

真空度对真空压铸镁合金副车架品质的影响

付彭怀¹ 孙启才¹ 王嘉诚¹ 李德江¹ 王泽忠² 赵正江² 周 力² 朱胜利³ 丁胜长³
刘锡林³ 胡国琦⁴ 鲍明东⁴ 彭立明¹

(1.上海交通大学材料科学与工程学院,轻合金精密成型国家工程研究中心;2.东风汽车公司技术中心;
3. 凤阳爱尔思精密成型有限责任公司;4.宁波工程学院材料与化工学院)

摘 要 对比研究了真空压铸中低真空(20~30 kPa)与高真空(<5 kPa)对 AE44 镁合金副车架铸件外观与内部品质的影响。结果表明,与低真空压铸相比,高真空压铸能够显著减少镁合金副车架表面压铸流痕、冷隔以及内部的气孔类缺陷、提高镁合金副车架本体试样的室温塑性和抗拉强度及其致密度,并降低孔隙率,其中铸件本体试样室温伸长率增幅接近 50%,平均密度提高了0.51%,孔隙率均值下降了 0.50%。压铸中采用高真空(<5 kPa)能够有效地提高镁合金副车架的致密度,从而显著提高铸件的抗拉强度和伸长率。

关键词 镁合金;副车架;真空压铸;伸长率;密度

中图分类号 TG249.2;TG146.22;TP311 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.01.018 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Vacuum Level on Appearance and Internal Quality of Die Cast Mg Subframe

Fu Penghuai¹, Sun Qicai¹, Wang Jiacheng¹, Li Dejiang¹, Wang Zezhong², Zhao Zhengjiang², Zhou Li², Zhu Shengli³, Ding Shengchang³, Liu Xilin³, Hu Guoqi⁴, Bao Mingdong⁴, Peng Liming¹
(1. National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University; 2. Technology Center of Dongfeng Automobile Company;
3. Fengyang Light Alloy Net Forming National Engineering Research Center Co., Ltd.;
4. School of Materials and Chemical Engineering, Ningbo University of Technology)

Abstract: The effects of vacuum level on the appearance and internal quality of die cast AE44 Mg subframe castings were investigated. The results show that compared with low vacuum (20~30 kPa), high vacuum (<5 kPa) can significantly reduce the flow marks/cold shuts on the surface of castings and the gas hole defects in the castings, improve the elongation and tensile strength at room temperature, increase the density and reduce the porosity of the castings. The elongation of the magnesium alloy subframe is increased about 50%, and the average density is improved by 0.51% with the average porosity decreased by 0.50%. High vacuum die casting (vacuum level <5 kPa) can effectively improve the density of Mg subframe castings, which further significantly improves their tensile strength and elongation.

Key Words: Mg Alloy, Subframe, Vacuum Die Casting, Elongation, Density

压铸具有生产效率高、尺寸精度高、铸件显微组织细小、力学性能较好,能生产薄壁、形状复杂的铸件等特点,得到了广泛应用。常规压铸件内部气孔较多,严重影响了压铸件的内部品质,进而限制了其应用范围。真空压铸通过在压铸过程中抽除型腔内的气体而消除或显著减少压铸件内的气孔,从而提高了压铸件力学性能和表面品质,极大拓展了压铸工艺的应用范围。目前应用于汽车上对强度和塑性要求较高的铝合金、镁合金零件基本上都是采用真空压铸生产,如减震塔^[1,2]、离合器壳体^[3]、变速箱中间板^[4]、缸盖^[5]、散热器^[6]等。

汽车轻量化是降低能源消耗、减少污染物排放最有效的措施之一。近年来,随着汽车产量的持续增加,面

收稿日期:2022-03-24;修改稿收到日期:2022-05-20
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB3701003, 2016YFB0301002);国家自然科学基金资助项目(51821001, U21A2048);宁波市科技创新2025 重大专项资助项目(2019B10102);广东省重点领域研发计划资助项目(2020B010186001)
第一作者简介:付彭怀,男,1980 年出生,副研究员,上海(200204),E-mail: fph112sjtu@sjtu.edu.cn
引用格式:付彭怀,孙启才,王嘉诚,等. 真空度对真空压铸镁合金副车架品质的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(1):88-91.
FU P H, SUN Q C, WANG J C, et al. Effects of vacuum level on appearance and internal quality of die cast Mg subframe[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(1):88-91.

