

稀土在铝、镁合金中的应用

Application of Rare Earth in Aluminum and Magnesium Alloys

郭旭涛, 李培杰, 熊玉华, 刘树勋, 曾大本
(清华大学机械工程系, 北京 100084)

GUO Xu-tao, LI Pei-jie,
XIONG Yu-hua, LIU Shu-xun, ZENG Da-ben
(Department of Mechanical Engineering,
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要: 稀土元素作为微量元素加入铝、镁合金中, 可以净化合金熔体, 细化、变质微观组织, 减少夹杂。随着稀土元素加入量的增加, 可以显著提高铝、镁合金的综合性能特别是高温力学性能。综述了含稀土铝合金和稀土镁合金的研究、发展和应用现状, 着重介绍了稀土对铝镁合金冶炼、工艺和合金化的影响。展望了稀土铝、镁合金的发展前景。

关键词: 稀土; 铝合金; 镁合金

中图分类号: TG146 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2004) 08-0060-05

Abstract: The addition of rare earth (RE) as trace elements to aluminum or magnesium alloys can purify the melts, refine and modify the microstructure, reduce the inclusion. The addition of more RE elements can significantly enhance the comprehensive properties, especially mechanical behavior at high temperature. Research, development, and application for RE-containing Al alloys and RE-containing Mg alloys is reviewed with the emphasis on the effect of RE elements on melting, processing, and alloying of alloys. The future development of RE-containing Al alloys and RE-containing Mg alloys is prospected.

Key words: rare earth; aluminum Alloy; magnesium alloy

进入 21 世纪, 环境保护与新材料的应用已成为社会可持续发展的首要问题, 轻质金属材料铝、镁合金的应用可以减少油耗、降低污染、提高材料使用性能, 它们的发展得到广泛重视。具有“工业味精”之称的稀土元素, 由于其独特的电子层结构, 使其在铝、镁合金中发挥出独特的冶炼、合金化作用, 在铝、镁新合金的发展进程中起着重要作用。本文综合评述稀土铝、镁合金的研究及应用情况。

1 稀土应用的意义

目前, 铝合金是仅次于钢铁的第二大金属结构材料, 其应用越来越广泛。随着技术进步以及成本降低, 近年来镁合金作为结构材料应用崭露头角, 2000 年世界原镁消费量达到 $4.5 \times 10^5 \text{ t}$, 其中作为结构材料的约有 30%^[1], 世界镁合金压铸件从 1994 年到 1999 年平均每年增长 21.2%, 预计 2004 年压铸业将成为原镁的最大最终用户^[2]。人们估计, 镁合金有可能成为继钢铁、铝合金之后的另一种重要金属结构材料。

在第一次世界大战期间, 德国人已经把稀土应用

于镁合金和铝合金, 他们采用稀土镁合金 (含 6% REM, 1.7% Mn) 制造飞机发动机的增压器, 早于稀土在钢铁中的应用^[3,4], 英国用稀土镁合金制造涡轮也获得了成功。但是, 长期以来, 稀土在冶金领域的应用研究主要集中在钢铁结构材料, 在铝、镁合金方面, 尚有很大研究发展空间。目前的研究表明: 铝、镁合金中添加稀土元素, 可以提高合金的强度, 尤其是高温强度, 改善合金的塑韧性、耐磨性、抗腐蚀性能^[5]、铸造工艺性能等, 具有显著的冶炼、合金化作用。目前, 在稀土元素总需要量中, 与金属有关的估计占 20% ~ 30%^[6]。

我国铝土矿资源居世界第四位, 铝消耗量居世界第二位, 铝原料需求旺盛; 而我国的稀土、镁资源占有、生产和出口均居世界第一^[7,8]。我国从 20 世纪 60 年代中期开始在铸铁中应用稀土, 稍后, 扩展至钢铁、有色冶金以及其它领域^[9], 有色领域主要应用于铝、镁合金。稀土在钢铁结构材料中主要作为微合金化元素使用, 而在铝、镁合金中, 尽管稀土价格昂贵, 但是由于产品附加值高, 除了利用其良好的物理冶金特

