

doi:10.3969/j.issn.1003-4226.2023.03.016

## 镁合金在轨道交通领域的应用<sup>\*</sup>

刘世杰, 唐伟能

(宝钢金属有限公司, 上海 200940)

**摘要:**镁合金作为 21 世纪绿色工程材料,在航空航天、国防军工、轨道交通等领域具有十分巨大的应用潜力。通过分析镁合金特点,介绍了镁合金加工技术的发展和新型阻燃镁合金、高强度大规格镁合金型材在轨道交通领域的应用现状及面临的技术瓶颈。新型阻燃镁合金材料及大规格镁合金型材制备加工技术研发能够助力我国轨道交通的轻量化。镁合金从非主要承载零件到主要承载零件的应用将是轨道交通车辆轻量化升级的关键。

**关键词:**镁合金;轨道交通;轻量化

**中图分类号:**U270.41 **文献标识码:**A

## Application of magnesium alloy in rail transit

Liu Shijie, Tang Weineng

(Baosteel Metal Co., Ltd., Shanghai 200940, China)

**Abstract:**As green engineering material in 21st century, magnesium alloy has great application potential in aerospace, national defense and military industry, rail transit and other fields. By analyzing magnesium alloy characteristics, Development of magnesium alloy processing technology, application status of new flame retardant magnesium alloy, high-strength large specification magnesium alloy profiles in rail transit field and technical bottlenecks are introduced. Research and development of new flame retardant magnesium alloy materials and large size magnesium alloy profile preparation and processing technology can help rail transit lightweight in China. The application of magnesium alloy from non-main bearing parts to main bearing parts will be the key to lightweight upgrading of rail transit vehicles.

**Keywords:**magnesium alloy; rail transit; lightweight

我国高铁总里程 2018 年达到 2.9 万 km,居于全球第 1 位,超过第 2~10 位国家的总里程之和。按照我国《中长期铁路网规划》,到 2030 年,高铁总里程将超过 4.5 万 km。为了进一步提高我国铁路运输效率,提升列车运行速度,对高速列车的材料选择提出了更高的要求,对具有更高强度、更低重量新型材料的需求更加迫切。目前,普遍采用铝合金、不锈钢等制造高速列车的车体等关键构件<sup>[1]</sup>。常用的金属材料有耐候钢、低合金高强钢、不锈钢和铝合金<sup>[2]</sup>。我国高铁除转向架和部分内饰材料外,全部为高性能铝合金材料,每节车厢车体总重约 11 t<sup>[3]</sup>,其中铝合金材料占比高达 90%。而在所用铝材中,铝型材占比高达 76%,随着轨道交通车辆运行速度的不断提高与资源节约型社会和“双碳”目标的建设需求,寻找适用于下一代高速列车的新型材料变

得十分重要。

### 1 镁合金材料介绍

#### 1.1 性能特点

镁合金具有密度低,比强度高,阻尼减震性好的特点,其密度约为  $1.8\text{ g/cm}^3$ ,是铝合金的  $2/3$ ,比阻尼系数可以达到 60%,在相同载荷下,镁合金的减震性是铝的 100 倍,是所有金属材料中阻尼减震最好的结构材料<sup>[4]</sup>。镁合金与铝合金性能对比见表 1。新型的高强韧镁合金作为重要的承力构件应用于高速铁路是轨道交通装备高速化发展的趋势<sup>[5]</sup>。数据表明,如果高铁动车组采用镁合金材料替代传统的铝合金,能够大幅降低车体重量,减少能耗,降低运营成本。据统计,如果京沪线高铁车身全部使用镁合金材料制造,整车重量

\* 基金项目:国家重点研发计划资助项目(项目编号:2021YFB3701100)。



将减少 13%, 节约能源达 8%, 每月节约用电 120 万 kW · h 以上, 折合二氧化碳减排约 1 146 t<sup>[6]</sup>。这对节能减排, 促进“双碳”目标的实现具有重要意义。

由于纯镁力学性能差, 不能直接作为结构材料使用。镁合金具有优异性能, 如 Mg – Al 系、Mg – Zn 系、Mg – Mn 系以及 Mg – RE 系等<sup>[7-10]</sup>, 部分镁合金牌号及力学性能见表 2。

