

高洁净度超细晶 微合金化高强高韧钢

文集 2

1998

钢铁研究总院

53

5

高洁净度超细晶微合金化高强高韧钢

1998 年（总第 2 集）

主 办：钢铁研究总院科技处

主 编：高 怀 焦晓渝

责任编辑：焦晓渝

编辑：钢铁研究总院信息室

出版：钢铁研究总院

地址：北京海淀区学院南路 76 号
(100081)

印刷：北京宇海印刷厂

发行：钢铁研究总院信息室

北京市内部报刊准印证第(Z) 1113 - 97121

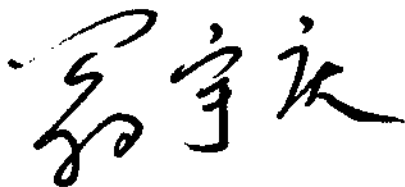
序 言

正值这本向研究新一代钢铁材料的冶金科技工作者提供的《高洁净度超细晶微合金化高强高韧钢》(文集2)出版之际,传来了令人振奋的好消息:国家科学技术部把“新一代钢铁材料(超级钢)的重大基础研究”列入首批启动的国家重点基础研究发展规划十个项目之一。这为献身此项课题的专家及科技人员提供了为国家、为科学施展才能,建功立业的大好时机和基本条件。

从基础研究入手,以与自然协调发展为战略目标,在传统钢铁材料生产的基础上,通过对工艺技术的优化、完善及科学准确地控制材料的组织结构,研制出适合我国国情、成本低廉、无污染、易于再回收、机械性能优异、经济实用的钢铁材料是承担此项研究工作的全体专家、科学工作者共同的奋斗目标。

立足在中国这块土地上的冶金科技工作者既要学习和借鉴世界各国同行的经验和成果,更要创造自己的研究方法和基础理论,同心协力地研制出我国自己的新一代微合金高强高韧钢系列产品。

仅用半年多的时间就出版了两本反映国际钢铁材料最新研究动态的文集,实属不易,在此仅向为此项工作付出辛勤劳动的人员表示感谢。

A large, expressive handwritten signature in black ink, likely belonging to Ma Ning, the author of the preface.

1998年12月

高洁净度超细晶微合金化高强高韧钢

1998年

文集2

目 次

综述

洁净钢及其生产工艺的发展 (钢铁研究总院 刘浏)	1
研制新世纪的超级钢铁材料	8
新钢铁材料开发计划——超级钢铁材料	10

最新进展

临界时间和等温回火脆性 (钢铁研究总院 徐庭栋)	14
焊接材料	
A-6 控制线能量密度分布的超窄小坡口电弧焊接试验	23
A-7 模拟施焊系统	26
A-8 提高低相变温度焊接材料环绕角焊接头的疲劳强度	27
A-9 超声波传播模拟在材料评定上的应用	30
A-10 金属微观组织中滑移变形和位错塞积的介观级解析	32
A-11 用Secant法预测微细铁素体-珠光体钢的特性	34
A-12 不同坡口形状对管焊接残余应力的影响	36
A-13 描述组织形成过程的非线性扩展方程式和标准方程式	37
A-14 用高分辨率TEM进行高温下的in-situ观察	39

150 kg级高强度钢

B-1 延迟断裂特性优异的新马氏体组织	40
B-2 高循环疲劳过程中高强度钢内部疲劳裂纹的产生及组织控制	42
B-3 纳米级晶界解析法的开发及延迟破坏评价法的确立	43
B-4 确立提高高强度钢长期疲劳特性的方针	45
B-5 应用APFIM装置解析珠光体钢丝的微细组织	47
B-6 PH17-4不锈钢在中温区域由失效产生的相分离和析出	48
B-7 AFM超微硬度计的开发及力学特性的评定	49
B-8 AFM超微硬度计在钢铁材料和薄膜方面的应用	51
B-9 铁系高刚性材料的基础研究	53
B-10 晶粒细化对分散颗粒溶解的影响	55

B-11 α/γ 界面移动对合金元素微观偏析的影响	56
B-12 2 000 MPa弹簧钢丝的高频热处理特性	57
B-13 齿轮超速感应加热的轮廓淬火	59

组织控制

C-1 长期稳定马氏体组织的设计	61
C-2 使马氏体组织长期稳定元素的研究	63
C-3 铁基微粒弥散合金的研制	65
C-4 2.25Cr-1Mo钢多层堆焊的蠕变断裂特性及焊接接头热影响区的显微组织	66
C-5 焊接区蠕变变形的分布测定	67
C-6 抗氧化性高Cr铁素体钢的材料设计	69
C-7 从固有蠕变强度的概念评价9%~12%Cr钢的蠕变强度特性	70
C-8 2.25Cr-1Mo钢长时间应力弛豫和蠕变变形行为	71
C-9 根据蠕变特性快速评价长时间蠕变强度	73
C-10 9%~12%Cr耐热钢的蠕变疲劳特性	75
C-11 含W的9%~11%Cr钢内压蠕变试样中焊接接头蠕变损坏的原因	76
C-12 添加Re对Cr-W系耐热钢蠕变强度的影响	78
C-13 W对高Cr铁素体耐热钢中位错组织变化的影响	79
C-14 超超临界压力发电设备用铁素体耐热钢的瞬间蠕变	81
C-15 硼化物析出型钢铁材料的相图	82

耐蚀钢

D-1 金属表面吸附水的观察	84
D-2 腐蚀对铁氧化细菌活度的影响	85
D-3 使用Kclvin探针测定电化学腐蚀	86
D-4 含氯化物大气腐蚀环境下铁锈的形成机理	87
D-5 大气环境下有机涂层的退化过程	89
D-6 高速燃气热喷涂膜中残留应力的发生过程	91
D-7 耐海水不锈钢的开发——N含量及洁净度对耐缝隙腐蚀性的影响	92
D-8 用浮熔法精炼熔融金属	95
D-9 在空气中腐蚀钢材试验结果的收集法	96
D-10 溅射蒸镀不锈钢的耐蚀性	97
D-11 关于耐候钢“稳定锈”的工程学定义	99
D-12 促进耐候钢稳定锈生成的处理技术	100

