· 今日铸造 Today Foundry ·

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.01.031

镁合金在汽车零部件中的应用与发展

纪宏超[1,2],李轶明[1],龙海洋[1],裴未迟[1,3],李耀刚[1]

(1.华北理工大学 机械工程学院,河北 唐山 063210;2.北京科技大学 国家材料科学安全服役中心,北京 100083;3.北京科技大学 机械工程学院,北京 100083)

摘 要:镁合金在零件的轻量化方面有着重要的作用,特别在汽车零部件领域受到广泛关注。综述了镁合金在国内外的发展历史、镁合金在汽车零部件上的应用以及在轻量化、节能减排和提高汽车安全性能等方面的作用,并从汽车发动机、轮毂、车身和支架类零件等方面对国内外镁合金在汽车领域的研究成果以及未来发展趋势进行了分析。

关键词:镁合金;汽车零件;轻量化;节能减排

中图分类号:TG146.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)01-0122-07

Application and Development of Magnesium Alloy in Automobile Parts

JI Hongchao[1,2], LI Yiming[1], LONG Haiyang[1], PEI Weichi[1,3], LI Yaogang[1]

(1. College of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China; 2. National Center for Materials Service Safety, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China; 3. School of Mechanical Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Magnesium alloys play an important role in lightweight parts, especially in the field of automotive parts has been widely concerned. The development history of magnesium alloys at home and abroad, the application of magnesium alloy in automobile parts and its role in light quantification, energy saving and emission reduction and improving safety performance are summarized. The research and future development trend of magnesium alloys in automobile field at home and abroad are analyzed from the aspects of automotive engine, wheel hub, bodywork and bracket parts.

Key words: magnesium alloy; automotive parts; lightweight; energy conservation and emission reduction

镁合金是最轻的金属合金材料之一;具有较低的密度、较高的比刚度和比强度、较好的吸振降噪性能和铸造性能,被誉为“21 世纪的绿色工程材料”[1],广泛应用于汽车发动机、轮毂、车身和支架等零部件的开发和生产[2-4],是未来汽车材料发展的主攻方向之一。其在汽车领域的应用可追溯到 20 世纪 20 年代,已有 90 多年的历史。但在早期,镁合金的用量并不多,由于其制造、加工、装配的工艺复杂,镁合金在汽车上的用量占汽车总质量不到 0.5%[5]。直到 20 世纪 70 年代,石油危机爆发,镁合金在汽车工业中的应用日益增加。特别是在 20 世纪 90 年代,由于镁的价格大幅度降低,镁合金在世界各国汽车行业的用量迅速增加[6]。目前,全球汽车行业中,镁合金正在以每年 20%的增长速率迅速发展,远远超过钢、铁、铝、锌等金属及合金的增长速率[7]。汽车上应用的镁合金零件数,成为全球汽车企业技术领先的标志。图 1[9]为镁合金在汽车领域的应用历史。

1 镁合金在汽车领域内的使用优势

镁合金与其它金属材料相比,具有质量轻、密度小、强度高、铸造性能好等优点,在汽车领域有着广阔的应用前景[9]。表 1[10]是几种常用材料的性能参数对比。

1.1 轻量化与节能减排

镁合金用于汽车零部件的制造,很大程度地减轻汽车质量,提高燃油的经济性[11]。其减重效果比铝合金零部件高 15%~20%。Decker 研究发现[13,14],汽车整车的质量每减轻 100 kg,汽油的消耗量就减少 5%,约 0.3~0.6 L,每节约 1 L 燃油,可减少 2.5 g 二氧化碳的排放。若每辆车上使用的镁合金能够达到 70 kg,那么每年的二氧化碳排放量就能降低 30%,达到环保要求。表 2[14]为镁合金汽车零部件的轻量化效果。

收稿日期:2018-09-21

基金项目:河北省自然基金项目(E2017209059);华北理工大学博士基金启动项目(BS2017020)

作者简介:纪宏超(1986-),河北承德人,讲师,博士后/博士.研究方向:汽车轻量化;轻质合金塑性变形机理.
电话:15230557103,E-mail:jihongchao@ncst.edu.cn