表 1 镁合金与铝合金性能对比

Table 1 Comparison of properties between magnesium alloy and aluminum alloy

材料名称	热膨胀系数/ $\mu\text{m} \cdot (\text{m} \cdot \text{k})^{-1}$	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	热传导系数/ $\mu\text{m} \cdot (\text{m} \cdot \text{k})^{-1}$	密度 ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/ %
镁合金 (AZ31B – H24)	25	595	72	1.8	290	220	15
铝合金 (6063 – T5)	23.9	600	145	2.7	200	160	7

表 2 部分镁合金牌号及力学性能

Table 2 Some magnesium alloy grades and mechanical properties

镁合金 牌号	状态	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	断后伸长 率/%
AZ40M	H112	$\geq 245$		$\geq 6.0$
AZ80A	T5	$\geq 325$	$\geq 205$	$\geq 4.0$
ZK61M	T5	$\geq 305$	$\geq 235$	$\geq 6.0$
VW75M	T5	$\geq 430$	$\geq 350$	$\geq 5.0$
VW93M	T5	$\geq 440$	$\geq 350$	$\geq 3.0$
VW94M	T5	$\geq 500$	$\geq 410$	$\geq 8.0$

## 1.2 镁合金挤压技术发展

传统镁合金的制备加工以铸造为主, 但铸造镁合金的综合力学性能较低, 不能满足结构材料对高性能的需求。变形镁合金比铸造镁合金具有更高的综合力学性能。变形镁合金的主要生产方式有轧制和挤压两种工艺。镁合金由于是密排六方结构, 可动滑移系少, 常温下塑性变形能力较差。镁合金轧制板材需要小压下量、多道次的轧制工艺。镁合金的散热性较好, 轧制过程需要考虑板材保温的问题, 镁合金轧制板材生产周期长、生产成本低。与轧制变形不同, 镁合金在挤压加工时处于三向压应力状态, 能够一次挤压成形, 同时镁合金挤压工艺具有较大的灵活性, 能够制备出不同形状、尺寸的复杂产品。在常规挤压过程中, 镁合金一般会形成平行于挤压方向的强烈基面织构, 会使镁合金性能表现出各向异性, 成形性能降低。为改善挤压态镁合金组织及性能, 一些研究者将非对称性加工的思想引入镁合金挤压过程中。L L Chang 等人<sup>[11]</sup>通过在挤压模具模口处设置斜面结构, 在 673 K 下对 AZ31 合金进行非对称挤压制备合金板材, 引入了较大的剪切应变, 晶粒细化并呈现一定的梯度, 在厚度方向上

的织构分布不均匀, 且基面织构得到弱化, 塑性得到改善。JunXu 等人<sup>[12]</sup>通过在挤压模具模口设计单边倾斜面实现非对称, 将传统挤压工艺和非对称挤压工艺分别制备的 Mg – 3Al – 1Zn (AZ31) 合金板材进行比较, 发现非对称挤压板材由于大量剪切应变的引入, 使得基面织构弱化和晶粒细化, 比传统挤压的板材性能明显改善。JunXu 等人<sup>[13]</sup>还提出了一种新的斜坡挤压工艺 (SE), 制备了 Mg – 3Al – 1Zn 合金板材, 并通过有限元模拟, 对挤压过程进行了相关研究, 最后在沿挤压方向向横截面方向倾斜 48° 得到拉长弱化的双峰织构, 且相比于传统挤压, 斜坡挤压显示出更低的屈服强度和更高的塑性, 在横截面方向的塑性达到了 27.3%。QinghangWang 等人<sup>[14]</sup>通过非对称孔模挤压 AZ31 板材, 发现相比于传统挤压 (CE) 和对称孔模挤压 (PE), 非对称孔模挤压 (APE) 引入了剪切应变, 基面呈广角分布, 当非对称孔模转角为 90° 时 (APE – 90), 获得了约 5.2  $\mu\text{m}$  的细小晶粒, 织构弱化, 成形性得到改善。在镁合金型材方面, 重庆大学经过“十一五”、“十二五”科技攻关和“十三五”重点研发计划项目, 先后制备出幅宽达 300 mm, 400 mm 和 500 mm 的镁合金宽幅中空型材, 为宽幅镁合金在轨道交通领域的应用奠定了基础。AZ31 镁合金制备的轨道车辆车体用宽幅型材如图 1 所示。

