

稀 土 金 属 应 用

《稀有金属应用》编写组

这本小册子是根据我社 1974 年出版的《稀有金属应用》第十四章重印的。重印时只对书中个别差错作了修改。

本书根据一些国外资料编写而成。书中系统扼要地介绍了国外稀土金属的各种用途和使用分配情况及今后发展趋势。书中收集的资料截止到 1973 年。本书可供各级领导和从事稀有金属的使用、生产、科研及教学等部门的有关同志参考。

稀 土 金 属 应 用

《稀有金属应用》编写组

•

冶金工业出版社出版

冶金部情报标准研究所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

•

850×1168 1/32 印张 1 $\frac{1}{4}$ 字数 45 千字

1975 年 8 月第一版 1975 年 8 月第一次印刷

印数 00,001~5,000 册 定价 (科三) 0.21 元

目 录

一、概述	1
二、稀土金属的主要性能	4
三、稀土金属的应用范围	7
(一) 黑色冶金工业	7
(二) 有色冶金工业	11
(三) 石油化学工业	17
(四) 玻璃和陶瓷工业	19
(五) 电子电工技术	24
(六) 原子能工业	34
(七) 农业	38
(八) 医学	39
(九) 轻工业及其它应用	40
四、稀土金属应用发展趋势	40
参考文献	53

一、概 述

稀土金属包括原子序数57（镧）到71（镱）的镧系元素，以及与镧系元素在化学性质上近似的铕和钇，共十七个元素。根据原子结构、物理性质和在矿石中存在的相似程度，稀土金属通常分为二组：镧组和铈组。镧组为轻稀土，包括镧、铈、镨、钕、钐和铕。铈组为重稀土，包括钆、铽、镱、铒、铥、镱、镱、镱、铕和钇。此外，钷为人造元素。

稀土金属早已不是稀有的材料，其使用量已从几毫克达到几千吨。“稀土”是从十八世纪沿用下来的名称，因为当时用以提取这类元素的矿物比较稀少，而且只能获得外观似碱土（氧化钙）的稀土氧化物，故取名“稀土”。其实，稀土并不似土，能制得典型的单一金属。稀土也并不稀少，地壳中所含的稀土金属要比锌、铅、锡、钼、钨和贵金属多几十倍或几百倍。镧、铈和偶数原子序数的稀土金属以及钇在地壳中的分布为最广。含有稀土元素的矿物大约有250种，其中稀土元素含量较高（约5~8%）的矿物有60~65种。据报导^[1]，从月球带回的岩石样品证明，在月球表面各稀土元素的储量相当于地壳中储量的3~10倍，钇为7.5倍，镧为3倍。

自1794年从钇铍硅矿中发现“钇土”，1803年发现镧，1839年由镧中分离出铈，直到从铀的裂变产物中得到最后一个稀土元素——钷，经历了一百五十多年。

大约在1885年开始了稀土和稀土产品的生产，但稀土金属曾经在很长时期内没有得到应有的实际应用。稀土金属最先的实际应用是作为灯罩和灯网。用二氧化钪（加入1%二氧化镧）制造灯网，可达到很大的亮度。再一个较早的用途是制作日常生活中用的打火石，它是铁和30%镧的合金，又称为引火合金，长期以

来稀土金属大量用作引火合金。第二次世界大战前，稀土金属的主要用途仍限于制作打火石、玻璃抛光及钢中的添加剂。第二次世界大战期间，各国加紧了试验研究工作，美国到1958年底在单一稀土的生产方面实现了全部工业化。最近十几年中，稀土金属在各种技术领域中的应用愈来愈广，因而稀土工业的发展十分迅速。1969年美国稀土总生产能力为18144吨（以氧化物计），混合稀土氧化物为14515吨。1969年美国生产的稀土氧化物中，氧化镧227吨、氧化铈295吨、氧化镨72吨、氧化钕218吨、氧化钐227吨、氧化铕10吨、氧化钆36吨。