性进行净化、变质外,还可以将其作为合金化元素使用。在稀土铝合金中一般含有稀土 4.4%~5%,最多可达 13%~16%^[10],在 90 年代初,稀土铝合金年产量达到 $10 \times 10^4 \text{ t}$ ^[11];在镁合金中一般含有稀土 2%~11%^[3],目前世界各国的含稀土铸镁合金牌号占镁合金总数的 50% 以上^[11]。研究稀土在铝、镁合金中的作用机制,加强应用研究,伴随铝、镁合金在结构材料领域的高速发展,将大大促进稀土的应用,提升铝、镁合金产品附加值,有利于我国资源综合利用,将我国的资源优势转化为经济优势。

2 稀土的作用

2.1 一般作用

稀土元素位于元素周期表第三副族,具有较大的原子半径,在化合物中 3 价为特征氧化态,有时呈现 2 价或 4 价,在金属元素中化学活性仅次于碱金属和碱土金属元素。

铝、镁合金中添加不同数量的稀土元素,其发挥的作用不同。添加少量稀土元素,未形成稀土金属间化合物之前,稀土元素在合金中主要起变质和细化作用,从而使合金获得一系列性能的改善。当稀土元素添加量足以生成金属间化合物、共晶复合物的金属纤维组织以及固溶强化相时,可以显著提高合金基体的高温性能^[12]。铝、镁合金中添加稀土元素,具有良好的冶炼、改善成形工艺和合金化作用。

2.2 冶炼作用

稀土元素在铝、镁合金熔液中具有良好的净化作用。首先,稀土元素与氧、硫、氢、氮、卤族等元素具有很强的相互作用,生成产物 RE_2O_3 、 RE_2S_3 、 RES 、 RES_2 、 RE_3S_4 、 REH_2 、 REH_3 、 REN 、 REX_3 (X 为卤族元素)等,在高温下稀土元素与碳、硅、硼反应生成 REC_2 、 RE_2C_3 、 REC 、 RE_2C 、 RE_3C 、 RE_4C 、 RESi_2 、 REB_4 、 REB_6 等。同时氢在稀土中的溶解度远高于铝、镁合金,因此稀土元素可以较好地除去铝、镁合金中的氢。对于耐热铝、镁合金,由于晶界夹杂的减少,可以明显提高耐热强度等高温性能。其次,稀土能与铝、镁合金中低熔点元素砷、铋、铅、锌等作用,生成熔点较高的二元或多元化合物,这些化合物可以成渣析出,也可以成为强化相存在,避免了低熔点金属引起的红脆性问题。最后,稀土的加入影响或改善铝、镁合金金属液和熔渣的物理化学性质,诸如表面张力、流动性、粘度、夹杂溶解度等,有利于非金属夹杂的球化,促进其上浮,实现铝、镁金属液较好处地去除夹杂^[13]。

稀土元素在铝、镁合金中具有良好的细化、变质作用。铝镁合金中少量添加稀土元素,可以增加液态

金属结晶中心、增加表面张力、增加过冷度,在析出相或生长相的表面生成一层吸附膜,阻碍晶粒继续长大,进而达到细化晶粒的目的。添加稀土还可以减小柱状晶,细化合金二次枝晶臂间距,改善晶粒形态,并在一定程度上控制材料晶粒度。镧和铈对铝合金具有强烈的变质作用,这与其具有较大的原子半径有关。稀土能够提高铝、镁合金的力学性能,在微观结构上还表现为使晶胞参数变小^[14]。

2.3 改善工艺作用

稀土元素加入铝、镁合金可以减少熔体中的气体、夹杂,改善液态金属的流动性,因此,显著改善铸造成形工艺性能。最终可以改善铸锭质量、材料塑性,实现部分零件的以铸代锻。同时加入稀土元素,可以减小或消除铸件热裂敏感性、以及裂纹、气孔等低倍缺陷。稀土元素还可以改善铝、镁变形合金性能。提高其高温稳定性。拉拔稀土铝导线中,稀土与铝一起形成弥散分布的高熔点金属间化合物,促进铝再结晶温度提高,将耐热铝导线在 230 和 250 加热时,其强度残存率分别为 97% 和 87.5%^[10]。