超洁净钢

高洁净钢的研究动态——作为新材料的纯铁及其合金	103
超洁净钢夹杂物成分控制的热力学	108
炼钢过程中氧的控制和超洁净钢的生产	116
高纯铁及铁合金的研究	121

利用RH真空脱气装置去除夹杂物的机理·····	124
移动磁场去除熔融金属中的夹杂物·····	130
用浸入式MgO-C多孔管进行钢水脱氧的研究·····	135
WORCRA连续炼钢工艺生产超洁净钢·····	141
VAD和经济型VAJ法冶炼超洁净钢·····	142

凝固过程

急速凝固时钢中氧化物的析出特性·····	148
冷却速率对铁-碳二元合金包晶反应过程中奥氏体相生长行为的影响·····	153
超低碳钢初始凝固均匀性的研究·····	157
钢液凝固过程中硫化锰夹杂物的形态控制·····	162

组织控制

高强度钢焊接部位局部脆化区的研究 (I)	
—显微组织与断裂特性·····	168
高强度钢焊接部位局部脆化区的研究 (II)	
—断裂机理和断裂模型·····	174
低碳钢和V-Nb微合金钢的高温变形及形变热处理·····	180
热轧钢板的晶粒细化和机械性能的改善·····	186
热装轧制条件对含Nb钢板机械性能的影响·····	187
加工热处理法制造超细晶钢的研究·····	192

合金设计

连铸—连轧过程中微合金钢显微组织和性能的预测·····	196
-----------------------------	-----

洁净钢及其生产工艺的发展

刘浏
钢铁研究总院

1 前言

最近 20 年,随着连铸技术和炉外处理技术的发展,钢材洁净度迅速提高。提高洁净度可明显改善钢的加工特性和使用性能,这已成为大多数冶金工作者的共识。另一方面,由于钢铁生产的迅速发展,钢材(特别是高附加值产品)市场竞争日趋激烈,许多钢厂为提高市场的竞争力,努力提高钢的洁净度,改善钢材质量,以占有更多市场份额。

上述原因促使洁净钢及其生产工艺迅速发展。目前国内外许多钢厂已建立了大规模生产超洁净钢(即钢中杂质总含量: $S+P+N+H+T.O \leq 100 \text{ ppm}$)的生产体系。本文对洁净钢及其生产工艺的发展进行技术评估,并展望其发展前景。

2 洁净钢的质量和性能

2.1 杂质与钢水的洁净度

钢中杂质对钢材性能有多种影响。钢种用途不同对钢材中杂质的要求也有很大差别。通常钢中杂质可分为以下两大类:

- (1) 表面活性杂质: O、P、S、As、Se、Sb、Te 等;

- (2) 间隙型杂质: H、C、N、O、(B)。

从元素周期表看(见表 1):表面活性杂质是周期表中 V_b 和 VI_b 族元素。此类元素容易在晶界或异相界面上偏析聚集,造成钢的脆化。其偏析程度有时可高达平均浓度的几千倍^[1]。间隙型杂质往往在铁结晶的原子间隙内运动,在 400℃ 以下的低温区域危害极大。此类元素负电性较大,原子半径偏小^[2],与铁原子一般以离子形式结合。钢中添加 Ti、Al、Mn 等合金元素可降低其危害。

表 2 给出了钢中杂质对钢材造成的缺陷及对性能的影响。此外,钢中杂质所形成的非金属夹杂物破坏了钢基体的连续性。特别是 Al₂O₃ 类不变形夹杂物,在钢材加工变形时成为应力源,容易引起钢材脆断,对钢材性能的危害特别严重。

显然,杂质元素是钢材发生各种裂纹和脆性的根源,提高钢的洁净度对改善材质和提高加工性能极为有效,但对钢的组织控制和细化晶粒,钢中杂质元素也存在一些有益的作用^[3]:

- (1) 固溶杂质拖曳晶界移动的效果;
- (2) 微细析出物(碳氮化合物、硫化物)对晶界的钉扎效果;

表 1 元素周期表

I _a	II _a	III _a	IV _a	V _a	VI _a	VII _a	VIII	I _b	II _b	III _b	IV _b	V _b	VI _b	VII _b	0
H															He
Li	Be										B	C	N	O	F Ne
Na	Mg										Al	Si	P	S	Cl Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	(Fe)	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se Br Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te I Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po At Rn
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U										

表 2 杂质诱导钢材脆性

钢中缺陷类型		对钢材性能的危害
线缺陷	固溶于晶体特位线	红热脆性 (N、C)
面缺陷	晶界、相边界偏析	低温脆性 (O、P、Sb)
	非金属夹杂物	破坏疲劳 (O、N、S)
体缺陷	晶界液相	高温脆性 (S)
	发裂	氢脆性 (H)

(3) 可抑制再结晶和晶粒长大。

据现代炼钢学的观点, 洁净钢生产应包括:

- (1) 尽量去除钢中有害杂质(S、P、C、N、T.O、H等);
- (2) 尽量减少钢中非金属夹杂(特别是脆性夹杂), 减小夹杂物尺寸和改变夹杂物形态;
- (3) 避免钢中存在各种缺陷(如表面缺陷、内部裂纹、偏析和疏松等)。

2.2 洁净度对钢材性能的影响

提高钢的洁净度可明显改善钢材的性能, 主要表现为:

- (1) 提高钢的机械性能, 包括钢的强度、韧性、硬度、疲劳强度、磁性和耐蚀性;
- (2) 改善钢的加工性能, 包括深冲性、冷弯性、拉拔性、耐磨性、焊接性、涂镀性和切削性能等。