根据用途，稀土金属可以各种产品形式应用。采用稀土产品的主要形式有：

（1）稀土金属和稀土金属合金，以及含其它非稀土金属的中间合金。

（2）氧化物、氢氧化物、稀土金属氧化物，以及与其它非稀土金属氧化物混合物。

（3）盐：氧化物、氟化物、硫化物、硫氧化物、磷化物、醋酸盐、环烷酸盐、硝酸和硫酸盐。

（4）特殊用途的化合物：氮化物和六硼化物等。

由于稀土金属同时兼有许多优异的性能，稀土氧化物、化合物和稀土金属的应用范围是极其广泛的，目前已经有20个以上的不同工业部门使用稀土金属，主要有：冶金、玻璃和陶瓷、石油、化学工业、电工、无线电技术、无线电电子学、核子工业、军事工业、农业、医学、摄影和照明，以及珠宝生产等部门。

据报导^[2]，1970年资本主义国家稀土消费总量为16000吨，其中美国9000吨、日本2000吨、法国2000吨、英国1500吨、西德1000吨、其它国家500吨。

目前，美国在催化剂、玻璃抛光材料、添加剂、冶金、制作混合轻稀土金属等方面大量使用稀土金属（见表14-1）。日本使用稀土金属的情况除催化剂外大体上与美国相同。日本稀土金属消费量列于表14-2^[3]。稀土金属在苏联的主要应用领域是玻璃工

业 (70%)、冶金、机械制造 (20%) 和电子工业 (2%)^[4]。

美国稀土金属消费分配情况 (%)

表 14-1

名 称	1942年	1949年	1952年	1966年	1970年
打火石	40	—	25	—	—
光学玻璃抛光	—	30	25	2.5	26
玻璃材料	—	—	—	6.2	4.4
电弧炭棒	40	25	25	8.8	—
冶金	—	—	—	26.2	4.4
催化剂	—	—	—	18.1	63
混合轻稀土金属	—	25*	—	—	2.2
其它用途	20	20	25	15.6	—

* 混合稀土金属及钕铁。

日本稀土金属消费量

表 14-2

名 称	純 度	主 要 用 途	消费量, 吨/年	费用比, %
氧化镧	99.9%以上	光学玻璃	150	19.5
氧化镧	—	陶瓷电容器	80	
氧化铈	—	玻璃脱色	70	
氧化铈 (抛光剂)	主要是氧化铈	玻璃板抛光等	180~200	17.0
	同 上	布劳恩管抛光	200~250	
	同 上	光学透镜抛光	100	
稀土氟化物	—	电弧炭棒	60~70	4.0
	—	钢铁用	70~80	
氧化钪	99.99%以上	荧光体, 铁氧体	20	43.5
氧化铈	99.99%以上	荧光体	1.5	
米什合金 (铈与稀土合金)	—	发火合金	150	16.0
	—	钢铁用	80~100	

另据报导^[5], 石油裂化催化剂的用途乃是稀土氧化物最大的消费部分。美国和其它资本主义国家各工业部门消费稀土氧化物的百分比如下:

	美国	其它资本主义国家
石 油 催 化 剂	65%	5%
玻 璃 陶 瓷、难 熔 材 料	15%	50%
冶 炼 合 金	10%	30%
电 弧 炭 棒	7%	10%
彩色电视、电子及核技术	3%	5%

稀土金属的成本多半取决于生产规模，而生产规模又和稀土金属在工业上应用的稳定需要量有关。探索和扩大稀土金属的应用范围是一项重要的课题。如能正确选择稀土金属的应用范围时，稀土金属的应用具有很大的技术经济效果。

二、稀土金属的主要性能

稀土金属由于电子结构和晶体结构相似而形成一族，因而稀土金属在物理化学性质方面彼此是极其相似的，故不易获得纯的单一稀土金属。重稀土元素是在最近30年以来才被制成金属的，关于它们的性质的报导还是不完整，目前对稀土金属的性质还在进行着多方面的研究。已经证明，稀土金属同时兼有许多优异的性能。

