● 应力控制与理化测试技术 Stress Control and Physicochemical Testing Technology ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.01.029

铝合金铸件国内外射线检测标准对比

王海登[1],王伏喜[1],张克俭[2],鄂 楠[1]
(1.中国船舶重工集团公司 第七二五研究所,河南 洛阳 471000;2.山西平阳重工机械有限责任公司,山西 侯马 043003)

摘 要:概述了国内外铝合金铸件射线检测标准发展和应用情况。通过对比各个标准的关键技术要求,分析了标准中关于射线源、透照工艺和底片质量要求的差别,并重点讨论了质量分级方法。最终结合当前射线检测的技术现状对标准的整体情况进行了归纳,旨在为国内相关标准的修订提供参考。

关键词:铝合金;铸件;射线检测;标准

中图分类号:TG115.28 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2019)01-0112-04

Comparison of Domestic and Foreign Standards of Radiographic Testing for Aluminum Alloy Castings

WANG Haideng[1], WANG Fuxi[1], ZHANG Kejian[2], E Nan[1]
(1. Luoyang Ship Material Research Institute, Luoyang 471000, China; 2.Shanxi Pingyang Industry Machinery Co., Houma 043003, China)

Abstract: The development and application of X-ray detection standards for aluminum alloy castings at home and abroad are summarized. By comparing the key technical requirements of each standard, the difference of quality requirements of X-ray source, diopter process and negative in the standard were analyzed, and the quality classification method was discussed emphatically. Finally, combined with the current status of X-ray detection technology, the overall situation of the standard is summarized, aiming at providing reference for the revision of relevant standards in China.

Key words: aluminum; casting; radiographic testing; standard

铸造铝合金能在控制成本的基础上获得其他成型工艺较为困难的复杂构件,广泛应用于汽车、航空航天、船舶等行业,但铸造成型很难避免铸造缺陷。目前,铝合金常用的铸造方法包括压差铸造、高压铸造、低压铸造等,各个方法所产生的缺陷类型基本相同,气孔、缩孔、疏松、针孔、夹渣等均是较为常见的缺陷。

由于铸件本身致密性较差,且结构相对复杂,超声检测的实施难度很大,反射回波法也难以准确评估缺陷形态,因此普遍采用射线法评估铸件内部质量。图1为铝合金铸件常见类型缺陷的射线检测底片,铸件缺陷的性质与分布规律较为独特,尤其在结果评定方面与焊接成型射线检测的差别很大。在标准层面对铝合金铸件射线检测的关键要点进行梳理,为相关标准修订及实际应用提供参考,有利于更好的控制铸造质量。

收稿日期:2018-08-21

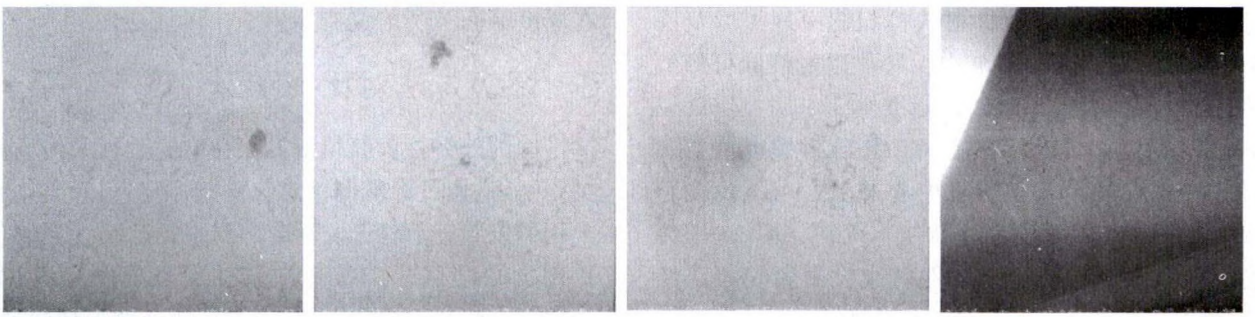
作者简介:王海登(1990-),河南洛阳人,硕士,工程师.研究方向:金属材料无损检测技术.电话:15236179377,E-mail:15236179377@163.com

