

国内外镁合金铸件射线照相 检测验收标准对比

丁方政¹, 胡可加²

(1. 空装驻北京地区第六军事代表室, 北京 100041; 2. 河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定 072750)

摘要: 国内标准主要以铸件应用行业来划分, 国外ASTM标准及AMS标准则主要以铸造成形方式以及合金成分来划分。在验收方式上, 国内标准普遍采用混合方式验收, 采用定量计算法评定气孔和夹渣类缺陷, 采用图谱对比法评定疏松和偏析缺陷; 国外标准采用图谱对比法进行所有缺陷的验收。不同标准在偏析缺陷的验收等级设置上具有一致性, 但在个别偏析缺陷的验收等级上存在较大分歧。不同偏析成分的底片影像显示不同, 不含锆镁合金的偏析缺陷显示与ASTM E155标准底片的显示存在差异。

关键词: 镁合金; 铸件; 射线检测; 验收标准

相比于铝合金, 镁合金具有密度小和比强度高的特点, 同等体积的镁合金零件质量比铝合金零件轻约三分之一, 因此镁合金在航空航天领域的应用具有重要意义。商用飞机与汽车减重相同质量带来的燃油费用节省, 前者是后者的近100倍, 而战斗机的燃油费用节省又是商用飞机的近10倍, 更重要的是其机动性能改善可极大提高其战斗力和生存能力^[1]。与此同时, 航空航天的工作场景要求镁合金产品具有优异的冶金质量, 受制于现阶段的熔炼水平及合金特性, 无法完全消除铸件的冶金缺陷, 因此无损检测就显得至关重要。

航空工业普遍采用五大常规方法进行无损检测, 其中超声检测和射线检测用于检测铸件的内部质量。由于超声检测的检测效果受铸件结构限制, 且检测结果不直观, 结合有色铸件冶金缺陷的特点, 国内外行业往往选择射线检测方法发现有色铸件内部缺陷, 避免不合格品流出。

本文对国内外的镁合金铸件射线照相检测的验收标准进行梳理, 结合实际生产检验过程的应用情景, 对比几种常见的验收标准, 为产品设计制定出完善的验收方案提供参考。

1 镁合金铸件内部缺陷及标准底片

1.1 缺陷类型及底片形貌

射线检测的原理即射线能量在穿过物体时, 由于不同物质或相同物质的不同厚度产生不同衰减, 这种衰减在胶片上形成影像, 从而反映出物体的内部情况。铸件内部缺陷的底片显示形貌多种多样, 镁合金铸件常见的内部缺陷有气孔、外来物夹杂、显微疏松、裂纹和偏析等^[2-4]。

在底片的显示上, 气孔为轮廓明显的圆形暗点, 单独或成组出现。

外来物夹杂可根据底片显示黑度分为低密夹杂和高密夹杂, 呈现出暗色或亮色的不规则形态显示。根据夹杂物不同, 又可分为熔剂夹杂、含锆氧化物夹杂和反应性夹砂。

熔剂夹杂一般呈现出白色圆形或雪花片状或小点状^[5]。根据相关研究, 熔剂夹

作者简介:

丁方政(1983-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为铝航空材料研究。E-mail: 121162098@qq.com

中图分类号: TG146.2;
TG115.22

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)
02-0246-06

收稿日期:

2024-10-31 收到初稿,
2024-12-04 收到修订稿。

杂在内部时,可当作一般孔洞处理,但由于熔剂夹杂的成分在接触空气时,会发生链式反应不断腐蚀铸件本体,因此必须将暴露在铸件表面的熔剂夹杂清除干净^[6]。含锆氧化物夹杂呈现出为不规则形态的亮点显示。反应性夹砂的轮廓分明,形状为中心暗淡的亮点。