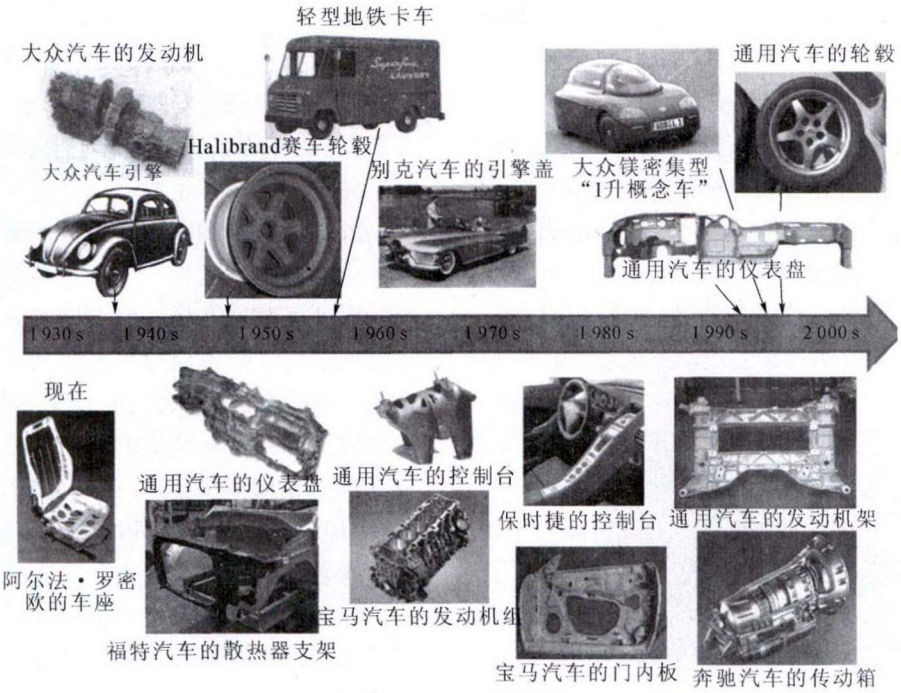


图 1 镁合金的应用历史

Fig.1 Application history of magnesium alloys

表1 几种常用材料的性能参数

Tab.1 Performance parameters of several common materials

材料种类	密度 /$\times10^3$ kg/m^3	弹性模量 /GPa	拉伸强度 /MPa	减震系数 (35 MPa)(%)
镁合金	1.74	45	200~300	30~60
铸铁	7.8	180	200~400	10~17
铝合金	2.7	70	200~350	2~5
工程塑料	1.5~2.0	15~25	100~250	N/A

表 2 镁合金汽车零部件的轻量化效果

Tab.2 Lightweight effect of magnesium alloy auto parts

汽车零部件	镁重量 /kg	取代重量 /kg	减轻重量 /kg	减轻百分比 (%)
壳体	5.4	12.8	7.4	58
动力系统	36.2	55.2	19.1	35
电气外壳	1.8	3.2	1.4	44
框架	7.2	14.5	7.3	50
悬挂件	25.9	62.2	36.3	58
内饰件	21	31.2	10.2	33
刹车	1.8	3.9	2.1	54
转向	3.9	5.6	1.7	30
方向盘	0.9	4.0	3.1	78
脚踏板	1.1	5.0	3.9	78
阀体零件	0.7	2.5	1.8	72
轮毂	18	23	5	22
合计	103.2	188.6	85.4	45

1.2 提高安全性能和操作性能

镁合金的减振性能良好，承受载荷的能力比其它金属材料都大。当受到外界冲击载荷时，其产生的变形较大，吸收冲击的能力远高于铝合金，约为铝合金的 1.5 倍。其比阻尼容量也远高于铝合金，比铝合金高 10~25 倍[15]，能够有效地减小由于振动和噪音等因素引起的人工疲劳，是减振缓压的理想材料。用镁合金制作的汽车座椅、转向盘、转向柱等零部件，除了质量有明显的减轻，其部件本身抑制振动的能力也相当显著；同时，用其制作汽车外壳对降低噪声有显著效果。镁合金汽车外壳具有很高的气密性，当汽车受到外部冲击时，能将受到的冲击分散，从而吸收更多的能量，可有效减小汽车壳体的凹陷，提高汽车的安全性能、操作性能和舒适性。

1.3 资源丰富及生产成本低

镁在地壳中的含量很高，约占地球壳层质量的 1.93%，所以镁资源的供应十分充足。此外，镁合金不同于其它金属材料的是它可再生，并且力学性能几乎不变[16]。镁合金铸件的优点在于可多种部件同时进行组装，不仅生产效率显著提高，而且降低了装配误差和生产成本。镁合金的熔点、比热容和相变潜热低，容易热成型[17]，在加工过程中显著降低了能源消耗，使其具有较低的熔炼成本。

