

镁合金在轨道客车上的应用及展望

发布日期：2015 年 01 月 23 日 13:45 采编：www.cnfeol.com

近年来我国轨道交通装备行业发展迅速，轨道客车速度快、能耗低、舒适性设计、环境友好、以人为本的设计特点，具有其他交通方式无法比拟的优势。轻量化设计可以实现轨道客车多方面的优化，是轨道客车关键技术之一。镁合金是目前工程应用中密度最小、比强度最高的结构金属材料，在轨道客车轻量化应用中具有非常好的前景。

一、镁合金的特点

镁在元素周期表中排在第十二位，属于第二主族碱土金属。镁在地壳中的蕴藏量极其丰富，其含量约占地壳总重量的 2.1%，仅次于氧、硅、铝和铁等元素而占第八位。镁的密度为 1.738g/cm³，镁合金比铝合金轻 36%，比锌合金轻 73%，比钢轻 77%，是目前工程应用中密度最小、比强度最高的结构金属材料。镁合金在材料减重方面的优势使得它在交通运输领域备受关注。镁合金主要具有以下优点：

(1) 高比强度、比刚度和比弹性模量。镁合金的比强度高于铝合金，远高于钢；比弹性模量和比刚度近似于高强度铝合金。日本的 Inoue 等人用快冷粉末冶金方法得到的 Mg₉₇Zn₁Y₂ 合金，其屈服强度达到 480MPa~610MPa，同时根据固结温度的不同有 5%~16%的大伸长率，是目前世界上强度最高的镁合金。

(2) 优秀的阻尼和减振性能。与铝合金相比，镁合金拥有更优秀的衰减振动和降低噪声的能力。例如在 20MPa 应力下，常用镁合金 AZ91D 的衰减系数为 20%，而铝合金 A380 只有 1%。在 100MPa 应力作用下 AZ91D 的衰减系数可达 55%，AS41 镁合金的衰减系数更是高达 70%，而同样情况下铝合金 A380 的衰减系数只有 4%。镁合金还具有良好的承受冲击载荷性能，弹性范围内镁合金受到冲击载荷时，吸收的能量可以比铝合金件多 50%，而且由于有更好的延伸率，镁合金收到冲击后可以吸收更多的能量而不至于断裂。所以镁合金是非常好的减振降噪材料。

(3) 优良的机械加工性能和铸造性能。镁合金在金属中属于非常易于加工的材料，切削阻力小可以满足高速切削加工，并且加工完成后表面十分光洁，基本不需要磨削和抛光。镁合金液流动性好，可以铸造出壁厚很薄、形状复杂的零

件，而且不容易粘模具，清理模具的费用较低。镁合金压铸件尺寸精度比铝合金压铸件精度高 50%，同时压铸周期短，生产效率比铝合金高 25%，镁合金加工耗能比铝合金低 50%。

（4）良好的导热、电磁屏蔽性能。镁合金的散热性能不但比塑料高的多，比铝合金也要好。由于镁合金压铸件可以比铝合金压铸件的壁厚做的更薄，所以散热比铝合金件更快，同时形状也可以做得更复杂。镁合金具有很好的屏蔽电磁干扰的性能，适合制作对电磁干扰标准要求严格的部件。

（5）镁合金材料可以循环使用，保护环境。镁合金比热较小，与比其它金属相比熔点较低，在循环利用熔解时所消耗的能源非常低，还不到新材料制造所消耗的能源的 5%。

二、镁合金的开发和应用

现在广泛应用的镁合金主要可以分为两种，一种是铸造镁合金，另一种是变形镁合金。目前压铸镁合金在工业已经得到广泛应用，镁合金经过变形之后，可以得到更加优秀的综合力学性能，从而满足不同的场合需求，所以发展变形镁合金非常有前景。

镁合金的特点可满足航空航天等高科技领域对轻质材料降噪、减振、防辐射的要求，同时可大大改善飞行器的气体动力学性能和明显减轻结构重量。目前镁合金在航空工业上应用很广泛，其中包括 AZ91、AZ31、ZE41、QE22、WE43 等。

