

稀土应用文集

全国稀土金属情报网

目 录

1. 近年来稀土在钢中的应用、研究与生产……………余景生等(1)
2. 国外稀土在钢中应用概况……………尤德麟等(11)
3. 稀土在特殊钢中应用研究概况……………大冶钢厂钢铁研究所(16)
4. 稀土在机械系统的研究和推广应用……………朱颂春等(19)
5. 全国冶金系统稀土在铸钢中应用近况……………张安文(32)
6. 稀土在柴油机中的应用……………无锡柴油机厂等(39)
7. 稀土在有色金属中的应用……………尤德麟(44)
8. 我国在玻璃和陶瓷中应用稀土的研究和发展……………王裕光等(58)
9. 稀土在精密陶瓷材料中的应用……………王纪鑫(94)
10. 稀土顺丁橡胶及其充油橡胶……………姜连升等(103)
11. 环烷酸铅—钴体系涂料催干剂应被取代
 ---羧酸稀土络合物催干剂……………翟应离(117)
12. 近年来稀土发光材料发展动态……………郑慕周(121)
13. 高等院校稀土荧光材料科研成果……………胡建国(137)
14. 稀土传感功能材料的研究进展……………任玉芳(138)
15. 稀土永磁合金的研制与应用……………北京钢铁研究总院精研部(148)
16. 稀土永磁力马达的研究……………武选生(160)
17. 稀土应用的新领域——稀土农用技术……………赖运生(172)

近年来稀土在钢中的应用、研究与生产

余景生 余宗森 吴承建

稀土在钢中应用始于五十年代,七十年代达到高峰。近年来面对钙的喷射冶金的竞争,稀土在钢中的应用在西方已经走向衰落,然而在我国相应的研究仍在方兴未艾。研究表明,稀土不仅改善了钢的韧性,这一点已得到普遍承认,而且也改变了钢的各种性能。稀土在钢中用途的潜在能力仍然必须进一步发掘。

一、稀土在钢中的冶金学

稀土处理的脱氧、脱硫和夹杂物形状控制等作用已得到普遍认可,许多研究者指出,为了消除由塑性夹杂物引起的钢的各向异性,最佳的RE/S比值为 3^{11} 。

含稀土夹杂物的类型取决于钢中氧、硫和铝的含量,它可能是氧化物、硫化物或铝酸盐,近年来应用了固体电解质探头和其他尖端技术,测定了含稀土夹杂物的生成热和平衡常数,见表1¹²⁻¹⁶。

由 $I_{Ca} \cdot C_e - I_{Ca} \cdot O$ 、 $-I_{Ca} \cdot S$ 沉淀图表示了形成夹杂物如 Ce_2O_3 、 $Ce_2O_3 \cdot Ce_2O_2S$ 、 CeS 、 Ce_2O_3 的氧硫活度条件(见图1)。

钢中加稀土的新方法是连铸通过结晶器喂稀土金属丝。用惰性气体保护,稀土的收得率为80~90%。加稀土后板坯的中心偏析消失了,并有宽的等轴晶区。^{12,13}(图2)。

对稀土处理和钙处理作了比较,作为脱硫剂,Ca和RE相似,经济上是可比的,最佳效果为在包内Ca和RE共同喷吹或在喷Ca后加入RE。如16Mn喷Ca后硫含量为0.007%再加入0.01%RE可进一步增加横向冲击值,使纵向冲击比值由1.46降到1.36^{12,13},消除了Ca处理未完全解决的部分长条MnS。在低硫下仅用Ca处理难以使全部夹杂物变质,而此时加RE更为有效¹³。