## 1.3 镁合金挤压模具

镁合金挤压型材生产具有可连续、加工简单等优点。镁合金由于塑性变形能力差, 变形加工困难, 并且镁与钢铁的亲合力低, 所以镁合金型材挤压加工后挤压垫与材料压余能够分离, 挤压过程中不需要对垫片进行润滑<sup>[15]</sup>。在生产空心型材时, 需要应用平面分流组合模具。挤压成形过程中, 挤压机对锭坯施力, 金属经分流孔分为金属流然后在焊合室焊合, 焊合后的金属在上模和下模间的空隙中流出,





图1 AZ31 镁合金轨道车辆车体用宽幅型材  
Fig. 1 AZ31 magnesium alloy wide profile for vehicle body

最后形成空心型材。如果镁合金型材的形状是对称截面,在设计镁合金挤压分流组合模时,模具的中心要和型材的截面质心重合<sup>[16]</sup>。在设计平面分流组

合模时<sup>[17]</sup>,组合模的上模包含分流孔、分流桥、模芯等部分,其中分流孔是焊合室的通道,分流桥实现模芯的支撑,模芯的主要作用是保证镁合金型材的形状和内腔尺寸的成形。组合模的下模包含焊合室和模孔等结构。其中在焊合室中经分流孔分开的金属流重新焊合在一起,然后经由模孔形成不同形状、外部尺寸的镁合金型材。在非对称挤压模具设计方面,杨青山等人<sup>[18-21]</sup>通过改变镁合金型材挤压模具的内腔结构,从而改变镁合金在挤压过程中的金属流速差。由于镁合金流速存在差值,从而在型材不同方向形成剪切应力,这些剪切应力使镁合金的晶粒取向发生改变,从而改善了挤压镁合金板材的基面织构,并由此提出镁合金渐进式非对称挤压和大应变非对称挤压工艺,镁合金传统挤压模具与非对称挤压模具及挤压板材(0002)织构如图2所示。