节能与环保的新要求使汽车公司都设法减轻汽车的重量，从而达到降低汽油消耗和温室气体排放量的新标准，镁合金的减重效果可以最大限度满足日益严格的节能的温室气体排放的要求。镁合金具有良好的阻尼系数，减振性能好于铝合金和铸铁。在座椅、方向盘、轮毂上应用可以减少振动，在车门等壳体上应用可以降低噪声，提高汽车的安全性和舒适性。目前，汽车仪表、座椅架、方向操纵系统部件、引擎盖、变速箱、进气歧管、轮毂、发动机和安全部件上都有压铸和变形镁合金产品的应用。

三、轨道客车的轻量化设计

轨道客车轻量化设计主要是通过优化结构、采用新材料来实现，它主要包括列车车体、车内设备、车外吊挂安装设备的轻量化。在考虑减轻列车重量的时候，必须在确保车体强度、刚度、动力学和动应力等满足要求的前提下，尽量实现列车的轻量化。

轨道客车轻量化设计主要考虑轴重限制、节省能源和加速制动等方面的因素。由于铁路轨道的承受能力有限，因此必须对列车的最大轴重做出限制。列车速度越高，对轨道的冲击力越大，当运行速度高于 250km/h 及以上时，对轨道的冲击力就会变得很大，所以速度高于 120km/h 的车辆轴重必须随车辆速度的升高而降低。轴重超过规定的车辆（包括机车、动车和拖车）不允许上线运行。轨道客车运行时阻力很大一部分是轮轨摩擦阻力，减小列车重量可以有效减小轮轨摩擦阻力，改善转向架等重要部件的运行条件，同时可以减小所需的牵引功率，节省能源。另外列车较重时惯性较大，减轻重量可以更安全快捷地起动加速和减速制动。因此，轻量化设计可以实现轨道客车多方面的优化，是提升轨道客车综合竞争力非常有效的途径。

综上所述，减轻轨道客车自重对减少线路损害、减少动力消耗、节约能源以及减少制动系统的负担，都具有十分重要的意义。轨道客车实际线路运行的环境和工况非常复杂，所以轨道客车材料必须保证在各种环境和工况下都能满足机械强度、疲劳强度、振动模态、理化性质、环境友好等标准要求。要想实现轨道客车的轻量化设计，材料必须符合以下要求：低密度，屈服极限及强度极限，弹性模量及刚度较高，温度稳定性较好等。镁合金的性能和特点比较适合轨道客车轻量化的要求，通过推广镁合金技术和产品在轨道客车上的应用，不仅可以减轻重量、节约能源，还可提高列车的安全性、可靠性和舒适性。

四、镁合金在轨道客车上的应用

目前常用的镁合金按照添加合金元素的不同可以大致分为 Mg-Al 系合金、Mg-Mn 系合金、Mg-Zn 系合金；按成型方法可以大致分为铸造镁合金和变形镁合金，其中应用铸造镁合金中绝大部分是压铸镁合金。工业常用的镁合金包括 AZ31B、AZ61A、AZ91D、AM60B 等。

常用变形镁合金和压铸镁合金与铝合金的力学性能相近，非常有潜力在轨道客车替代铝合金，实现轻量化减重的目的。

现代轨道客车设计必须考虑的几个顶层指标分别是安全性设计、节能环保设计和舒适性设计。镁合金有良好的吸收能量性质，应用在列车座椅上可以在列车出现碰撞事故时使座椅吸收更多的能量，从而保护乘客的安全。比如 AM60 合金具有突出的吸能性，同时兼有良好的强度和韧性，已经在国外直升飞机座椅上得到应用。镁合金在列车减重节约能源方面优势明显，而同时镁合金具有优良的模压加工性能，可以压铸成为复杂的外形，从而满足座椅的人体工程学和外观美学设计。使用镁合金制作列车座椅上可以把美学、人体工程学、轻量化和成型性这几种设计很好地结合在一起。

国外轨道客车上已经有许多镁合金应用的报道。法国 TGV 高速列车已经在 TGV Duplex 双层高速列车座椅上应用了镁合金件，采用镁合金件的座椅总数量超过了 45000 个，应用镁合金的部件包括座椅小桌面板、座椅扶手、脚踏板、座椅侧面面板。采用镁合金的座椅重量明显减轻，和原先的铝合金座椅相比每个双人座椅由 36kg 减轻到 30kg。镁合金件所需成本不高，减重之后节约了列车运行成本。TGV 列车镁合金在座椅上的应用实现了减重、节约成本和应用功能的良好结合。韩国 KTX 特快列车在座椅基座上使用了镁合金板材零件，镁合金比之前采用铝合金和玻璃钢每个座椅减重 5kg，并且可以节省 8%~10% 的成本。