1 国内外铝合金铸件射线检测标准

铸造铝合金的质量要求通常体现在技术合同中,射线检测所采用的标准大多为参考性质,各个行业也有所不同。目前,国内外铝合金铸件专用的射线检测相关标准数量并不多,而且部分标准为方法性标准,表1列出了国内外铝合金铸件射线检测常用标准。

国外铝合金铸件射线检测标准中,ASTM自成体系,整个系列标准涵盖检测设备、工艺和评级等各项要求,通常以E94和1030为依据制定检测工艺,最后按照E155或E505的规定评级。ASTM推出的参考射线底片是目前世界上最权威的标准底片,基本上每5年更新一次,以E155为例,有15、10、05和00等版本,目前最新版为2015版。EN 12681标准和ISO 9915标准的质量评定均是在参考ASTM标准底片的基础上进行,ISO 9915自92年首次发布后一直没有更新,目前已废止[1-6]。

相比国外标准,国内铝合金铸件的射线检测标准以行业标准为主,其中GB/T 9438和HB 963-2005属于铸造规范,但标准中的质量规定章节



(a)气孔　(b)夹渣　(c)疏松　(d)偏析

图 1 铸造铝合金常见缺陷射线检测底片

Fig.1 X-ray negative of common defects in aluminum alloy castings

表1 铝合金铸件射线检测相关标准

Tab.1 Related standard for X-ray detection of aluminum alloy castings

类别	序号	标准号及名称
国外	1	ASTM E 94 射线检验指南
	2	ASTME 155 铝铸件和镁铸件检验用参考射线底片
	3	ASTME 505 铝和镁压铸件检验用参考射线底片
	4	ASTME 1030 金属铸件射线检验方法标准
	5	EN 12681 铸造 - 射线检验
	6	ISO 9915-92 铝合金铸件射线检测
国内	1	GB/T 9438 铝合金铸件
	2	GB 11346-1989 铝合金铸件 X 射线照相检验 针孔（圆形）分级
	3	CB/T 1226 鱼雷用铝合金铸件 X 射线照相检测及质量分级
	4	HB 963-2005 铝合金铸件规范
	5	HB 5395-88 铝合金铸件 X 射线照相检验长针孔分级标准
	6	HB 5396-88 铝合金铸件 X 射线照相检验海绵状疏松分级标准
	7	HB 5397-88 铝合金铸件 X 射线照相检验分散疏松分级标准
	8	HB 6578-92 铝、镁合金铸件检验用标准参考底片

要求采用射线检测，具体的检测需要执行 GB 11346、HB6578 等标准，仅属于相关标准，并不是射线检测标准。CB/T 1226 为船舶行业标准，适用于鱼雷用铝合金铸件的 X 射线检测，针对性强，但其他类型的铸件也可参照使用。HB5395、HB5396、HB5397、HB6578 为航空行业标准，将缺陷分为长针孔、海绵状疏松和分散疏松 3 类进行分级，共同构成了铝合金射线检测评定标准。上述几项标准均发布于 20 世纪 90 年代左右，均存在标龄过长的问题，在射线检测技术不断进步的背景下，某些技术指标和专业术语已不符合当前的技术要求和行业习惯[7-14]。

2 关键技术对比

2.1 射线源的要求

国外标准中，ASTM E1030 和 EN 12681 规定了各类材质铸件的射线检测方法，体现出了铸件有别于焊接成型射线检测的技术特点，而 ISO 标准中，则无专门针对铸件的方法标准，相关要求执行适用于金属材料射线检测的 ISO 5579 标准。几项标准规定的射线源均分为 X 射线和 γ 射线，其中铝合金铸件可根据厚度选择射线源，透照厚度大于 35 mm 时允许采用 γ 射线，但射线源应为 Se-75。

在对射线源的要求方面，国内标准则更为严格，适用厚度范围内均要求采用 X 射线，不允许采用 γ 源，甚至在 CB/T 1226 标准中要求采用软 X 射线机。除 HB/Z 60 外，国内外其他标准均对透照能量提出了要求，即在保证穿透力的情况下，尽量选择较低能量，以此提高底片对比度。