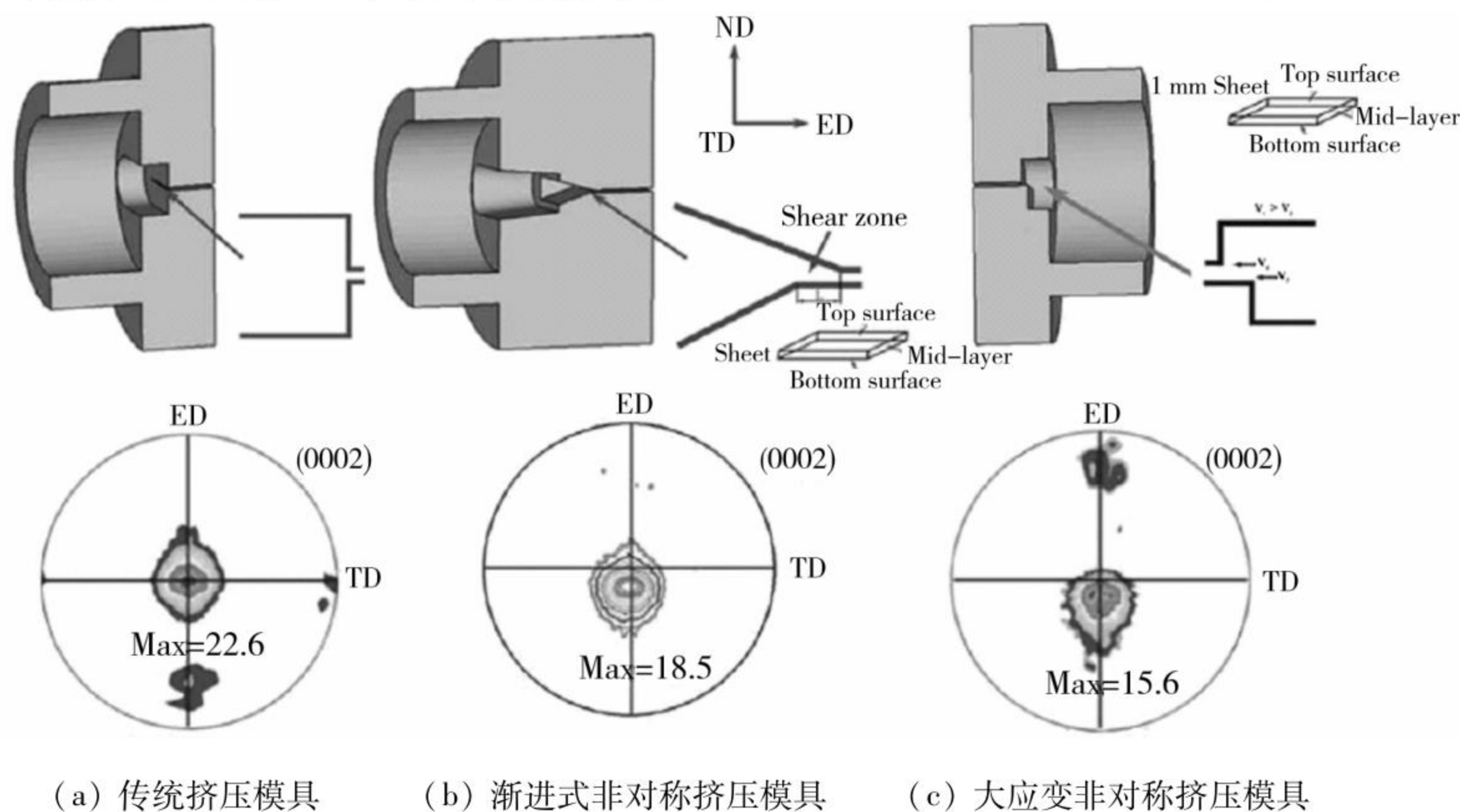


图2 镁合金传统挤压模具与非对称挤压模具及挤压板材(0002)织构  
Fig. 2 Traditional extrusion die and asymmetric extrusion die of magnesium alloy and extruded sheet (0002) texture

## 2 镁合金在轨道交通领域的应用

镁合金作为轻型商用金属结构材料,在轨道交通领域具有巨大的应用潜力,多用于轨道交通车辆的非主要承载件或内饰件。轨道交通领域常用的镁合金材料有AZ31、ZK60、AZ80等,这些镁合金的力学性能已经接近甚至超过部分铝合金材料<sup>[22]</sup>。

### 2.1 国外镁合金在轨道交通领域的应用

国外有关镁合金在轨道交通领域的应用已有较多报道<sup>[6]</sup>。韩国KTX型特快列车采用镁合金构件生产座椅基座。该座椅与原来玻璃钢和铝合金座椅相比重量可以减少5 kg,节约成本8%~10%。日

本新干线N700系列高速列车的座椅骨架同样采用镁合金制备而成,该座椅由背靠、扶手、底垫、底座和中央支架等组成,可以实现整车减重,具有很好的减震效果。在提升列车动力性的同时,实现了节能降本。法国的TGV Duplex高速列车上也使用了镁合金座椅,使用数量已超过45 000个。除此之外,在座椅扶手、座椅侧面面板、脚踏板等零部件上也选用了镁合金,实现了减重减震与节能的结合。这些镁合金座椅的重量由原来铝合金座椅的36 kg减少到30 kg,有效降低了车体的整体重量。日本新结构材料技术研究协会使用新开发的阻燃镁合金制造了一种用于新干线车辆的车厢地板。应用于日本新一代



子弹头列车测试车辆 ALFA - X。目前这种阻燃镁合金地板仅安装在 ALFA - X 的一辆中间车厢上,长约 9 m,宽约 3 m。通过性能测试,研究人员发现在保持隔音的情况下,新型地板可减重 23% (约 50 kg)。可以承受长期运行所带来的负荷。目前这是世界上最大的镁合金压延材料应用于铁路车辆的例子。