面临的能耗、安全、环保等问题日益突出,汽车轻量化已成为推动汽车工业可持续发展、提高汽车燃油经济性、减少汽车尾气排放的重要手段。镁合金兼具比强度和比刚度、减振性能好、电磁屏蔽、导热性能优良等特点,成为汽车轻量化技术的重要发展方向^[7~10]。有研究表明,采用镁合金代替铝合金制备汽车座椅座盆、发动机油底壳、发动机气门室罩、变速器左箱体端盖、变速器左箱体、变速器右箱体等部件,可分别实现减重 31.8%、33.3%、37.4%、37.1%、37.0%、36.8%,轻量化效果显著^[11]。为了进一步推动镁合金的应用,开展了镁合金副车架铸件的结构设计、模具设计与压铸试验、台架试验等研究,以探讨镁合金在汽车大型薄壁结构件上应用的可行性。本课题主要讨论真空压铸工艺中真空度对镁合金汽车副车架铸件外观与内部品质的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验方法

镁合金汽车副车架铸件外形尺寸为 920 mm×510 mm×170 mm,质量为 5.83 kg,相对于钢制结构件减重 61.9%。副车架铸件总体呈工字型,为上下表面加强筋结构,最大壁厚与最小壁厚之比为 5.5 : 1,薄壁区域主体壁厚为 5 mm、局部壁厚为 4 mm。镁合金副车架的浇注系统设计见图 1。压铸工艺参数采用正交试验通过仿真获得^[12],压铸试验在伊之密 45 000 kN 卧式压铸机上进行,具体工艺参数见表 1。

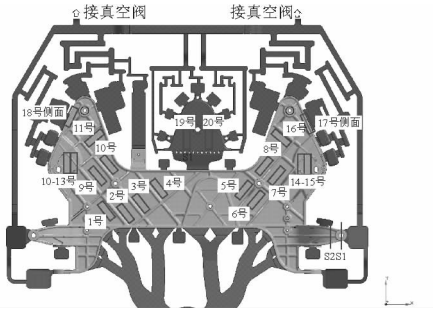


图 1 镁合金副车架浇注系统设计与力学性能取样位置示意图
Fig.1 Gating system design of Mg subframe and the locations of tensile samples

表 1 镁合金副车架压铸工艺参数

Tab.1 Die casting process parameters of Mg subframe				
模具温度/℃	浇注温度/℃	冲头速率/(m·s ⁻¹)	增压压力/MPa	型腔真空度/kPa
约 250	695~705	5*	50	20~30 kPa,<5 kPa

注: * 计算机仿真^[12]的优化压铸工艺为 7 m/s,但实际压铸时,冲头速率最高仅能达到 4.79~5.17 m/s。

为了提高压铸件的内部品质,在镁合金熔体充型前对其进行抽真空,对比研究高真空(<5 kPa)与低真空(30 kPa)对副车架铸件外观品质和内部品质、力学性能

的影响。真空由真空阀通过冲头位置进行控制,压室总长度为 1 050 mm,抽真空开始与结束的位置分别为 330 mm 和 830 mm,冲头起高速的位置为 850 mm。压室内的真空度变化曲线见图 2。压铸合金为 AE44 镁合金,其化学成分见表 2,镁合金熔体通过定量炉浇注。

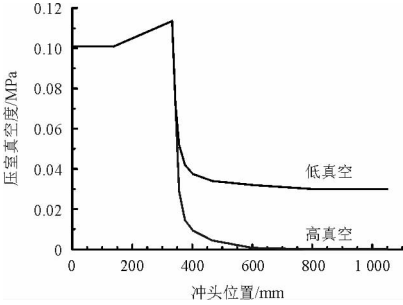


图 2 副车架真空压铸时冲头位置与型腔真空度的变化
Fig.2 Variation curves of punch position with vacuum level in the chamber during the vacuum die casting process of Mg subframe casting