2.4 合金化作用

稀土元素在金属结构材料中的合金化作用的大小决定于稀土与金属的相图(如稀土元素在金属中的溶解度)、稀土化合物的性质、形状、分布,稀土在金属中分布和扩散速度,以及稀土对其它合金元素的分布及扩散速度的影响等。

在钢铁结构材料中,主要研究稀土的冶炼作用;而在稀土铝、镁合金中,由于产品性价比高,稀土的合金化作用得到广泛重视及研究。

多相铸造铝合金的耐热性由 α 固溶体的化学成分、第二相的性质、形状和分布状况等因素决定。 α 固溶体的化学组成越复杂,组织结构越稳定,合金耐热性越好;第二相热稳定性越高,沿晶界分布的弥散度越高,晶粒越细,则越能阻碍 α 固溶体的变形,合金耐热性就越好。第二相的热稳定性通常可以用高温下的显微硬度-热硬性衡量,热硬性研究表明^[10],在 350~400℃,铝合金中稀土化合物具有最高的热稳定性。

铝合金基体为面心立方结构,镁合金与稀土元素皆为密排六方结构,这成为稀土元素在镁合金中最大固溶度较大、而在铝合金中较小(表 1)的主要原因之一。同时,稀土元素与镁的差异较小^[7],与铝的原子半径(0.1428nm)差异较大。因此,稀土对 α 铝固溶体的强化作用不大。稀土元素与其它合金元素一起形成稳定的化合物相是提高铝合金耐热性能的主要途径。而几乎所有的稀土元素对 α 镁固溶体都具有较好的固溶强化作用^[7]。

铝合金中稀土化合物相晶格结构复杂,和 α 固溶体的结构差别大,所形成的新相扩散过程慢,在高温

工作时溶解度变化小。在铝合金中, 稀土元素往往是沿枝晶和晶界分布, 形成连续和不连续的网膜。这些可以提高铝合金晶界强度和抗蠕变能力, 使晶间裂纹不易扩展, 进而提高合金的热强性^[15]。稀土铝合金系一般处在相图的共晶部分, Al-Ce 合金共晶点成分为 12% Ce, 这些合金铸造性能良好; 同时, 稀土铝合金的共晶温度较高 (Al-Ce 合金为 638 °C), 稀土元素沉淀、聚集生成化合物的速度相比铝合金中常用合金元素 Si 慢得多, 这也是稀土铝合金系具有很好的耐热性的原因之一。随着铝合金中 RE 含量增加, 晶间稀土化合物数量增加, 铝合金高温强度显著增加, 但晶间脆性相的增多将导致合金塑性下降, 因此 RE 的添加应控制在合适的比例。ZL401 合金含有 RE 元素 4.4% ~ 5.0%, ZL206 合金中稀土化合物相的数量控制在 10% 为宜。考虑到利用铝-稀土多元金属间化合物增加铝合金的耐热性能, 人们成功开发出快速凝固 Al-8.4% Fe-3.4% Ce 合金, 这种合金中沉淀相细小、分布均匀且稳定, 使铝合金耐热性能又有了进一步突破。

表 1 稀土在铝、镁合金的 α 基体中最大固溶度

Table 1 The maximum solid solubility of rare earth in α -matrix of aluminum and magnesium alloys

Rare earth element	Ce	La	Y
α -Al / %	0.05	0.05	0.17
α -Mg / %	0.74	-	12

稀土在铝及铝合金中固溶度极小, 能与杂质生成金属间化合物或非金属化合物, 它们偏聚在晶界上, 加大了过冷度, 具有细化晶粒的作用, 同时可以改变铝合金组元 Si, Fe, Mg 的形态, 减少针状晶, 增加球状晶, 提高铝合金机械性能。稀土还使铝合金腐蚀电位变正, 增大电化学反应的电阻, 从而提高铝合金的耐蚀性。