2 镁合金在汽车零部件上的应用研究

目前，镁合金在汽车领域主要有两大类应用：一类是壳体类零部件，如汽车轮毂、变速箱外壳、车身等；另一类是支架类零部件，如汽车座椅支架、方向盘、转向柱支架等。

2.1 镁合金在汽车轮毂中的应用研究

汽车轮毂位于汽车轮胎上，是以车轴为中心用

来支撑汽车轮胎的圆柱形金属构件，用来连接制动盘、轮盘和半轴，其作用为承担整车质量、散发轮胎热量、传递汽车动力。镁合金受到载荷冲击时发生的弹性形变最大，但可瞬间恢复原状，具有显著的缓冲减压作用。镁合金轮毂的抗颠簸能力远高于其它材质轮毂，可大大提高汽车的平稳性和舒适性。因此，镁合金被广泛应用于汽车轮毂的制造。

常见的汽车轮毂为整体式轮毂，如图 2，从内部到外部的组成部分依次是法兰、轮辐、轮缘、轮辋。

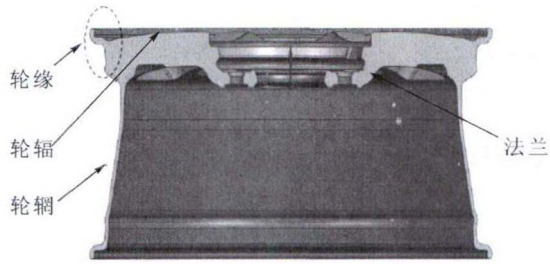
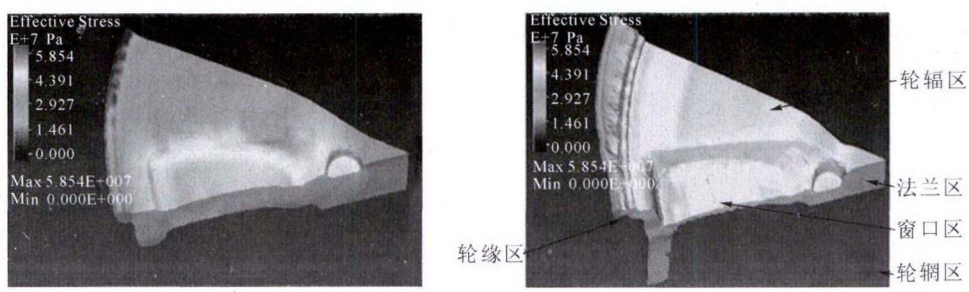


图 2 整体式汽车轮毂
Fig.2 Integral car wheel hub

杨等[18]利用 UG 软件建立 AZ80 镁合金轮毂的三维实体模型，并对其锻造成型过程进行数值模拟和实验研究，分析了镁合金汽车轮毂在变形过程中的受力情况和锻造过程中的温度分布情况。图 3 为轮毂锻造件变形过程中的应力分布，图 4 为轮毂锻造件成型过程中的温度分布。结果表明：坯料的主要受力区域随着锻造成型的进度而发生变化，轮毂窗口区域所受应力相对较大，是主要的变形区域，并且窗口区的圆角处是最容易产生成型缺陷的区域，其余的轮毂区域所受应力相对较小，变形较小，不易产生缺陷；温度呈区域化分布，锻件中心区域温度最高，锻件的表面温度低于中心区域。研究结果对汽车轮毂的生产有重要[18]。

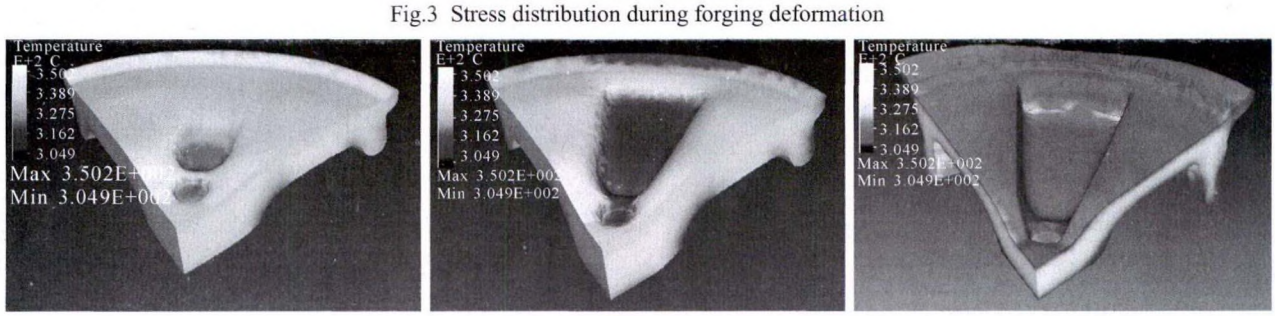
Peng 等[19]采用有限元差分法模拟了镁合金汽车轮毂的低压压铸过程，分析了填充阶段和凝固过程中的温度场和速度场，对温度的分布情况和液相演化过程进行了数值模拟，并预测了轮辐中间存在气体夹层、轮辋和轮辐之间的收缩等潜在缺陷。通过分析不同冷却条件下产生的缩孔缺陷得出：模具中的冷却装置能显著提高轮辋和轮辐连接处的冷却能力；冷却装置可使连接处的热点明显减少，产品质量得到改善。