日本新干线列车在轻量化减重技术方面一直处于领先地位。目前日本新干线 N700 系列高速列车座椅骨架已经采用镁合金，包括座椅扶手、中央支撑架、底垫、底座、扶手座、背靠等。使用效果良好，实现了整车减重目的，提升了动车组的动力性能并减少了能耗。

轻量化材料中的优势使镁合金在我国轨道客车应用潜力巨大，我国某些研究机构和主机厂也对镁合金在列车上的应用做了许多研究和试验。比如使用 AZ91D 镁合金替代动车组 PA 塑料制作小桌支臂减轻列车重量。动车组原始 PA 塑料小桌支臂强度较低，现车使用中会有断裂损坏的风险，使用镁合金制作小桌支臂，不仅强度完全满足使用需求，并且可以明显提升承载能力、断裂伸长率和冲击韧性等性能。首先，经过测试镁合金小桌支臂的抗拉强度和弹性模量完全优于 PA 塑料小桌支臂，对两种材料的小桌支臂做 20kg 载荷变形量试验，结果显示镁合金支臂变形量明显小于 PA 塑料支臂。PA 塑料支臂为实心结构，而镁合金支臂结构设计得更薄更合理，所以每个 AZ91D 镁合金支臂可以比原来实心 PA 塑料支臂减轻约 35% 的重量。疲劳强度试验结果显示镁合金小桌支臂完全符合疲劳耐久设计。尽管重量有所减轻，但由于材料性能出众，使用镁合金材料的小桌支臂最大承载能力比以前有明显的提升。综合评价得出，镁合金小桌支臂可以完全满足国内动车组使用需求，使用 AZ91D 镁合金替代 PA 塑料制作小桌支臂可以满足动车组的轻量化设计。

现阶段轨道客车镁合金应用的主要研究目标是在大部分非承载零部件上使用镁合金材料替代铝合金，在使用成熟后再发展到承载零部件的应用。根据镁合金的性能和特点，目前镁合金可以在列车以下结构上进行使用：

?列车内装型材、车窗内框架、小桌板及支臂；

?行李架边框、座椅骨架、卧铺框架、内部仪表盘框架；

?车下裙板、车内间壁面板、车下设备舱底板。

国内有研究机构已经试制出了镁合金卧铺框架样品和镁合金间壁面板样品，有相关厂家小批量试制了在行李架、座椅骨架、小桌板支臂等部位应用的镁合金零件，需要在列车上进行进一步的使用性能验证。

五、技术难点及展望

尽管镁合金有许多其他材料不具备的优势，但如果想进一步扩大在高速列车上的应用，主要还需要解决一下一些问题：

（1）镁合金是密排六方晶体结构，经过轧制或者定向挤压等变形加工后容易产生基面织构而导致力学性能在各个方向上不一致，需要研究如何消除内应力分布不均匀。

（2）镁合金化学性质活泼，易被氧化和腐蚀，与异种金属表面接触容易产生电化学腐蚀。需要进一步研究表面防腐技术和镁合金装配防腐方法。

（3）常规焊接方法不适用于镁合金焊接，使用新型的固相焊接方法（搅拌摩擦焊等）焊接镁合金的性能还需要做许多验证。

（4）镁合金宽幅挤压工艺还不成熟，难以制造大断面挤压型材。需要对镁合金挤压设备和挤压工艺加以改进。

（5）镁合金在高温与在室温下强度差别较大，大多数镁合金工作温度不超过 150℃。目前有添加稀土的耐热镁合金的研究，但成本较高，应尽快研制成本较低的耐热镁合金。

我国轨道交通装备的快速发展，对轻量化的要求也会越来越高。我国镁资源储量约占全球的 50%以上，菱镁矿、白云石资源丰富，这为我国的镁合金发展提供了巨大的资源和成本优势。随着镁合金开发和应用研究的发展，镁合金的性能会得到不断提升，未来趋势是进一步拓展应用范围，从高速列车上的非承载零部件逐渐发展应用到承载零部件，使镁合金成为高速列车轻量化关键材料。