稀土在镁合金中可以作为合金剂、球化剂, 同时具有良好的净化熔体的作用。添加稀土元素进行合金化, 可以显著提高镁合金的耐热性能, 使其作为飞机、导弹以及火箭上的重要零件。研究表明, 双数原子序数的稀土元素能增加镁合金的耐热强度, 单数原子序数的稀土元素能增加镁合金的塑性。稀土元素可以提高镁合金的流动性, 细化晶粒, 强化固溶体, 在镁合金中生成弥散分布的金属间化合物, 强化晶界, 显著提高耐热强度。

固溶体型铝、镁单相合金, 晶粒越大, 晶格缺陷或晶界越少, 即表面能越小, 在高温下的稳定性越大; 多相铝、镁合金中, 细质点的耐热第二相对固溶体晶粒变形的阻碍作用比在粗晶粒合金中大, 特别当温度

高于 0.6 T 熔点时, 第二相的作用突出。形状复杂的、热稳定性高的化合物相, 在晶界形成封闭的网状或骨架状结构的化合物相, 可以显著提高合金的热强性。由于经过加工变形, 这一特点被消除, 因此, 铸造铝、镁合金的耐热性要比相同成分的变形合金好。

3 应用状况

目前, 已开发出稀土合金对铸造铝合金的复合精变处理技术, 提高了产品质量, 生产成本没有增加, 生产过程不对环境产生任何污染^[16]。铝合金中添加少量稀土, 可以降低硅含量, 提高导电率, 改善铝合金的电导及热导性能, 同时大大提高铝合金延展性能, 这类铝合金大量用于高压传输导线^[17, 18]。一般将添加大量稀土的铝合金称为稀土铝合金, 国内外典型的稀土铝合金往往添加富铈混合稀土, 如国产 ZL401, ZL206 等^[19], 前苏联的 ALP-1 合金等。较近的研究表明, 重稀土钇对提高铝合金耐热性有明显效果, 但由于钇的价格较高, 尚未得到广泛应用。稀土铝合金可用于空气调节系统、内燃发动机零部件等在高温高压下工作的零件。

1937 年, Haughton 和 Prytherch 首先报道了高温抗拉 Mg-Ce 合金, 其后发现稀土镁合金的耐热性能按照 Mg-La, Mg-Ce, Mg-Nd 序列增高, 随着研究深入, 不断有适用于更高温度的稀土镁合金系列出现, 其发展如图 1 所示:

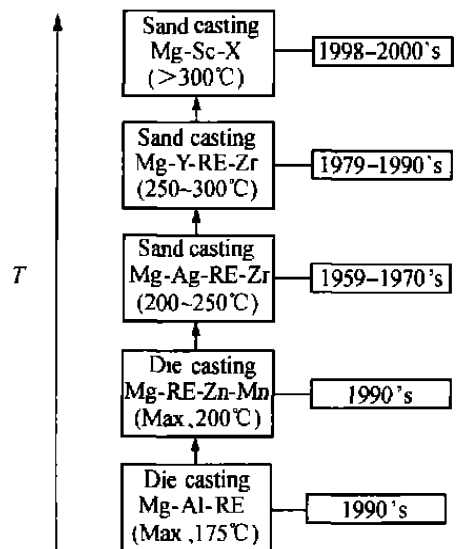


图 1 稀土镁合金的发展应用^[20]

Fig. 1 Development and application of RE-containing magnesium alloys

由于稀土镁合金的成本较高, 早期主要用于航空航天领域^[21], 随着技术的不断进步, 更高性能的稀土

镁合金不断出现并被应用, 航空工业成为稀土镁合金发展的第一推动力。但是, 由于稀土镁合金各项性能特别是耐热性能^[22]优异, 蕴含着巨大的应用潜力, 随着稀土镁合金价格的不断下降, 稀土镁合金开始向民用方向发展。在镁合金应用市场前景广阔的汽车行业, 通过压铸工艺生产的稀土镁合金产品的发展方兴未艾^[7], 目前正掀起了新一轮稀土镁合金新材料研制、作用机理讨论的热潮。

