

# 镁合金半连续铸造铸坯中气孔缺陷的形成及防止

柴韶春<sup>1</sup>, 赵大志<sup>2</sup>, 柴生樾<sup>1</sup>, 王海志<sup>1</sup>, 乐启焱<sup>3</sup>

(1. 淄博德源金属材料有限公司, 山东淄博 256000; 2. 东北大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819;  
3. 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁沈阳 110819)

**摘要:** 通过对镁合金大规格半连续铸造铸坯内气孔缺陷形成特征的分析, 研究了合金凝固过程中气孔形成的机理, 制定出减少气孔形成、改善铸坯凝固质量的有效措施。结果表明: 适当增加有降低熔体中氢溶解度的合金化元素可降低合金含氢量; 调整浇注温度、优化浇注系统、控制浇注速度, 可改善熔体凝固状态, 减少析出性气孔的形成; 优化引锭的结构设计, 可有效避免合金中侵入性气孔的形成, 改善合金坯料的凝固质量。

**关键词:** 镁合金; 半连续铸造; 气孔; 缩松

随着节能降耗、轻量化的深入, 由于镁合金优良的综合使用性能, 其应用领域逐渐扩大, 广泛应用于汽车、轨道交通、3C、航天、航空及军事等领域。镁合金的应用研究得到了足够的重视, 越来越受到研究者的青睐, 成为有色金属材料中应用前景最为广泛的新型材料<sup>[1-2]</sup>。

镁合金铸坯作为塑性加工成形的原材料, 是实现合金变形加工的基础与前提, 尤其在合金塑性成形过程中有着举足轻重的地位<sup>[3]</sup>。在生产实践中, 通常镁合金都具有导热能力差, 体积热容、凝固潜热小以及含气量大等特点, 这使得镁合金在凝固与铸造过程中极易产生凝固组织不均匀、宏观偏析、热裂/冷裂、组织疏松以及气孔等缺陷, 会严重影响到镁合金坯料的后续成形质量及使用性能<sup>[4-6]</sup>。近些年来, 镁合金的应用领域不断拓展, 对大规格镁合金坯料的需求越来越大。特别是在制备高强度、大幅面的轧板和锻板时, 对坯料的品质要求更高, 优质坯料必需具有组织致密、分布均匀, 无裂纹、无夹渣、无气孔等凝固缺陷<sup>[7-8]</sup>。

本研究针对大规格镁合金铸坯在生产实践中常产生的侵入性气孔缺陷, 通过工艺优化并结合理论分析, 对侵入性气孔的产生原因, 对铸坯质量的影响以及解决问题的对策进行了分析研究, 并通过工艺优化达到减少侵入性气孔, 获得组织致密、晶粒细小、纯净度高、大幅面镁合金半连续铸造坯锭的目的。

## 1 气孔的形成特征及其影响

### 1.1 气孔的特征

图1分别为生产中当镁合金半连续铸造制备的方坯及圆坯的尺寸规格大于300 mm时, 通常会在铸坯横截面的中部形成大量的侵入性气孔, 形状主要为圆球状及不规则形状, 孔径通常在10 mm以内, 其中部分气孔会贯穿整个铸坯, 孔洞内壁多为光滑、带金属光泽, 表明气孔多为非氧化性气孔。且在同炉次半连续铸造制备的铸坯中, 有的铸锭横截面中会出现类似气孔, 并随着铸坯宽度厚度的增加, 气孔产生的概率随之增加。而有的则组织致密, 比较完整, 说明气孔的形成主要与工艺控制有直接联系。