日本新一代高速列车 FASTECH360 的原型车部分结构采用了 2017 年发明的新型阻燃镁合金材料,现在已经完成了局部车体样件的制备,这种新的镁合金车体与原来铝合金车体相比能够实现减重 25%<sup>[23]</sup>。阻燃镁合金高速列车车体局部样件如图 3 所示。对推动镁合金材料在轨道交通领域的应用具有促进作用。



图 3 阻燃镁合金高速列车车体局部样件

Fig. 3 Local flame-retardant magnesium alloy sample of high-speed train body

## 2.2 国内镁合金在轨道交通领域的应用

目前在国内部分轨道交通车辆中已采用 AZ91D 镁合金替换传统塑料生产高速列车的小桌支臂。采用 AZ91D 镁合金制作的小桌支臂相比于原来实心塑料可减重 35%,能够满足轨道交通装备轻量化设计的需要,降低了轨道交通列车整体车重。同时在国内的 25G 型客车上,已经采用 AZ31 镁合金替代铝合金材料生产部分车载构件。和谐号 CRH5 动车组中的镁合金行李架<sup>[24]</sup>如图 4 所示。

在“提速客车车体轻量化的研究”项目中,中车唐山机车车辆厂使用镁合金材料代替了约 30% 的木质骨架,并使用镁合金型材替代普通线槽。除此之外,在列车内部的行李架、窗框、门框、出风口等装饰件上也采用了镁合金材料<sup>[25]</sup>。在列车通风系统空调栅格以及卧铺结构中均采用了镁合金材料<sup>[26]</sup>。



图 4 CRH5 动车组镁合金行李架

Fig. 4 CRH5 multiple unit magnesium alloy luggage rack

在国内下线的首列实用型中低速磁悬浮列车上,出于对列车轻量化设计的需要,在灯体上尝试了镁合金型材,并实现了结构上的减重。

BGZ8 镁合金挤压型材高铁座椅骨架如图 5 所示。该座椅骨架重量仅为 1.7 kg,相比原有的铝合金座椅骨架减重 25%。挤压型材经过 T5 处理后,其室温拉伸屈服强度为 289 MPa,抗拉强度为 396 MPa,延伸率为 11.5%,能够满足高铁的使用要求<sup>[27]</sup>。