2.2.1 洁净度对钢材机械性能的影响

(1) 钢材的强韧性

降低钢中 S、P、N 等杂质含量, 可以提高钢材的强韧性。如图 1 所示, 当钢中[S] $\leq 0.004\%$ 时, NiCrMo 钢的冲击韧性明显提高^[4]。对 AISI4340 钢, [P] 从 0.03% 下降到 0.003%, 室温 V 型缺口冲击能约提高 20%^[5]。对于含 B 钢, 控制[N] < 20 ppm, 可获得高的强度和低温韧性(见图 2)。

(2) 疲劳寿命

对于轴承钢, 降低钢中全氧含量 T.[O] 可明显提高轴承钢寿命。高质量轴承钢要求钢中 T.[O] $\leq 10 \times 10^{-4}\%$ 。钢中夹杂物尺寸、分布与性质对钢材疲劳极限有明显影

响^[6](见图 3)。降低钢中夹杂物有利于提高钢材的疲劳强度。

(3) 钢材的磁性和耐腐蚀性

对于硅钢(Si = 3%), 降低钢中 S 和 T.[O] 含量([S] ≤ 20 ppm, T.[O] ≤ 15 ppm), 可

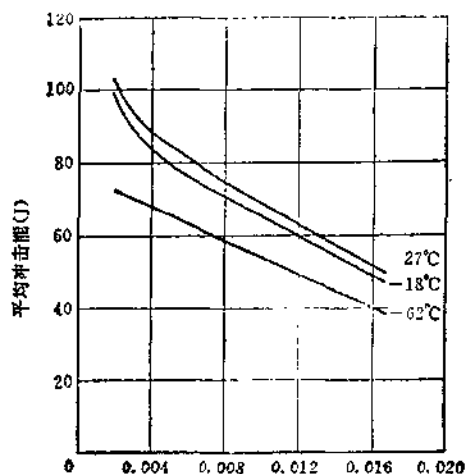
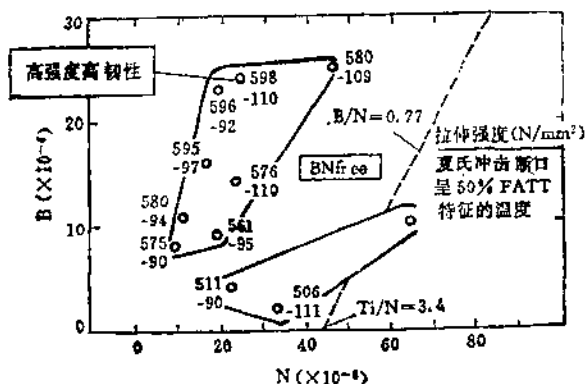


图 1 不同试验温度下硫对 NiCrMo 钢 HAZ 区韧性的影响



钢种: 0.02C-1.65Mn-0.04Nb-0.015Ti-B;
加热温度: 1050℃

图 2 B 和 N 对强度和韧性的影响

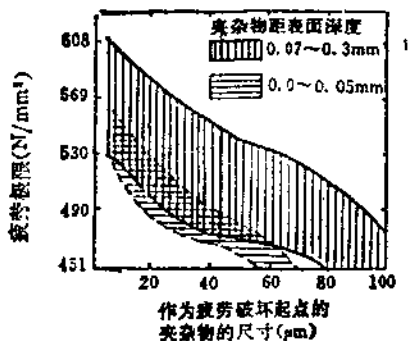


图3 疲劳极限与疲劳破坏起点夹杂物的大小和位置

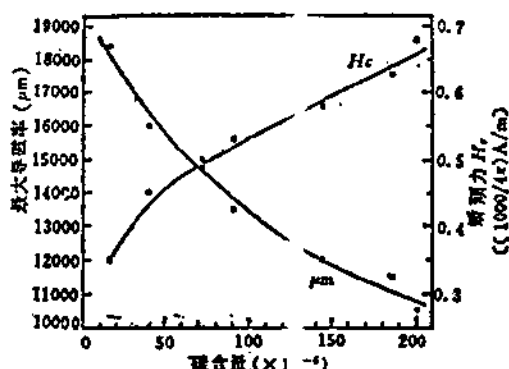


图4 碳含量对纯铁最大导磁率和矫顽力的影响

使无取向硅钢片铁芯损失降低到 2.3 W/kg 以下^[7]。降低钢中[C](和[N])含量,可提高硅钢片的最大导磁率,降低矫顽力^[8]。

提高铁的纯度可明显改善耐蚀性,提高使用寿命。最近日本学者研究证明,当铁的纯度 $\geq 99.95\%$ 时,其耐蚀性能达到不锈钢水平;而铁的纯度 $\geq 99.99\%$ 时,其耐蚀性与黄金相当^[9]。

2.2.2 洁净度对钢材加工性能的影响

(1) 钢的焊接性能

焊接性能是钢材最重要的使用性能之一。如图5所示^[10],降低钢中的含碳量或钢中的碳当量,有利于改善钢的焊接性能。

(2) 钢的深冲和拉拔性能

汽车板、家用电器和DI罐用钢材不仅要求一定强度,还要求良好的深冲性能。图6(略)表明降低钢中碳含量可明显改善钢的

深冲性能^[11]。汽车用高强度IF钢要求钢中 $C+N \leq 50 \text{ ppm}$ 。此外,生产热轧薄板须严格控制钢中大型 Al_2O_3 夹杂物数量,以避免轧制时产生裂纹,获得良好的表面质量。如生产0.3 mm DI罐用钢板的关键技术是杜绝 $30 \sim 40 \mu\text{m}$ 大型脆性非金属夹杂的出现^[12]。

帘线钢生产要求连续拉拔钢丝25 km($\phi \leq 0.3 \text{ mm}$),不允许出现断头^[12]。严格控制夹杂物含量,可明显减少钢丝拉拔时的断头率(见图7)^[13]。日本神户公司生产经验证明,改善脱氧工艺,严格控制钢中 $[\text{Al}]_{\text{sol}} = 3 \sim 5 \text{ ppm}$,可保证钢中夹杂物 Al_2O_3 含量 $\leq 20\%$ 。控制夹杂物成分,使全部夹杂变为塑性,能提高帘线钢质量^[14]。

