



丁文江 DING Wenjiang

中国工程院院士

Academician of Chinese Academy of Engineering

上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心主任

Director of National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming

上海交通大学材料科学与工程学院教授、博士生导师,现任轻合金精密成型国家工程研究中心主任,中国材料研究学会副理事长,中国铸造学会理事长,中国镁业协会副会长。丁文江院士长期从事先进镁合金、铝合金材料及成形技术研究,获国家和省部级奖励10余项。发表SCI论文500余篇,授权发明专利150余项。2000年创建了轻合金精密成型国家工程研究中心,将基础研究、应用技术开发、工程化研究和技术转移有机融合,加快了科研成果的转化。培养博士后、博/硕士研究生100余人。曾获“上海市科技功臣奖”、“何梁何利奖”、“中国优秀青年科技创业奖”、“全国先进工作者”、“上海市劳动模范”、“全国优秀科技工作者”等殊荣。

加强创新, 促进镁合金的发展和應用

——访中国工程院院士, 上海交通大学丁文江教授

Innovation Promoting the Development and Application of Magnesium Alloy

本刊记者 玲犀

玲犀: 在您及团队几十年不断研发、探索和发明中, 镁的易腐蚀、强度低和难变形等一系列难题被“一网打尽”, 镁及镁合金性能不断提升, 让波音公司、美国通用汽车等许多国际巨头心甘情愿求助于中国“镁”。在

这个过程中, 团队主要经历了哪些重要的研究历程, 在镁及其合金的研制中取得了哪些突破?

丁文江: 我第一次看到镁, 是在1985年。当时, 一位前辈突然打电话过来, 说“铝烧起来了, 你赶紧过

来看下”, 我顿时感到很讶异, 因为铝的燃点是1800多℃, 一般条件下不可能烧起来的。取样回来检验后, 才发现烧起来的这种金属原来是镁。

镁来自桑塔纳汽车的生产线, 那一年上海刚刚引进这一款德国汽车,

人们对其中应用的材料并不熟悉。在陆续走访了国内与材料有关的各大研究机构后,发现国内竟然还没有专门研究镁的组织和个人。当时镁研究在中国,几乎是空白!而德国人早已经将其用在汽车制造上了。所以我深刻认识镁这种元素其实是偶然的。

镁合金是目前实际应用中最轻的金属结构材料,镁的密度约为铝密度的2/3,钢铁密度的1/4,具有较高的比强度和比刚度、良好的阻尼减振性能、优良的导电导热性能及良好的电磁屏蔽性能,机加工性能也优于铝合金,而且我国是镁资源大国。我经过深思熟虑后,决定要做中国镁材料研究的开拓者!意识到一旦可以将镁应用于工业制造,大量部件将比用钢或者铝制造轻很多,这也就意味着能耗的极大降低。从此之后,我全力投身这一领域,一干就是30多年。

首先面临的是解决上海大众桑塔纳轿车镁合金变速箱铸造生产过程中镁合金熔炼的燃烧问题,我们针对普通镁合金熔剂失效快和有毒气体排放严重的缺点,采用低温添加高温发泡剂的工艺,发明了镁合金熔炼阻燃覆盖剂,攻克了镁合金熔炼过程中易于燃烧的难题,取代进口熔剂在轿车变速箱壳体生产中获得应用,为其国产化作出了重要贡献。

镁合金的燃点低,常规镁合金的燃点仅520℃,远低于合金熔点,所以生产过程中极易燃烧。我课题组针对镁合金易氧化、易燃烧的问题,在国际上较早地开展阻燃镁合金的研究,探明了镁的高温氧化膜生长微观机制;通过添加稀土与钙等元素,使高温氧化膜致密化,把镁合金燃点提高至935℃以上。使得大气中无保护的镁合金熔炼与生产成为可能,还显著降低熔炼和生产过程中对环境的污染。


传统镁合金存在强度低、塑性差、耐热性差及耐蚀性低等关键瓶颈

问题。我们针对现有镁合金强度低、耐热性差的难点,以我国富有的Gd、Y、Sm、RE等稀土元素(尤其是重稀土元素)进行合金化的技术路线,发现了Mg-Gd-Y-Zr系合金中新的时效析出强化相 β_1 ,探明了Mg-Gd-Y-Zr合金的时效析出序列以及高密度析出相垂直于镁基面从而有效阻碍位错运动的强化机制,并利用细晶、析出相和LPSO结构的多因素复合强化作用开发了高强耐热Mg-Gd-Y系镁合金JDM。针对镁合金强基面形变结构导致各向异性和塑性差的难题,发现了稀土元素的偏聚能抑制基面滑移、促进非基面滑移,弱化了变形镁合金组织。建立了镁稀土合金组织调控原理,提高了合金变形能力及强韧性。在镁合金腐蚀机理研究方面,发现了镁合金腐蚀的电位差效应,通过添加稀土元素降低了基体与强化相电位差,并形成致密腐蚀保护膜,从而大幅度提高了镁合金的耐蚀性。