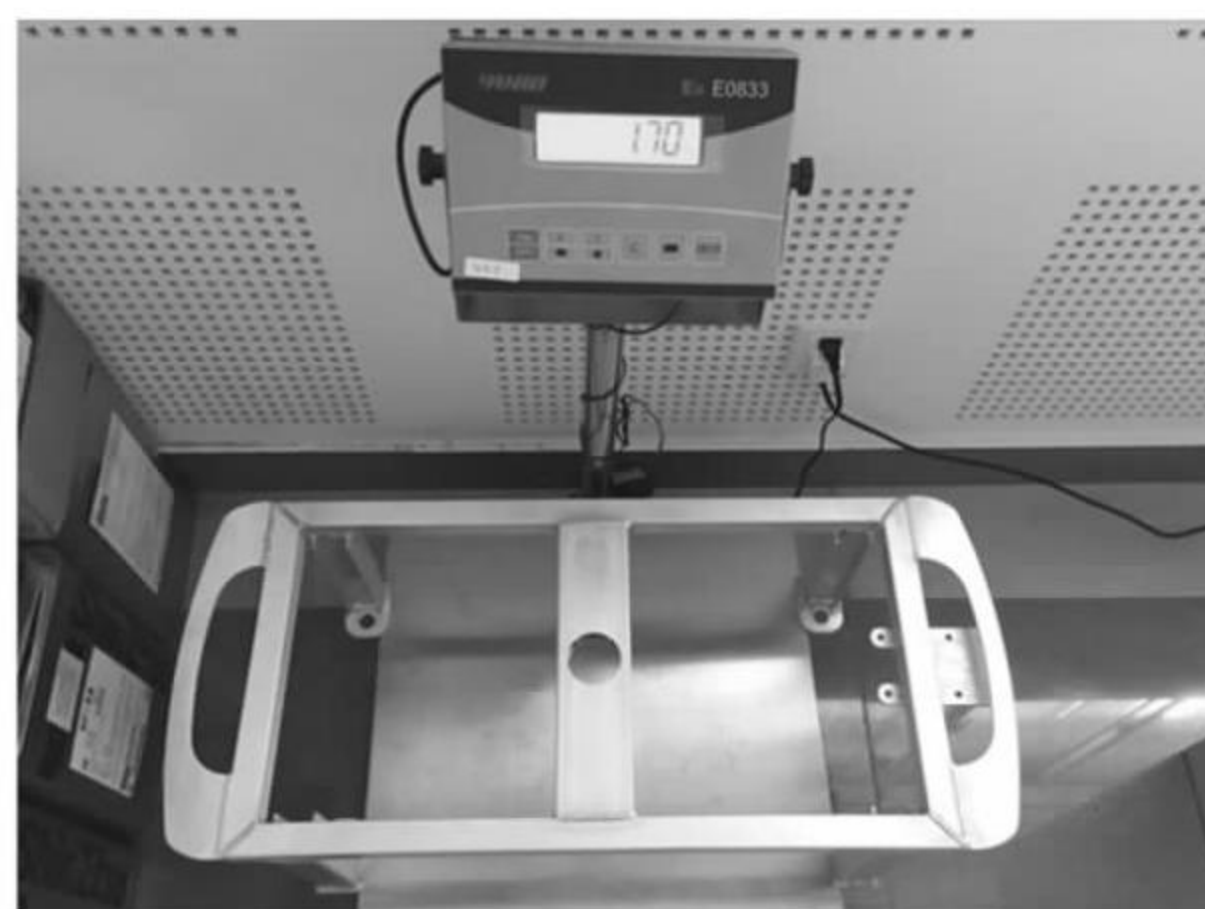


图 5 BGZ8 镁合金挤压型材高铁座椅骨架

Fig. 5 BGZ8 magnesium alloy extruded profile for seat frame of high-speed train

银光镁业集团已经开发出轨道交通车辆用镁合金精密挤压型材<sup>[28]</sup>,自 2017 年下半年以来,已经陆续成功在高铁列车、地铁车辆上成功列装,装车型材总长度达 150 km。

## 3 镁合金在轨道交通领域应用存在的问题与发展方向

在材料方面,虽然近年来科研人员已经开发出了一系列高性能镁合金,使得部分镁合金在力学性能上能够达到甚至超过铝合金。但是,传统的镁合金燃点较低,只有 750 ℃ 左右,因此还无法在轨道交



通车辆关键承载件如车体、支撑梁等结构中得到应用。国外有学者通过传统镁合金材料中加入适量的Ca元素,设计研发出了新型阻燃镁合金材料,该镁合金的燃点相比于传统镁合金可以提高200~300℃<sup>[29]</sup>。此外,作者通过在Mg-Al系合金中添加少量的RE元素后,发现镁合金燃点也会大幅提高,同时具有良好的综合力学性能。但是在其他体系的阻燃镁合金材料开发方面仍需要更大的投入。由此可见,开发高强度兼具阻燃性能的结构功能一体化镁合金材料具有十分迫切的需求。

在制备加工技术方面,目前科研人员已经能够制备大尺寸宽幅镁合金型材,但是,该型材选用的镁合金是如AZ31等强度较低的材料,对于强度更高,且同时具有阻燃性能的结构功能一体化的镁合金大规格型材挤压制备技术目前还不具备,这也严重制约了镁合金在轨道交通领域的应用。因此发展高性能结构功能一体化镁合金大规格型材挤压加工技术具有十分重要的意义。通过非对称挤压模具设计、差温恒速挤压等技术以及多场耦合的非对称挤压加工技术有望在大规格镁合金型材挤压制备技术方面形成突破。