2.2 透照工艺

在透照方式上，国内外标准均以在可实施的条件下优先选择单壁透照为基本原则，而且 EN12681 标准中给出了十几种典型结构的透照示意图，对工艺制定有很大的指导意义。ASTM、EN 和 ISO 标准和国内 HB 标准中均提到了多胶片透照技术，多胶片技术能够减小变厚度截面检测时产生的黑度差大、边蚀效应等不利因素影响，目前也是国内外射线检测各个行业中较为成熟的技术。

射线源到胶片距离和一次透照长度是透照工艺的关键参数，EN 和 ISO 标准采用公式计算法确认射线源至胶片的最小距离，而一次透照长度则是根据透照厚度比确定，ASTM 标准则直接给出了几何不清晰度的数值要求，通过计算法获得射线源至胶片最小距离，但并未专门指出一次透照长度的要求，只要黑度满足要求即可。国内 2 项行业标准中，同样给出了计算公式和透照厚度比结合的方式确定参数，与国际标准保持一致。

2.3 底片质量

作为检测结果的载体和质量分级的依据，底片的质量必须要满足相关要求，通常除了应避免伪缺陷和干涉影像外，相关标准均有黑度和灵敏度的要求。

ASTM 标准中，铸件射线检测的底片黑度范围要求为 1.5～4.0，EN 标准中，底片黑度最低可降低到 1.5，但无上限要求，ISO 标准则要求底片黑度位于 2～3 区间。国内标准中，CB/T 1226 黑度值要求 1.2～3.5，HB 配套方法标准中要求 1.5～4.0，由此可见在黑度要求方面各个标准并不统一，但 2～3 为重叠区间，根据铝合金铸件射线检测底片评定经验，黑度要求的下限定在 1.5 是合适的。

底片影像中像质计可识别的最小线径或孔径用于衡量检测灵敏度，像质计一般分为线型和孔型，标准中规定不同透照厚度下应识别的最小线径或孔径。ASTM 标准中对像质计的要求并不严格，一般要求达到 2%的灵敏度等级，也可根据供需双方协议确定等级。EN、ISO 和国内标准对像质指数的规定更为详细，图 2 为各个标准要求识别的像质指数与厚度关系示意图，由图中可知，各个标准不同透照厚度下的像质指数要求变化规律基本一致，GB/T 11346 标准要求最低，其他标准比较接近，但在厚度区间分类时又有差别。

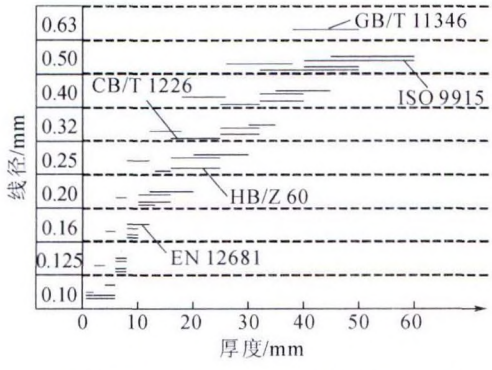


图 2 各标准像质计可识别线径与厚度关系

Fig.2 Standard images quality and the relationship between recognized line diameter and thickness

3 评级方法对比

国内外铸件射线检测结果评定方法可归纳为两类：一类是通过标准图谱对比进行评定；另一类则是常用的定量计算法[15]。标准图谱根据缺陷性质制作专用的缺陷底片，按照缺陷的严重程度分级，如 ASTM 中将缺陷分为八级，该种评级方法方便快捷，但无多类缺陷综合评级的要求。定量计算法需要结合缺陷性质、面积或长度进行评定，分级量化指标明确，但铸造缺陷存在种类多、空间分布不规律等特征，实际评判时计算过程十分繁琐，使用不便。图 3 为两种评级方式示意图，目前图谱评级法应用较广泛，占主导地位[16]。

