

压铸铝合金技术标准现状及应用

尤 畅

(辽宁地质工程职业学院, 辽宁丹东 118000)

摘要: 综述了中外压铸铝合金材料标准体系的现状与发展。通过对比分析国外(如IS、EN、ASTM、JIS)与中国标准体系差异,剖析了标准协同化发展的路径与挑战,展望了压铸铝合金未来研发的重点方向以及技术发展趋势,旨在为推动压铸铝合金材料及产业的标准化、高质量发展提供参考。

关键词: 压铸铝合金; 标准体系; 标准化; 标准

1 概述

在2060碳中和目标驱动下,汽车等交通领域正加速实施节能减排(Energy Conservation and Emission Reduction, ECER)战略。铝合金凭借其低密度、高比强度及成本优势,成为汽车轻量化的理想材料。《中国制造2025》重点领域技术创新绿皮书^[1]中明确提出:到2025年乘用车新车平均油耗低于4 L/100 km,代表性的轻量化零部件占市场的20%;轻量化材料在新能源车上的应用率达到30%以上。加大轻量化材料在制造设备上的应用,不仅符合我国的战略需求,也是汽车行业未来发展的重要方向。

汽车轻量化主要通过结构优化设计和轻合金材料代替协同实现。铝合金因综合性能优异成为汽车轻量化核心材料。行业预测,全球铝合金应用规模将持续扩张,2029年将增加至7 800万吨^[2],中国汽车行业的用铝量将从2018年的380万吨增加到2030年的910万吨^[3],在全球范围内,汽车用铝合金材料的用量也在不断增加。据统计,北美每辆车的铝合金平均质量预计将从2020年的208 kg增加到2030年的258.5 kg。我国每辆车的铝合金平均质量预计将从2019年的110 kg预计增至2030年的242 kg^[4],压铸铝合金产业具有广阔的发展空间,但国外标准体系、技术要求方面存在差异。同类牌号合金材料呈现出性能要求差异,导致部分国家合金材料难以满足国际车企对关键性能指标的技术要求,增加了全球汽车供应链整合的技术障碍,以及标准理解偏差引发的国际贸易纠纷。目前,国外标准主要以国际标准(IS)、美国ASTM标准、欧洲标准(EN)及日本工业标准(JIS)为核心,本文对比分析中外压铸铝合金标准体系、标准发展路径与挑战,旨在为后续开发高性能、低成本压铸铝合金及先进的工艺提供参考,推动我国铝合金压铸产业发展。

2 压铸铝合金国内外标准现状

全球压铸铝合金技术标准体系主要由国际标准(IS)、美国材料与试验协会标准(ASTM标准)、日本工业标准(JIS)和欧洲标准(EN)等构建,为全球压铸铝合金生产提供技术规范和评价依据。通过对比分析IS、ASTM标准、JIS、EN与中国标准(GB)之间的差异,分析中外标准体系的发展现状与技术发展趋势,探讨中国标准体系的未来方向与标准化实施路径。中外铝合金压铸标准体系框架结构如图1所示。

作者简介:

尤畅(1980-),女,副教授,工程硕士,主要从事材料成形CAD设计、CAE分析。电话:18641524609, E-mail: youch80@163.com

中图分类号: TG249.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)09-1301-08

收稿日期:

2025-06-26 收到初稿。

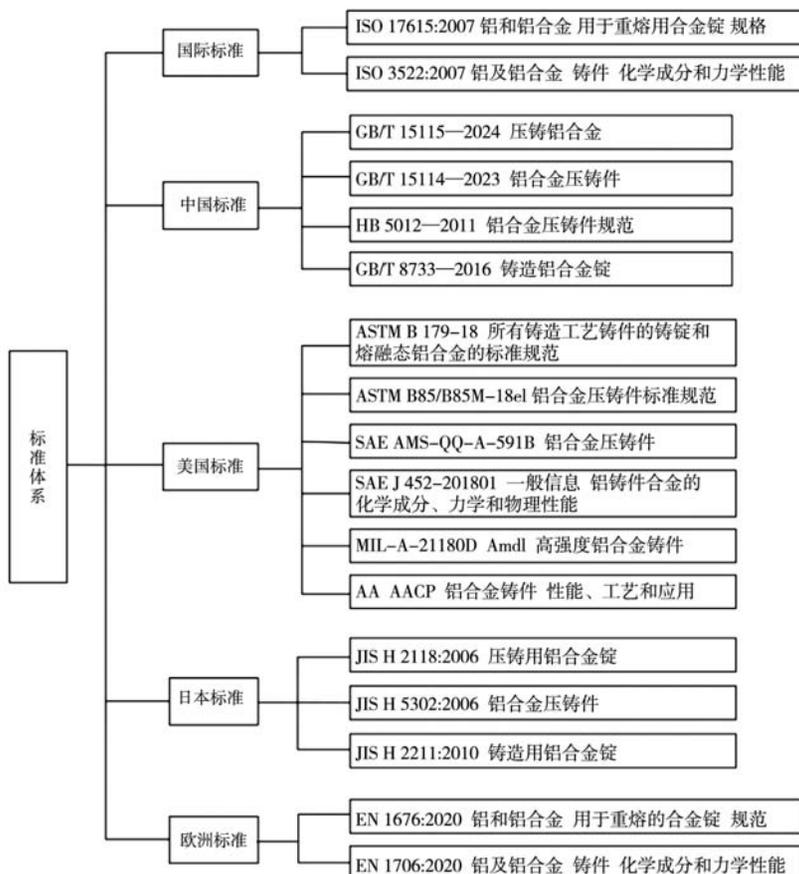


图1 中外压铸铝合金标准体系框架图

Fig. 1 Framework diagram of Chinese and foreign die-casting aluminum alloy standard systems