权等[20]研究了超塑性模锻镁合金汽车轮毂，分别对超塑性模锻镁合金轮毂进行拉伸试验、冷热条件下力学特性分析，图 5 为超塑性模锻镁合金汽车轮毂实物图。采用标准拉伸实验，先对镁合金汽车轮毂进行超塑性模锻成型和热处理，然后切割汽车轮毂，进行横向筋与径向筋的拉力测试，经测试得出：镁合金轮毂经超塑性模锻成型和热处理后，强度提高了 60%左右，塑性也有很大提高；平均抗拉强度达 335 MPa，平均伸长率为 12.8%，明显高于铸态镁合金和铝合金。表 3 是镁合金轮毂在不同温度条件下力学特性的检测结果，通过表中数据可知：AZ80 超塑性锻造镁合金轮毂在高温和低温时均表现出优



(a)变形初期 (b)变形末期

图 3 锻造件变形过程中应力分布情况
Fig.3 Stress distribution during forging deformation



(a)变形初期 (b)变形中期 (c)变形末期

图 4 锻造件成型过程中的温度分布情况
Fig.4 Temperature distribution during forging process



图 5 超塑性模锻镁合金汽车轮毂实物图
Fig.5 Physical picture of superplastic die forging magnesium alloy automobile wheel hub

表3 镁合金轮毂在不同温度下的力学特性
Tab.3 Mechanical properties of magnesium alloy wheels at different temperatures

温度 /℃	R_m/MPa	$R_{p0.2}$/MPa	A(%)
-73	386	259	8.15
-18	355	252	10.5
21	338	248	11.0
93	307	221	18.0
150	241	176	25.5
200	197	121	35.5
260	110	76	57.0

异的力学特性，高温时软化不显著，低温时也未明显脆化，为汽车轮毂的开发提供参考。

2.2 镁合金在汽车发动机中的应用研究

发动机是为汽车提供动力的机器，与汽车的动力性、经济性和环保性密切相关。将性能优异的镁合金应用到发动机各零部件的生产中，不仅使发动机减重，还可显著降低发动机振动和噪声，延长发动机寿命。

Seetharaman 等[21]采用 AZ91D 镁合金开发了一种发动机油泵，对油泵铸件进行了性能测试、泄漏测试和耐久性测试，并与 ADC12 铝合金材料制造的油泵铸件进行了对比。测试和对比结果表明：该油泵与由 ADC12 铝合金材料制造出的油泵铸件性能相似，满足发动机铸件的使用要求，可用于生产制造发动机油泵；将两种发动机油泵铸件完全浸没水中 20 s，观察到泄漏量都没有达到 6 mL，符合油泵密封要求；在 4 000 min/r、0.3 MPa、90 ℃的条件下，对 AZ91D 镁合金发动机油泵铸件进行了 500 h 的耐久性测试，其抗疲劳强度也满足使用要求。

Song 等[22]讨论了发动机缸体可能遇到的腐蚀条件，并进行了两组实验：将 AM-SC1 发动机缸体和 AZ91 发动机缸体同时置于盐水溶液中、将 AM-SC1 发动机缸体和 AZ91 发动机缸体暴露于盐雾环境中，探究 AM-SC1 镁合金发动机缸体的抗腐蚀性能，并与 AZ91 发动机缸体进行比较。结果如表 4，AM-SC1 镁合金的耐腐蚀性明显高于 AZ91 镁合金，说明 AM-SC1 镁合金更适合制造发动机缸体。

表 4 两种环境下的 AM–SC1 发动机缸体和 AZ91 发动机缸体的腐蚀结果
Tab.4 Corrosion results of AM–SC1 engine cylinder and AZ91 engine cylinder in two environments

测试条件	合金	腐蚀速率 /(mg/cm²/day)
浸泡在 3.5% NaCI	AM-SC1	0.86
饱和的 $Mg(OH)_2$ 中	AZ91E ingot	0.44
浸泡在 5% NaCI 中	AM-SC1	3.9
	AZ91E ingot	1.63
ASTM B117 盐雾	AM-SC1	0.68
(5% NaCI)	压铸 AZ91D	0.27

