H—钢锭高 D_L—钢锭下部直径
D_U—钢锭上部直径 H/D—高径比
D—钢锭平均直径 = ((D_L+D_U)/2)

为了研究偏析情况,使用带锯把13t碳铸锭沿轴线锯成100mm×100mm大小的试块。图1中给出了在13t锭中取样进行化学分析和检验树枝晶的详图。除430t锭外,

对于其它钢锭,分别从锻件上相应于钢锭底部和顶部的位置取样。430t钢锭的试样是在切除的冒口上按图2所示的位置切取的。钢锭中心轴线上的试样和表面试样是在粗加工的同时分别从中心套料棒和表面上切取的。

为了寻求钢锭尺寸对偏析率的影响,研究了13~430t的10个钢锭的尺寸对偏析率的影响。表2中给出了所研究的钢锭重量和它们的包样分析结果。

为了研究炼钢工艺对偏析的影响,对硅脱氧和真空碳脱氧工艺进行了对比。

二、结果

图3中给出了13t硅脱氧钢锭的中心轴线方向上的偏析状况。顶部有明显的正偏析,底部有负偏析。图4说明210t硅脱氧碳素钢锭的顶部和底部化学成分的横向分布。顶部横截面中,偏析状况从表面的负偏析变到心部的正偏析。但是在底部横截面中,心部负偏析比表面大得多。大型碳素钢锭底部的负偏析导致了沉淀区的形成,这主要是由于纯的结晶生成物的析出和聚集的缘故。虽然碳偏析率是41%,但在210t硅脱氧钢锭中,未发现“A”偏析。

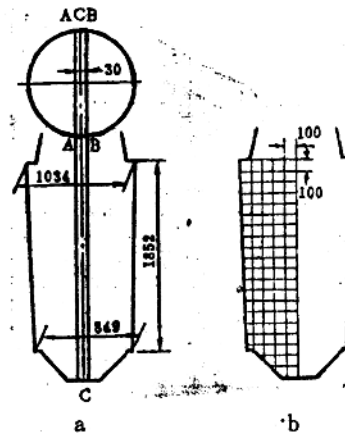


图1 在13t碳铸锭上取样进行化学分析和检验枝晶的示意图

a—钢锭尺寸 b—试样

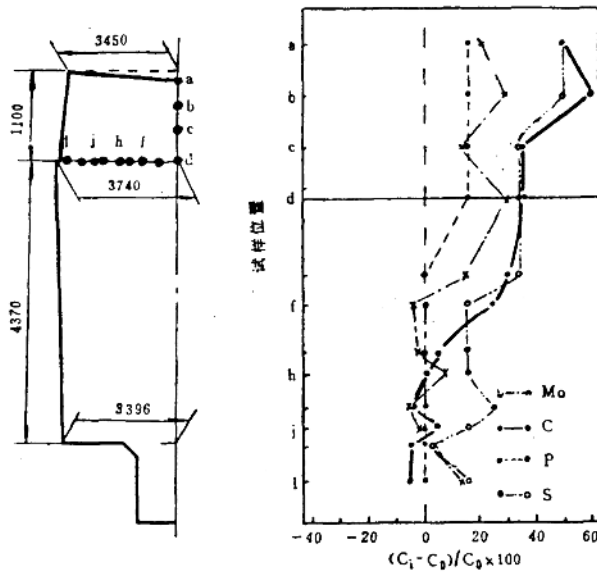


图2 430t真空碳脱氧钢锭冒口部分的中心轴上和横向上的偏析率

C_i —钢锭中的*i*组分的化学成分

C_0 —包样中的*i*组分的化学成分

表2 钢锭重量和包样分析结果

锭号	锭重 (t)	化学成分(%)											
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	As	Sn	Sb
1	13	0.29	0.22	0.48	0.006	0.006	—	—	0.010	—	—	—	—
2	25	0.56	0.27	0.81	0.009	0.007	1.72	0.77	0.35	0.08	—	—	—
3	54	0.37	0.21	1.16	0.008	0.007	0.17	0.18	0.014	—	0.003	0.004	0.003
4	54	0.25	0.07	0.39	0.007	0.006	2.17	1.40	0.49	0.07	—	—	—
5	54	0.25	0.08	0.31	0.007	0.007	3.41	1.70	0.48	0.12	0.013	0.006	—
6	54	0.56	0.26	0.80	0.009	0.008	1.71	0.78	0.34	0.09	—	—	—
7	104	0.28	0.09	0.48	0.007	0.006	2.28	1.65	0.40	0.10	0.009	0.006	0.013
8	180	0.36	0.25	1.00	0.007	0.008	0.05	0.08	0.160	0.047	0.004	0.004	0.003
9	210	0.37	0.26	0.99	0.007	0.007	0.03	0.07	0.010	0.045	0.003	0.004	0.003
10	430	0.20	0.04	0.32	0.006	0.006	2.97	1.59	0.39	0.10	0.006	0.003	0.002