镁熔体纯净化较为困难,针对镁合金易氧化燃烧、夹杂难以去除、稀土元素成分因损耗而难以控制的特点,发明了集镁合金精炼熔剂、镁熔体净化装置、镁合金熔体保护装置于一体的复合净化系统,实现了镁液中氧化夹杂与杂质元素的高效去除和稀土元素的烧损率控制,解决了镁稀土合金纯净化的难题。在细晶化与凝固组织调控方面,发明了镁钕钇三元中间合金的制备方法与镁合金熔炼的钎复合细化剂,开发了镁合金在线成分检测与凝固组织控制的方法及装置,有效调控了镁合金熔体的预结晶组织与结构,实现铸态组织微细化和均质化。

针对镁合金化学活性强、成型过程中易与铸型材料发生化学反应甚至燃烧,以至铸件表面质量差、精度低的应用瓶颈问题,发明了镁合金金属型铸造涂料,创新了非占位式转移涂料及涂层转移制芯技术,开发了镁

合金砂型铸造用树脂自硬砂与树脂砂砂型铸造用阻燃剂,发明了镁合金低压铸造坩埚的密封材料与铸造升液管涂料,研制了镁合金涂层转移砂型精密低压铸造工艺。攻克了镁合金铸造充型过程中易氧化燃烧的难题,大幅度提高了铸件的尺寸精度与表面质量。


:您一直认为“有用是材料研究的灵魂”,并在轻合金研究方面始终坚持“瞄准应用”的理念。为了实现镁材料高强度、强耐腐蚀性能等与其可加工性的有机结合,您的团队主要做了哪些工作?

丁文江:我对材料科研提出了16字的学术思想,即“寓精于料,料要成材,材要成器,器要有用”,我一直主张“材料就是有用的物质,有用是材料研究的灵魂,材料的研究如果不是瞄准应用,就不能算是在研究材料,所研究的具体问题,必须是来自于产业需求,再回到产业需求中去检验”。围绕着这样的理念,我多次强调材料学研究必须追求“有用”,基础研究必须服务工程科学研究,再用科技成果转化获得的收益反哺基础研究。为了贯彻“科研瞄准应用”的理念,我先后创建了“轻合金精密成型国家工程研究中心”和“上海市镁材料应用研究工程中心”。与国内外企业建立了广泛的科研合作关系,包括美国通用汽车公司、美国波音飞机公司等。

为了实现镁合金材料的高性能与其可加工性的有机结合,我们在材料开发的同时,注重其加工技术的开发。例如,我们基于中国优势资源镁与稀土,开发高性能镁稀土合金材料的同时,也开展了镁稀土合金熔体复合处理、镁稀土合金铸造成型、镁稀土合金塑性成形、镁稀土合金腐蚀与防护等技术与研究。

首先以开展镁-稀土(尤其是重稀土)系新型合金的强韧化、微观机理与组织演变、耐热机制研究与成分

设计为核心,研制出具有国际领先水平的新一代高性能镁稀土合金材料;在此基础上,围绕该类合金的成形关键环节(纯净化、细晶化与组织调控、精密成形)进行一系列技术创新,突破其材料制备、精密成形与表面防护处理等关键工艺与技术瓶颈,形成从基础研究、应用基础研究到技术开发、产品应用及工程化的全流程研发体系。采用系列原创性工艺、技术与装备,开发出大型复杂军用关键重要部件,实现在国家航天、航空等关键重要部件上的应用。以军用为主,辐射民用,实现军民融合,促进汽车、轨道交通、通讯等民用领域的轻量化及我国镁与稀土工业的发展。这些年,我们团队已授权发明专利 150 余件,并已经将相关技术成功转移给 10 余家企业。

: 目前镁合金在航空制造领域主要有哪些应用,还面临哪些挑战?其未来几年的研究热点以及发展方向如何?