1. 物理性能

所有稀土元素都是典型的金属，其金属光泽介于铁和银之间。其中某些可以形成带颜色的盐类的元素，略具淡黄色光泽（如镨和钕及其他元素）。大部分稀土金属均成密集六方晶格或面心立方晶格结晶，只有钐为菱形结构，铈为体心立方结构。

稀土金属的某些物理性能列于表14—3。从该表中可以看出，所有稀土金属的难熔程度均属中等，例如，铈为800°C、钆为1350°C、镨为1700°C。稀土金属的熔点随原子序数的递增而升高，但铈，特别是镧不在此限。

特别值得注意的是，有些稀土金属的热中子俘获截面很大，如钆、钐、铈。钆的俘获截面几乎比一切元素的都要大。但另一方面，有些稀土金属的热中子俘获截面却非常小，例如钕的热中子俘获截面仅为1.27靶。

纯稀土金属的导电性强，随着金属纯度的降低导电性下降，成为不良导体，其电阻比铜的电阻大40~70倍。在超低温下（-268.78°C）具有超导性。稀土金属及其化合物在一般温度下是强顺磁性物质，具有很高的磁化率。钐、钆、镨具有铁磁性。

2. 机械性能

表 14-3

稀土金属的物理性能*

元素名称	熔 点 °C	沸 点 °C	密 度 克/厘米 ³	比 热 (0°C) 卡/克分子·度	热膨胀系数 (400°C) ×10 ⁻⁶ /度	电 阻 率 (0°C) 欧姆厘米 ×10 ⁻⁶	电阻温度 系数 (0°C) 10 ⁻³ /度	磁 化 率 (25°C) 10 ⁻⁶ 高斯/ 奥斯特	热中子俘获 截 面 靶	氧 化 物 熔 点 °C
镧	920±5	4200	6.162	6.65	8	62.4	2.18	1444	8.9	2315
铈	804±5	2900	6.768	6.89	7	76.7	0.87	8792	0.70	1950
镨	935±5	3000	6.769	6.45	6	73.7	1.71	68700	11.2	2500
钕	1024±5	3150	7.007	7.20	8	71.3	1.64	43458	46	2270
钐	1052±5	1600	7.540	6.49	—	88	1.48	16580	5500	2350
铕	826±10	1489	5.245	6.00	26	81.3(25°C)	4.80 (25°C)	2813	4600	2050
钆	1350±20	2700	7.868	11.20	8	137	0.9~1.76	铁磁性	46000	2350
铽	1450±50	2500	8.253	6.54	10	—	—	2160320	44	2387
镱	1485±20	2300	8.565	6.72	12	56	1.19	7410	1100	2340
镱	1500±25	2300	8.799	6.45	—	87	1.71	5488	64	2360
铒	1500±25	2600	9.058	6.65	11	107	2.01	3768	166	2355
铥	1600	2100	9.318	6.45	—	79	1.95	1910	118	2400
镱	824±5	1500	6.959	6.00	31	30	1.30	1017	36	2346
镱	1700±50	1900	9.849	6.45	—	79	2.40	224.8	108	2400
铒	1539	2727	2.995	—	—	—	—	—	—	—
铒	1500±25	3200	4.472	6.01	—	80	2.71	弱	1.27	2680

* 除热中子俘获截面根据文献〔6〕氧化物熔点根据文献〔31〕外,其他各项均根据文献〔7〕。

稀土金属的机械性能和其中各种杂质的含量有密切的关系。稀土金属的维氏硬度为20~85公斤/毫米²。硬度随原子序数的增加而增加，铈、铈和镱例外。钇的硬度与镁的硬度相近。