稀土作为合金元素应用于铝、镁合金, 尚存在一些问题。

首先是稀土较高的价格增加了最终产品的成本, 通过研究的深入, 不断提高材料使用性能, 最终提高产品性价比, 是稀土铝、镁合金进一步发展的动力。

其次稀土合金化添加工艺始终是需要攻克的技术难关, 准确把握稀土在铝、镁合金中的添加量, 控制稀土铝、镁合金中间相的形成, 进而使产品保持稳定、优秀的力学及其它性能, 是该领域工作者重要攻关目标之一。例如国内某稀土镁合金零件生产厂目前采用如下稀土添加工艺: 在不锈钢杯中装入混合稀土, 加入镁合金熔体前在 300 ~ 400 °C 预热去潮、脱蜡, 然后将不锈钢杯悬浮于镁液中, 使稀土扩散溶解。这种方法保证了稀土元素在镁合金熔体中具有较好的收得率。不同的铝、镁合金, 稀土的添加工艺不同, 分别表现为以铝、镁稀土中间合金和单质稀土两种形式加入。

最后, 铝、镁合金的回收再生性能是其比塑料制品优越的特性之一, 2000 年全世界回收的铝废料占铝消费量的 25%, 达到 8.5×10^6 t, 但是, 稀土铝、镁合金中由于稀土元素成分易于波动, 给其回收再生带来一定困难, 需要在今后的实践中探索成熟的回收再生工艺。

4 展望

中国航空工业一直是稀土镁合金新材料研究的主要力量, 在 20 世纪 70 年代末其研究曾一度达到世界先进水平。近 20 余年来, 中国铝合金业得到迅猛发展, 而镁合金长期未得到应有的发展, 稀土在铝合金中的应用研究领先于在镁合金中的应用研究, 在 250 ~ 300 °C 应用水平上, 稀土镁合金 ZM6, ZM9 已经落后于 WE54, WE43 的性能^[23] (图 2) 以及俄罗斯最新的稀土镁合金。

20 世纪 90 年代初启动、由欧洲 14 个国家的 40 个研究单位参加目前正在开展的新型轻合金热化学、热物理学测定和计算数据库合作开发工程 (cost507 工程), 以及国际材料科学研究机构 (MSIT) 都将稀土二元或三元铝、镁合金的研究列为重要研究课

题^[24]。

20 世纪 90 年代中期, 中国将稀土元素在铁液中与其它元素作用机制的研究列为自然科学基金资助课题, 对推动稀土元素在钢铁中的应用起到了重要作用, 带来了显著的经济效益。目前, 稀土在铝、镁合金中的应用研究也得到了国家有关部门的重视, 列入“863”、“十五”等重要发展计划, 同时, 稀土对铝、镁合金的影响规律和作用机理方面的研究也在不断取得进展, 这些成果对进一步拓宽稀土在铝、镁合金中的应用具有重要意义。

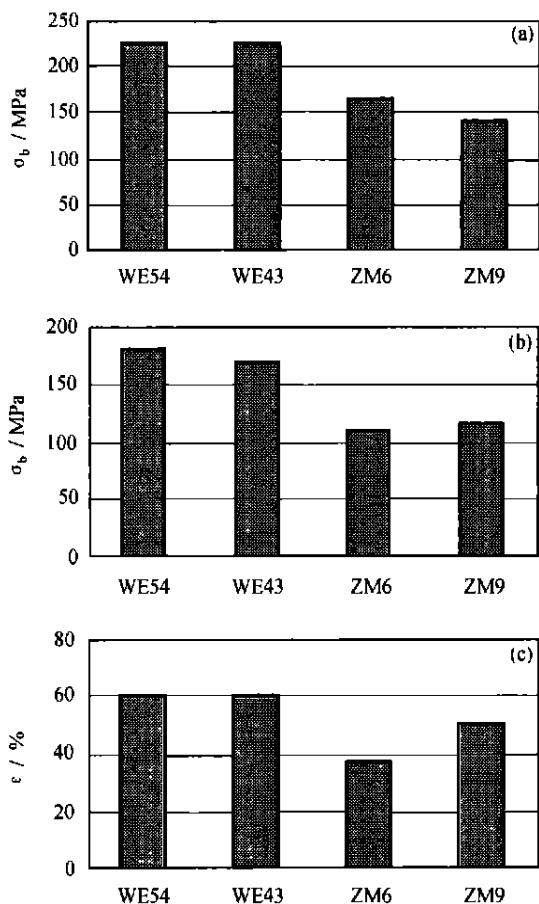


图 2 国内外主要耐热稀土镁合金性能对比^[25]
(a) 250 °C 拉伸强度; (b) 300 °C 拉伸强度; (c) 250 °C 伸长率
Fig. 2 Comparison of properties for heat-resistant RE-containing magnesium alloys home and abroad
(a) tensile strength at 250 °C; (b) tensile strength at 300 °C; (c) elongation at 250 °C