表 2 AE44 镁合金的化学成分

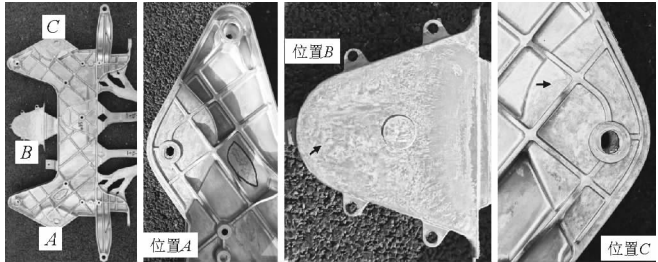
Tab.2 Chemical compositions of AE44 Mg alloy							%
ω_B							
RE(La,Ce)	Al	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Mg
4.06	4.21	0.39	0.024	0.001 3	0.001 4	0.001 3	余量

通过 XG-160ST/C X 射线观察镁合金副车架铸件的内部品质,X 射线缺陷分辨率为 0.2 mm;采用 Zwick/Z100 力学试验机测试铸件不同位置的力学性能,拉伸试样为矩形试样,标距尺寸为 15 mm×3.5 mm×2 mm;通过阿基米德排水法测量试样的密度,孔隙率根据密度换算而成: $P_{孔}=(\rho_{max}-\rho)/\rho_{max}$,其中 ρ_{max} 为密度最大值; ρ 为实际密度。力学性能试样取样位置见图 1。

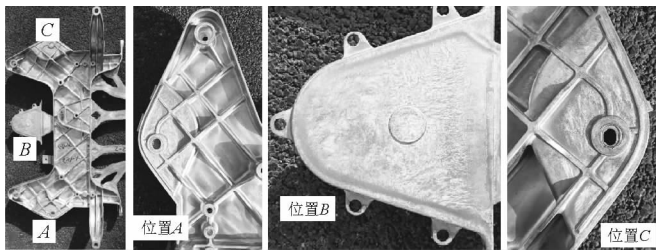
2 试验结果分析

2.1 外观形貌与内部品质

镁合金副车架低真空与高真空压铸件表面形貌分别见图 3 和图 4。由图 3a 和图 4a 可以看出,铸件外观总体良好,距离内浇口较近的位置,铸件表面比较光亮,而远离内浇口的铸件表面流痕比较明显,见图 3b~图



(a) 整体 (b) A 位置 (c) B 位置 (d) C 位置
图 3 低真空镁合金副车架压铸件外观形貌
Fig.3 Morphologies of low vacuum die cast AE44 Mg subframe



(a) 整体 (b) A 位置 (c) B 位置 (d) C 位置

图 4 高真空镁合金副车架压铸件外观形貌

Fig.4 Images of high vacuum die cast AE44 Mg subframe 3d 和图 4b~图 4d。与高真空压铸件相比,低真空压铸件表面的冷隔更加明显,见图 3c 和图 3d 中的箭头处,即提高真空度能够明显减轻铸件表面流痕,特别是铸件表面冷隔类缺陷。

图 5 为镁合金副车架低真空与高真空压铸件 X 射线照片。从图 5b 可以看出,高真空副车架压铸件内部品质优良,未发现 $>200\ \mu\text{m}$ 的孔洞类铸造缺陷,而低真空时,副车架压铸件在铸件远端滑块处发现细小气孔,见图 5a 中的局部放大图。因此,提高真空度能够明显降低铸件内部的气孔,显著减少了铸件远端处的气孔。

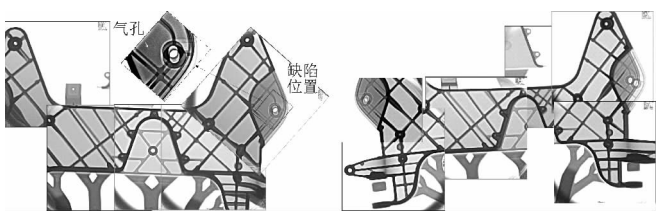
表 3 镁合金副车架不同部位室温力学性能、密度、孔隙率

Tab.3 Mechanical properties, densities and porosities of samples taking from the different parts of Mg subframe at room temperature