显微疏松呈现出暗色显示,根据形态分为条状疏松和云状疏松,亦可称为羽毛状疏松和海绵状疏松。

裂纹呈现出弯曲和不规则形状的暗色线条。

偏析根据其形成机制分为比重偏析与共晶偏析,共晶偏析又分为显微疏松型偏析、热裂型偏析、流线型偏析和缩管型偏析。比重偏析为雪花状的密集亮区。显微疏松型偏析与羽毛状显微疏松形态一致,其本身是由高密度金属液填充疏松缺陷造成的,呈现出亮色显示。热裂型偏析为亮色线条,流线型偏析为暗色扩散状的线条,缩管型偏析呈现亮色树枝状。

1.2 镁合金铸件标准底片

由于铸造缺陷存在无法量化的类型,如疏松、偏析和针孔等,为了能够评定此类缺陷,相应的标准底片必不可少。关于镁合金标准底片,国内制定有HB 967—1970《ZM-5镁合金显微疏松X光透视分级标准》。该标准底片根据形态差异,将显微疏松分为“条状”和“云状”两种,被许多国内镁合金铸件规范引用,用以评估显微疏松缺陷。

美国材料试验协会ASTM制定的ASTM E155-20《铝、镁铸件检验用标准参考射线底片》是目前为止针对铝、镁合金铸件最权威的标准底片,其中包含14张镁合金铸件标准底片,缺陷类型涉及气孔、外来物夹杂、显微疏松和偏析等9种缺陷。为满足需要,我国制定了HB 6578—1992《铝、镁合金铸件检验用标准参考射线底片》等效采用该标准底片。

另外,ASTM为铝、镁压铸件制定了ASTM E505-22《铝、镁压铸件检验用标准参考射线底片》,其中镁合金压铸件缺陷涉及针孔、冷填充、缩松和外来物等4种缺陷。该标准中的镁合金标准底片被GB/T 25747—2022《镁合金压铸件》所采用^[7-8]。

在数字标准图像方面,ASTM制定了ASTM E2869-17《镁铸件标准数字参考图像》及ASTM E2973-22《铝、镁压铸件检验用标准数字参考图像》,前者图像是ASTM E155中镁合金铸件标准底片的数字化,后者是ASTM E505-22的数字化,数字图像呈现的缺陷形貌与标准底片完全一致,但在标准说明上增加了数字图像的使用要求^[9-10]。

2 国内外镁合金铸件射线照相检测验收标准概况

2.1 国内射线验收标准

射线检测标准通常不包含对产品验收的内容,仅对射线照相检测过程的控制及射线底片的质量提出要求。一般而言,铸件的检验及验收要求由设计图纸和技术协议规定。与铝合金的情况一致^[11],当前国内外少有专用的镁合金铸件射线验收标准。

由于不同材质铸件的冶金缺陷呈现出差异的形态,其验收标准必须按材质分类,通常情况下无法混用。国内外镁合金铸件的射线检测验收规范,基本被包含进铸件规范之中,数量颇多,国内标准主要按行业进行划分,有航空标准、航天标准和国家推荐标准,除此之外还存在大量的企标,以及专用的型号标准。表1列出了国内常见的镁合金铸件规范^[12-18]。

表1 国内常见的镁合金铸件规范
Tab. 1 Common specifications for domestic magnesium alloy castings

序号	标准号及名称
1	HB 7780—2005 镁合金铸件规范
2	QJ 168—1985 镁合金铸件技术条件
3	QJ 2526—1993 差压铸造镁合金铸件技术条件
4	GB/T 13820—2018 镁合金铸件
5	GB/T 26649—2011 镁合金汽车车轮铸件
6	GB/T 26650—2011 摩托车和电动自行车用镁合金车轮铸件
7	GB/T 25747—2022 镁合金压铸铸件

2.2 国外 ASTM 系列射线验收标准

国外镁合金铸件标准主要以美国材料试验协会的ASTM标准以及美国汽车工程师协会SAE的AMS标准为主。镁合金铸件根据成形方式可分为砂型铸造、熔模铸造、压力铸造、金属型铸造和离心铸造等,ASTM按成形方式对镁合金铸件标准进行分类。表2列出了几种ASTM的镁合金铸件规范^[19-22]。