重稀土金属具有较大的强度特性，钇的强度比铝和镁的强度大，与钛的强度相近。压力加工可显著提高钇的硬度和强度。

稀土金属具有可塑性，可以制成线材和板材。可塑性最好的要算镱和铈。轻稀土金属具有像镁和锡差不多的弹性，而重稀土金属则有与锆和钛相似的弹性。

纯稀土金属易于进行压力加工，在室温下可以锻压、轧制。稀土金属可以冷加工与热加工。稀土金属的机械性能列于表14—4[8]。

稀土金属在室温下的机械性能

表 14—4

金 属	硬度 HV 公斤/ 毫米 ²	拉伸 强度 极限 公斤/ 毫米 ²	屈服点 公斤/ 毫米 ²	抗压 强度 极限 公斤/ 毫米 ²	延伸率 %	收縮率 %	弹性 模数 $\times 10^{-2}$ 公斤/ 毫米 ²	切变 模数 $\times 10^{-2}$ 公斤/ 毫米 ²	泊松比	可 压 縮 性 $\times 10^{-6}$ 厘米 ² / 公斤
钪	85	—	—	40	—	17	—	—	—	—
钇	60	10~14	7~10	80	5~10	—	63~70	27	0.27	2.1
镧	40	13	13	22	8	33	39	15	0.29	3.2
铈	25	11	9	30	24	18	31	12	0.25	5.0
镨	40	10	10	33	10	36	36	14	0.31	3.3
钕	35	17	15	25	11	—	38	13	0.31	3.0
钐	45	14	11	—	3	—	35	13	0.35	2.6
铈	20	—	—	—	—	—	—	—	—	—
钆	55	20	16	—	8	—	57	22	0.26	2.5
铽	60	—	—	—	—	—	58	23	0.26	2.5
镱	55	25	23	—	6	—	64	26	0.24	2.4
铈	60	27	22	—	7	—	68	27	0.26	2.1
铈	70	30	30	78	4	22	74	30	0.24	2.1
铈	65	—	—	—	—	—	—	—	—	2.6
铈	25	7	7	—	6	—	18	7	0.28	7.1
铈	85	—	—	—	—	—	—	—	—	2.3

3. 化学性质

稀土金属之间有着突出的化学相似性，可是也能清楚地看到

它们之间的差别。稀土金属的化学活性很强，几乎能与所有的元素起作用，能生成极稳定的氧化物、卤化物和硫化物等。在较低的温度下也能和氢、碳、氮、磷及其它许多元素起作用。

稀土金属于室温下在干燥空气及潮湿空气中的稳定性，决定于所形成的氧化物的结构及性质。如镧、铈和镨在空气中腐蚀得很快；而铟、钆和钇的氧化程度就不大，能长时间保持其光泽。

所有的稀土金属对于酸的稳定性小，除钆、铈、钇外，多数不抗腐蚀，可溶于任何浓度的硫酸、盐酸和浓硝酸中。稀土金属对碱是十分不活泼的，然而碱金属氯化物却对稀土金属起一定的溶解作用。把稀土金属加热到 $200\sim 400^{\circ}\text{C}$ 会着火燃烧；粉末铈在空气中会自燃，但致密的金属铈在纯氧中的着火点低于铝和镁。

稀土金属氧化物的稳定性很高，氧化物的熔点也较高。稀土氧化物的颜色是多种多样的，如 La_2O_3 ， Ce_2O_3 ， Gd_2O_3 ， Y_2O_3 等呈白色、 Nd_2O_3 为淡紫色、 CeO_2 加热时呈黄色，冷却后呈白色。 Eu_2O_3 呈浅玫瑰色， Pr_2O_3 为黄绿色^[9, 10]。

三、稀土金属的应用范围

(一) 黑色冶金工业

稀土元素广泛用于冶金工业，尤其是黑色冶金工业。在冶金过程中，稀土元素可以用作合金剂、还原剂、去氧剂、脱硫剂、变性剂和调质剂^[11]。添加稀土能够改善材料的热加工性、韧性和高温蠕变特性、抗氧化性和耐高温腐蚀性，以及提高其他机械性能等。各种稀土金属与氧、碳、氮和硫的化学亲和力很大，只要添加微量稀土，就可收到显著效果。

1. 球墨铸铁

稀土金属（主要是铈铁状态的铈和镧或它们与其它金属的中间合金）在高强度生铁生产中具有很大的使用前途。稀土金属在生铁中起变性作用和脱硫作用。由于变性作用的结果，生铁中石墨变为球形，其机械性能随之显著提高。