将 AM-SC1、AZ91D、铝合金 A380、高强度钢 4 150 和纯锌放在 5% NaCl 溶液中进行电化学腐蚀，图 6 为 5 种金属的极化曲线，从图中可以看出：AM-SC1 具有比钢、铝、锌更大的腐蚀电位，如果与它们接触，会产生电化学腐蚀；在配合面上使用绝缘垫片和密封剂或在所有与镁合金接触的螺栓和螺钉上均涂上钝化涂层，可减少电腐蚀的风险，延长缸体的使用寿命。

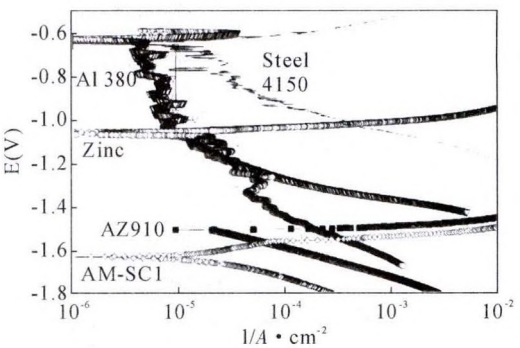


图 6 5 种金属在 5% NaCl 溶液中的极化曲线
Fig.6 Polarization curves of five type of metals in 5% NaCl solution

余等[23]应用 PROE 软件建立了镁合金汽车发动机缸盖的三维模型，如图 7，对其强度和刚度进行了有限元分析。分别计算了镁合金发动机缸盖在自由模态下和受约束模态下的固有频率和振型状态，确定了缸盖的震动特性，为缸盖结构设计提供了依据，证实了该模型的可行性，缩短了发动机缸盖的设计周期，减小了试验的次数和误差，对镁合金汽车发动机缸盖的设计和生产具有重要意义。

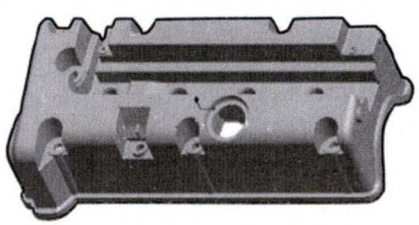


图 7 发动机缸盖的三维模型
Fig.7 3D model of engine cylinder head

2.3 镁合金在汽车车身中的应用研究

车身是支撑汽车的骨架，为驾驶员和乘客提供舒适的乘坐条件，保护他们免受外界恶劣环境的影响和行车时的震动、噪声及废气的侵袭。镁合金是最轻的材料，具有较低的弹性模量，而且相比于其它金属材料，其吸收振动冲击的能力更强，减振、减噪效果明显，因此被广泛应用于汽车车身的设计制造中。

Kiani 等[24]开发了一种满足碰撞条件和振动条件的轻型镁合金车身结构，针对碰撞和振动约束下的车身质量最小化，提出了一种基于镁合金替代钢材料的非线性优化问题。通过有限元法，对整车模型进行全正面碰撞、偏正面碰撞和侧面碰撞的模拟实验，并对三种碰撞的峰值加速度和结构部件吸收的能量的能力进行了分析。图 8 为三种碰撞下有限元模型的加速度曲线和试验曲线的对比图。分析结果表明，在不影响车辆的耐撞性和振动特性的前提下，用镁合金代替钢材料制作车身，使车身总重减少 46.7 kg，下降了 44.3%，减重相当显著；从图中的加速度曲线可以看出，有限元模型的加速度曲线与试验的加速度曲线走势接近一致，验证了镁合金车身设计的可行性。

任等对汽车前体进行了研究，采用镁合金材料代替原始的钢材料生产汽车前体，并对镁合金汽车前体的疲劳耐久性进行了测试分析。结果表明：用镁合金材料生产的车前体比用钢材料生产的车前体，质量上降低了 50.2 kg，轻量化效果显著；通过 MSC/NASTRAN 软件进行汽车前体的耐久性疲劳试验，并与原汽车前体的疲劳型进行对比，对比结果如表 5 所示：用镁合金代替钢材料生产汽车前体后，不仅质量显著降低，而且疲劳损伤值也明显减小，大大提高了整车的安全性能，对镁合金在车身上的应用研究具有重要意义。