稀土处理钢水口堵塞机制近几年来也较清楚,堵塞产物是由凝固的钢、 $RE_2O_3 \cdot S$ 或 $REAlO_3$ 组成,(图3略)。紧贴水口壁的钢液流速接近于零,夹杂物易粘在水口壁¹⁴,钢中RE与耐火材料作用,与纯 SiO_2 反应生成低熔点化合物或玻璃,导致水口侵蚀。与纯 Al_2O_3 作用生成高熔点的固态铝酸盐,它们并不粘附钢液中夹杂物。但对 $SiO_2 - Al_2O_3$ 耐火材料,二者与RE反应形成粘性的低熔点和高温点化合物的复合物,它可粘附钢液中的夹杂物¹⁵。一旦夹杂物在水口聚集、熔接、长大,吸收更多的夹杂物,导致水口完全堵塞¹⁴。

二、铁中RE的固溶度和钢中RE的溶解量

用X射线测量点阵常数法和电子探针定量分析,测定Ce在Fe中固溶度为0.048%(wt)

(0.019%at), Nd为0.055% (wt) (0.021%at), La, Y接近0.02~0.03%at^[11]。用正电子湮灭法测定Nd在Fe中760℃固溶度为0.088% (wt)^[18], 见图4。由于难以完全分离稀土夹杂物, 图5表示钢中金属相中RE含量(包括固溶量和金属间化合物)随钢中RE加入总量增加而增加^[19]。同时钢中铝含量增加, 金属相中RE含量也增加。在通常加入量为0.05~0.1%RE时, 大部分RE在夹杂物中, RE溶解量是极少的。

三、稀土在铁中的晶界偏聚及与其他元素的相互作用

通常稀土在钢中溶解量很少, 主要偏聚在晶界, 这种晶界偏聚可以影响与晶界有关的钢的性能。

用TEM和EDX测定了稀土在Fe-0.3%P合金中, 在500~800℃温度范围的晶界平衡偏聚浓度, 随温度降低, 铈在晶界的平衡偏聚浓度升高, 见图6^[20]。在M-V钢中则在奥氏体晶界偏聚的浓度与淬-火温度的关系见图7, 铈降低Mn-V钢中磷在1050℃的晶界偏聚量(图8)^[21]。高速钢中稀土含量增加时, 晶界硫含量降低, 当含0.15%RE时, 晶界硫的俄歇峰消失(见图9), 稀土也降低晶界磷的偏聚量^[22]。

研究了稀土与P、Sn、Sb等杂质元素在晶界的相互作用, 降稀土低Sn在 α -Fe晶界的偏聚在Sn和P共存时, 稀土首先降低P在晶界的偏聚^[23]。铈还降低Sb在晶界的偏聚, 速度, 在500~600℃范围显著降低Sb在晶界的平衡偏聚浓度(图10)^[24]。在25MnTiB钢中, 加0.4%RE, 在一定淬-火温度范围内阻碍在奥氏体晶界的偏聚^[25]。

四、稀土对钢的组织 and 相变的影响

稀土无论使夹杂物变质作用或溶于基体或偏聚于晶界, 都会对钢的组织发生影响。

稀土可以影响钢的铸态组织。将0.88公斤/吨的稀土加入钢锭或连铸坯中, 其一次枝晶臂间距变窄, 一次枝晶臂变短且数目增多, 见图-11^[26]。枝晶臂生长方向性减弱, C、Si、P、S和Mn的显微偏析也减轻了, 稀土不增加凝固时的核心数目^[27]。用定凝固法排除了稀土夹杂物的影响后^[28~29], 发现在高锰钢、16Mn、20CrMoV、35CrNiMoV和碳钢中, 铈含量增加, 在结晶前沿胞状结构逐渐变成树枝晶, 然后变成单个晶体。使二次枝晶臂间距减小, 柱状晶区长度减少, 细化等轴晶区的晶粒。再者, 合金元素Mn、V、Cr、Mo的显微偏析减小。

稀土可改变电渣熔铸35CrNiMoV钢铸态断口, 抑制柱状晶发展, 使断口沿晶面上粗大VC粒子减小至30 μ m以下^[30]。稀土可抑制电渣熔铸18Cr2Ni4WA钢奥氏体晶粒长大, 使Ms点下降, 细化马氏体板条和碳化物^[31]。