2.1 国际标准体系

压铸铝合金材料及铸件国际标准由ISO/TC 79/SC 7（铝及铸造铝合金分会）负责制修订，该组织制定的国际标准为全球铝铸件（包括压铸件）的生产、检测与贸易提供了基础性规范。核心标准主要包括：

ISO 17615: 2007《铝和铝合金 重熔用合金锭规范》规定了用于熔炼铸造铝合金（含压铸合金）的原料——重熔用合金锭的质量要求，涵盖等级划分、命名规则、生产工艺条件、关键特性指标及标识方法。

ISO 3522: 2007《铝和铝合金 铸件 化学成分和力学性能》为铸造铝合金材料的通用基础类标准，规定了各种铸造方法（包含压铸）生产的铝铸件的化学成分要求。同时，该标准还明确了使用单铸试棒测试时不同铸造合金应达到的力学性能指标（如抗拉强度、屈服强度和伸长率）。

2.2 美国标准体系

美国标准体系以市场化需求为导向，其核心原则是服务产业应用。美国国家标准学会（ANSI）作为非营利性机构，既非政府组织亦非标准制定实体，其核心职能在于协调、促进和推动美国自愿性共识标准体

系的发展。ANSI通过认证合格的标准制定组织及其标准制定程序，并最终批准为美国国家标准（ANS）。ANSI认可的重要材料标准制定机构包括美国材料与试验协会（ASTM）、美国力学工程师协会（ASME）、国际自动机工程师学会（SAE International）、美国宇航材料规范（AMS）制定机构以及美国钢铁协会（AISI）等。

压铸铝合金材料及产品标准相关的标准包括ASTM B 85/85M-e1《铝合金压铸件标准规范》、ASTM B 179-18《所有铸造工艺铸件用铝合金锭和熔融铝合金标准规范》、SAE J 452-201801《一般信息 铝铸件合金的化学成分、力学和物理性能》及SAE AMS-QQ-A-591B《铝合金压铸件》（默认使用冷室压铸机工艺）。

在合金应用方面，ASTM标准体系主导美国市场^[5]，A380合金及其衍生牌号（如A383、A384）占据约85%的铝合金压铸件产量。其余约15%主要由A360、A390、A413以及少量A443、A518等合金生产。ASTM中压铸铝合金标准适用于汽车零部件等一般用途，SAE标准适用于高负载或安全关键领域（如航空航天）。

2.3 日本标准体系

日本工业标准（JIS）是日本压铸铝合金领域的主

要规范体系，其核心标准包括JIS H 2118: 2006《压铸用铝合金锭》、JIS H 5302: 2006《铝合金压铸件》及JIS H 2211: 2010《铸造用铝合金锭》。JIS压铸铝合金标准的发展历程深受工艺演进和应用需求影响。一方面，随着冷室压铸机在日本的广泛应用，该工艺能更有效地控制铁(Fe)等杂质元素的含量，JIS标准对合金体系进行了精简。将原压铸铝合金牌号类别从早期的13种显著减少至当前的7种，目前合金类别及应用见表1^[6]。另一方面，与国际标准接轨以及适应本土资源条件的双重考量。早期借鉴美国标准，仅对个别合金种类进行了小幅删减和调整。后续修订则以IS为基础，JIS H 5302: 2006等同采用了ISO 3522: 2006中的

5个合金系列，即Al-Si系[AlSi9与AlSi12(Fe)]，Al-Si-Mg系[AlSi10Mg(Fe)]，Al-Si-Cu系[AlSi8Cu3、AlSi9Cu3(Fe)、AlSi9Cu3(Fe)(Zn)、AlSi11Cu2(Fe)、AlSi11Cu3(Fe)、AlSi12Cu1(Fe)]，Al-Si-Cu-Mg系(AlSi17Cu4Mg)以及Al-Mg系(AlMg9)，共11个合金牌号，不加修改的引入JIS标准中。同时，出于资源节约战略考虑，日本对标准进行了本土化调整，在确保性能的前提下，适度放宽了部分杂质元素的含量上限，以充分利用日本国内较丰富的资源。减少了稀缺合金元素的使用量。例如，锡(Sn)含量的上限从0.3%修改为0.2%。力学性能调整：伴随化学成分的调整，对相应合金的力学性

表1 JIS压铸铝合金代号及特点
Tab. 1 JIS designations and characteristics of die-cast aluminium alloy

| 代号 | 合金系 | 合金特点 |
|--------|--------------|-----------------------------------|
| ADC1 | Al-Si系 | 耐腐蚀性、铸造性好，耐力稍低 |
| ADC3 | Al-Si-Mg系 | 冲击性及耐力高，耐腐蚀性大体上与ADC1相同，铸造性比ADC1稍差 |
| ADC5 | Al-Mg系 | 耐腐蚀性最好，伸缩性、冲击值高，但铸造性相对较差 |
| ADC6 | Al-Mg-Mn系 | 耐腐蚀性略低于ADC5，铸造性则优于ADC5 |
| ADC10 | Al-Si-Cu系 | 力学性能、切削性、铸造性方面均表现优异 |
| ADC10Z | Al-Si-Cu系 | 相较于ADC10，其耐铸造，裂纹及耐腐蚀性相对较差。 |
| ADC12 | Al-Si-Cu系 | 力学性能、切削性、铸造性方面均表现优异 |
| ADC12Z | Al-Si-Cu系 | 耐铸造，裂纹及耐腐蚀性略低于ADC12 |
| ADC14 | Al-Si-Cu-Mg系 | 耐磨损性好，流动性好，耐力高，伸缩性较弱 |