表2 ASTM的镁合金铸件规范
Tab. 2 ASTM magnesium alloy casting specifications

序号	标准号及名称
1	ASTM B80-23 镁合金砂型铸件标准规范
2	ASTM B94-18 镁合金压铸铸件标准规范
3	ASTM B199-17 镁合金永久型铸件标准规范
4	ASTM B403-20 镁合金熔模铸件标准规范

ASTM的镁合金铸件标准中,除ASTM B94采用ASTM E505标准底片之外,其余均采用ASTM E155。除此之外,ASTM B80及ASTM B199提供了可供参考的内部质量验收等级要求,且两者验收等级要求完全一致,而ASTM B94、ASTM B403则表明验收等级要求由客户与制造商商定。

2.3 国外 AMS 系列射线验收标准

美国汽车工程师协会SAE的宇航材料标准AMS基本由美国军用标准转化而成,据统计,标准号段AMS 4350-4490为镁合金相关标准,共计113种,涉及35种镁合金材料牌号^[23]。相较于ASTM标准,AMS标准的镁合金铸件标准分类不仅区分铸造成形方式,还区分合金成分以及热处理状态。

AMS的镁合金铸件规范分类极其细致,内部质量

验收基本上参照AMS2175进行,并采用ASTM E155标准底片。AMS2 175B-2024《铸件的分类和检验》是航空航天领域中的一重要标准,在2003年代替AMS-STD-2175,其前身为美国军用标准MIL-STD-2175^[24]。该标准在检测方法上涵盖了目视检查、磁粉检测、渗透检测、射线检测;适用于除高压压铸外的所有铸造方式;适用铸件材质包括铝、镁、钛、铜合金铸件及钢铸件。

3 国内外镁合金铸件射线照相检测验收标准对比

3.1 射线检测适用性对比

国内外镁合金铸件规范射线检测适用性上存在不少差异,对比项目见表3。

表3 镁合金铸件标准的射线检测适用性对比
Tab. 3 Comparison of radiographic testing applicability of magnesium alloy casting standards

序号	标准	成形方式	参考底片	适用厚度	质量分级	检测要求	验收方式
1	HB 7780—2005	砂型和金属型	HB 967、HB 6578	未要求	按类别分为三类	按HB/Z 60进行	气孔和夹渣采用定量计算法,疏松和偏析采用图谱对比法
2	QJ168—1985	砂型和金属型	HB 967	未要求	按类别分为三类	按HB/Z 60-81进行	气孔和夹渣采用定量计算法,疏松采用图谱对比法
3	GB/T 13820—2018	砂型和金属型	HB 6578	≤50 mm	按类别分为三类	按GB/T 19943或HB/Z 60进行	1、气孔和夹渣采用定量计算法,疏松采用图谱对比法 2、图谱对比法
4	ASTM B80—23	砂型	ASTM E155	≤50 mm	按等级分为四等	按ASTM E94进行	气孔、疏松和外来物夹杂采用图谱对比法,未包含偏析要求
5	ASTM B403—20	熔模型	ASTM E155	未要求	未规定	按ASTM E94进行	未指定验收方式及要求
6	AMS2175B—2024	除高压压铸外的所有铸造方式	ASTM E155	≤50mm	按等级分为四等	按ASTM E1742进行	对所有缺陷采用图谱对比法

在标准修订方面,国外ASTM标准及AMS标准发布后基本上每5年修订一次,如不修订,也需重新认定,该模式保证了标准的时效性及适用性。国内标准则无固定的修订周期要求,如航天标准QJ 168—1985仍处于现行有效状态。

在质量分级方面,国内标准按铸件重要程度分为Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ三类,以该类别确定铸件的检测频率以及验收等级。国外AMS 2175对铸件既分类别也分级别,类别用于确定检测频率,级别确定验收等级。