在铸坯的横截面上还会看到有少量的侵入性皮下气孔形成, 如图2中箭头所示。由于侵入性气孔在铸坯表层的形成具有一定深度, 不仅会严重影响到铸坯的表面质

#### 作者简介:

柴韶春(1972-), 男, 高级工程师, 研究方向为镁合金铸造。电话: 15898743296, E-mail: c-sc@163.com

#### 通讯作者:

赵大志, 男, 讲师。电话: 13840333117, E-mail: zhaodz@smm.neu.edu.cn

中图分类号: TG245

文献标识码: A

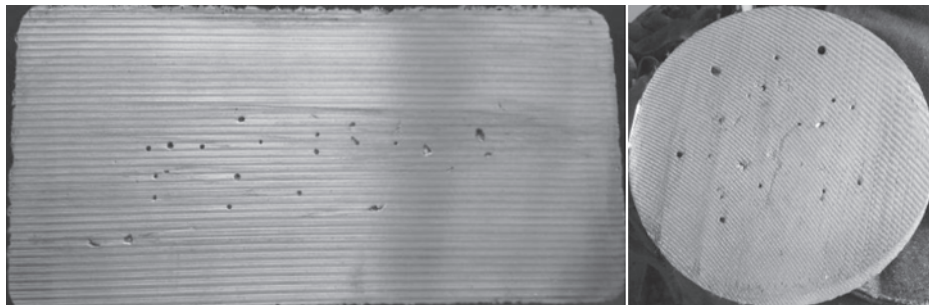
文章编号: 1001-4977(2020)10-1039-05

#### 基金项目:

国家自然科学基金面上项目(51974082)。

#### 收稿日期:

2020-07-30。



(a) 铸造方坯

(b) 铸造圆坯

图1 镁合金铸坯横截面的侵入性气孔缺陷

Fig. 1 Blowhole defects at cross section of magnesium alloy billet

量, 增加铸坯的表面切削量, 降低合金的成品率, 同时还会影响到合金后续加工变形的成形质量。

## 1.2 气孔对合金铸坯及其成形质量的影响

图3a为镁合金半连续铸造制备的铸坯的横截面, 在箭头所指的气孔上有明显的裂纹产生。合金在凝固过程中由于凝固收缩产生应力, 在合金凝固后期的位置, 尤其在铸坯的中心区域就会产生应力集中。这一区域内凝固形成的气孔就会成为裂纹源, 引起铸坯中心区域的开裂, 不仅影响到铸坯凝固组织的致密性, 而且会影响到合金的后续加工成形质量。镁合金铸坯在变形过程中, 铸坯内形成的气孔对变形产品的成形质量会产生严重的影响。

图3b为镁合金铸坯经轧制变形后获得的镁板。从轧制板材上可以看到有大量的变形缺陷形成, 这些缺陷的产生与铸坯凝固时形成的侵入性气孔密切相关, 如图3b中箭头所示。由图中可以看到, 板材边部形成大量的轧制裂纹, 其中大部分裂纹是由于合金在轧制变形中, 板坯边部形成的应力集中使侵入性皮下气孔产生裂纹源, 引起轧制板材边部严重开裂, 如图中箭头1所示。铸坯内部形成的气孔在变形过程中, 通常会在板材表面形成鼓包、起皮及孔洞等缺陷, 如图中箭头2所示, 并形成连续的缺陷分布带, 严重影响到镁合金板材的成形质量及成品率。

## 2 气孔形成的机理分析及防止措施

### 2.1 气孔形成的机理分析

合金在半连续铸造过程中通常会产生两类气孔: 一类是析出性气孔, 即合金熔体在凝固过程中因气体溶解度的变化而析出形成的气孔, 与合金的属性密切相关; 另一类就是侵入性气孔, 与合金熔体的属性无关, 主要是合金熔体在浇注过程中, 因工艺控制、装置工作状态等因素使合金熔体的状态发生波动, 引起空气或水分卷入合金熔体内而形成的侵入性气孔, 气

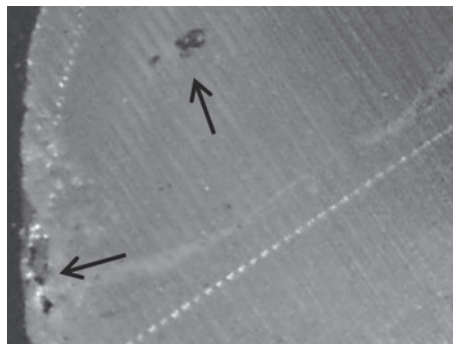


图2 镁合金铸坯横截面的侵入性皮下气孔

Fig. 2 Subsurface blowhole defects at cross section of magnesium alloy billet

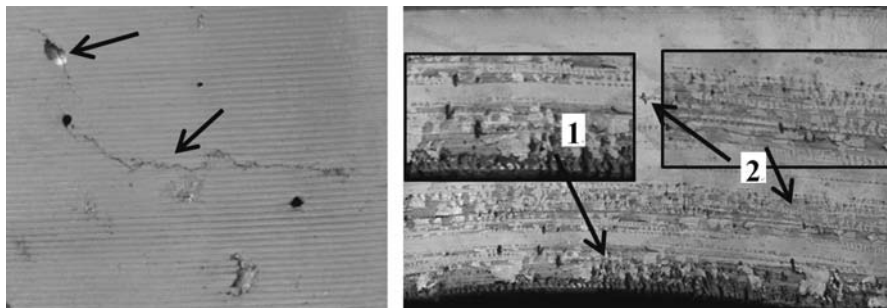
孔的形成主要与浇注、装置的结构及工艺控制的稳定性密切相关。

合金中形成的析出性气孔通常与合金熔体中含气量关系密切, 溶入镁合金熔体中的气体主要是氢气<sup>[9]</sup>。Mg的熔点为650 °C, 由Mg-H二元相图(图4a)可知: Mg在形核凝固时随着温度的降低, H的溶解度会有明显的变化, 尤其在650 °C时, 会有急剧降低的趋势, 如图4b所示, 析出的大量H会以氢气的形式存在于凝固过程中固相间的剩余熔体中, 由于镁合金的凝固区间较宽, 合金形成缩松的倾向较大, 有利于析出性气孔的形成, 同时析出性气孔又会阻碍熔体的补缩, 加剧合金缩松的形成<sup>[10-11]</sup>, 如图5所示。