能指标也进行了修订。

2.4 欧洲标准体系

欧洲压铸铝合金标准体系以欧洲标准(EN)为核心，由欧洲标准化委员会(CEN)下属的CEN/TC 132“铝和铝合金”技术委员会负责起草与修订。该体系较为成熟完整，不仅规定了压铸铝合金的化学成分、力学性能等基本要求，还纳入了环保、安全等方面的考量。为促进欧洲统一市场的便利性，欧盟成员国国家标准(如德国标准协会的DIN标准)逐步被协调为EN标准。EN标准具有德、英、法三语为官方版本，由CEN成员国负责翻译。

压铸铝合金的核心欧洲标准包括EN 1676: 2020《铝和铝合金 重熔用合金锭 规范》和EN 1706: 2020《铝和铝合金 铸件 化学成分和物理性能》。其中，EN 1706: 2020前身为德国标准DIN 1725-2: 1943《铝合金、铸造合金、砂型铸件、金属型铸件、压铸件、精密铸件力学和物理性能的基本说明和铸造技术说明》，该标准后被CEN采用并修订为EN 1706: 1998，并最终演变为现行版本。EN 1676: 2020《铝和铝合金 重熔用合金锭 规范》则规定了熔炼用合金铝锭等级的要求，涵盖了这些等级的分类与命名、生

产条件、有害元素限值、性能以及标识。

EN 1706: 2020规定了铸造铝合金的化学成分限值，以及这些合金的单铸试棒的力学性能要求，并提供了特定用途或工艺合金选用指南。该标准可与EN 576、EN 1559-1、EN 1559-4、EN 1676和ISO 8062-3协同配套使用。

EN 1676: 2020技术特点主要体现在：材料需要符合循环经济原则，如EN AC-46000(Al-Si-Cu系)合金通过限制有害元素(如Pb、Cd)，推动再生铝应用。同时在检测方面，该标准引用ASTM E 505射线图谱标准作为内部缺陷验收依据，促进跨国技术衔接。

2.5 中国标准体系

中国压铸铝合金标准体系以GB/T 15115—2024《压铸铝合金》、GB/T 15114—2023《铝合金压铸件》及HB 5012—2011《铝合金压铸件规范》为核心，结合GB/T 8733—2016《铸造铝合金锭》共同构成技术框架。该体系覆盖材料牌号分类、化学成分控制、力学性能指标、铸造工艺要求及质量检验方法，为压铸铝合金生产与应用提供规范。

GB/T 15115—2024《压铸铝合金》规定压铸铝合金的化学成分，GB/T 15114—2023《铝合金压铸件》

则详细规定了铝合金压铸件的化学成分、力学性能、尺寸及内外表面质量等技术要求。HB 5012—2011作为航空行业标准，对铝合金压铸件提出了特定要求。GB/T 8733—2016规范了铸造用铝合金锭的要求。

我国标准体系涵盖了Al-Si系、Al-Si-Mg系、Al-Si-Cu系及Al-Mg四个主要合金系列，各合金特点及应用见表2^[7]。其中，YL113合金要求严格控制其Fe含量（≤0.5%），杂质容忍度低。其通过高硅含量（9.6%~12.0%）优化铸造性能，该合金对标美国383、日本ADC12。YL113单铸试棒抗拉强度的抗拉强度≥230 MPa，伸长率≥1%。YL101/YL102分别转化自ASTM A360.0/A413.1。在产业化应用方面，A356（Al-Si-Mg系）、380（Al-Si-Cu系）铝合金锭，伴随压铸设备的推广应用，在汽车及摩托车轮毂制造领域得到广泛应用。YZAlSi10MnMg（Al-Si-Mg-Mn系）实现高强韧化，真空压铸下屈服强度≥180 MPa（较传统合金提升30%），T6热处理后伸长率≥8%，应用于汽车安保结构件的制造。

过去三十年，全球压铸铝合金标准体系呈现出技术相似的特征。欧美国家凭借先发优势，通过“技术专利化—专利标准化—标准国际化”的路径，构建了以ISO、ASTM、EN、JIS为主导的全球标准体系。而我国压铸铝合金标准体系主要以跟随和转化ASTM、ISO、EN、JIS为主，在系统顶层设计方面存在不足。

尤其在新型高强韧、轻量化合金的牌号开发及其标准化方面滞后，技术创新与标准化进程方面也相对滞后。相较于在标准化领域长期占据主导地位的发达国家，中国标准的整体竞争力仍有待提升。