在验收方式上,国内标准具有相当高的一致性,普遍采用混合方式验收,对气孔和夹渣采用定量计算法,无法量化的缺陷采用标准底片进行比对验收。国外标准采用的ASTM E155标准底片包含的缺陷种类更加全面,因此可以按图谱对比法进行所有缺陷的验

收,且标准底片中对射线检测的适用厚度进行了规定。

国内外镁合金铸件射线检测验收标准各有特点,评定方式之间无优劣之分,定量计算法无需标准底片参考,但疏松和偏析缺陷无法定量评定。图谱对比法能够对所有缺陷进行评级,但仍存在一定不足,评定无法量化的缺陷,即使参考标准底片,也存在一定程度的主观判断。

值得注意的是,GB/T 13820—2018包含了两种验收方式,既包含了国内标准的混合验收方法,同时在其附录A中包含另外一种图谱对比法的验收方式,采用HB 6578(等效于ASTM E155)标准底片,确定铸件等级。

对于显微疏松缺陷的验收上,HB 7780—2005、

QJ 168—1985要求参考HB 967—70标准底片, GB/T 13820—2018要求参考HB 6578标准底片, 但在验收等级上仍采用HB 967—70的分组方式以及级别设置, 如表4所示。HB 6578的显微疏松标准底片使用的标准板

表4 GB/T 13820—2018铸件显微疏松X射线检测验收标准
Tab. 4 GB/T 13820—2018 acceptance criteria for microshrinkage X-ray testing of castings

铸件级别	探伤部位	验收级别/级		
		第一组 ^a	第二组 ^a	第三组 ^a
I	指定部位	≤2	≤2	≤1
	非指定部位	≤3	≤3	≤2
II	指定部位	≤3	≤3	≤2

注: a壁厚≤30 mm; b壁厚≤30 mm; c壁厚>30 mm。

厚仅有6.35 mm及19.05 mm两种, 适用的厚度分别为≤12 mm和>12~50 mm; 而HB 967—70适用的厚度分成了三组: ≤10 mm、>10~20 mm、>20~30 mm。为了满足搭配需要, GB/T 13820—2018额外在验收等级上注明前两组适用壁厚≤30 mm, 第三组适用壁厚>30 mm。

3.2 偏析验收级别对比

在HB 6578标准制定后, 赵志远对国内外铝、镁合金铸件标准底片进行了缺陷及验收标准对比分析^[25]。随着该标准的推广应用, 国内的镁合金铸件规范, 如HB 7780—2005、GB/T 13820—2018等, 均参考该标准底片, 增加对偏析缺陷的验收要求。由于评定偏析缺陷采用的参考底片一致, 因此可对不同标准之间的偏析验收级别进行对比分析, 见表5。

表5 镁合金铸件标准的偏析验收级别对比
Tab.5 Comparison of segregation acceptance levels for magnesium alloy castings standard

缺陷类型	GB/T 13820—2018				HB 7780—2005			AMS 2175B-2024			
	A级	B级	C级	D级	I类指定部位	I类非指定部位 和II类指定部位	III类	A级	B级	C级	D级
流线型共晶偏析 ^c	无	a	a	b	a	a	b	无	与插图尺寸相同	插图尺寸的两倍	任意长度[1]
热裂型共晶偏析 ^c	无	a	a	b	a	a	b	无	与插图尺寸相同	与插图尺寸相同	插图尺寸的两倍
缩管型共晶偏析 ^c	无	无	a	a	c	c	b	无	无	无	插图尺寸的1/3
显微疏松型共晶偏析 ^c	1	2	3	5	2	3	4	无	4	5	6
比重偏析 ^c	1	1	2	3	1	2	3	1	2	3	4
反应性夹砂	1	3	4	6	2	3	4	1	3	4	6

a允许达到X射线底片显示量的一半。

b允许达到X射线底片显示量。

c评定含铝合金的偏析。评定含Al、

Zn合金的偏析为: A级/无; B级/无;