表 5 车身前体疲劳损伤值对比

Tab.5 Comparison of fatigue damage value of bodywork precursor

镁合金代替区域本体		损伤值前两位	
结构模型	钢材结构	0.062	0.048
	镁合金结构	0.000 005 5	0.000 003 9

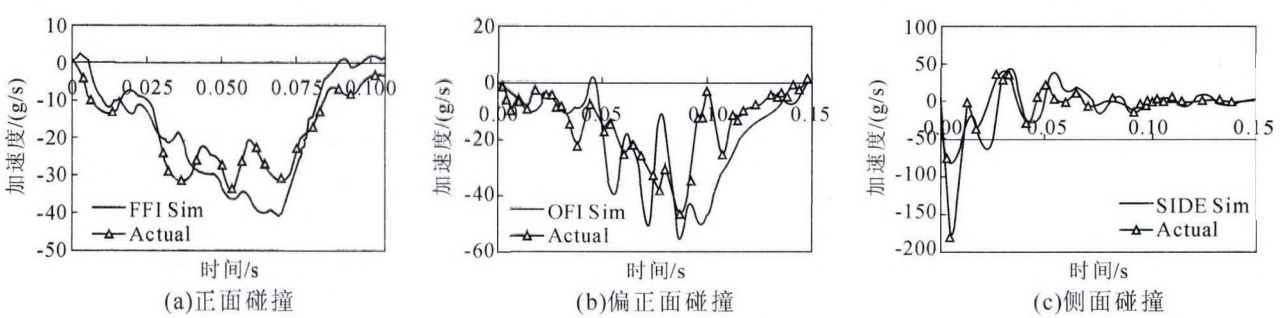
2.4 镁合金在汽车支架类零部件中的应用研究

汽车上的支架类零件对其它零件起支撑作用，镁合金的开发和利用推动了支架类零件的发展。采用镁合金生产支架类零件，减轻了支架的总重，同时镁合金对降低汽车运行时产生的振动有显著的效果。

Mao 等 [25] 研究了镁合金在汽车方向盘中的应用，成功制作出 AM50 方向盘框架，并在框架上随机选取几点进行了拉伸试验。试验结果表明，各点极限抗拉强度均为 220 MPa、伸长率均为 5%，说明用所定参数制备的镁合金方向盘具有均匀的微观结构。AM50 方向盘框架的疲劳测试是在通用方向盘测试机上进行的，将方向盘固定在轮辋中心，应用±250 kN 的力，反复加载，测得 AM50 HP-F 方向盘的平均疲劳寿命为 1.1×10^5 个周期，AM50 HP-F 方向盘的企业标准为 1×10^5 个周期，说明 AM50HP-F 可以满足方向盘框架疲劳寿命要求。

刘等[26]对镁合金汽车转向柱支架的压铸过程进行了模拟仿真。采用 T 型浇注法，设定模具温度为 220 ℃、浇注温度为 700 ℃，通过改变镁合金熔液的压射速度（压射速度分别为 4.3、6.0、7.8 m/s）观察其充型过程，图 9 为压射速度为 6 m/s 时的温度场模拟结果，并进行不同压射速度下的充型结果对比。通过对比可知：压射速度对转向柱支架铸件质量有很大影响；当压射速度为 6 m/s 时，镁合金熔液流动平稳，充型过程中的热量损失小，温度分布均匀，并且没有产生喷溅现象，铸件没有缩孔产生，充型过程较好；得到了转向柱支架压铸过程的最优工艺参数：压射速度 6 m/s、模具温度 220 ℃、浇注温度 700 ℃。研究结果为镁合金汽车转向柱支架的开发和生产提供了实际参考。

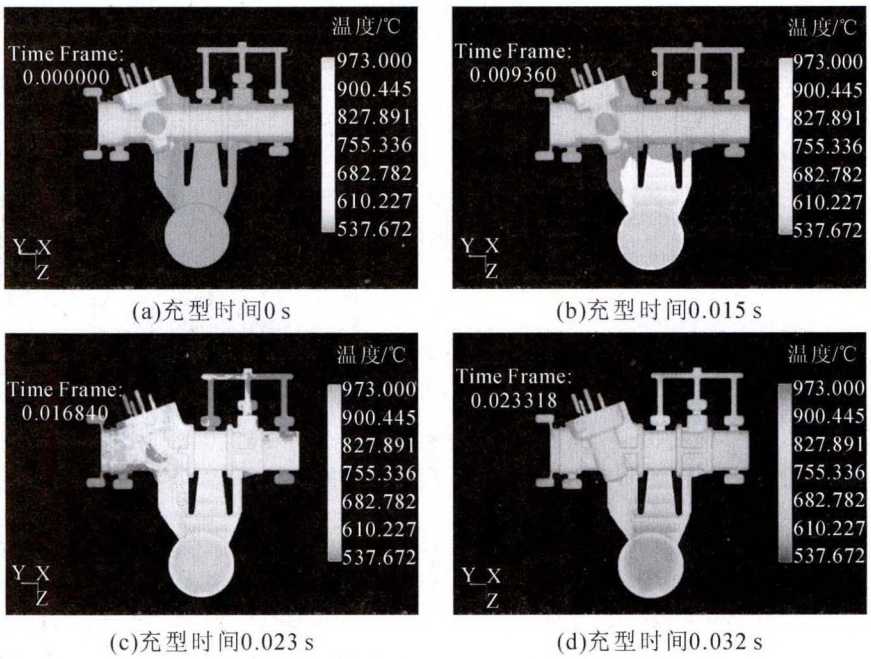
Wang 等[27]研究了镁合金支架和轮毂的精密锻造工艺，为了降低最大成型载荷，提出了铸坯预应变