随着中国镁资源较铝资源优势的不断显现, 未来几年镁合金有望作为结构材料得到大量的应用^[27-29]。中国稀土镁合金的研究, 前期可以跟踪瞄准俄罗斯、欧美等技术强国的发展道路, 随着国内稀土镁合金材料研究水平的进步, 在未来的国际市场, 中国的稀土镁合金产品将显示出其强大的竞争优势。

目前, 高纯稀土在铝、镁合金中的应用发展大大

加快, 稀土在铝、镁合金中的应用总量逐年增加。可以预见, 随着稀土在铝、镁合金中的应用研究深入开展, 人类认识水平和技术水平的不断提高, 更加广泛的、更多系列的新型稀土铝、镁合金即将被开发、应用。加强稀土镁合金的研究, 同时重视稀土铝合金的研究, 是结合中国资源特色, 获得新材料领域突破的重要途径。

参考文献

- [1] 刘兵. 中国镁产业面临的发展机遇与挑战 [A]. 2001 年中国国际镁业研讨会论文集 [C]. 北京: 中国镁业协会, 2001. 5- 8.
- [2] 李晓敏. 压铸镁合金在汽车中的应用及其发展前景 [J]. 世界有色金属, 2001, (9): 16- 18.
- [3] 杜挺. 稀土元素在金属材料中的应用. 杜挺科技文集- 冶金、材料及其物理化学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996. 11- 33.
- [4] 杜挺. 稀土元素在金属材料中的一些物理化学作用 [J]. 金属学报, 1997, (1): 69- 77.
- [5] KARIMZADEH H, LYON P, KING J F. Factors affecting the corrosion performance of elektron WE43 and WE54 magnesium casting alloys [A]. MORDIKE B L, KAINER K U. Werkstoff- Informationsgesellschaft [C], Frankfurt: 1998. 403- 408.
- [6] 川二郎. 稀土的最新应用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1993.
- [7] 郭旭涛, 李培杰, 曾大本. 稀土耐热镁合金发展现状及展望 [J]. 铸造, 2002, (2): 68- 71.
- [8] 吴秀铭. 中国镁工业的现状与展望 [A]. 2001 年中国国际镁业研讨会论文集 [C]. 北京: 中国镁业协会, 2001. 1- 4.
- [9] 李振宏, 伍虹. 我国稀土应用的现状与前景 [J]. 稀土, 1997, (6): 48- 52.
- [10] 孙伟成. 稀土在铝合金中的行为 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [11] 刘光华. 稀土固体物理学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [12] 美国金属学会. 金属手册- 性能与选择: 有色合金及纯金属 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [13] P E 沙林. 金属材料中的稀土元素 [J]. 材料工程, 1993, (1): 1- 5.
- [14] 张密林, 景晓燕, 鲁化一, 唐定骧. 稀土对 Al-Mg-Si 合金晶体结构参数的影响 [J]. 中国稀土学报, 1992, (9): 276- 277.
- [15] 王武, 苏光翼, 何德坪. 稀土元素在 Al-Mg 合金中的分布及对结晶组织的影响 [J]. 中国稀土学报, 1990, (9): 252- 256.
- [16] 顾晓文, 等. 铝合金熔炼绿色集约化的尝试. 中国第五届压铸技术交流会论文集. 上海, 2001.
- [17] 刘余九. 稀土在有色金属工业中应用现状 [J]. 中国稀土学报, 1995, (7): 387- 389.
- [18] 钟俊辉. 稀土在合金中应用的新进展 [J]. 世界有色金属, 1994, (11): 24- 29.
- [19] 李风梅, 钱鑫源, 李金桂, 王乐安, 赵进. 稀土在航空工业中的应用现状与发展趋势 [J]. 材料工程, 1998, (6): 10- 13.
- [20] BARRY L MORDIKE. Magnesium and Magnesium Alloys [J]. 轻金属, 2001, (1): 2- 13.
- [21] FURUYA H, KOGISO N, MATUNAGA S, SENDA K. Applications of magnesium alloys for aerospace structure systems [J]. Materials Science Forum, 2000, 350-351: 341- 348.