镁合金半连续铸造过程中, 为了减小引锭与熔体间的温差, 通常在铸造开始前要对引锭进行加热升温处理。要浇注时冷却水在结晶器及引锭下端的冷却温降, 会使结晶器内壁及引锭凹槽内快速形成凝结水, 镁合金熔体浇入结晶器时就会与凝结水作用, 在合金铸坯内形成大量侵入性气孔。引锭/铸锭与结晶器内壁的间隙对冷却水形成的虹吸作用, 使冷却水不断吸入到引锭上端发生汽化, 同样会形成侵入性气孔, 甚至与凝结水形成的气孔在铸坯内形成贯穿式的侵入性气孔。

合金铸造过程中，由于合金铸坯尺寸较大，凝固收缩使得铸坯低端发生翘曲，在铸坯与引锭外侧形成一定弧度的间隙，如图6箭头1、2所示，冷却水会通过引锭头与铸锭结合的缝隙由于虹吸进入到图6中箭头2所示的间隙内。冷却水受热后汽化，铸坯底端的熔体凝壳强度较低时，汽化的气体就会侵入到熔体内部，与凝结水形成的气孔汇合，在铸锭内形成贯通式的气

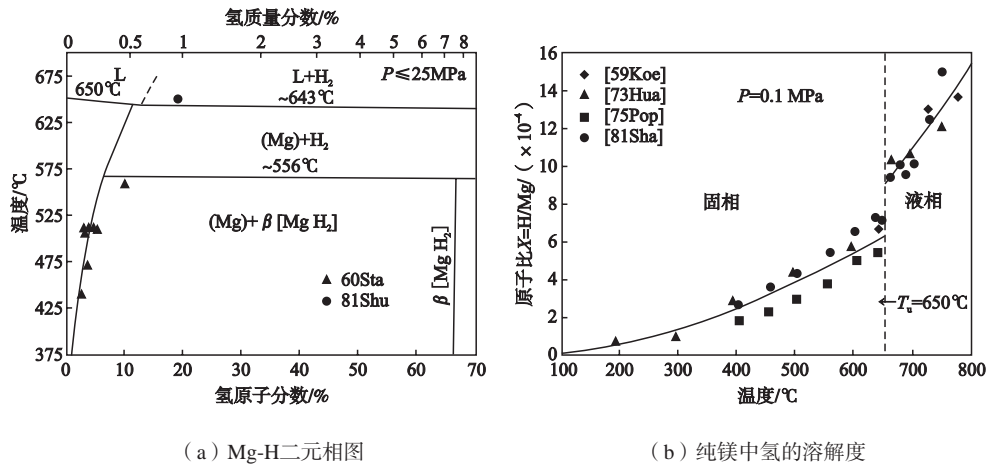
孔；当熔体凝壳具有一定强度时，汽化的气体就会在图6中箭头2所示的间隙内富集，气压增大到一定程度时就会将铸锭从引锭上顶起，释放间隙内的气压，铸锭再次落下，同时又会有新的冷却水再次进入到间隙内并汽化，使得铸坯在铸造过程中发生周期性的弹跳，严重影响到了铸坯的生产稳定性，甚至会引起返水并与液穴内的熔体作用造成爆炸的危险事故。



(a) 镁合金铸坯中心缺陷 (b) 镁合金轧制板材缺陷

图3 气孔缺陷对铸坯及其加工变形制品质量的影响

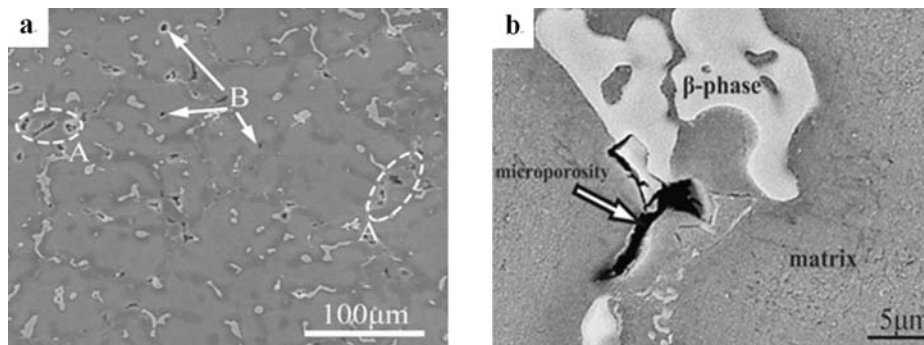
Fig. 3 Influence of blowhole defects on quality of wrought magnesium alloy billet