(3) 钢的切削性能与耐磨性能

钢中夹杂物数量与类型对切削刀具寿命有明显影响。如图8所示^[15],由于钢中

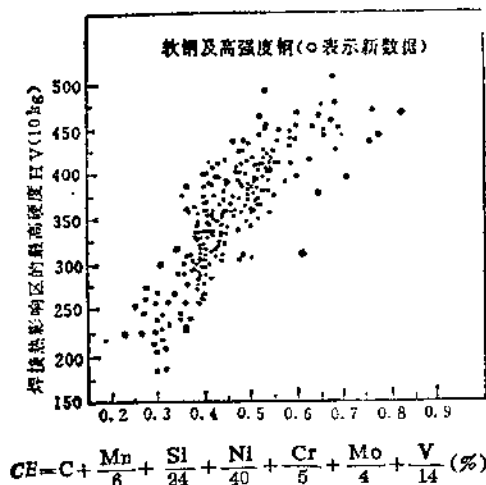


图5 碳当量与焊接区最高硬度的关系

脆性夹杂物(如 Al_2O_3)增大了工件与刀具的摩擦阻力,不利于钢材的切削性能。尽量降低钢中脆性夹杂物含量,有利于改善钢材的切削性能^[16]。

钢中脆性夹杂物(Al_2O_3 等)对钢的耐磨性能有极坏的影响。钢轨钢和轴承钢中 Al_2O_3 等脆性夹杂往往造成钢材表面剥落、

腐蚀。控制钢中 Al_2O_3 数量为零, 可解决钢材表面磨损问题, 提高钢轨的耐磨性^[17]。

(4) 钢材的冷热加工性能

硫通常以 MnS 夹杂形式富集在晶界上, 引起钢的热脆, 显著降低钢的热加工性能。对于碳钢, $S \leq 60 \text{ ppm}$ 时, 基本可避免热加工时钢材的热裂纹现象^[18]。对于铁素

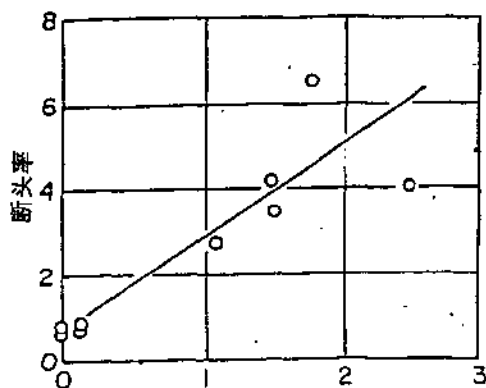


图7 钢中夹杂物指数与拉拔断头率的关系

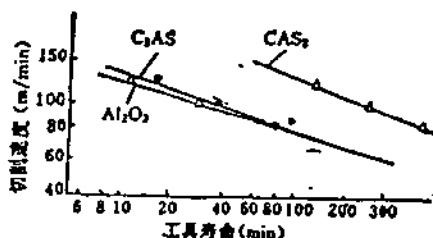


图8 钢中夹杂物类型对钢材加工性能的影响

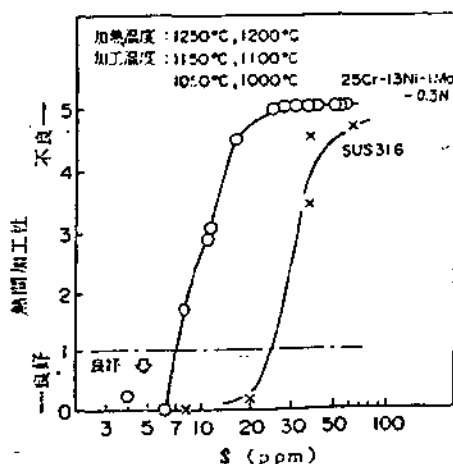


图9 S含量对不锈钢加工性能的影响

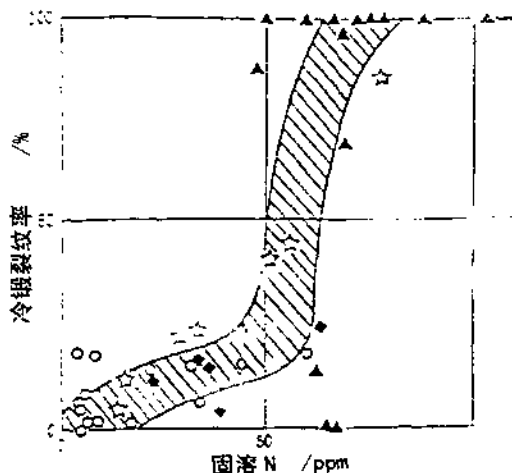


图10 固溶N含量对钢材锻造性能的影响

体不锈钢(见图9), 控制钢中 $S \leq 20 \text{ ppm}$, 可保证钢材良好的热加工性能^[19]。N 和 C 都是间隙型杂质, 低温时容易在 Fe 原子晶格内扩散, 产生时效, 使钢材的低温锻造性能下降。如图10所示^[20], 对 0.35 % 碳钢, 控制钢中的固溶 N 量小于 50 ppm, 可明显降低钢材冷锻时裂纹的发生率。

3 洁净钢的生产工艺

图11给出现代转炉典型的洁净钢生产工艺流程、工序、温度的控制目标以及采用的关键工艺技术。表3给出国外一些钢厂采用洁净钢生产工艺, 生产的典型钢种和达到的钢水洁净度的指标。采用不同的脱磷工艺, 洁净钢生产工艺大致可分为以下两种工艺流程:

(1) 铁水“三脱”生产工艺, 以日本为代表。主要工艺特点是采用铁水预处理脱磷工艺生产洁净钢;

(2) 钢水精炼生产工艺, 以欧美为代表。主要靠转炉脱磷, 并采用钢包喷粉深脱磷。

3.1 铁水“三脱”生产工艺

铁水“三脱”生产工艺的技术特点:

• 采用脱硅、脱硫和脱磷的铁水“三脱”预

图 11 当代洁净钢生产工艺流程

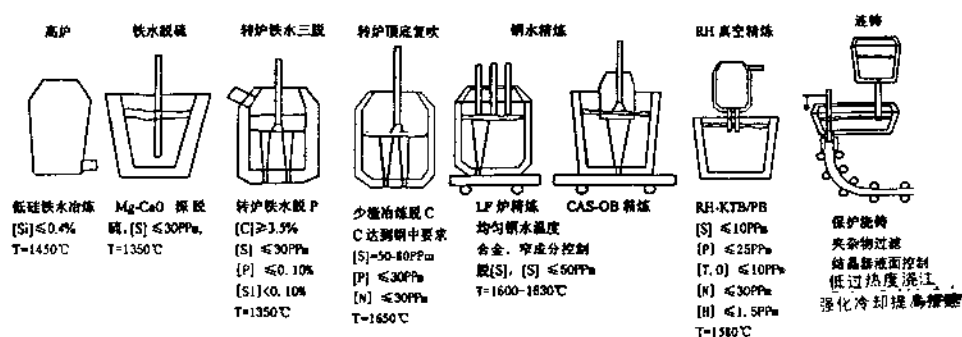


表 3 国外一些钢厂洁净钢的冶炼工艺、钢种和钢水的洁净度

公司	炼钢厂	代表钢种	冶炼工艺	钢水纯净度 PPM
新日铁	君津厂	石油管脱碳	铁水内脱 Si—转炉铁水脱 S—P—LB/OB 转炉脱碳—V-KIP 精炼	$P \leq 50$ $S \leq 10$ $H \leq 2$
	大分厂	深冲镀锌钢	铁水内脱 Si—铁水包脱 S—P—LB/OB 转炉脱碳—RH 喂粉精炼	$C \leq 10$ $P \leq 50$ $S \leq 10$ $H \leq 1.5$
	名古屋厂	IF 钢	转炉铁水脱 S—转炉铁水脱 S—P—LB/OB 转炉脱碳—RH—OB—喂粉精炼	$C \leq 10$ $P \leq 50$ $S \leq 10$ $H \leq 1.5$ $N \leq 25$
	神户厂	轴承钢	铁水内脱 Si—H 炉脱 P、S、Si—LB/OB 转炉脱碳—VSC 脱碳—LF 加热—RH 精炼	$T.O. \leq 10$ $S \leq 10$ $P \leq 20$
神户	加古川厂	高锰钢、Cr-Mn 钢	铁水内脱 Si—转炉铁水脱 S—P—LB/OB 转炉脱碳—RH 脱气	$P \leq 40$ $S \leq 10$ $H \leq 1.5$ $N \leq 20$
	川崎	水岛厂 冷轧板、涂层板 汽车板	BOP 转炉三脱—K-BOP 转炉脱碳—RH—KTB 精炼	$T.O. \leq 20$ $P \leq 20$ $S \leq 10$ $N \leq 30$ $H \leq 1.5$
住友	鹿岛厂	汽车板	SRP 转炉三脱—SRP 转炉脱碳—RH 精炼	$T.O. \leq 20$ $P \leq 20$ $N \leq 30$
	和歌山	超纯铁素体不锈钢	SRP 转炉三脱—SRP 转炉脱碳—VOD 喂粉精炼	$P \leq 50$ $S \leq 10$ $N \leq 30$
西德	蒂森	石油管脱碳、电工钢	铁水脱碳—转炉脱 C、P、Si—RH 喂粉脱 P—LF 脱碳—RH 脱气	$P \leq 50$ $S \leq 10$ $H \leq 2$ $N \leq 30$
	Acosta	高速工具钢、不锈钢、Ni 合金	电炉初炼—(OP-VOD)脱碳—喂碳—LF 升温脱碳—VD 脱气	$P \leq 50$ $S \leq 10$ $H \leq 2$
大同	大同	合金结构钢、轴承钢	电炉—LF 喂粉脱碳—喂碳—LF 升温脱碳—RH 脱气	$S \leq 5$ $P \leq 40$ $N \leq 30$ $T.O. \leq 5$

表 4 铁水“三脱”洁净钢生产工艺的特点

工 序	技 术 关 键	控 制 目 标
高 炉	低硅铁水冶炼	$Si \leq 0.4 \%$
铁水脱硫	100%铁水脱 S 预处理 采用 Mg-CaO 系高效脱硫剂。 铁水包喂粉脱硫，扒渣。	$S \leq 0.005 \%$ $\Delta T \leq 20^\circ C$
转炉铁水“三脱”	采用复吹工艺，底吹搅拌强度 $0.1 \sim 0.3 \text{ Nm}^2/(\text{t} \cdot \text{min})$ 顶吹弱供氧 $[0.8 \sim 1.2 \text{ Nm}^2/(\text{t} \cdot \text{min})]$ 。 采用部分转炉渣作脱磷剂，渣碱度 $R=2.0 \sim 2.5$, $FeO < 15 \%$ 。	$S \leq 0.005 \%$ $P \leq 0.010 \%$ $C \geq 3.5 \%$ $30^\circ C \sim 50^\circ C$
转炉炼钢	采用复吹工艺，少渣冶炼，CaO 消耗 $20 \sim 40 \text{ kg/t}$ ， 弱脱氧挡渣出钢	$S \leq 0.007 \%$ $P \leq 0.004 \%$ $C = 0.04 \%$ $T = 1650^\circ C$
炉外精炼	采用 RH 喂粉深脱碳工艺：真空脱碳、脱气	$C \leq 0.002 \%$ $P \leq 0.0035 \%$ $S \leq 0.0010 \%$ $N \leq 0.003 \%$ $T.O. \leq 0.0015 \%$