稀土强烈影响纯铁再结晶过程和晶界迁移速率^[32]。0.10%Ce使纯铁再结晶温度升高150℃, 增高再结晶激活能, 是铈偏聚于晶界所造成。

稀土由于偏聚在奥氏体晶界, 阻碍过冷奥氏体相变的晶界形核, 降低形核率, 增加共析铁素体和贝氏体转变孕育期, 提高钢的淬透性^[33], 图13为Mn-V钢加铈后对

淬透性的影响。当钢中 $\sim 0.02\%P$ 时，磷的作用减小。0.13%Ce也提高60Si2Mn钢的淬透性²²。磷对Mn-V钢的过冷奥氏体恒温转变动力学曲线的影响见图14，磷使先共析铁素体形核率降低4.5倍³³。

五、稀土对钢的疲劳强度的影响

近年来研究表明，稀土能提高钢的疲劳强度，经稀土处理的车轴钢其旋转弯曲疲劳强度由290MPa提高到315MPa³⁴。这是由于稀土夹杂物对疲劳裂纹形成和扩展的有害作用小于MnS，由于细化了夹杂物尺寸和降低其数量之故^{13,35,36}，见图15。稀土改善60Si2Mn钢的疲劳寿命见图16³⁶。

六、稀土对钢的高温强度和塑性的影响

稀土降低晶界磷的偏聚量，提高耐热钢的高温强度。离子质谱分析了蠕变沿晶断口钢的偏聚，加铜提高了Cr-Ni-Si-N耐热钢持久断裂时间，降低蠕变速率(图17)³⁷。稀土使Cr18Ni18Si2耐热钢650℃持久寿命提高1—4倍，断裂塑性提高0.2—2倍³⁸。

稀土降低Cr-Ni-Si-N和W18Cr4VMn钢晶界的硫含量，提高其高温塑性，提高热扭转周次(图18)²²。

七、稀土对钢的回火脆性的影响

在CrMnSi和Cr-Ni钢中加入La使脆化处理晶界磷偏聚的浓度降低，加La后晶界磷含量在初态为无La钢的52%，脆化后为84%⁴⁰。文献[41]表明，在33CrNi3Mo钢中加入0.1~0.17%Ce，强烈阻碍钢的回火脆性，钕偏聚在晶界降低晶界磷的平衡偏聚量，时间越长，钕在晶界偏聚浓度越高，改善33CrNi3Mo长期回火脆化的效果越显著。在10MnP和15MnP钢中加0.059%RE也显著改善钢的回火脆性⁴²。

八、稀土对钢中氢的影响

用电化学方法研究Nd和La对纯铁中氢的渗透过程和扩散系数的影响⁴⁶。随纯铁中Nd或La含量增加，氢的扩散系数下降，渗透过程减慢，见图19，可以认为Nd和La原子固溶于基体是氢的浅的“陷阱”。

稀土脱硫和使夹杂物变质作用可降低钢对氢致开裂(HIC)的敏感性⁴⁸，不同RE/S比值对低硫钢中裂纹长度与试样宽度比(CLR)和裂纹宽度与试样宽度比(CTR)的关系见图20，可见适量稀土可提高钢抗氢致开裂的能力。Ca和RE复合处理钢的氢致开裂敏感性最低，此时长条状MnS全部为颗粒状稀土夹杂物所取代。Ca和RE处理都能增加钢抗氢致开裂能力，由于RE回收率高，故RE处理比较更为合适³³。

稀土降低钢轨钢对白点敏感性³⁹。如表2所示，随RE加入量增加，钢中白点减

少，铸坯淬火裂纹也减轻，当RE加入量达0.67%时，在锻环上既看不到白点又看不到淬火裂纹。

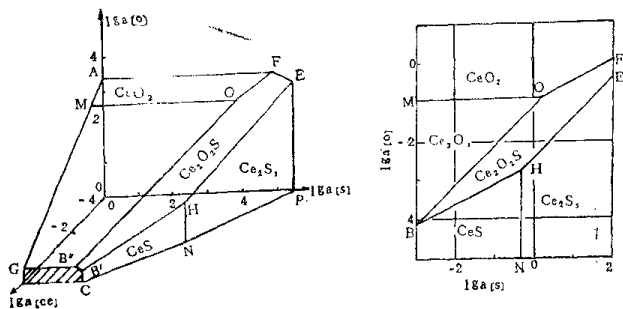


图1 (a) $\lg a [Ce] - \lg a [O] - \lg a [S]$ 沉淀图
 (b) $\lg a [Ce] - \lg a [O] - \lg a [S]$ 投影图