3 压铸铝合金国内外标准技术差异分析

3.1 牌号

中外标准牌号均依据主要合金元素，形成Al-Si、Al-Mg、Al-Cu及Al-Zn四大基础系列。

（1）国际标准。在国际标准中，压铸铝合金牌号由基体金属的元素符号、合金元素符号及名义百分含量值和添加元素符号及名义百分含量值组成。

（2）中国国家标准。我国国家标准牌号采用“YL+元素符号及其百分含量”命名规则，元素体系与17615:2007趋同。

（3）美国的标准。以美国ASTM标准为例，压铸铝合金标准采用3××、4××、5××数字编码分别对应Al-Si-Cu/Mg系、Al-Si系及Al-Mg系合金。

（4）日本标准。在JIS标准中，压铸铝合金牌号由材料类别代号A、压铸代号D及种类号组成。如ADC3铝合金是在Al-Si合金添加Mg及Fe等合金元素，AD12合金是在Al-Si合金添加Cu元素。

表2 压铸铝合金特点及应用举例
Tab. 2 Characteristics and typical applications of die-cast aluminium alloy

| 合金系 | 牌号 | 代号 | 合金特点 | 应用举例 |
|-----------|---------------|-------|--|--|
| Al-Si系 | YZAlSi12 | YL102 | 共晶铝硅合金。具有较好的抗热裂性能和很好的气密性，以及很好的流动性，不能热处理强化，抗拉强度低 | 用于承受低负荷、形状复杂的薄壁铸件，如各种仪壳体、汽车机匣、牙科设备、活塞等 |
| | YZAlSi12Fe | YL118 | | |
| Al-Si-Mg系 | YZAlSi10Mg | YL101 | 亚共晶铝硅合金。较好的抗腐蚀性能，较高的冲击韧性和屈服强度，但铸造性能稍差 | 汽车车轮罩、副车架、车身后/后纵梁、减震塔、摩托车曲轴箱、自行车车轮、船外机螺旋桨等 |
| | YZAlSi10 | YL104 | | |
| | YZAlSi10MnMg | YL119 | | |
| | YZAlSi7MnMg | YL120 | | |
| Al-Si-Cu系 | YZAlSi9Cu4 | YL112 | 具有好的铸造性能和力学性能，很好的流动性、气密性和抗热裂性，较好的力学性能、切削加工性、抛光性和铸造性能 | 常用作齿轮箱、空冷气缸头、发动机机座、割草机罩子、气动刹车、汽车发动机零件，摩托车缓冲器、发动机零件及箱体，农机具用箱体、缸盖和缸体，3C产品壳体，电动工具、缝纫机零件、渔具、煤气用具、电梯零件等、YL112的典型用途为带轮、活塞和气缸头等 |
| | YZAlSi11Cu3 | YL113 | 过共晶铝硅合金。具有很好的流动性、中等的气密性和较好的抗热裂性，特别是具有高的耐磨性和低的热膨胀系数 | 主要用于发动机机体、刹车块、带轮、泵和其他要求耐磨的零件 |
| | YZAlSi17Cu5Mg | YL117 | | |
| Al-Mg系 | YZAlMg5Si1 | YL302 | 耐蚀性能强，冲击韧性高，伸长率差，铸造性能差 | 汽车变速器的油泵壳体，摩托车的衬垫和车架的联结器，农机具的连杆、船外机螺旋桨、钓鱼竿及其卷线筒等零件 |

(5) 欧洲标准。EN标准使用两种命名系统，一种是符号命名系统，由基体金属的元素符号、合金元素符号及名义百分含量值和添加元素符号及名义百分含量值组成。另一种是EN 1780-1: 2002数字编号系统，由代表组别号及类别号的数字组成，如43×××为AlSi10Mg系，46×××为AlSi9Cu系，47×××为AlSi(Cu)系，51×××为AlMg系。

各国标准普遍依据主要合金元素进行分类，GB、ISO、ASTM、EN和JIS压铸铝合金牌号对照表见表3^[6-10]。但在具体化学成分，特别是杂质元素限值(如Fe)及元素测试方法等方面，存在显著差异，影响合金性能及应用场景。以“AlSi9Cu3(Fe)、A380.1、EN AB-46000”三种合金为例进行对比分析，见表4。

表3 GB, ISO, ASTM, EN和JIS压铸铝合金牌号
Tab. 3 GB, ISO, ASTM, EN and JIS designation

| GB/T 15115—2024 | ISO 17615: 2007 (E) | ASTM B 179-18 | EN 1676: 2020 | JIS H 2118: 2006 |
|-----------------|---------------------|---------------|---------------|------------------|
| YZAlSi10Mg | AlSi10Mg (Fe) | A360.1 | EN AB-43400 | AD3.1 |
| YZAlSi10MnMg | - | 365.0* | EN AB-43500 | ACA.2* |
| YZAlSi9Cu4 | AlSi9Cu3 (Fe) (Zn) | E380.1,383.1 | EN AB-46500 | AD10Z.1 |
| - | AlSi9Cu3 (Fe) | A380.1 | EN AB-46000 | AD10.1 |
| YZAlSi11Cu3 | AlSi11Cu3 (Fe) | 383.1 | EN AB-46100 | AD12.1 |
| | | 390 | - | AD14Z |
| YZAlSi17Cu5Mg | AlSi17Cu4Mg | B390.0 | - | AD14.1 |
| | | 413 | | AD1 |
| YZAlSi12 | AlSi12Cu1 (Fe) | A413.0 | EN AB-47100 | AD1 |
| YZAlSi12Fe | AlSi12 (Fe) | - | EN AB 44300 | AD AlSi12 (Fe) |
| | | 516.1 | | AD6 |
| YZAlMg5Si1 | AlMg5Si | - | EN AB 51400 | AlMg5Si1 |
| | AlMg9 | 518.0 | EN AB-51200 | ADAlMg9 |