在生铁中，加入铈可以防止钛、铋、铅、锑、锡、铝和铁的微量杂质对球墨化的影响，有利于进行脱氧、脱氮、脱硫和提高液体的流动性等^[12]。

在苏联，生铁的变性处理采用铈铁和镁的合金（40~50%铈、20~24%镧、15~18%钕、3.5~7.5%镁、10%铁以下，余为其它稀土金属）^[13]。用铈作变性处理也采用铈镧合金（56%铈、18%镧、1.6%铁以下、0.056%锌以下、0.026%氮以下、0.02%硫以下、0.015%磷以下，其它为钕、镨和钆）^[9]。

生铁中加入少量的（0.15%）铈、硅、镁和铁（30：30：5：35）的中间合金，可以炼成一种具有特殊球墨结构的极坚固的灰色生铁。生产这种生铁比较经济，其性能不次于钢^[11]。

铈球墨铸铁可以有效地用于所有用可锻铸铁和高强度镁生铁制造的零件。铈球墨铸铁能够广泛应用于许多工业部门来制造采掘机、钻探装置、轧钢设备、锻压设备零件，制造轮毂、钢锭模、汽车、拖车、轧辊、机床铸件、播种机零件、减磨零件、压缩机曲轴和减速机传动轮等。

稀土用于各种铸铁：稀土球墨铸铁，稀土镁球墨铸铁，稀土高硅耐酸铸铁，稀土硅铁，稀土钢锭模，稀土白口铁（畜力犁镜），加铝稀土铸铁和稀土低碳钢芯球墨铸铁焊条等^[14]。

2. 铸钢（成型铸件和钢锭）

在铸钢中加入稀土金属可以提高钢水流动性，进一步脱氧和脱硫，并能改善铸钢的宏观组织与提高其机械性能。

铁和钢的脱硫程度既决定于钢的化学成分及铈的加入量，也决定于一系列工艺因素（金属温度，炉渣成分，在盛钢桶中的保持时间）。加入0.2%的发火合金可急剧地降低铬镍钼钢中的含硫量。

美国用稀土硅铁改善连续铸造工艺和钢锭的显微组织^[5]。

3. 普通低合金结构钢

在普通低合金钢中加入适量的稀土，就能起到良好的脱氧、脱硫作用，这可以提高钢的冲击韧性，降低脆性转变温度，抑制

树枝状结晶组织的发展，提高钢坯的成品率。

国外研究了平炉和碱性电弧炉熔炼的铬镍钼钢和铬镍钒钢。加入铈铁（0.12~0.35%）有效地降低了含硫量（从0.02%到0.015~0.005%）并大大地提高钢的低温（-100°C）冲击韧性。

据报导，37XC和36Г2C钢锭内添加2.7~2.8公斤/吨稀土元素，在轧材快速冷却的条件下能防止白点的形成。Cr-Ni-Mo钢内添加稀土防止了该合金大型制品中白点的出现。加入铈铁可改进30ХГБТ钢，12XH3A钢和其他钢的机械性能。稀土元素可提高结构钢的抗寒性^[15]。

4. 轴承钢和工具钢

在轴承钢中，加入稀土可提高韧性，耐磨性，疲劳寿命和淬透性。

在工具钢中，稀土对改善加工性和防止碳化物偏析很有效，并起成核作用^[9]。高速工具钢加入稀土金属或稀土氧化物后，高速钢中碳化物不均匀度的级别可以降低0.5~1级。用这种钢制成的工具，其切削寿命也可提高^[14]。

5. 不锈钢和耐热钢

稀土元素广泛用于生产高级优质合金不锈钢、耐热钢和其它特殊钢及合金。不锈钢中添加铈钨合金改善了钢的锻造加工性和塑性。添加稀土氧化物能够改善钢的热加工性。

在许多钢种中，添加稀土元素作为必要的组分（如X23H18及X17H13M2T不锈钢添加0.1~0.3%稀土元素），可提高热轧时的塑性和改善钢坯的表面质量。X18H9T钢中添加稀土元素可把贵重的镍量减少一些，而不降低其热塑性^[15]。