编号	低真空					高真空				
	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙率/%	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙率/%
1	134.71	247.68	11.08	1.799	0.50	139.98	249.78	13.94	1.796	0.66
2	136.03	226.12	6.53	1.789	1.05	—	237.84	—	1.795	0.72
3	151.62	250.81	8.93	1.796	0.66	138.21	252.43	14.38	1.793	0.83
4	139.42	238.09	10.38	1.785	1.27	121.17	250.66	13.66	1.808	0.00
5	120.37	246.12	13.12	1.801	0.39	135.80	247.60	12.89	1.795	0.72
6	149.24	230.05	6.02	1.742	3.65	143.45	249.86	12.52	1.766	2.32
7	121.15	226.78	8.23	1.788	1.11	129.10	242.33	13.65	1.794	0.77
8	133.26	244.63	10.61	1.797	0.61	144.32	250.88	11.67	1.796	0.66
9	143.22	247.08	10.11	1.789	1.05	142.98	252.01	13.97	1.795	0.72
10	139.22	196.59	4.22	1.772	1.99	144.10	247.89	9.68	1.796	0.66
11	139.86	243.18	10.07	1.795	0.72	139.84	249.17	13.40	1.789	1.05
12	130.28	200.28	5.53	1.753	3.04	125.76	245.65	14.43	1.789	1.05
13	129.20	212.22	6.12	1.764	2.43	133.84	245.40	16.29	1.785	1.27
14	133.49	154.85	1.27	1.765	2.38	136.43	231.55	8.91	1.793	0.83
15	133.36	203.07	5.08	1.764	2.43	140.71	250.47	15.81	1.788	1.11
16	132.73	230.41	8.22	1.792	0.88	118.77	251.17	13.60	1.788	1.11
17	136.24	249.66	15.35	1.794	0.77	126.38	215.31	8.01	1.793	0.83
18	144.70	231.54	7.65	1.802	0.33	125.85	222.28	7.72	1.789	1.05
19	138.56	234.32	9.52	1.771	2.05	144.94	252.59	13.64	1.777	1.71
20	134.93	230.74	9.14	1.77	2.10	127.15	231.88	8.37	1.783	1.38
平均	136.08	227.21	8.36	1.781	1.47	134.67	243.84	12.45	1.790	0.97

提高最为显著,增幅接近 50%,即高真空能够显著提高镁合金铸件的塑性;孔隙率绝对值下降 0.50%,降幅为 33.83%。

副车架室温力学性能与密度之间的对应关系见图 6。可以看出,室温抗拉强度(σ_b)与伸长率(δ)和密度之



(a) 低真空 (b) 高真空

图 5 镁合金副车架铸件 X 射线照片

Fig.5 X-ray images of Mg subframe castings

2.2 室温力学性能

镁合金副车架铸件不同位置室温力学性能、密度、孔隙率见表 3。可以看出,高真空压铸件的平均室温屈服强度为 134.67 MPa、抗拉强度为 243.84 MPa、伸长率为 12.45%;平均密度为 1.790 g/cm³,平均孔隙率为 0.97%。低真空压铸件的平均室温屈服强度为 136.08 MPa、抗拉强度为 227.21 MPa、伸长率为 8.36%;平均密度为 1.781 g/cm³,平均孔隙率为 1.47%。与低真空压铸相比,高真空压铸条件下,副车架屈服强度稍有下降(— 1.03%),抗拉强度(+ 7.32%)、伸长率(+ 48.93%)、密度(+ 0.51%)均明显提升,其中伸长率

间呈一定相关性:即抗拉强度与伸长率随着密度的增加呈明显的上升关系,但屈服强度($\sigma_{0.2}$)和密度相关性较差:随着密度增加,屈服强度变化不明显^[12]。因此,提高铸件密度能够有效提高铸件室温抗拉强度和塑性,但对提高屈服强度作用并不明显。总体而言,高真空对铸