图5说明104t真空碳脱氧低合金钢锭的顶部和底部的化学成分的横向分布。图2表明430t真空碳脱氧低合金钢锭的冒口横向和

中心轴线上的偏析率。这些结果类似于从碳素钢锭的顶部获得的结果。但是，低合金钢锭的偏析不如碳素钢锭的那样明显。图6说

明取自430t锭制成的发电机轴表面部分和中心套料棒的偏析率。负偏析发生在表面，而正、负偏析分别发生在发电机轴的顶部和底部。将发电机轴中的碳分布与钢锭的实际位置相对照时，其结果如图7所示。

表3表明所试验钢锭的碳偏析率。 $C_{最大}$ 为钢锭本体最大的碳含量， $C_{最小}$ 为钢锭本体最小的碳含量， C_0 为碳的包样分析。

$$\Delta C = C_{最大} - C_{最小}$$

图8给出真空碳脱氧低合金钢锭和硅脱氧碳素钢锭的尺寸与碳偏析率($\Delta C/C_0$)的关系曲线。对同样尺寸的钢锭来说，碳素钢锭中的碳偏析率要比低合金钢锭中的碳偏析率大。

在碳素和合金钢锭中，当碳的偏析率低于30~40%时，未发现“A”偏析。

表3 所试验钢锭的碳偏析率

钢锭号	重量 (t)	C_0 (%)	$C_{最大}$ (%)	$C_{最小}$ (%)	$\Delta C/C_0$ (观察值)*	$\Delta C/C_0$ (计算值)**
1	13	0.29	0.35	0.28	0.24	0.22
2	25	0.56	0.63	0.53	0.20	0.25
3	54	0.37	0.44	0.33	0.30	0.40
4	54	0.25	0.27	0.24	0.12	0.18
5	54	0.25	0.28	0.24	0.08	0.16
6	54	0.58	0.72	0.53	0.34	0.33
7	104	0.28	0.31	0.25	0.21	0.23
8	180	0.36	0.44	0.32	0.33	0.61
9	210	0.37	0.46	0.31	0.41	0.69
10	430	0.20	0.27	0.19	0.38	0.31