不锈钢中添加铈、钨或铈合金能改善热加工性能，添加铈对18Cr-10Ni-Ti钢的效果显著^[16]。

在18-8型奥氏体不锈钢中加入稀土后，可以提高抗蚀性。稀土加入于铁素体和马氏体型不锈钢中，能细化钢的晶粒，使钢锭的柱状晶得到改善，净化了钢质。加入0.15%稀土的12MoWVBR钢，可用作540°C，100个大气压高参数的锅炉过热器

管[14]。

美国往 308、309、310、316 型不锈钢中添加 0.68~2.27 公斤/吨的稀土氧化物。美国制钢公司已将稀土氧化物的添加列入熔炼不锈钢的工艺规程。过去浇铸的钢锭最大为 4 吨，由于使用稀土氧化物，可以经济地浇铸 20 吨钢锭。4 吨钢锭的轧钢成品率由过去的 65% 提高到 75%[9]。

稀土金属加入耐热钢中能提高耐热强度、耐热性和改善热变形能力。日本有人试验了 19Cr-9Ni 奥氏体不锈钢，含有 0.2% 稀土元素的钢，在 1200°C 以上的扭转回数，约提高 2 倍。

掺入不到 0.01% 的铈就可延长镍铬热导体合金在 1150~1200°C 时的使用寿命，这是因为生成了一层很粘的保护氧化层。

添加稀土元素可提高耐热合金的蠕变断裂强度和延伸率。对 Kh18N10T 不锈钢和 EI 481 钢的效果良好。

往 80Ni-20Cr 合金电热丝、60Ni-18.5Cr-Fe 合金电热丝中加入铈，可提高它们的耐高温腐蚀性，对提高反复加热的寿命是有效的。

钇和镧对提高耐高温腐蚀性是特别有效的。13%Cr 和 25%Cr-Fe 合金中加入 0.11~0.13% 钇，会使其氧化量显著减少。30%Cr 和 3%Al-Fe 合金中加入 1% 钇时其耐热性提高最大。

钴基超耐热合金中加入 0.05~0.5% 的钇，提高了它的耐氧化性。

美国矿务局成功地进行含镍铬钼及钒的合金钢中添加稀土金属硅化物的试验[17]。添加 2 公斤/吨稀土金属，钢中的铈含量为 0.014~0.025%，增大了钢的强度和可锻性。

6. 钢铁中常用的稀土元素

从目前来看，各国用于钢铁中的稀土，主要有混合稀土金属、混合稀土氧化物、铈铁和稀土硅铁合金。

较常见的混合稀土金属的大致组分为：20~25% 镧、40~50% 铈、15~20% 钕、其它稀土元素合计 10~15%。

典型的混合稀土氧化物，含 34.34%CeO₂、19.75%Nd₂O₃、

10.69% La_2O_3 、3.95% Sm_2O_3 、3.43% Gd_2O_3 、3.09% Pr_6O_{11} 、2.64% ThO_2 、1.51% Y_2O_3 、0.76% Dy_2O_3 、0.48% Er_2O_3 、0.12% Yb_2O_3 。

铈铁是一种最常见的稀土铁合金，大约含30%铁，其余为混合稀土金属及痕量杂质。主要用途是作各种铁合金的稀土添加剂，还可利用其引火性能制造打火石。有一种含铁量低的引火合金（49.5%铈、44%镧和铈、4.5%铁、0.5%铝，余为钙、硅、碳）用来制造子弹、炮弹的引信及点火装置^[18]。

稀土硅铁合金约含20%稀土、40%硅。

（二）有色冶金工业

在有色金属各种合金的冶炼中，广泛地应用稀土金属。稀土金属有效地用于铝、镁、铜、镍、钛、钒、铌、钨合金，以及铬和其他一系列有色金属的合金化，并用作金属热反应的强还原剂。稀土金属对有色金属基合金都有良好的影响，能改善合金的物理性能和机械性能。