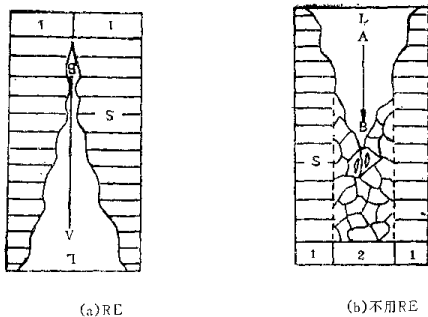


图2 熔液中凝固前沿的生成示意图
 1—柱状晶区
 2—等轴晶区

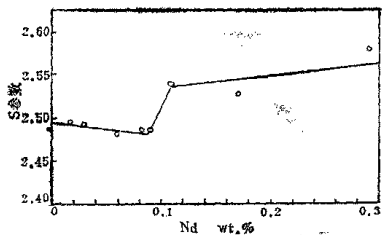


图4 760°C/120+158小时, S参数的波动

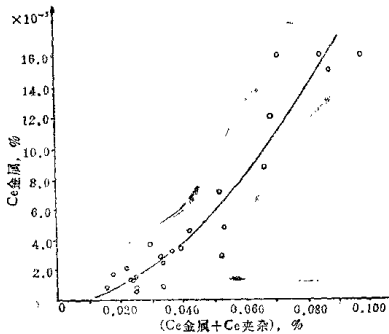


图5 25MnTiB钢的金属相中Ce含量与Ce总含量的变化

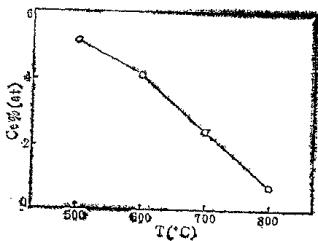


图6 Ce在Fe-0.3%P合金中的晶界偏聚

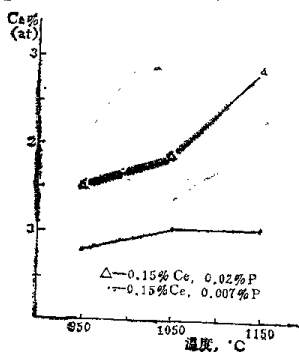


图7 Ce的晶界浓度与温度的关系

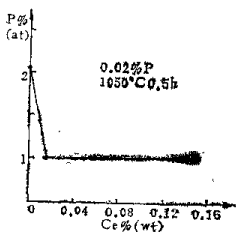


图8 钢中P的晶格浓度与Ce含量的关系

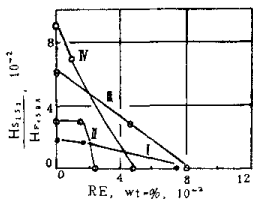


图9 俄歇峰高度比和钢中RE含量的关系
 I—0.002~0.005% S, 铸钢中的晶间断裂;
 II—0.002~0.005% S, 奥氏体的晶间断裂;
 III—0.01~0.013% S, 铸钢中的晶间断裂;
 IV—0.01~0.013% S, 奥氏体晶间断裂。

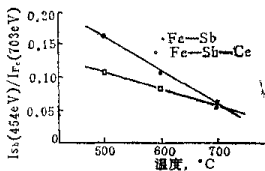


图10 Ce对Fe-Sb合金中晶S界上的b

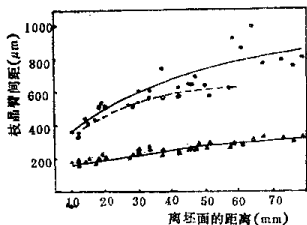


图11 稀土金属添加剂对枝晶臂间距的影响(连续铸钢坯)