(a)正面碰撞　(b)偏正面碰撞　(c)侧面碰撞

图 8 三种碰撞的加速度曲线

Fig.8 Acceleration curves of the three collisions



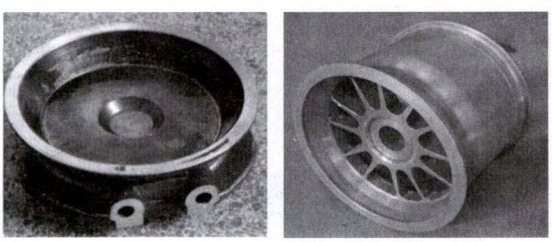
(a)充型时间0 s　(b)充型时间0.015 s

(c)充型时间0.023 s　(d)充型时间0.032 s

图 9 压射速度为 6 m/s 时温度场模拟结果

Fig.9 Temperature field simulation results with injection velocity 6 m/s

和空心坯的概念。利用所开发的技术，在适当的工艺参数下成功地生产出 AZ80 镁合金车轮和 AZ31 镁合金支架，如图 10 所示。分别加工出直径为 5 mm 的标准拉伸试样，在室温下进行拉伸试验，结果表明：AZ31 镁合金支架极限拉伸强度分为 260~270 MPa、AZ80 镁合金车轮的极限拉伸强度为 320~330 MPa，伸长率为 10%~12%，力学性能有了显著提高；成型温度在 360~400 ℃时，AZ31 和 AZ80 镁合金的锻造效果最好，没有裂纹和不稳定变形产生。研究结果为镁合金支架类零件和轮毂的设计和生产提供了参考依据。



(a)AZ31支架　(b)AZ80轮

图 10 镁合金锻件

Fig.10 Magnesium alloy forgings

3 结语及展望

镁合金是最轻的金属材料之一，以其优异的性能，成为汽车轻量化中的首选材料，21 世纪汽车业的发展会更多的依赖镁合金。未来镁合金会向以下方向发展。

(1)增强韧性　镁合金复合材料是一种具有较高强度和高模量的结构材料，但其韧性较差，在很大程度上限制了其应用。因此，模量 / 强度和延展性之间的良好平衡是镁合金复合材料未来的主攻方向。

(2)功能和力学性能的整合　机械强度和功能间的矛盾限制了镁合金结构和功能的整合，接下来的工作要对镁合金的阻尼系数、屏蔽系数和导热系数的潜在机制进行全面系统的研究。

(3)增强抗腐蚀性能　镁合金极易受到腐蚀破坏，提高其耐腐蚀性关键在于两个方面：一是对分散相颗粒的析出进行最优的合金化设计、塑性变形处理和热处理；二是对镁合金零部件的表面进行处理，引入物理保护层或自修复层，将镁合金与外界腐蚀环境隔离。

(4)增强耐热性　镁合金的蠕变行为与外界因素和内部因素密切相关，未来的工作将集中在探索变形机制和微观结构演化间的关系，对镁合金的微观结构演化进行原位观测，对镁合金的蠕变行为进行力学研究，同时确定不同蠕变阶段的主导变形机制。

作为世界上镁资源最多的国家，我国将镁合金应用到汽车零部件的研究起步较晚，虽有飞速的发展，但与发达国家还存在差距。因此，我国要大力开发镁合金的潜在价值，集中力量解决镁合金在应用中的关键问题，紧跟世界镁合金在汽车领域的发展趋势。

参考文献：

[1] Friedrich H, Schumann S. Research for a “new age of magnesium”

in the automotive industry [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 117(3):276-281.

[2] Mordike B L. Magnesium Properties-applications-potential [J]. Materials Science & Engineering A, 2001, 302(1): 37-45.

[3] Luo A A. Recent Magnesium Alloy Development for Automotive Powertrain Applications [C]// Materials Science Forum. 2003: 57-66.