国外几项铝合金铸件射线检测标准中，评级方法均是依据 ASTM 标准图谱的基础上进行的。ASTM 标准给出了气孔、圆形针孔、长形针孔、较小密度夹渣、较大密度夹渣、疏松和缩孔缺陷的标准图谱，共分为八个级别，适用于厚度不大于 51 mm 的铸件评级。EN 12681 标准主要侧重于检测方法的要求，仅在附录中给出了 ASTM 标准图谱的基本情况作为评级参考。ISO 9915 中对于评级的规定比较详细，虽然同样参照 ASTM 标准图谱进行评定，但进一步明确了图谱使用的要求，给出了复合缺陷的质量要求和评定方法。

国内航空行业在 ASTM 的基础上推出了行业专用标准参考底片，如 HB 6578 等效采用 ASTM E155，但也结合自身情况颁布了 HB 5395、HB 5396、HB 5397 标准，适用于长形针孔、海绵状疏松和分散疏松检测评级，最大适用厚度 50mm，缺陷则

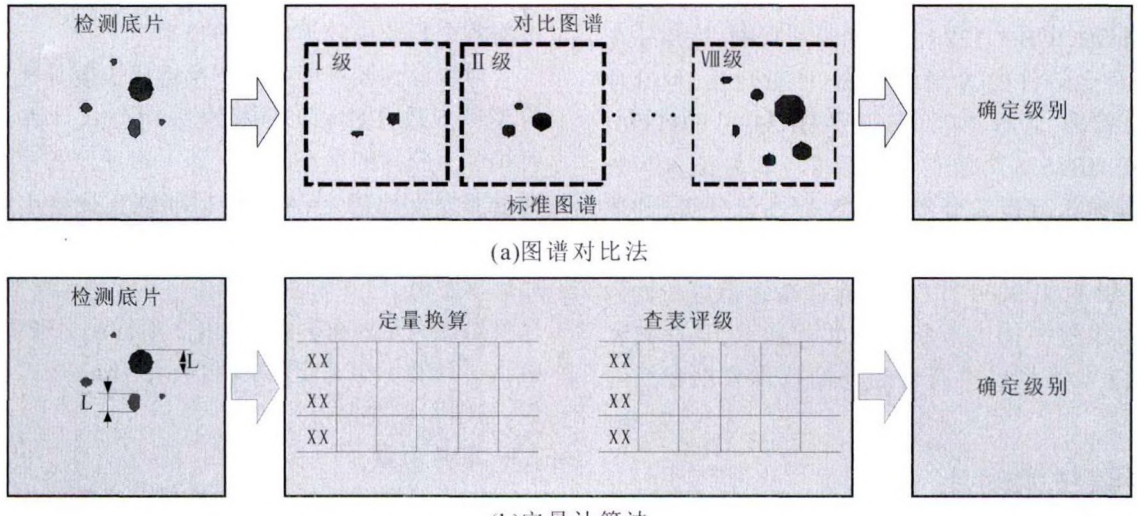


图 3 铸件射线检测评级方法示意图

Fig.3 Schematic diagram of casting X-ray detection and grading method

分为五个级别。GB 11346 标准给出了针孔(圆形)缺陷的分级图谱，缺陷分为八级，最大适用厚度 50 mm。CB/T 1226 标准与 ISO 9915 标准的评级要求较为类似，也是在参照 ASTM 标准图谱的基础上进行评级，根据铸件的工作状态将质量分为 A、B、C、D、E 五级，每个级别对应有按照图谱评级要求的具体级别，同时包含综合评级等内容。

综合上述分析，目前国内外铝合金铸件射线检测的质量分级均是建立在图谱对比的基础上，最大适用厚度在 50 mm 左右，且无论是权威性还是通用性，ASTM 的标准图谱影响最大。除此之外，ISO 9915 和 CB/T 1992 标准在参考标准图谱的基础上，结合实际应用设置了专门的评级要求，既保留了图谱对比法快速查询的特点又兼顾实际使用中综合评定的需求，保持了标准的灵活性和易用性。

4 结束语

国内外铝合金铸件射线检测标准各具特色，其中关于检测工艺和质量评定的要求并无太大差别，但 ASTM 标准对各类铸件的分类标准最为系统，制作的标准底片代表当前最高水平，值得借鉴。