丁文江: 航空领域对材料轻量化提出了迫切需求,就航空器而言,材料轻量化带来的经济效益和性能改善十分显著。镁合金的应用能够带来巨大的减重效益和飞行器技术指标的显著提升。商用飞机与汽车减重相同重量带来的燃油费用节省,前者是后者的近 100 倍,而战斗机的燃油费用节省又是商用飞机的近 10 倍,更重要的是其机动性能改善可以极大提高其战斗力和生存能力。战斗机重量若减轻 15%,则可缩短飞机滑跑距离 15%,增加航程 20%,提高有效载荷 30%;喷气发动机结构减重 1kg,飞机结构可减重 4kg,升限高度可提高 10m。

镁合金在航空领域主要用于制造直升机、轰炸机、发动机、导弹等军用装备的零部件。镁铸件在直升机发动机结构质量比中占 2%,主要应用于变速系统壳体和减速机匣的制造,这样可以使旋翼获

得更大的升力。UH60“黑鹰”直升机、CH47“支努干”直升机以及 AH64“阿帕奇”武装直升机的变速箱均采用 ZE41 镁合金铸件。由美国贝尔直升机公司和意大利阿古斯塔公司联合研制的 BA609 双发侧旋翼直升机(军民两用),其传动变速箱为 WE43 镁合金铸件,单件质量达到 12kg。此外,Elektron 21 镁合金用于新型 AH-64 Block III“阿帕奇”直升机和 AW169“阿古斯塔-韦斯特兰”直升机,使得其可以在更高马力和更高温度下使用。Elektron WE43 和 Elektron 21 镁合金应用于欧洲战斗机的辅助推进装置(APUs)、恒速驱动装置(CSDs)、机身附件传动系统(AMADs)和发动机变速箱。在 F-22、F-35、F-16 战斗机和欧洲台风战斗机上也有应用。

镁合金在飞机发动机上也具有一定的应用。全球鹰无人机配装的罗-罗公司 AE-3007 发动机的中介机匣采用 ZE41 镁合金铸件,F-16、F-18、F-22 等飞机采用的附件传动系统 AMAD 的壳体多为 ZE41 镁合金铸件,F-16 和飞机配装的 F-119 发动机变速箱壳体均为 WE43 镁合金铸件,F-18 飞机配装的 F-110 发动机附件机匣以及 F-22 飞机配装的 F-119 发动机变速箱壳体也均为 WE43 镁合金铸件。

尽管镁合金在航空领域取得了一定程度的应用,但耐蚀性差和易燃烧的特点限制了其应用范围。由于镁合金耐蚀性差,在沿海、湿热以及大气污染较严重地区,镁合金材料容易受到腐蚀而导致零部件损坏。此外,航空发动机中镁合金构件,因摩擦可能产生细小镁屑,在高温环境中极易着火。镁合金燃点低,接触燃气时也容易着火。因此欧洲 CS-E 标准规定,应仔细评定发生镁火的可能性,并表明镁火限制在发动机内部而不会导致危险性影响。以上适航条款和标准规范均表明镁合金需要采

取可靠的措施,提高耐蚀性和耐热性,才能在航空发动机使用进一步推广应用。

纵观世界镁合金发展与应用现状,镁合金在应用过程中仍存在着一些重大缺陷,尚存在强度低、韧性差、耐热性低、抗蚀性差等关键瓶颈,制造复杂部件的成形工艺与装备也相对落后,无法满足航空领域重要装备主承力结构件的使用要求,严重制约着镁合金的进一步推广应用。我国在航空领域采用的镁合金部件仍屈指可数,这主要受制于我国在镁合金的先进加工应用技术上的创新不够,而先进国家又对我国进行严密技术封锁,以致我国技术水平与发达国家差距巨大。

我国虽然是镁合金的资源、生产和出口大国,但我国现有镁合金材料及其技术体系基本上仍沿袭 20 世纪五六十年代前苏联的技术体系,存在合金材料选择范围小、自主牌号少、产品强度低、耐热性差、工艺与装备落后等缺点,严重阻碍了我国航天航空与国防工业装备的轻量化进程和性能指标的进一步提高。我国同种类型装备几乎均比国外装备超重 10% 以上。采用常规的主干材料,如铝合金和钢,已经很难进一步减轻重量,而采用现有的镁合金材料和加工工艺,可替代的铝构件和钢构件又非常有限。

随着我国航空航天事业的飞速发展,轻量化势必成为航空航天制造业的主流,具有轻质高强的新型镁合金材料在航空航天领域的应用将越来越广泛。我国应充分利用镁与稀土资源优势,加快发展镁合金科技,在技术上不断创新,实现航空镁合金产品的标准化,扩大镁合金在航空领域的应用范围。

在未来的航空镁合金材料应用中,高强高韧、耐蚀与耐热镁合金仍然是发展的主题。

(责编 玲犀)