C级/1; D级/1。

a允许达到X射线照相显示量的一半。

b允许。

c不允许。

1.不允许在类似于参考射线底片插图尺寸的区域中包含其他类型的不连续。

总体上而言, 在偏析缺陷的验收等级设置上, HB 7780—2005的I、II和III三类基本对应另外两种标准的B级、C级和D级, 这种对应关系同样体现在疏松缺陷的验收上。验收标准反映了不同偏析缺陷类型对铸件性能的影响程度, 缩管型共晶偏析对铸件的力学性能影响较大, 因此三种标准均严格限制该类缺陷的验收。

除缩管型共晶偏析之外, AMS 2175对偏析缺陷的验收要求较另外两个标准来说更低, 对于流线型共晶

偏析、热裂型共晶偏析和比重偏析, 约低一个等级; 对于显微疏松型共晶偏析, 约低两个等级。由此可见, 国内外标准对显微疏松型共晶偏析的危害程度存在分歧, 国内对该缺陷的验收相对保守。

GB/T 13820—2018对几种偏析缺陷的验收等级进行了注释, 表示表格中的验收等级仅针对含铝合金的偏析。当评定含Al、Zn合金的偏析时验收等级为: A级/无; B级/无; C级/1; D级/1。镁合金牌号众多, 成分组合复杂多样, 不同成分的镁合金产生的偏析成分

也存在差异,以比重偏析为例,在Mg-Zn-Zr合金中是Zn-Zr化合物;在Mg-Al合金中是Mn化合物^[26]。根据射线检测原理,不同成分的物质具有不同程度的线衰减系数,在底片上的影像显示也必然不同,ASTM E155以EZ33A合金试板制作共晶偏析标准底片,以ZK91合金试板制作比重偏析标准底片,两种材质均为含锆合金。当镁合金铸件材质不含锆时,偏析缺陷影像显示则与标准底片不完全一致。

4 展望

射线检测分为胶片检测与数字射线检测(Digital Radiography,简称DR检测),本文介绍的相关标准均属于胶片检测技术。近年来DR检测技术日渐完善,在部分产品的检测上已经达到了与胶片法相同的灵敏度,被普遍认为将要取代胶片检测。然而在航空航天产品实际生产过程中,DR检测大部分应用于过程检测。

无损检测质量控制得严谨,检测方法标准与质量管理标准紧密相关,检测要求的提出均应以技术文件

形式确定。尽管DR检测的相关标准并不少见,更有相应的数字标准底片,而现有的航空航天产品图纸技术文件在射线检测方法选择上仍以胶片法为主,究其原因,是当前铸件规范中缺少对DR检测技术的支持,这是国内外铸件规范标准进一步完善的方向。

5 结论

综上所述,通过对国内外镁合金铸件射线照相检测验收标准的对比,可以发现标准之间的划分方式不同、验收方式不同、偏析验收级别设置存在差异。当前国内外镁合金铸件射线照相检测验收标准基本上涵盖了所有缺陷类型,无论是采用定量计算及图谱对比的混合方式,还是仅采用图谱对比的方式,其最终目的均是实现对镁合金铸件冶金缺陷的有效控制。同时,由于不同偏析成分的底片影像显示不同,不含锆镁合金的偏析缺陷难以对应上ASTM E155标准底片的显示,因此在产品科研试验阶段应考虑这种情况,从而制定出完善的验收标准。

参考文献:

- [1] 丁文江. 镁合金科学与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 365-371.
- [2] ASTM International. ASTM E155-20 Standard reference radiographs for inspection of aluminum and magnesium castings [S]. United States: 2020.
- [3] 中华人民共和国航空航天工业部. HB 6578—92 铝、镁合金铸件检验用标准参考射线底片 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [4] 中华人民共和国航空航天工业部. HB 967—70 ZM-5 镁合金显微疏松X光透视分级标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1970.
- [5] 邓加贤. 铸造镁合金溶剂夹渣X光无损探伤的表象浅探 [J]. 新疆有色金属, 2023, 46(4): 47-48.
- [6] 张绍兴, 朱德云. 含锆铸造镁合金的夹杂物及偏析 [J]. 特种铸造及有色合金, 1983(3): 56-60.
- [7] ASTM International. ASTM E505-22 Standard reference radiographs for inspection of aluminum and magnesium die castings [S]. United States: 2022.
- [8] 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. GB/T 25747—2022 镁合金压铸件 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [9] ASTM International. ASTM E2869-17 Standard digital reference images for magnesium castings [S]. United States: 2017.
- [10] ASTM International. ASTM E2973-22 Standard digital reference images for inspection of aluminum and magnesium die castings [S]. United States: 2022.
- [11] 王海登, 王伏喜, 张克俭, 等. 铝合金铸件国内外射线检测标准对比 [J]. 铸造技术, 2019, 40(1): 112-115.
- [12] 国防科学技术工业委员会. HB 7780—2005 镁合金铸件规范 [S]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2006.
- [13] 中华人民共和国第七机械工业部. QJ 168—1985 镁合金铸件技术条件 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.
- [14] 中华人民共和国航空航天工业部. QJ 2526—1993 差压铸造镁合金铸件技术条件 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [15] 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. GB/T 13820—2018 镁合金铸件 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. GB/T 26649—2011 镁合金汽车车轮铸件 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. GB/T 26650—2011 摩托车和电动自行车用镁合金车轮铸件 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

- [18] 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. GB/T 25747—2022 镁合金压铸件 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [19] ASTM International. ASTM B80-23 Standard specification for magnesium-alloy sand castings [S]. United States: 2023.
- [20] ASTM International. ASTM B94-18 Standard specification for magnesium-alloy die castings [S]. United States: 2018.
- [21] ASTM International. ASTM B199-17 Standard specification for magnesium-alloy permanent mold castings [S]. United States: 2017.
- [22] ASTM International. ASTM B403-20 Standard specification for magnesium-alloy investment castings [S]. United States: 2020.
- [23] 李岩, 袁文明, 熊艳才. AMS标准体系与形成方法研究 [J]. 航空动力, 2020 (4): 75-78.
- [24] SAE International. AMS 2175B-2024 铸件的分类和检验 [S]. United States: 2024.
- [25] 赵志远. HB 6578-92《铝、镁合金铸件检验用标准参考射线底片》的制定和应用 [J]. 航空标准化与质量, 1993 (6): 7-10.
- [26] 章林强, 周鹏飞, 吴振成, 等. 铝镁合金铸件针孔和偏析缺陷特点及分析 [J]. 铸造工程, 2024, 48 (S1): 16-24.

Comparison of Domestic and Foreign Acceptance Standards for Radiographic Testing of Magnesium Alloy Castings

DING Fang-zheng¹, HU Ke-jia²

(1. The 6th Military Representative Office of Air Force Equipment Department in Beijing, Beijing 100016, China; 2. Hebei Steel Research Dekai Technology Co., Ltd., Baoding 072750, Hebei, China)

Abstract:

Domestic standards are mainly divided by the casting application industry, while foreign ASTM standards and AMS standards are mainly divided by the casting forming method and alloy composition. In terms of acceptance methods, domestic standards generally adopt a mixed method of acceptance, using quantitative calculation methods to evaluate defects such as gas holes and inclusion, and using chart comparison methods to evaluate defects such as shrinkage and segregation. Foreign standards use the chart comparison method for the acceptance of all defects. Different standards have consistency in setting the acceptance level for segregation defects, but there are differences in the acceptance level for individual segregation defects. Images of films with different segregation components show differences, and there are differences in the display of segregation defects between films without zirconium magnesium alloys and ASTM E155 standard films.

Key words:

magnesium alloy; castings; radiographic testing; acceptance criteria