*注: ACA.2为Al-Si-Cu系(属砂型/金属型铸造合金,非压铸专用)。

表4 对典型的三种压铸铝合金化学成分对比
Tab. 4 Chemical compositions of three typical die-cast aluminium alloy

| 合金 | Mg | Si | Fe | Mn | Cr | Ti | Cu | Ni | Zn | Sn |
|---------------|-----------|----------|----------|-----------|------|------|---------|------|-----|------|
| AlSi9Cu3 (Fe) | 0.1~0.5 | 8.0~11.0 | 1.30 | 0.20~0.55 | 0.15 | 0.25 | 2.0~4.0 | 0.5 | 1.2 | 0.25 |
| A380.1 | 0.10 | 7.5~9.5 | 1.0 | 0.5 | - | - | 3.0~4.0 | - | 2.9 | 0.35 |
| EN AB-46000 | 0.15~0.55 | 8.0~11.0 | 0.6~1.10 | 0.55 | 0.15 | 0.20 | 2.0~4.0 | 0.55 | 1.2 | 0.15 |

关键元素控制差异分析:

(1) Fe元素。AlSi9Cu3(Fe)合金中允许Fe元素上限1.30%，利用Fe元素减少粘模，A380.1中Fe≤1.0%，EN标准规定EN AB-46000合金中Fe含量为0.6%~1.10%，范围更窄，旨在平衡成分和性能。

(2) Cr元素。AlSi9Cu3(Fe)和EN AB-46000中允许Cr≤0.15%，而A380.1中不主动添加Cr，这其实反映了工艺路线的区别，Cr能细化富铁相但增加成本，北美优先考虑经济性，欧洲则侧重性能优化。

(3) Zn元素。AlSi9Cu3(Fe)和EN AB-46000中Zn≤1.2，而ASTM A380.1合金中Zn≤2.9，Zn元素添加会产生时效，影响合金组织，ISO与EN标准通过控制Zn元素含量，减少时效后的尺寸不稳定性，而ASTM则通过Zn元素添加，提高耐腐蚀性。

(4) Mg元素。AlSi9Cu3(Fe)中高镁含量0.1%~0.5%，平衡强度与铸造性；A380.1合金中超低镁含量，上限为0.01%，通过牺牲强度换取最佳流动性；

EN AB-46000中高镁含量0.15%~0.55%，通过Mg₂Si相强化，获得较好的力学性能。

(5) Fe/Mn比。AlSi9Cu3(Fe)合金低Mn/Fe比(0.15~0.42)，关键相组成以β-Fe(Al₃FeSi)为主，伸长率相对较低。

A380.1合金中等Mn/Fe比(≤0.5)，合金相为针状β-Fe相与α-Fe(Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂)混合，中等伸长率。

EN AB-46000合金高Mn/Fe(0.5~0.92)，具有最佳的成分设计，通过Mn精准控制Fe相形态，合金相以α-Fe(Al₁₅(Fe, Mn)₃Si₂)相为主，伸长率达6%~8%，较A380.1显著提升。

合金成分直接决定其服役性能与适用场景，综合来看，AlSi9Cu3(Fe)适用于中等强度的压铸件，EN AB-46000合金相较于AlSi9Cu3(Fe)力学性能良好，更适用于高强汽车电机壳体等，而A380.1更适用于腐蚀环境船用铸件。

3.2 表面质量

IS、GB、ASTM标准、EN标准及JIS标准均按照材料标准、产品标准制定，产品标准中规定压铸件性能，包括力学性能、尺寸公差、表面质量等。材料标准中规定铝锭/熔体质量，GB/T 15115—2024、ISO 17615: 2007、ASTM B 179-18、EN 1676: 2020、JIS H 2118: 2006均对表面质量提出严格要求，压铸铝合金熔体液面外观应清洁，无明显熔渣及非金属漂浮物，锭材表面应无污染物，如油脂、污垢、腐蚀产物、熔渣滓或任何其他异物（标记用油漆除外）等。其中，GB/T 15115—2024额外规定合金锭断口组织，要求断口组织致密，无严重偏析、缩孔、熔渣及非金属夹杂物，且对合金夹杂渣进行量化控制。各国对于合金锭质量及熔体质量等关键技术指标上呈现相似性。

3.3 应用

随着压铸技术革新、材料性能提升及工艺优化，铸件从功能件逐步扩展到结构件，并向一体化压铸件发展，其应用场景从单一功能需求向一体化应用拓宽。

(1) 功能件应用。早期压铸技术主要应用于小型功能件的生产，以满足密封性、导电性或耐磨性等性能要求，典型产品包括发动机缸体、阀门壳体等。这类部件对材料的流动性、气密性及加工性能要求较高，因此主要采用Al-Si-Cu系合金，如欧洲标准中的EN AC-46000，控制Fe含量 $\leq 1.0\text{wt.}\%$ 以抑制 $\beta\text{-Al}_3\text{FeSi}$ 脆性相，结合真空压铸，更好地控制孔隙率，提高密封性，多应用于德系和法系等欧洲车厂中。北美车企广泛采用ASTM B85标准中的383牌号合金，即AlSi9Cu3(Fe)系列，而日韩系车企以ADC12或AlSi9Cu3(Fe)为主；国内自主品牌车厂同时采用国外标准材料和GB/T 15115标准的Y112或Y113牌号。对于压铸铝缸体的材料均为Al-Si-Cu系的AlSi9Cu3(Fe)合金，仅在个别元素的使用范围上存在微小差异。各国汽车制造商基本采用本国标准的材料牌号。