REM	枝晶臂间距	
	原来的	再生的
不用REM	—●—	▲—▲
用REM	○—○	△—△

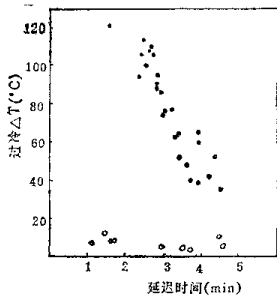


图12 过冷对含RE或不含RE的钢结晶延迟时间的影响

- 不加REM
- 加REM

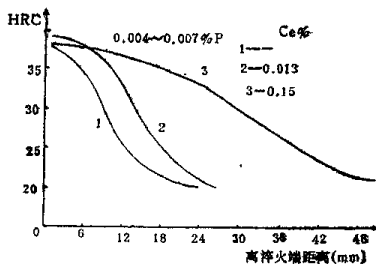


图13 ce对Mn-V钢淬透性的影响

- 1—Ce% 0.004~0.007P
- 2—0.013
- 3—0.15

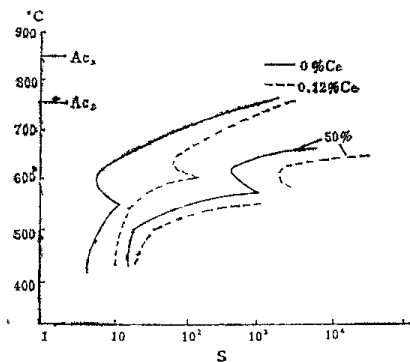


图14 Ce对在1000°C奥氏体化的低C-Mn-V-Ti钢TTT图的影响

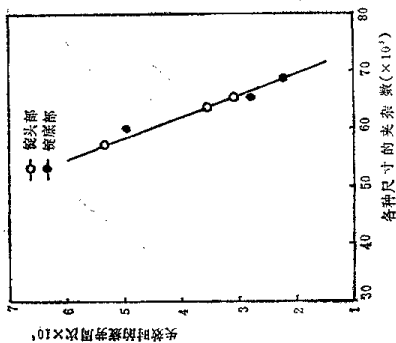


图15 25MnCrS钢100周拉一拉疲劳强度和钢中夹杂物数量的关系

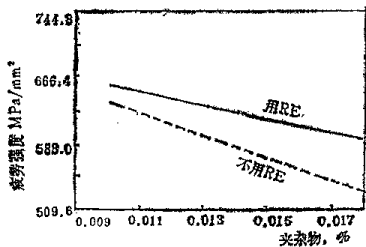


图16 疲劳强度与夹杂物量的关系

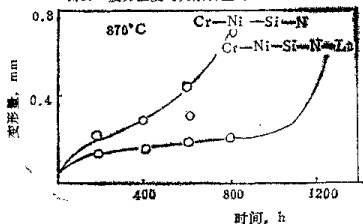


图17 La对Cr-Ni-Si-N奥氏体耐热钢的蠕变性能的影响

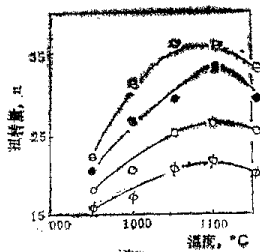


图18 RE和S含量对高速钢的扭转变形的影响

- 0.052Ce; 0.004S;
- 0.046Ce; 0.013S;
- ◐—0.002S; ◑—0.010S;