往有色金属中添加稀土金属含量范围很宽，从微量约0.001~0.5%到8~10%。加入适量的稀土金属可以得到重量轻而强度高的合金。这些合金可用来制造航空、火箭、气轮机和发动机的零件等。

1. 镁合金

稀土金属加入镁合金中主要是提高合金的耐热性，同时改善合金的结构、净化合金，并提高合金的室温机械性能。铸造合金中用稀土金属合金化可以增加流动性和减少微孔^[13]。

使用稀土来改良镁合金是在30年以前开始的，当时发现，加入混合稀土合金能降低微孔率，改进铸造镁合金的质量^[19]。ZE10A是典型的这种合金，是含有1.25%锌、0.17%混合稀土的镁基合金。这种合金成本低，强度适中，电弧焊后不需要去除应力，可用来生产板材。但是，这种合金的可浇铸性差，浇铸效果低。加入锆能细化合金的晶粒结构，改进强度和延性，而不影

响混合稀土合金降低铸件微孔的能力。

喷气式飞机发动机的发展，要求在 204°C 高温下具有较好抗拉强度和抗蠕变性能的轻合金部件，为了适应这种需要，发展了 EZ33 合金。这种合金含 2.5% 混合稀土合金、2.5% 锌、0.6% 锆，其余为镁。

为了使镁合金在上述高温下保持较大的强度，已研究出 QE22A 合金。该合金含有 1.2~3.0% 镧、2~3% 银、0.7% 锆，其余为镁。这种合金在 204°C 和 1590 公斤/厘米² 压力下，经 30 小时后断裂，而 EZ33 在 1190 公斤/厘米² 时即已断裂。

在 21°C 下，QE22A 的强度为 2450 公斤/厘米²，而 ZE33 为 1610 公斤/厘米²。因此，QE22A 合金最近在火箭、导弹、卫星、飞机上的应用日益增长，主要用作长期工作温度高达 204°C、连续使用温度在 111~137°C 之间的部件。QE22A 合金还可以大大降低上述部件的重量。

ZE41 (4% 锌、1.2% 混合稀土合金、0.7% 锆，余量为镁) 是一种高强度、无气孔、抗断裂合金。该合金是十五年前由镁电子公司研究成功，并在欧洲市场以 RZ5 合金出售。由于这种合金能用来生产用 AZ91 和 AZ92 铝基合金难于生产的复杂铸件，因而在美国引起重视。法国一家公司用这种合金制造直升飞机的复杂的 75×75×100 厘米的传动罩。这种合金的产品成本比使用 AZ 合金时增加 10~15%，但是由于改进了可浇铸性，降低了废品率，有较好的可焊接性，使增加的成本得到补偿。

据 1967 年报导，研究出一种 ZE63 合金 (5.5~6.0% 锌，2~3% 混合稀土合金、0.4% 锆，其余为镁)。这种合金用于工作温度高达 166°C 的铸件。由于 ZE63 合金没有微孔和具有高的疲劳强度，在疲劳临界应力条件下，可用作直升飞机的结构和传动铸件，齿轮箱、飞机着陆轮等。由于该合金具有优异的浇铸特性，又可用作构架的异型薄铸件，控制托架、门窗框架等。最近发展的熔盐热处理法将进一步促进 ZE63 合金的使用。

镁锰锆合金具有很好的抗蚀性、可焊性和室温及高温下的机

械性能，其工作温度达 $200\sim 250^{\circ}\text{C}$ 。镁锰钹合金可在更高温度（ $250\sim 300^{\circ}\text{C}$ ）下短时间工作，而在 250°C 下能较长时间连续进行工作。

有一种含有 $2\sim 6\%$ 混合稀土（其中的百分组成为 $8\sim 12\%$ 锆、 0.5% 钕、 $23\sim 35\%$ 镧、 $2\sim 10\%$ 铈，其余 $42.5\sim 65\%$ 钹）的镁合金，在 300°C 工作温度下仍保持其稳定的机械性能。