表 5 钢水精炼洁净钢生产工艺特点

工 序	技术 关键 与 发展 措施	控 制 目 标
高 炉	低 Si 铁水冶炼	$S \leq 0.4\%$
铁水脱硫	100% 铁水脱硫预处理: 采用 Mg-CaO 系高效脱硫剂: 铁水喷粉脱硫	$S \leq 0.0050\%$, $\Delta T \leq 20^\circ\text{C}$
转炉炼钢	顶吹转炉冶炼低碳钢强化脱磷: 大渣量、高碱度, 高氧化铁炉渣脱磷: 不脱氧挡渣出钢	$S \leq 0.0070\%$, $P \leq 0.002\%$ $C = 0.04\%$, $T = 1680^\circ\text{C}$
P I 钢包	顶喷 CaO+FeO+CaF ₂ 脱磷剂: 脱磷时间长, 温降大, 必须严格扒渣	$S \leq 0.0070\%$, $P \leq 0.005\%$
喷粉脱磷		$C = 0.03\%$, $T = 1580^\circ\text{C}$
LF 炉钢水	埋弧泡沫渣精炼升温: (升温幅度 $60 \sim 80^\circ\text{C}$, 时间长)	$S \leq 0.0050\%$, $P \leq 0.005\%$
脱硫升温	白渣冶炼, 搅拌脱硫	$C = 0.03\%$, $T = 1620^\circ\text{C}$
RH 真空精炼	真空喷粉深脱硫: 真空脱碳、脱气	$S \leq 0.0010\%$, $P \leq 0.005\%$ $C \leq 0.0020\%$, $T. O \leq 0.002\%$

表 6 两种生产工艺脱磷的技术经济比较

项目	铁水三脱工艺	钢水精炼工艺
脱	$O_2 = 2[O]$	$2Fe + O_2 = 2FeO$
磷 脱磷机理	$5[P] + 2[O] = (P_2O_5)$	$5[P] + 2(Fe) = (P_2O_5)$
热	熔池直接传氧脱磷	渣钢界面反应脱磷
力 反应温度	$1300^\circ\text{C} \sim 1350^\circ\text{C}$	$1580^\circ\text{C} \sim 1680^\circ\text{C}$
学 铁液中 P 的活度	碳高, 提高磷的活度:	碳低, 降低磷的活度:
和 渣中 FeO 含量	$5 \sim 15\%$	炼钢 $20 \sim 30\%$, 喷粉 $\geq 30\%$
动 碱度	$2.0 \sim 2.5$	炼钢 $3.5 \sim 4.0$, 喷粉 ≥ 4.0
力 搅拌强度	$3.1 \sim 0.3 \text{ Nm}^2/(\text{t} \cdot \text{min})$, 强	$0.003 \sim 0.001 \text{ Nm}^2/(\text{t} \cdot \text{min})$, 弱
学 $(P_2O_5) [P]$	$500 \sim 1000$	≤ 200
渣量	$40 \sim 60 \text{ kg/t}$	$80 \sim 100 \text{ kg/t}$
工 钢水氧化性	$[O] = 500 \sim 800 \text{ ppm}$	$1000 \sim 1200 \text{ ppm}$
艺 处理温降	升温约 50°C 可熔化废钢:	喷粉脱磷降温 $80^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$:
操 处理工序	简单	工序复杂, 流程长, 需钢水扒渣:
作 泡沫渣控制	容易解决	不易解决:
参 处理时间	$17 \sim 25 \text{ min}$	$20 \sim 30 \text{ min}$
数 对 N 的控制	较容易	困难, 喷粉吸氮严重:
对 T O 的控制	容易	较困难, 喷粉易造成钢水过氧化:
耐火材料消耗	小	大
铁耗	小	大
生 氧耗	脱磷 $7 \text{ Nm}^3/\text{t}$, 脱碳 $50 \text{ Nm}^3/\text{t}$	脱碳 $60 \sim 65 \text{ Nm}^3/\text{t}$
产 CaO 消耗	脱磷 20 kg/t , 脱碳 25 kg/t	炼钢 $60 \sim 80 \text{ kg/t}$, 喷粉 $10 \sim 15 \text{ kg/t}$
成 CaF ₂ 消耗	$< 2 \text{ kg/t}$	$5 \sim 6 \text{ kg/t}$
本 FeO 皮消耗	$< 5 \text{ kg/t}$	$10 \sim 15 \text{ kg/t}$
升温成本	0	$40 \sim 60 \text{ kWh/t}$
生产成本	低	高

处理工艺。目前大多以转炉为铁水三脱的反应器，不再进行铁水预脱硅；

- 复合吹炼转炉采用少渣冶炼工艺，脱碳升温并进行脱磷；
- 通常采用多功能 RH 进行钢水精炼，深脱碳、深脱磷和脱气；
- 转炉弱脱氧“沸腾”出钢，避免钢水吸氮，适宜冶炼超低氮钢；
- 连铸采用保护浇注、夹杂物过滤等一系列技术措施保证钢水质量。表 4 给出该工艺各工序间关键的技术措施和控制参数。图 12 给出该工艺冶炼过程中碳、硫、磷和温度的变化情况。