[4] 黄伟, 张军. 汽车用耐热稀土镁合金的研究进展 [J]. 铸造技术, 2014, 35(10):2227-2230.

[5] Alam S R, Barrett R F, Fahey M R, et al. An Evaluation of the Oak Ridge National Laboratory Cray XT3 [J]. International Journal of High Performance Computing Applications, 2008, 22(1):52-80.

[6] Enss J, Evertz T, Rcicr T, et al. New magnesium rolled productions for automobile applications [A] .Proceedings of the second Israeli international Conference on Magnesium Science & Technology [C]. 2000 Dead Sea, Isreali, 19-34.

[7] Bamberger M, Dehm G. Trends in the Development of New Mg Alloys [J]. Annual Review of Materials Research, 2008, 38(38): 505-533.

[8] Powell B R, Luo A A, Krajewski P E. Magnesium alloys for lightweight powertrains and automotive bodies [M]// Advanced Materials in Automotive Engineering. 2012.

[9] Kaneko T, Suzuki M. Automotive Applications of Magnesium Alloys[C]// Materials Science Forum. 2003:67-74.

[10] 龙思远, 章宗和. 镁合金在中国摩托车上应用的可行性分析 // 2001 年全国镁行业年会[C], 2007.

[11] Joost W J. Reducing Vehicle Weight and Improving U.S. Energy Efficiency Using Integrated Computational Materials Engineering [J]. JOM, 2012, 64(9):1032-1038.

[12] Decker R F. Renaissance in Magnesium[J]. Advanced Materials & Processes, 1998, 154(3):31-33.

[13] Decker R F. Magnesium Semi-solid Metal Forming [J]. Advanced Materials & Processes, 1996, (2):41-42.

[14] 陈虎. 镁合金的研究及其在汽车轻量化中的应用 [J]. 企业技术开发:学术版, 2009, 28(11):17-19.

[15] 杨惠, 孙健, 赵玮霖, 等. 手持工具镁合金零部件阻尼性能分析 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2009, 23(5):150-154.

[16] 王晓强, 李培杰, 刘明星, 等. 镁合金再生技术综述 [J]. 铸造, 2001, 50(8):446-449.

[17] Suh B C, Shim M S, Shin K S, et al. Current issues in magnesium sheet alloys: Where do we go from here [J]. Scripta Materialia, 2014, 84-85(30):1-6.

[18] Peng Y H, Li D Y, Wang Y C, et al. Numerical Study on the Low Pressure Die Casting of AZ91D Wheel Hub [J]. Materials Science Forum, 2005, 488-489:393-396.

[19] 杨志伟. AZ80 镁合金汽车轮毂锻造成型数值模拟及实验研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2014.

[20] 权高峰, 刘绍东. 超塑性模锻镁合金汽车轮毂应用研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(4):22-27.

[21] Seetharaman R, Lavanya B, Niharika N, et al. Development and Performance Validation of Engine oil Pump for Passenger Cars Using Magnesium Alloy[J]. Materials Today Proceedings, 2017, 4 (6):6743-6749.

[22] Song G, Stjohn D, Bettles C, et al. The corrosion performance of magnesium alloy AM-SC1 in automotive engine block applications[J]. JOM, 2005, 57(5):54-56.

[23] 余熳烨, 林颖. 镁合金汽车发动机缸盖有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2010, (10):75-77.

[24] Kiani M, Gandikota I, Rais-Rohani M, et al. Design of lightweight magnesium car body structure under crash and vibration constraints[J]. Journal of Magnesium & Alloys, 2014, 2(2):99-108.

[25] Mao P L, Liu Z, Wang C Y, et al. Fatigue behavior of magnesium alloy and application in auto steering wheel frame [J]. Journal of China nonferrous metals, 2008, 18(s1):218-222.

[26] 刘正, 贾莹莹, 毛萍莉, 等. 镁合金汽车转向柱支架的压铸模拟仿真[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(4):321-323.

[27] Wang Q, Zhang Z M, Zhang X, et al. Precision forging technologies for magnesium alloy bracket and wheel [J]. Journal of China nonferrous metals, 2008, 18(s1):205-208.

技术资料邮购

《铸造实用生产技术集锦》

《铸造实用生产技术集锦》本书由李德臣教授级高工编著。共七章：1、重大铸件生产技术；2、耐热耐磨产品生产技术；3、耐蚀耐磨产品生产技术；4、耐磨产品生产技术；5、铸造工艺设计；6、铸造用辅助产品生产技术；7、铸造与哲学。特快专递邮购价：97元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071