在镁合金应用技术方面,镁合金由于电位低,化学性质较活泼,易腐蚀,需要对其进行表面处理。开发出适用于轨道交通车辆用镁合金型材的表面处理技术仍是一个需要解决的关键难题。此外,常规的焊接方法并不适用于镁合金,尤其是镁合金与铝合金、不锈钢等异种金属间的焊接技术。近年来开发的搅拌摩擦焊接技术为镁合金构件的连接提供了较好的支撑,但是在异种金属间连接以及复杂构件之间的连接技术方面仍需要进一步突破。

#### 4 结语

我国镁矿资源十分丰富,在镁合金材料研发与应用方面有着巨大的资源优势。作为一种应用潜力十分巨大的金属结构材料,新型阻燃镁合金材料以及大尺寸镁合金型材制备加工技术研发能够助力我国轨道交通的轻量化。镁合金从非主要承载零件到主要承载零件的应用将是轨道交通车辆轻量化升级的关键。

#### 参考文献

[1] 彭晓峰. 论镁合金在轨道车辆结构上的应用[J]. 科技风, 2008(5): 11.  
[2] 康兴东, 龚晓波, 赵建. 城市轨道交通车辆轻量化车体结构材料的研究与应用[J]. 城市轨道交通研究,

2020, 23(6): 177-180.  
[3] 袁伟涛. CRH380 型标准动车组车体结构优化设计研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.  
[4] 韩晓明. 城市轨道交通车辆采用的工程新材料[J]. 装备制造, 2012(3): 2-8.  
[5] 缪炳荣, 张卫华, 池茂儒, 等. 下一代高速列车关键技术特征分析及展望[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 58-70.  
[6] 罗彦云, 蒲全卫, 左国良. 铝合金和镁合金在轨道交通装备轻量化上的应用[J]. 电力机车与城轨车辆, 2020, 43(3): 1-5.  
[7] 潘复生, 蒋斌. 镁合金塑性加工技术发展及应用[J]. 金属学报, 2021, 57(11): 1362-1379.  
[8] 曾小勤, 陈义文, 王静雅, 等. 高性能稀土镁合金研究新进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 2963-2975.  
[9] 鲍键, 李全安, 陈晓亚, 等. 挤压镁合金的研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(10): 112-123.  
[10] S Liu, K Wang, J Wang, et al. Ageing behavior and mechanisms of strengthening and toughening of ultra-high-strength Mg-Gd-Y-Zn-Mn alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2019, 758(05): 96-98.  
[11] L L Chang, Y N Wang. Microstructure and mechanical properties in an AZ31 magnesium alloy sheet fabricated by asymmetric hot extrusion[J]. Materials Science and Engineering, 2008, 496(06): 512-516.  
[12] Jun Xu. Effect of effective strain gradient on texture and mechanical properties of Mg-3Al-1Zn alloy sheets produced by asymmetric extrusion[J]. Materials Science and Engineering, 2017, 706(09): 172-180.  
[13] Jun Xu, Bin Jiang. Unusual texture formation in Mg-3Al-1Zn alloy sheets processed by slope extrusion[J]. Materials Science & Engineering, 2018, 732(06): 1-5.  
[14] Qinghang Wang, Jiangfeng Song. An investigation on microstructure, texture and formability of AZ31 sheet processed by asymmetric porthole die extrusion[J]. Materials Science & Engineering, 2018, 720(02): 85-97.  
[15] 刘静安. 镁及镁合金挤压模具的设计特点[J]. 轻合金加工技术, 2011, 39(11): 43-47.  
[16] 陈凌. 镁合金低周疲劳损伤演化模型探讨[J]. 机械设计与制造工程, 2020, 39(7): 1114-1120.  
[17] 冯红芬. 关于镁合金型材挤压模具的设计与分析[J]. 世界有色金属, 2019(19): 241-242.  
[18] Yang Q, Jiang B, He J, et al. Tailoring texture and refining grain of magnesium alloy by differential speed extrusion process[J]. Materials Science and Engineering,