* 所试验的碳偏析率。

** 用J.Common(4)公式计算的碳偏析率。

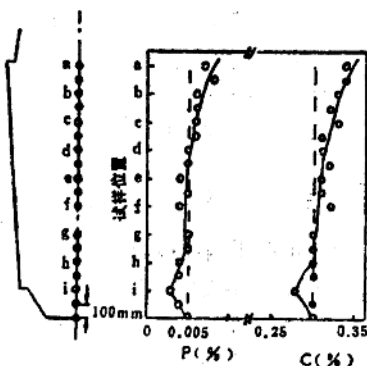


图3 13t硅脱氧钢锭的碳和磷沿中心轴线的分布

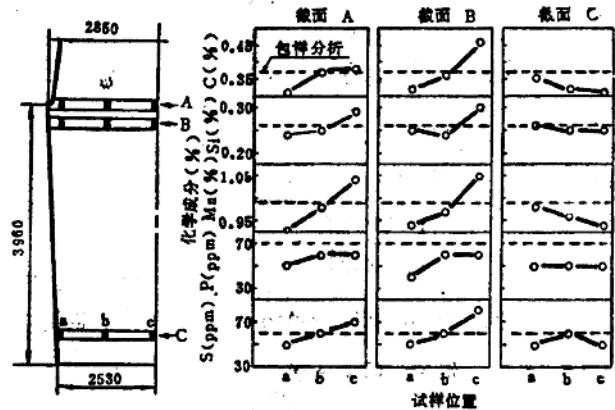


图4 210t硅脱氧碳素钢锭的顶部和底部化学成分的横向分布

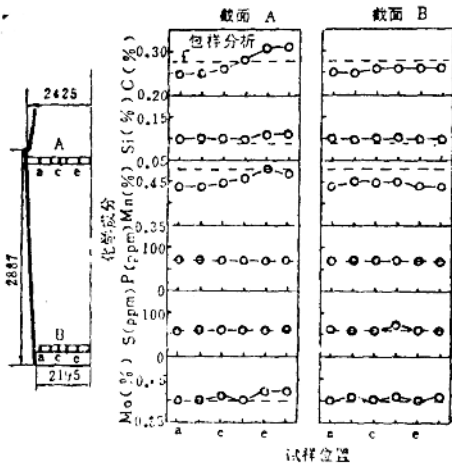


图5 104t真空碳脱氧低合金钢锭的顶部和底部的化学成分的横向分布

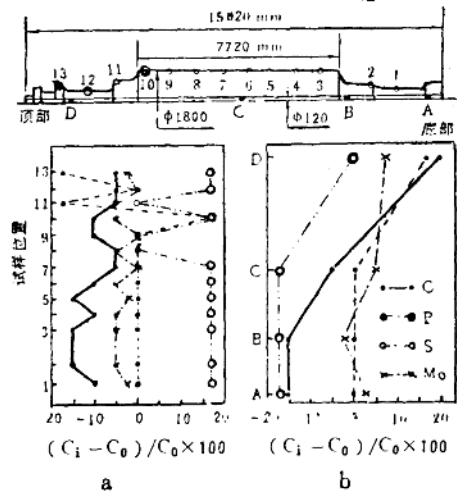


图6 用430t真空碳脱氧低合金钢锭制成的发电机转子轴的表面部分和中心套料棒的化学成分偏析率
a—表面部分 b—套料心棒

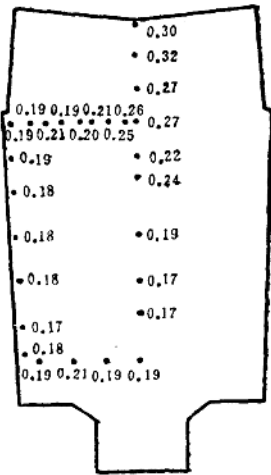


图7 430t 3Ni-Cr-Mo-V 钢锭中的碳分布
钢包中的平均碳含量为0.20%

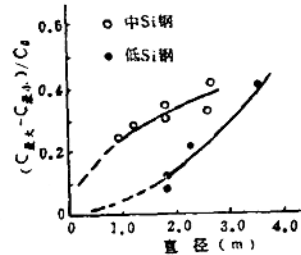
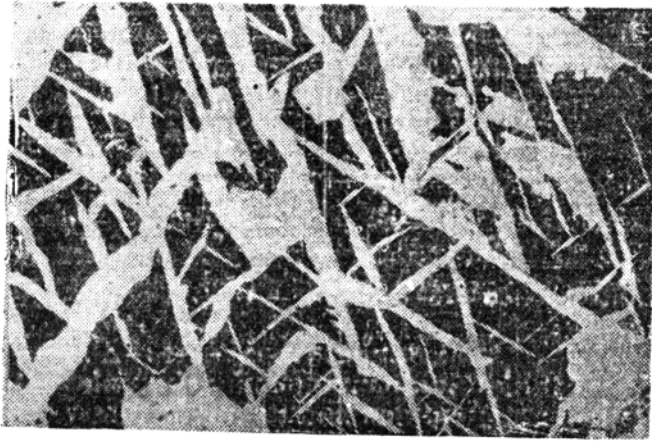


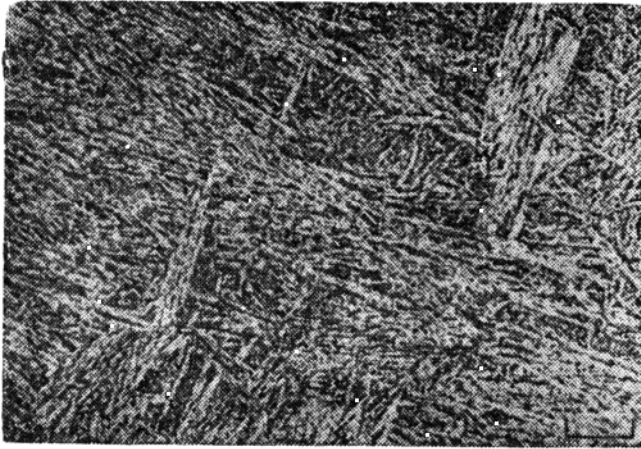
图8 渣脱氧钢锭和真空碳脱氧钢锭的尺寸与碳偏析率的关系曲线
C_{最大}—钢锭中i组分的最大碳浓度
C_{最小}—钢锭中i组分的最小碳浓度

三、讨论

图9示出了13t碳素钢锭和430t低合金钢锭中的枝晶。低合金钢锭的枝晶平均间距小于碳素钢锭的平均间距。合金元素对枝晶的形成有显著的效果。在规定范围内通过增加铝含量,降低硅含量使枝晶弯曲的半径减小,容易形成较大的枝晶杆。这个结果与



a



b

图9 枝晶组织

a—131渣脱氧碳素钢锭

b—430t真空脱氧钢锭的冒口部分

所给标尺表示140μm，硝酸乙醇腐蚀液浸蚀

Taniguchi 和 Suzuki⁽⁶⁾ 的研究结果相吻合。在凝固期间，由于钼促进了较大的枝晶杆的形成，因而我们认为钼抑制了大型钢锭中宏观偏析的形成。

众所周知^(6,7)，在凝固期间，钢液密度的变化是引起粘糊状区的溶质富集钢液迁移的驱动力。在粘糊状区溶质富集钢液的自然迁移明显地影响宏观偏析的发生。因此，

有必要调整合金元素间的关系，使钢液的密度变化最小。在凝固期间，为了抑制钢液密度的变化，可根据积分 $I^{(1)}$ 计算出合金元素之间的关系：

$$I = \int \left. \frac{g_L = 1}{g_L = g_E = 0.04} \right| \Delta \zeta_L \left| g_L dq_L \right. \quad (1)$$