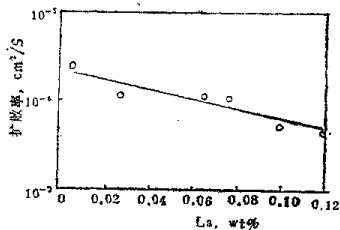


图19 La对纯铁中氢扩散系数的影响

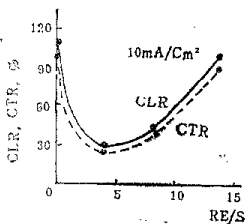


图20 不同RE/S比值对低碳钢中裂纹长度与试样宽度比(CLR)和裂纹宽度与试样宽度比(CTR)的关系

表1 含REM的生成热, 平衡常数

产物 products	生成热 heat of formation ΔG° , cal/mol	平衡常数 equilibrium constants	参考文献 reference
Ce_2O_3	$-451150 + 161.68T$	$-\frac{98611}{T} + 35.34$	2
Nd_2O_3	$-375050 + 123.7T$	$-\frac{81970}{T} + 27.04$	2
Y_2O_3	$-428460 + 157.38T$	$-\frac{93653}{T} + 34.4$	3
CeS		$1.9 \times 10^{-6} (1600^\circ\text{C})$	7
CeS		$2.8 \times 10^{-6} (1600^\circ\text{C})$	9
LaS		$7.41 \times 10^{-7} (1600^\circ\text{C})$	9
NdS		$2.57 \times 10^{-6} (1600^\circ\text{C})$	9
La_2S_3	$-338323 + 65.93T$		4
YS	$-76740 + 21.66T$	$-\frac{16773}{T} + 4.74$	3
$\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$	$-407700 + 65.0T$		4, 6
		$3.81 \times 10^{-13} (1550^\circ\text{C})$	5
$\text{La}_2\text{O}_2\text{S}$		$6.45 \times 10^{-10} (1600^\circ\text{C})$	5
		$7.41 \times 10^{-18} (1650^\circ\text{C})$	5
$\text{Ce}_2\text{O}_2\text{S}$	$-241000 (1600^\circ\text{C})$	$3.9 \times 10^{-14} (16000^\circ\text{C})$	7
$\text{Y}_2\text{O}_2\text{S}$	$-363650 + 128.24T$	$-\frac{79487}{T} + 28.03$	3
CeAlO_3	$-173400 + 26.7T$	$-\frac{37900}{T} + 5.84$	8
NdAlO_3	$-113030 + 3.16T$	$-\frac{24700}{T} + 0.69$	8
$2\text{Y}_2\text{O}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$		$-\frac{208417}{T} + 61.78$	10
$3\text{Y}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{Al}_2\text{O}_3$		$-\frac{556915}{T} + 167.78$	10

表2 稀土金属对钢轨钢白点敏感性的影响

Heats 炉次	RE addition % 加 RE	总面积 Flakes one	白点
		Total area, mm ²	Area %
1	0	135×62	62.0
2	0.30	117×35	30.3
3	0.50	92×35	23.8
4	0.67	0	0

国外稀土在钢中应用概况

尤德麟 陈希颖 高振寰

(包头稀土研究院)

稀土在钢中应用的展望

稀土在冶金、催化剂、玻璃和陶瓷中的应用在西方世界占稀土总消费量的95%，稀土的消费量从1984年的31000吨峰值急剧下降，1985年降至27000吨，预计1986年将降至25000吨。自1970年至1985年的15年间，稀土消费量平均年增长率仅有3.9%。稀土消费量锐减原因之一，是由于1985年新的石油裂化催化剂——超稳定沸石（VS-Y）问世，世界稀土年消费比例见表1。

稀土在冶金中的消费比例由1980年的33%降至1983年的20%，据罗纳公司的估计1985年可达25%，稍有增加。

美国的稀土消费是自1980年至1983年期间占世界稀土消费量的3/4左右（见表2），

表1 世界稀土年消费比例

应用领域	年											
	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
冶金	44	45	32	34	32	43	33	32	22	20	22	25
催化剂/化学品	34	36	39	39	32	26	34	30	31	45	43	33
玻璃 陶瓷	20	17	28	26	35	31	30	35	44	31	31	37
发光 电子	2	2	2	1	1	<1	3	3	3	4	4	5