- 2014,612(06): 187 - 191.
- [19] Yang Q, Jiang B, Pan H, et al. Influence of different extrusion processes on mechanical properties of magnesium alloy[J]. Journal of Magnesium & Alloys, 2014, 2(3): 220 - 224.
- [20] Yang Q, Jiang B, Zhou G, et al. Influence of an asymmetric shear deformation on microstructure evolution and mechanical behavior of AZ31 magnesium alloy sheet [J]. Materials Science & Engineering, 2014, 590(1): 440 - 447.
- [21] Yang Q, Jiang B, Tian Y, et al. A tilted weak texture processed by an asymmetric extrusion for magnesium alloy sheets [J]. Materials Letters, 2013, 100 (02): 29 - 31.
- [22] 李瑞淳. 镁合金在现代铁道车辆上的应用探讨[J]. 铁道车辆, 2010, 48(9): 18 - 21.
- [23] 苏柯, 金希红, 刘永强, 等. 地铁列车车体技术研究 [J]. 机车电传动, 2022(2): 82 - 88.
- [24] 赵睿虎. 动车组镁合金行李架的应用研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.

- [25] 宋银川. 镁合金材料在客车轻量化中应用的探讨[J]. 铁道车辆, 2003(5): 25 - 27.
- [26] 孙家乐. 面向轨道交通运输装备的镁合金与铝合金性能及应用对比研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2012.
- [27] 张成, 谢玉, 唐伟能, 等. 高强韧镁合金挤压型材的研制及其在轨道交通上的应用[C]//中国金属学会. 第十一届中国钢铁年会论文集. 北京: 中国金属学会, 2017: 93 - 101.
- [28] 刘义鹤, 江洪. 镁合金在轨道交通装备中的应用和展望[J]. 新材料产业, 2018(10): 20 - 22.
- [29] Yasumasa, Chino, Kazunori, et al. Development of high-performance flame-retardant wrought magnesium alloys and evolution for application of the alloys to high-speed railway body[J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 2019, 69(1): 22 - 29.

(收稿日期:2022-11-22)

## 作者简介

**刘世杰** 1991 年生, 宝钢金属有限公司技术中心工程师。

唐伟能 1979 年生, 宝钢金属有限公司技术中心副研究员。

(上接第 66 页)

和 724 MPa,断裂位置均在母材上,抗拉强度均大于母材的标准最低抗拉强度 520 MPa,试验合格。

### 3.2.2 侧弯试验

侧弯试样厚度 10 mm, 弯曲半径 40 mm, 弯曲角度  $180^{\circ}$ , 4 个侧弯试样的弯曲面均无开口缺陷, 试验合格。

### 3.2.3 冲击试验

焊接接头冲击试验结果见表 5,焊缝及热影响区冲击功均不小于 31 J,焊接热影响区无韧性下降的情况,试验合格。

表 5 焊接接头冲击试验结果

Table 5 Impact test results of welded joints

-196 ℃ 冲击功(平均值)/J		合格标准冲击功/J
焊缝	热影响区	
66	56	≥31

### 3.2.4 宏观断面

从宏观腐蚀断面可见,焊接接头熔合良好,焊缝内部无缺陷,焊缝外观符合 ISO 5817 B 级要求。

## 4 结语

对于 30408 不锈钢采用的钨极氩弧焊焊接工艺,其焊接接头无损检测及力学性能检测均满足使用要求,本焊接工艺可以取得优良的 30408 不锈钢焊接接头。

## 参考文献

- [1] 彭京旗. 大型 LNG 低温储存罐施工技术[J]. 石油化工建设, 2005(8): 12-14.
- [2] 刘长沙. 不锈钢储罐壁板陶瓷衬垫单面焊双面成型焊接工艺研究[J]. 焊接与检测, 2020(8): 64-66.
- [3] 李硕. 不锈钢容器焊接工艺研究[J]. 甘肃科技, 2017(3): 74-75.
- [4] 潘伍覃. 船用 LNG 燃料储罐焊接工艺研究[J]. 焊接技术, 2016(1): 46-49.
- [5] 郑周. 低温环境下使用的 S30408 不锈钢焊接工艺研究[J]. 工艺与装备, 2021(5): 105-107.

(收稿日期:2023-02-27)

## 作者简介

解 蒙 1992 年生, 秦皇岛秦开工程项目管理建设有限公司助理工程师。

**杨永强** 1982年生,久益环球(天津)装备制造有限公司高级焊接工程师。