在镁合金中加入 $0.2\sim 1.0\%$ 锆和 $2.5\sim 4.0\%$ 铈或发火合金使其合金化，其耐热性提高到 250°C ，而加入 $2\sim 4\%$ 钹则提高到 300°C 。

据称，在英国 57% 的镁合金都含稀土元素^[18]。英国应用含 $0.5\sim 0.7\%$ 锆、 $0.1\sim 1.0\%$ 铈、 1.0% 铈或镧的镁合金，这些合金适用于在 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ 下工作^[13]。

据报导，一种含 $18\sim 22\%$ 镁、 $1\sim 2\%$ 二氧化硅、 $1\sim 2\%$ 铁的以混合稀土为基的镁稀土合金，用作引爆组分的一种并料，以增加火花塞的引火能力。这一应用若能顺利发展，将为混合稀土合金开辟新的巨大的市场^[19]。

2. 铝合金

用稀土金属使铝合金化，可以细化合金组织，提高液态金属的流动性，改善耐热性和机械性能。如纯铝的硬度为 13公斤/毫米^2 ，加入稀土金属后显著提高，含稀土金属 2% 时硬度几乎提高一倍，在某些合金中含 5% 铈和钇时可提高二倍。

国外已有一系列含稀土金属的铸造用标准铝合金，铝中加入稀土金属量的范围很宽（ $0.05\sim 11\%$ ）。铝铜硅和铝锰系合金中也添加微量稀土（ $0.05\sim 0.3\%$ ）。

英国航空发动机的重要零件是用含稀土金属的 AC7 和 AC15 铝合金制造的。制造航空仪器的耐热性材料系用含稀土金属高的 SAM 铝合金。

美国用含铈的铝合金（铝铈合金）以及加铈的铝镍铜和铝硅铜合金来制造一系列内燃机的零件。铈铝合金用于制造内燃机的曲轴箱，汽缸盖和汽缸组；铝铜合金及铝硅铜合金用于制造内燃

机活塞。

据报导^[19]，美国和日本已大量使用高强度的输电铝线，在铝中加入少量米什合金（铈与稀土合金），改善了铝线的抗张强度、耐热性、抗振性和耐蚀性，而不影响其导电性，又不致增加生产成本。

美国一家电线制造公司对家庭用铝线提出一套标准：在完全退火条件下，极限抗张强度为1120公斤/厘米²、屈服强度703公斤/厘米²、最小延伸率10%，同时导电性和耐蚀性要求尽可能好。在铝线中加入1%米什合金就能达到上述标准，而且能顺利地拉到24级，而铝铁合金只能拉到17级，二者的导电率分别为61%和60% IACS（国际退火铜标准）。此外，这种合金的晶粒较小，挤压和拉丝性能较好，铝线产品的表面光洁度也得到改进。

在含22%硅的铝硅合金中加入1%米什合金，可使晶粒细化到同含17%硅的合金一样，从而为使用铝硅合金创造了条件。加入米什合金后，使这种合金具有热膨胀小、硬度高、耐磨性好和机械性能好等特点。这种合金用作模铸发动机垫块以及传输部件、离合器箱和活塞等。

掺铈铬铝的钇合金具有优越的抗氧特性，在某些领域内与较廉价的铁铬铝合金和不锈钢一起搭配使用，钇能改善抗氧表面层的性能，并改善其延性。这种合金用于制造燃气涡轮机的涡流部件^[5]。

据称，日本准备使用一种时效硬化铸铝合金。这种合金含2.5%铜、1.5%镍、0.8%镁、1.2%铁、1.2%硅、0.15%米什合金，其余为铝。合金具有良好的高温性能和极好的疲劳强度，其典型用途是做活塞、汽缸头、模铸部件、汽车和飞机的结构部件等。

据报导，铝合金中加入1%钇，在高温下获得良好效果。在300°C和350°C时加钇的合金比不加添加剂的合金的性能提高一倍，400°C时提高50%。

3. 铜合金