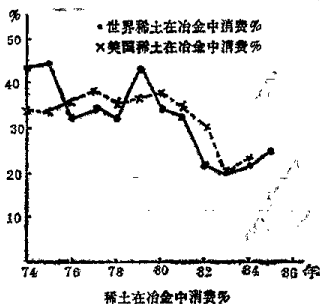
表2 美国稀土消费量占世界消费比

年	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
消费量											
美国稀土消费量t	14100	11500	12300	16800	15800	16000	18100	20000	17100	19600	21400
世界稀土消费量t	24000	17000	16000	24000	25000	26000	24000	27000	23000	25300	31000
百分比%	59%	68%	78%	70%	63%	62%	75%	74%	74%	78%	70%

从美国稀土的消费可以看出世界稀土消费的趋势。美国稀土在冶金中消费比从表3可知,从前几年占消费量的1/3降至1983年的20%。用量为3900吨,1984年又有增加,见表3和图1。

表3 美国稀土在冶金中消费比

年	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
消费量											
冶金消费量t	4800	3800	4300	6300	5500	5700	6700	6800	5100	3900	4900
总消费量t	14100	11500	12300	16800	15800	16000	18100	20000	17100	19600	21400
百分比%	34%	33%	35%	38%	35%	36%	37%	34%	30%	20%	23%



稀土在冶金中消费比例下降，主要是因为世界主要资本主义国家钢铁工业不景气以及其它材料咄咄逼人加入竞争的局面有关，钢铁工业中的石油管道用钢大大减产。美国钢产量已由1980年的一亿吨降至1985年的8000万吨，减少了20%。其次，与美国钢中采用喷钙脱硫的影响有关。

据美国矿物局的估计美国2000年稀土（包括钪）需求量的预测值见表4。

稀土在钢铁中应用受到喷钙的挑战及钢铁不景气的影晌以及代用材料的使用，这是对钢铁中稀土消费增长不利的

表4 美国2000年稀土需求量予测值

应用领域	1983年	2000年 预 测 值		可能实际用量
		低 限	高 限	
石油催化剂	12700	8300	24700	16500
玻璃陶瓷	2400	2200	68000	4500
冶 金	3900	5198	19400	11200
其 它	600	500	6000	2200
总 计	18600	16000	57000	34000

因素。但是，随着技术进步稀土在钢中的应用会有许多新的发展如稀土在热处理中的应用、喷涂技术、离子注入以及非晶态合金中的应用，可使稀土发挥更加重要的作用，但就稀土总的用量来说，也许不会向以前那么大。上表是对美国稀土用量在2000年时的估计，它对稀土在冶金中应用抱着乐观的态度。但罗纳公司估计稀土在其它领域内（新技术）发展最快，而对冶金中应用没有那么乐观。

稀土在钢中应用的动向

国外在20世纪50年代开始将稀土应用于改善不锈钢热加工性能，至今已有30余年。近年来稀土的应用有所进展，但也经历了曲折。为了对国外稀土的应用情况有一宏观的了解，我们收集了从1984年至1987年4月国外发表的文章、专利进行了分类统计。

共收集到文献共199篇，其中专利109篇，文章90篇，详见表5、表6。

从统计结果可以看出：在发表的专利中，日本有81件占专利总数的57%居首位，苏联占37%，两国专利共占专利总数的94%。英美等国专利甚少。从发表的论文来看，俄

表5 专利文献分类表 (篇数)

钢 类	国 别			小 计	百分比
	日 本	苏 联	英美等		
工模具钢	5	17	0	22	20%
铸 钢	4	10	1	15	14%
不锈钢热钢	11	2	1	14	13%
耐腐蚀钢	11	1	1	13	12%
结 构 钢	3	4	1	8	7%
钢 板 钢	6	1	1	8	7%
薄 板 钢	5	1	0	6	6%
低温 钢	4	2	0	6	6%
弹 簧 钢	5	1	0	6	6%
容 器 钢	4	0	1	5	5%
其 它 钢	3	3	0	6	6%
总 计	61	42	6	109	102%
百分比	56%	38%	6%	—	—