(2) 结构件应用。在汽车轻量化趋势推动下，压铸铝合金结构件（如减震塔、电池托盘、车门框架）应用日益广泛。与功能件相比较，结构件对材料的强度、伸长率及疲劳性能提出更高要求，为满足这些要求，国内外普遍采用Al-Si-Mg系（Silafont 36/38），及Al-Si系（YL104、Aural-2）合金。

表5列出了常用的Al-Si系压铸铝合金结构件合金牌号^[11-14]。这些合金共性特点为Si含量为8.5%~11.5%，与EN AB-43500标准牌号呈现显著相似性。这几类合金技术路线主要在标准限定的元素框架内，通过细化成分与工艺创新来提升合金性能。以Silafont 36合金为例，其通过将Fe含量严格控制在约0.15%（较标准限值降低25%），并优化Mn/Fe比，通过析出汉字状、星

状或多面体状的 $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ ^[15]相，减少或抑制针状或薄片状的 $\beta\text{-Al}_3\text{FeSi}$ 相形成，使其伸长率提升至8%~11%，远高于标准要求的5%。添加Mg元素 $\leq 0.5\text{wt.}\%$ ，在凝固初期形成 Mg_2Si 析出相，通过基体弥散强化提高合金硬度及耐磨性^[16]，使布氏硬度提高至HBW 75~95（标准要求为HBW 65）。Silafont 36合金最显著的特点为低成本设计，未添加贵金属，但同时保障了良好的力学性能与铸造工艺性，在大规模工业化应用中具有显著的经济性优势。

其他高强韧合金（如Silafont 38、Aural系列等）则在标准牌号基础上，进一步添加微量Sr元素（含量范围0.01%~0.1%）进行变质处理，促进Si相球化，球状Si相有效地阻碍晶界移动和位错滑移，提高合金强度、断裂韧性、热膨胀性能及加工性能^[17]。同时，引入TiB₂细化剂，作为异质形核基底，促进晶核形成，细化晶粒，提高合金的强度、韧性，并减少铸件中的缺陷^[18]。

汽车轻量化驱动结构件性能不断提升，新一代标准呈现“成分精细化—组织均匀化—工艺稳定化”特征。如表5所示，主流Al-Si系结构件合金通过Mn/Fe比调控（最佳值0.6~0.8）实现 $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_3$ 相占比 $>85\%$ ，提升材料伸长率。

一体化压铸件应用。当前，一体化铸件主要应用于后地板、前舱及电池托盘等大型部件。一体化压铸技术对于合金材料强韧性、流动性、填充性能提出更高要求，免热处理材料作为关键环节之一。目前免热处理合金材料主要包括Al-Si系及Al-Mg系材料。

Al-Si系合金又分为非热处理强化的Al-Si-Mg系（如Silafont-36和Silafont-38），Al-Si-Mg-Mn系（Aural-3/5），Al-Si-X系（如JDA1x）以及Al-Si-Cu系（A380）；此外还包括非热处理的Al-Si系合金（如Castasil-37），非热处理合金不含Mg、Cu元素，且热处理后性能变化不明显。

Al-Mg系包括：C446F、Magsimal-59、Magsimal-Plus、Castaduct-18、Castaduct-42、Thermodur-72、Tesla alloys、EZCast-NHT及Al-Mg-X系（JDA2x）等。这些免热处理合金的具体化学成分及力学性能见表6^[19-20]。

从功能件到一体化铸件，技术发展更新围绕“更高性能、更低成本、更优集成”目标展开。我国目前仍面临挑战，欧美企业对于Al-Si系压铸铝合金及其工艺研究较早，并通过早期研发优势构建了完善的知识产权壁垒，如德国RHEINFELDEN公司开发Silafont 36/38，加拿大铝业开发的Aural 2/3系列，美国铝业生产的Alcoa EZCast-NHT A152等合金，其专利覆盖合金成分设计及核心工艺技术等多个方面。我国虽然已通过开发JDA1、JDA2和Al-Si-Mn-Mg-Re、THAS、纤晶等合金，但对低成本高性能合金研发方面仍存在较广阔的空间。

表5 压铸铝合金结构件的化学成分及力学性能
Tab. 5 Chemical compositions and mechanical properties of die-cast aluminium alloy for structural components