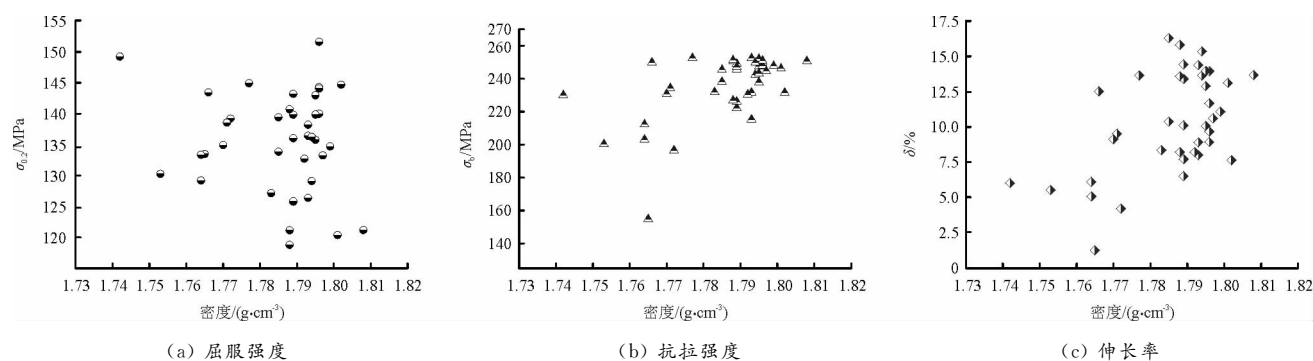


图6 AE44 镁合金副车架室温力学性能与密度之间的对应关系

Fig.6 Relationship between the mechanical properties and the densities of AE44 Mg subframe at room temperature

件力学性能的提升作用可以解释为:高真空有效提高了AE44 镁合金副车架铸件的致密度,从而显著提高了铸件的抗拉强度和伸长率,而对铸件屈服强度无明显影响。

3 结 论

(1) 采用真空压铸技术能够制备出外观品质和内部品质良好的 AE44 镁合金副车架铸件,但即使真空压铸中真空气度<5 kPa,镁合金副车架远离浇口部位铸件表面压铸流痕仍然比较明显。

(2) 与低真空压铸相比,高真空压铸能够显著减少 AE44 镁合金副车架表面压铸流痕、冷隔和铸件内部的气孔类缺陷,提高镁合金副车架本体取样的室温塑性(其中室温塑性增幅接近 50%)和抗拉强度,提高铸件的致密度(平均密度增幅为 0.51%),降低铸件孔隙率(孔隙率均值降低 0.50%)。

(3) 镁合金副车架本体力学性能与密度的对应关系表明,提高铸件密度能够显著提高铸件室温抗拉强度与塑性,但屈服强度与铸件密度的相关性较低。真空压铸中采用高真空措施能够有效提高镁合金副车架铸件致密度,从而显著提高铸件的抗拉强度和伸长率。

参 考 文 献

- [1] 刘付曙,廖仲杰,陈国恩,等. 高真空压铸减震塔铸件力学性能的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(2): 246-248.
- [2] 聂小勇,杨海,李慎国,等. 真空压铸铝合金减震塔在铝车身上的应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(3): 286-290.
- [3] 李建宇,管胜敏,吴树森,等. 大型复杂离合器壳体高致密化压铸[J]. 铸造, 2020, 69(11): 1 198-1 202.
- [4] 安肇勇,黄志垣,陆淳佳. 缸盖罩高真空压铸工艺与普通排气块压铸工艺分析[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(12): 1 312-1 315.
- [5] 李文巧,袁海波,马溶,等. 高强韧铝硅合金变速箱中间板铸件热处理工艺研究[J]. 铸造, 2019, 68(12): 1 382-1 386.
- [6] 陈思涛. 真空气度对镁合金散热器压铸件性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42(1): 116-118.
- [7] 范叶,杨沿平,孟立春,等. 汽车轻量化技术及其实施途径[J]. 汽车工业研究, 2006(7): 40-42.

- [8] 潘复生,王敬丰,章宗和,等. 中国镁工业发展的机遇、挑战和责任[J]. 中国金属通报, 2008(2): 6-14.
- [9] 付彭怀,彭立明,丁文江. 汽车轻量化技术:铝/镁合金及其成型技术发展动态[J]. 中国工程科学, 2018, 20(1): 84-90.
- [10] 郭径,叶兵,吴玉娟,等. 高强韧压铸镁合金的研究现状和发展趋势[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(3): 254-260.
- [11] 刘波,黎予生,李晓青,等. 长安汽车镁合金技术研究与应用进展[J]. 汽车工艺与材料, 2012(1): 17-21.
- [12] 付彭怀,丁浩源,李德江,等. 镁合金副车架压铸过程计算机仿真与工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(2): 231-235.

(编辑:张正贺)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志,是中国科学技术协会主管,中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区九万方路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