表6 文章分类表 (篇数)

类 别	文 种				小 计
	日 文	俄 文	英 文	其 它	
加入方法及夹杂物控制	0	8	9	2	19
不 锈 钢	3	8	13	2	26
低合金高强度钢	0	4	6	1	11
结 构 钢	0	5	6	0	11
铸 钢	1	5	5	2	13
工 具 钢	1	4	0	0	5
抗 氢 脆 钢	0	1	3	0	4
镀 层	0	0	1	0	1
合 计	5	35	43	7	90

文的文章有35篇，英文论文有43篇，日文的只有5篇。总之苏联在发表的专利和文章均较多而涉及范围较广；日本在专利中数量最多，涉及的钢类亦多，但是在论文方面甚少；英美等国专利甚少，而文章较多。这说明国外各国研究重点不一致，苏联对稀土在钢中应用研究较多，日本着重于实际应用，而英美等国对稀土在钢中应用的研究已没有从前那么有兴趣。

从研究的钢类来看：在发展的专利中，日、苏专利涉及的钢类较广，日本主要集中在不锈钢耐热和抗腐蚀钢，其次是板材用钢；苏联主要集中于工模具钢类，其次是铸钢。从发表的论文来看苏联集中于稀土加入方法、夹杂物控制和不锈钢耐热方面。有关研究如下：

1. 耐腐蚀钢：包括抗氢致裂纹、耐海水腐蚀、抗潮湿二氧化碳气体腐蚀及抗硫酸钙腐蚀等。使用的稀土元素多为La或Ce亦有使用混合金属的，含量一般较多可高达0.2—0.3%。稀土主要是与钢中有害杂质P、Sn等形成LaP、La₂Sn等类似的化合物，防止这些有害杂质在晶界集中及产生非正常的带状组织，从而提高了钢的抗腐蚀性能。稀土与硫生成不溶于水的硫化铈防止产生点蚀的 α (MnFe)S的生成从而提高了钢的抗海水腐蚀能力。

2. 不锈钢耐热钢：最近日本公布的材料中在奥氏体不锈钢中加入0.1—2.0%的稀土元素氧化物用以提高高温抗氧化性能。

3. 工模具钢：工模具钢中稀土含量一般为0.3%以下，高者达0.6%。稀土提高了钢的机械性能和耐腐蚀性、红硬性等。据认为加入稀土后在温度为1400~1500℃钢液中可直接析出碳化物，这种细小碳化物可做为其它碳化物的核心，因而使钢的基体中共晶碳化物呈细小而均匀地分布，同时也为以后热处理工艺中，碳化物分解成细小状态提供了条件。

4. 特种用途钢：在低膨胀钢、硅钢片、粉末烧结合金钢等的应用。低膨胀系数钢中加入稀土元素能与铁和锰形成Fe₂Y, Fe₂Sm, SmMn₂等金属间化合物，可减低合金膨胀系数而且可提高钢的抗腐蚀性能及强度。在非取自硅钢片中，稀土可以降低铁损。

稀土加入工艺研究

稀土加入钢中的工艺，随着连铸钢的发展，在中间包和连铸机中加入稀土的研究增加。使用的合金除混合金属和稀土硅铁合金外，还研究了许多复合合金，这就为稀土改善钢性能的同时进行了钢的微合金化。美国在连铸含硼钢中使用含B0.4~0.75%，RE15~30%，Ti15~30%，Si20~40%及Mg, Zr, Al及Fe，同时该合金还能减少水口堵塞。苏联在工业条件下，对含硼、磷、稀土和钙的合金进行了试验，用以改善奥氏体不锈钢及结构钢的机械性能。在加入工艺上，苏联研究了采用铝热还原稀土氧化物的方法加入稀土，据报导稀土的还原率可高达80%以上，只是钢液中含铝量由0.010~0.012%，增加到0.027~0.032%。

低硫钢中加稀土的研究

夹杂物变性和硫化物形态控制的最新方法是单独使用吹氩喷CaO—CaF₂粉或与钙