| 合金 | 化学成分(质量分数)/% | | | | | | | | 力学性能 | | | |
|----------------|--------------|----------|----------|-----------|-----------|-------|------------|--------|-------|----------|----------|--------|
| | Mg | Si | Fe | Mn | Ti | Cu | Sr | 其他 | 热处理状态 | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 伸长率/% |
| Silafont 36 | 0.1~0.5 | 9.5~11.5 | <0.15 | <0.8 | 0.04~0.15 | <0.03 | - | | T5 | 155~245 | 275~340 | 4~9 |
| | | | | | | | | | T6 | 210~280 | 290~340 | 7.1~10 |
| Aural 2 | 0.27~0.33 | 9.5~11.5 | 0.15~0.2 | 0.45~0.55 | <0.08 | <0.03 | 0.01~0.016 | <0.03 | F | 140 | 310 | ~8.6 |
| | | | | | | | | | T5 | 189~230 | 303~339 | 8~9 |
| Aural 3 | 0.4~0.6 | 9.5~11.5 | 0.15~0.2 | 0.45~0.55 | <0.08 | <0.03 | 0.01~0.16 | <0.03 | F | 130~160 | 250~310 | 4~8 |
| | | | | | | | | | T5 | 190~240 | 300~340 | 4~6.5 |
| Mercalloy A368 | 0.1~0.3 | 8.5~9.5 | <0.25 | 0.25~0.35 | <0.2 | <0.25 | 0.05~0.07 | Zn<0.1 | F | 125~140 | 260~275 | 10~12 |
| | | | | | | | | | T6 | 185~200 | 280~295 | 14~18 |
| Mercalloy A367 | 0.3~0.5 | 8.5~9.5 | <0.25 | 0.25~0.35 | <0.2 | | 0.05~0.07 | <0.05 | F | 115 | 270 | 8.1 |
| | | | | | | | | | T5 | 170~205 | 295~310 | 5~9 |
| | | | | | | | | | T6 | 135~250 | 195~300 | 7~16 |

从上述压铸铝合金应用发展可以看出,压铸铝合金的技术进步与标准体系的完善协同发展,这种相互作用主要体现在两方面。一方面,标准对技术发展的引领作用,合金元素含量严格要求促进原料与工艺升级,如YL119、EN AB-43500中要求Fe≤0.20%,促使生产企业采用高纯铝锭或铝液作为原料,并促进过滤工艺改进以满足标准要求;另一方面,技术创新促进

标准更新完善,如早期Silafont 36合金的开发,推动其被纳入到EN标准中,如我国在一体化压铸技术领域的突破,推动免热处理材料的研发及优化,促进了GB/T 15115标准中免热处理合金牌号的补充。这种“标准引领—技术创新—标准更新”的循环,已成为推动压铸行业发展的关键动力。

表6 典型的免热处理压铸铝合金化学成分及力学性能
Tab. 6 Chemical compositions and mechanical properties of typical non-treated die-cast aluminium alloy

| 合金 | 化学成分(质量分数)/% | | | | | | | | | 力学性能 | | | |
|------------------|--------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------------|--------|----------|----------|-------|
| | Mg | Si | Fe | Mn | Ti | Cu | Zn | Sr | 其他 | 热处理状态 | 屈服强度/MPa | 抗拉强度/MPa | 伸长率/% |
| Castasil 37 | <0.06 | 8.5~10.5 | <0.15 | 0.35~0.60 | <0.2 | <0.05 | | 0.006~0.025 | Zr, 0.1~0.3 | F | 120~150 | 230~300 | 10~14 |
| JDA1 | 0.25~0.5 | 8.5~11.5 | - | 0.1~0.8 | 0.15~0.35 | 0.5~3.0 | - | - | P, RE | F | 170~200 | 300~340 | 6~10 |
| Silafont 36 | 0.1~0.5 | 9.5~11.5 | <0.15 | <0.80 | 0.04~0.15 | <0.03 | 0.10~0.40 | | | F | 120~150 | 250~290 | 5~11 |
| Thermodur-73 | 1.8~2.3 | 10.0~12.0 | <0.15 | <0.40 | 0.10 | 2.0~2.3 | 0.10 | | Ni | F | 130~155 | 250~280 | 1~2 |
| JDA1 | 0.25~0.5 | 8.5~11.5 | - | 0.1~0.8 | 0.15~0.35 | 0.5~3.0 | | - | P, RE | F | 170~200 | 300~340 | 6~10 |
| Aural 3 | 0.4~0.6 | 9.5~11.5 | 0.15~0.2 | 0.45~0.55 | <0.08 | <0.03 | | 0.01~0.16 | <0.03 | F | 130~160 | 250~310 | 4~8 |
| Aural 5 | 0.15 | 9.5~11.5 | 0.15~0.2 | 0.30~0.70 | 0.04~0.15 | 0.02 | | | | F | 190~240 | 300~340 | 4~6.5 |
| C611 | 0.15~0.3 | 6.0~9.0 | 0.15 | 0.40~0.80 | | - | - | 0.01~0.03 | - | F | 123 | 268 | 16.2 |
| Tesla alloys | 0.15~0.4 | 6.0~11.0 | 0.50 | 0.35~0.80 | 0.15 | 0.30~0.80 | - | 0.015~0.05 | Cr | F | 120~200 | - | - |
| C446F | 2.8~3.6 | 0.25 | 0.20 | 1.1~1.4 | 0.15 | - | 0.05 | - | - | HPDC-F | 150~156 | 195~300 | 17~23 |
| Castaduct-42 | 4.1~1.5 | 0.25 | 1.5~1.7 | 0.15 | 0.20 | 0.20 | 0.30 | | Be,Cr | HPDC-F | 200~220 | 245~265 | 11~16 |
| EZCast-NHT | 1.2~1.6 | 3(4) | - | - | - | - | - | - | - | F | 142~150 | 267~283 | 14~17 |
| SITU-Al-Mg-Si-Mn | 5.5~7.5 | 2.0 | 0.15 | 0.60~0.90 | 0.15~0.20 | 0.1~0.5 | 0.10~0.20 | | Be, V, Ca, Zr, Re | HPDC-F | 180~220 | 360~400 | 10~15 |
| Magsimal-59 | 5.0~6.0 | 1.8~2.6 | 0.20 | 0.50~0.80 | 0.20 | 0.03 | 0.07 | | Be | HPDC-F | 125~135 | 310~340 | 12~18 |
| Magsimal-plus | 6.0~6.4 | 2.1~2.6 | 0.20 | 0.50~0.80 | 0.20 | 0.03 | 0.07 | | Be | HPDC-F | 160~220 | 340~360 | 9~12 |