- [22] M IHRIBAN O PEKGULERYU Z. Development of creep resistant magnesium diecasting alloys [J]. Materials Science Forum, 2000, 350-351: 131- 139.
- [23] KARIYA R, IWASAKI H, MORIT, MOHRIT, MABUCHI M, NAKAMURA M, ASAHINA T, HIGASHI K. Deformation mechanisms in a Mg-4Y-3RE alloy [J]. Materials Science Forum, 2000, 350-351: 93- 96.
- [24] FERRO R, SACCONI A, BORZONE G. 铝、镁轻合金中的稀土 [J]. 中国稀土学报, 1997, (9): 262- 273.
- [25] K H 马图哈. 材料科学与技术丛书- 非铁合金的结构与性能 [M]. 丁道云等译. 北京: 科学出版社, 1999.
- [26] 赵志远. 铸造稀土镁合金在我国航空工业的应用 [J]. 材料工程, 1993, (7): 8- 10.
- [27] AGHION E, BRONFIN B. Magnesium Alloys Development towards the 21st century [J]. Materials Science Forum, 2000, 350-351: 19- 28.
- [28] 师昌绪, 李恒德, 王淀佐, 李依依, 左铁镛. 加速我国金属镁工业发展的建议 [J]. 材料导报, 2001, (4): 5- 6.
- [29] MORDIKE B L, EBERT T. Magnesium properties-application-potential [J]. Materials Science and Engineering, 2001, A302: 37- 45.
-
- 收稿日期: 2003-09-19; 修订日期: 2004-05-06
- 作者简介: 郭旭涛 (1977-), 男, 博士, 主要从事稀土在镁合金中的应用研究工作, 联系地址: 北京市清华大学机械工程系 (100084)。
-
- * * * * *
- (上接第 59 页)
- [19] KINGSHORTH D J, et al. Physical aging and light scattering of low-loss poly (methyl methacrylate) glass [A]. Symposium The Weathering of Plastics and Rubber [C]. London: Plastics and Rubber Institute, 1976. 169- 173.
- [20] VINCENT J A, et al, The effect of temperature and radiation intensity on the weathering resistance of HDPE [J]. Polymer Journal, 1982, 6: 2- 4.
- [21] 姚志亮. 低吸湿性航空有机玻璃 [A]. 96 珠海航空学术交流会论文集 [C]. 北京: 中国航空学会, 1996. 20- 26.
- [22] 黄宝臣. 影响有机玻璃老化因素的探讨及老化方法简介 [J]. 飞机设计, 1995, 3: 46- 52.
- [23] 刘其华. 聚甲基丙烯酸甲酯大气老化动力学研究 [J]. 老化通讯, 1973, 4: 23- 27.
- [24] 史伟琪. 航空有机玻璃板材的大气老化寿命 [J]. 材料工程, 1993, (9): 28- 35.
- [25] J J TEN BOSCH, W F VERHELST. Relation between free radicals and PMMA and ultraviolet absorption in poly (Methyl Methacrylate) [J]. Journal of Polymer Science: Part A-1, 1972, 10 (6): 1679- 1685.
- [26] 尼尔塞茨. 经营预测原理及微机应用 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1988.
-
- 基金项目: 航空科学基金资助项目 (02G21010)
- 收稿日期: 2004-02-16; 修订日期: 2004-05-28
- 作者简介: 马丽婷 (1977-), 女, 硕士研究生, 从事航空有机玻璃老化性能及寿命预测方面的研究, 联系地址: 北京 81 信箱 23 分箱 (100095)。
-