(1)铝合金铸件的质量评定普遍采用图谱对比法，结合参考图谱和使用情况制定覆盖面更全的综合分级方法更有利于发挥标准的通用性。

(2)标准中关于数字射线检测技术的涉及较少，标准修订时应充分考虑技术进步带来的新要求，明确关键技术指标。

(3)随着数字化和自动化的发展，批量化铸件的检测和评定在未来可能会与生产线融合，基于缺陷自动识别技术的质量评级将会消除繁琐的比对计算过程，相关标准的规定也必然要相适应，更好地保证产品质量。

参考文献：

[1] ASTM E155-2015 铝铸件和镁铸件检验用参考射线底片[S].
[2] ASTM E505-2015 铝和镁压铸件检验用参考射线底片[S].
[3] ASTM E1030-2005 金属铸件射线检验方法标准.
[4] ASTM E94-2004 射线检验指南[S].
[5] EN 12681 铸造-射线检验[S].
[6] ISO 9915-1992 铝合金铸件射线检测[S].
[7] GB/T 9438-2013 铝合金铸件[S].
[8] GB 11346-1989 铝合金铸件 X 射线照相检验 针孔(圆形)分级[S].
[9] HB 963-2005 铝合金铸件规范[S].
[10] HB 5395-1988 铝合金铸件 X 射线照相检验长针孔分级标准[S].
[11] HB 5396-1988 铝合金铸件 X 射线照相检验海绵状疏松分级标准[S].
[12] HB 5397-1988 铝合金铸件 X 射线照相检验分散疏松分级标准[S].
[13] HB 6578-1992 铝、镁合金铸件检验用标准参考底片[S].
[14] CB/T 1226-1992 鱼雷用铝合金铸件 X 射线照相检测及质量分级[S].
[15] 万升云，章文显，刘仕远，等. 国内外铸件无损检验标准对比分析[J]. 铸造技术，2011，32(10)：1480-1482.
[16] 王广坤，王化龙，范春雷，等. X 射线 DR 技术在铝合金铸件检测中的应用[J]. 影像技术，2012(6)：47-55.

(上接第 111 页)

4 结论

在循环氮化时效处理工艺基础上进行技术改进，前期安排超声喷丸预处理、滚压预处理，或后续安排二次氧化处理，都能明显提高耐蚀性。耐蚀性的提高程度与工件最终表层氧化膜的完整性和致密性正相关，因此以后续安排二次氧化处理耐蚀性效果最佳。

参考文献：

[1] 包文强，罗德福，张磊. N80 钢油管 QPQ 处理后的力学性能[J]. 金属热处理，2016，41(5)：57-61.
[2] 杨文兵，张晖，何宜柱. 汽车零件表面改性的 QPQ 复合表面处理技术研究[J]. 润滑与密封，2009，34(9)：82-83.
[3] 李瑞卿，孔春花，王海平，等. 拖拉机制动器压盘 QPQ 技术的适应性分析[J]. 金属加工，2017(9)：38-40.
[4] 郭杰，刘利国，张盼盼，等. 改进的 QPQ 技术在高速钢刀具上的应用[J]. 工具技术，2014，48(2)：53-56.
[5] 葛志宏，邓静. 快速强韧氮化工艺对 M2 钢性能的影响[J]. 铸造技术，2014，35(12)：2868-2869.
[6] 李雪莉，李英，王福会，等. USSP 表面纳米化 Fe-20Cr 合金的腐蚀性能及机制研究 [J]. 中国腐蚀与防护学报，2002，22(6)：326-329.
[7] 吴桐，张留艳，蒋俊杰，等. 超声喷丸对钢基体表面发黑膜耐蚀性的影响[J]. 表面技术，2018(3)：191-195.
[8] 罗德福，李远辉，吴少旭，等. QPQ 技术高抗蚀机理探讨[J]. 金属热处理，2005，30(6)：28-30.
[9] 郑锦华，吴 双，魏新煦，等. 研磨抛光表面微孔织构的形成[J]. 光学精密工程，2016，24(4)：788-795.