3.2 钢水精炼生产工艺

钢水精炼洁净钢生产工艺技术特点：

- 采用转炉冶炼低碳钢脱磷工艺，脱碳、脱硅、脱磷和升温精炼同时进行；
- 转炉弱脱氧出钢，钢包喷粉深脱磷，然后扒渣；

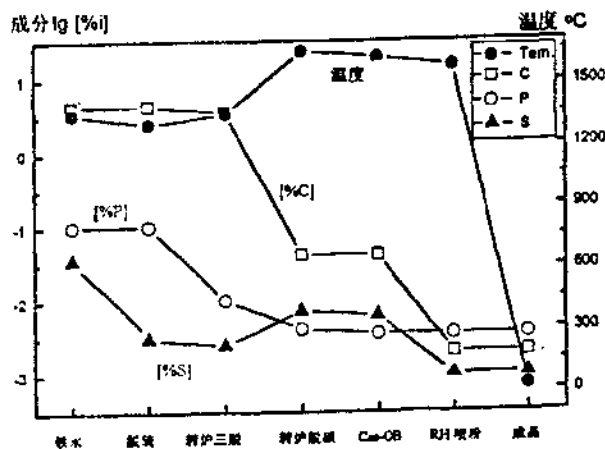


图 12 铁水三脱超洁净钢生产工艺

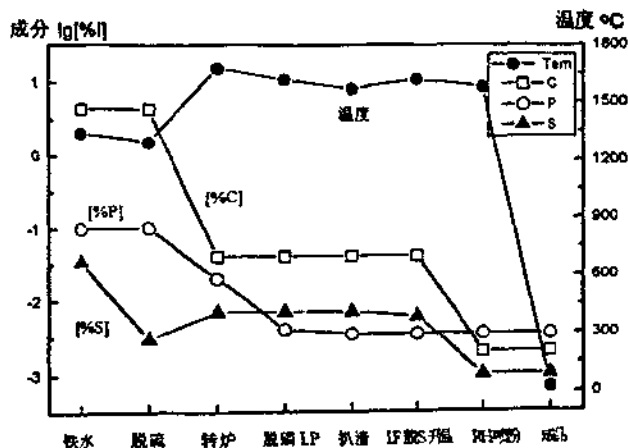


图 13 钢水精炼超洁净钢生产工艺

- LF 升温脱硫精炼；
- RH 脱气和深脱硫，连铸保护浇注；
- 不适宜同时生产超低氮、超低磷钢种。

表 5 给出该工艺各工序间关键的技术措施和控制参数。图 13 给出该工艺冶炼过程中 C、S、P 和温度的变化情况。

3.3 两种精炼工艺的技术比较

表 6 给出了两种纯净钢生产工艺的技术比较。分析表 6 可以得出：

- (1) 采用铁水“三脱”工艺，脱磷热力学、动力学条件优于钢水精炼工艺；
- (2) 铁水“三脱”工艺流程短，工艺简单，更适宜冶炼超纯净钢；
- (3) 铁水“三脱”工艺生产纯净钢的生产成本明显低于钢水精炼。

4 结论

通过比较洁净钢生产工艺，得出采用铁水“三脱”工艺生产洁净钢效率高，工艺简单，生产成本低的结论。

参考文献（略）

研制新世纪的超级钢铁材料

日本金属材料技术研究所

1 前言

面对 21 世纪,在日本经济高速增长长期建设的主要基本项目先后经过了 50 年,进入了更新时期。为了建设放心、安全的 21 世纪的日本,对于支撑其社会基础的构件材料,必须达到规划中的安全性和长的使用寿命。如果考虑地球的环境,减少环境的负担,节省资源也是很重要的。因而可以预测主要结构材料中的钢铁材料的革新将会对社会产生很大的影响。

日本金属材料技术研究所把实现满足上述性能的新世纪的构造材料(超级金属材料)作为目标,设置了极限结构研究中心,聚集了企业、学校、政府的优秀人才,通过重点课题的资金分配,对过去长期不能解决的技术课题进行突破。

极限结构材料研究中心的机构

——中心领导

——材料研究所

把强度提高 1 倍,大幅度提高耐热性、耐蚀性作为目标,推动四个具体课题的研究。不采用精炼、凝固、轧制、热处理等传统的工艺流程,采用新的构思,研究夹杂物、析出物的微细弥散组织的控制技术;研制微细的微观组织,并使其在高温下达到稳定。

——结构体化研究所

有效利用开发材料的特性结合使用环境,对最佳结合法进行基础研究。努力把结合过程的诸现象模型化,确立预测显微组织和残余应力的模拟方法。通过最佳结合条件,提高耐破坏特性。

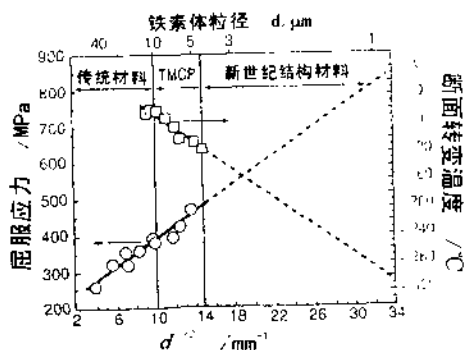
——评价研究所

通过对纳米级、原子级组织破坏试样

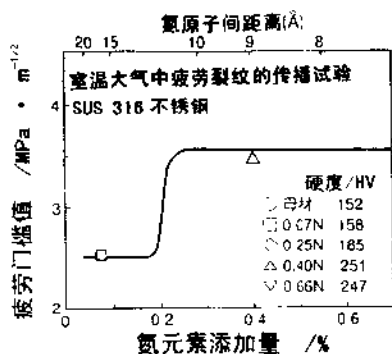
的端面解析,搞清楚延迟破坏特性、长期疲劳特性、蠕变特性等现象的机理。为了提高这些特性,确立其指导理论,在各种环境下进行评价,并把评价法标准化,确立加速试验法。

2 焊接简单的 800 MPa 级高强度钢

目前使用的高强度钢主要是通过添加合金成分达使其具有高强度,但是随着合金浓度的增加,焊接性能变差。本研究具有从根本上改变高强度化概念的特点,即采用低合金钢研制出结晶粒径为 $1\mu\text{m}$ 的超细复相组织、焊接性能不变、抗拉强度为 400 ~ 800 MPa 的高强度钢。同时为了不降低焊接接头部位的韧性及疲劳强度,应减少其部位的残留应力,以实现设计负载 2 倍化的目标。为此 800 MPa 级高强度钢具备了碳钢优异的焊接性能,解决了焊接裂纹的问题。因为焊接工艺简单化,不需要高级焊工,工艺将成为可能。此外,由于减少了贵金属的使用量,节约了资源,使原材料成本下降。