注:表格中“空格”表示该合金含有此元素但具体含量未确定;“-”表示该合金不含此元素。

4 展望

随着欧盟碳边境调节机制已将压铸件碳足迹纳入核算体系,标准从单纯的技术规范向绿色贸易通行证转型,技术标准与贸易规则融合趋势显著。我国压铸

行业未来发展应重点关注以下方向。

(1) 循环经济与低碳发展:优化合金成分设计,降低对高价元素的依赖;聚焦于二次合金开发与使用,提高免热处理合金杂质容忍度,朝工艺废料100%

回用方向发展;构建覆盖设计—制造—回收的全生命周期碳管理系统,建立符合国际上通用的碳足迹核算方法,以满足国际绿色贸易规则要求。

(2) 推动多工艺融合与优化:持续推进真空压铸技术迭代,开发增材制造—压铸复合工艺、半固态/触

变成形等先进工艺组合。

(3) 智能化升级:推动AI、SMART与数字孪生技术等压铸装备中的集成应用,实现工艺参数实时优化与质量控制。

参考文献:

- [1] 国家制造强国建设战略咨询委员会.《中国制造2025》重点领域技术创新绿皮书[M].北京:电子工业出版社,2016.
- [2] Worldwide aluminum consumption forecast 2029 [EB/OL]. <https://www.statista.com/statistics/863681/global-aluminum-consumption>.
- [3] 国际铝协发布《中国汽车工业用铝量评估报告(2016—2030)》未来再生铝的总消费量将显著增加[J].资源再生,2019(9):24-27.
- [4] DuckerFrontier. 2020 North America Light Vehicle Aluminum Content and Outlook [R]. Final Report Summary, 2020.
- [5] ASTM. Standard specification for aluminum-alloys die castings: ASTM B 85/85M-18 [S]. United States: 2018.
- [6] JIS.ダイカスト用アルミニウム合金地金: JIS H 2118; 2006 [S]. Japan: 2006.
- [7] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.压铸铝合金:GB/T 15115—2024 [S].北京:中国标准出版社,2024.
- [8] ISO. Aluminium and aluminium alloys — alloyed ingots for remelting — specifications: ISO 17615: 2007 [S]. Switzerland: 2007.
- [9] ASTM. Standard specification for aluminum alloys in ingot and molten forms for castings from all casting processes: ASTM B 179-18 [S]. United States: 2018.
- [10] CEN. Aluminium and aluminium alloys — alloyed ingots for remelting — specifications: EN 1676: 2020 [S]. Brussels: 2020.
- [11] 袁灵洋.非热处理高强韧压铸铝合金材料研究进展及其在汽车结构件中的应用[R].合肥:中国机械工程学会铸造分会,铸造行业生产力促进中心,2022.
- [12] RHEINFELDEN. Silafont®~an infinite wealth of properties [EB/OL]. <https://rheinfelden-alloys.eu/en/alloys/silafont/>.
- [13] LUO A, SACHDEV A, APELIAN D. Alloy development and process innovations for light metals casting [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2022. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2022.117606.
- [14] WIESNER S, KLOS R, ANTHONY V, et al. 2017. New DEvelopments in HP-DC alloy for structural castings [R]. 2017 Die Casting Congress & Exposition. North American Die Casting Association, Arlington Heights, IL, USA.
- [15] IVANA Švecová, EVA Tillová, LENKA Kuchariková, et al. Possibilities of predicting undesirable iron intermetallic phases in secondary Al-alloys [J]. Transportation Research Procedia, 2021, 55: 797-804.
- [16] ALHAWARI K S, OMAR M Z, GHAZALI M J, et al. Microstructural evolution during semisolid processing of Al-Si-Cu alloy with different Mg contents [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(7): 1483-1497.
- [17] 孙文扬. Sr变质对ZL105合金组织和力学性能的影响[J].铸造技术,2021,42(6):456-459.
- [18] ZHANG L L, JIANG H X, HE J, et al. Kinetic behaviour of TiB₂ particles in Al melt and their effect on grain refinement of aluminium alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(8): 2035-2044.
- [19] 黄华,但昭学,朱宇,等.一体化压铸免热处理铝合金研究进展[J].特种铸造及有色合金,2024,44(8):1054-1061.
- [20] 段宏强,韩志勇,王斌.汽车结构件用非热处理压铸铝合金研究进展[J].汽车工艺与材料,2022(5):1-6.

Current Status and Industrial Implementation of International and Chinese Standards for Die-Cast Aluminum Alloys

YOU Chang

(Liaoning Geology Engineering Vocational College, Dandong 118000, Liaoning, China)

Abstract:

This paper reviews the current status and development of the global standard systems for die-cast aluminum alloys. Through a comparative analysis of differences between international standards (IS, EN, ASTM, JIS) and China's GB system, it examines harmonization approaches and challenges, identifies key research directions, and discusses technological development trends. The paper aims to serve as a reference for advancing the process of standardization and high-quality development of die-cast aluminum materials and related industries.

Key words:

die-cast aluminum alloys; standard system; standardization; standard