钢组织的细化是高强度和高韧性的重要因素



在超低C钢中加入大量氮元素，大幅度提高不锈钢的疲劳特性。此项技术正扩展到低合金结构钢领域

3 1 500MPa 超级钢高性能研究

为了实现采用螺栓的新型联结结构的建筑物、汽车零部件的轻量化和超长高大桥梁的建设，需要开发超过 1 500 MPa 强度的钢材。其开发的关键不仅是实现超过 1 500 MPa 强度的制造方法本身，而且还要提高由于强度提高显著下降的延迟破坏特性和与强度增加相抵消的疲劳破坏特性，确立提高性能的技术方法。

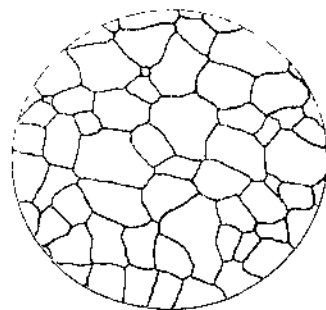
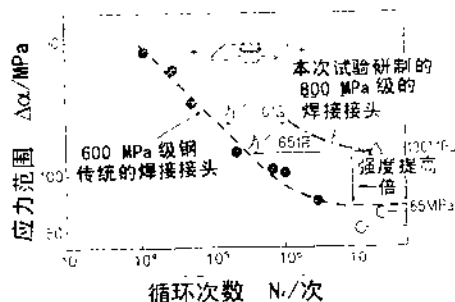
分析原子级金属组织及合金元素的存在状态、机能以及纳米级的变形和破坏过程，在弄清楚延迟破坏或疲劳现象机理的基

础上，研制与下贝氏体组织类似的马氏体等新型金属组织。以此大幅度提高其质量性能。此外，为了保证 1 500 MPa 超高强度钢长期使用的可靠性，要进行评价法标准化、

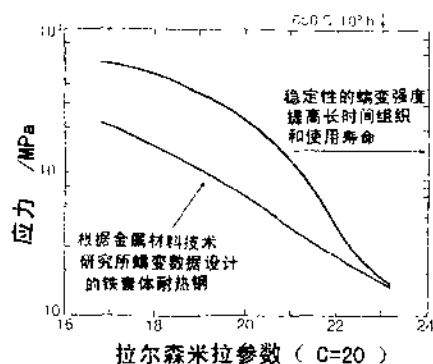
数据库的建设等。作为高强度钢性能的有效应用技术，还要进行金属组织低温焊接技术及高刚性化技术的探索。

4 铁素体耐热钢的高性能研究

为了在 21 世纪实现 650 ℃、350 atm 超超临界压的发电设备，必须开发耐热特性优异的钢材。在本研究中把锅炉材料作为对象，进行能长时间（数十年）使用在高温、高压条件下的高 Cr 铁素体耐热钢的基础研究。为了开发 650 ℃级耐热钢，必须在传统钢应用数据的基础上，大幅度提高其长期蠕变强度及耐氧化性。在短时间内，钢种间的蠕变断裂强度有很大的不同，而经过长时间，由于析出物粗大化或回复使金属固有蠕变强度下降。因而为了确保耐氧化性及金属组织在高温长时间条件下的稳定性，通过热力学计算等的计算材料学与加工热处理结合，设计、研制高性能材料。与此同时，在短时间内进行加速试验，以取得长期的蠕变强度数据进行评价。根据其评价的方法及最佳的焊接接头组织，确立其结构体的寿命。



由于使用了马氏体膨胀率高的焊缝金属并与改善后的施工方法相结合，降低了应力集中部位的残余应力。这种技术的开发，使高循环疲劳强度提高了 1 倍。



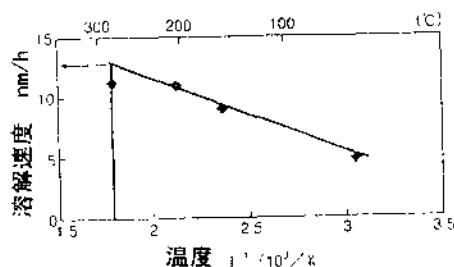
在金属材料技术研究所中,积累铁素体系耐热钢长时间蠕变数据,并作成表,进行系统的分析

5 耐海水钢的开发

在平地少的日本,人口集中在沿海一带,新的社会资本建设也集中在这一地区,且大多使用的是钢铁材料。为了提高使用寿命,大幅提高抗海水的腐蚀能力是重要的。

为提高海水环境下钢铁材料的寿命,本研究使用金属材料技术研究所长期一直使

用的较先进的原子、分子级测定技术,以搞清楚钢铁材料的腐蚀机理。此外,为了开发高耐腐蚀材料,确立防腐性能的评价技术也是不可缺少的。积累在自然环境下的长期试验数据的同时,进行与实际环境吻合的腐蚀试验,把得到的数据或生锈的基础知识作为基准,对放置在清洁溶液或一定气氛下的溶液里的钢中微量杂质及夹杂物的控制技术和环境屏蔽型的高耐腐蚀被覆的喷镀技术进行研究,以此作为耐海水钢的开发目标。



通过AFM求出腐蚀点的腐蚀速度与温度倒数的关系。采用原子序观测技术的AFM,有可能预测腐蚀起点金属间夹杂物的溶解速度

《内部资料》1998; 焦晓渝 译

新钢铁材料开发计划 超级钢铁材料

左藤 彰

1 21 世纪 — “新铁器时代”

高度工业化发展的日本在 21 世纪初将迎来大的转变期。人口将减少,每四人中即有一人是 65 岁以上的老人。在高度发展期建设的主要基本设施的维修成本增大,进而迎来更新期,社会基本设施全部投资的更新费用比例达到 50 % 以上,使竞争更加激化。

另外随着发展中国家经济的发展,资源、能源和地球环境等问题也更加突出。

钢铁材料仍在被大量生产和使用,其性能的改善给社会、经济带来很大的效益。但同时钢铁的废钢市场上也出现了前所未有的情况,废钢量达 5 000 万吨以上。对应社会结构的变化,为形成可持续发展的 21 世