(a) Mg-H二元相图 (b) 纯镁中氢的溶解度

图4 Mg-H二元相图及其溶解度随温度变化曲线

Fig. 4 Mg-H binary phase diagram and variation curve of solubility with temperature



(a) 镁合金的缩松及析出性显微气孔 (b) 镁合金的缩松形貌

图5 镁合金铸坯中缩松与析出性气孔形貌

Fig. 5 Morphologies of dispersed shrinkage and blowhole in as-cast sample

## 2.2 气孔形成的防止措施

氢在镁熔体内具有较高的溶解度，要降低合金的析出性气孔，除了在合金用料、熔炼及精炼过程中降低熔体的吸氧量，同时应考虑对合金属性进行相应的调整，降低合金的吸氢趋势。图7为部分合金元素对氢溶解度的影响。从图中可以确定合金化元素Y、Gd、Nd均有增加氢在熔体中溶解度的趋势，Al、Zn则有降低熔体中含氢量的趋势。因此，在镁合金成分有效控制范围内，可以适当增加合金元素Al、Zn的含量，降低Y、Gd、Nd的含量，以降低合金中氢的溶解度，减少合金铸坯内的析出性气孔。

从工艺控制角度，改善合金的凝固状态，高温出炉，低温浇注，将镁合金的浇注温度控制在700~720℃为宜。由于南方春、夏季湿度大，操作平台、熔化场地、工具应尽量保持干燥。保持引锭头干燥，浇注前用压缩空气吹干。在半连续铸造起步阶段，夹渣较大的合金熔体容易藏纳水分造成气孔，因此开始浇注时，液流适当调小，适当降低拉速，从而延迟铸锭见水的时间，确保铺底熔体尽快冷却排气，熔体液流速度由小增大保证铺地完成前不出现冷隔。

合金浇注过程中，移液管口应尽量靠近漏斗，垂直距离以100 mm为宜，放流应平稳且不断流。液流不能直接流向一个部位，应尽量均匀，需经过滤网、缓冲漏斗平稳地进入结晶器内。浇注过程中，漏斗应保持充满并防止熔体扰动，浇注速度应保持匀速为好，防止急流而产生二次氧化夹杂物及卷气。

从装置结构设计上，根据镁合金的凝固特点，对镁合金半连续铸造引锭的结构进行优化设计，降低水汽对合金铸坯凝固过程的影响，如图8所示。首先，根据铸坯尺寸规格及引锭凹槽深度，将引锭凹槽设计成阶梯状，以增大铸坯与引锭的接触面积，缓解接触面内水汽压力的变化，同时可以利用铸坯底面的阶梯结构提高底面的强度，减小由于凝固收缩引起的底面翘曲变形程度，降低冷却水向引锭与铸坯接触面内的吸入，避免水汽的大量形成。其次，根据引锭底面面积，在引锭底面设计一定数量的阶梯状排气孔，以便使浇注初期形成的水汽能够快速通过排气孔从铸坯与引锭的接触面间隙排除，而不至于侵入到合金熔体内形成侵入性气孔。

通过以上改进措施，不仅使大规格镁合金铸坯内的气孔明显减少，缩松、缩孔的形成趋势降低，而且使铸坯的铸造过程趋于稳定，确保了镁合金半连续铸造过程的安全运行，并提高了铸坯的成形质量。

## 3 结论

(1) 通过适当调整合金化元素含量，增加降低镁

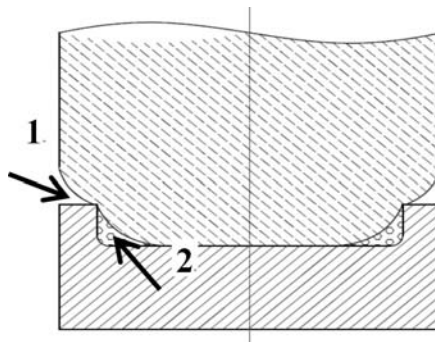


图6 镁合金半连续铸造引锭与铸坯结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram showing structures of magnesium alloy billet and dummy bar during direct chill casting

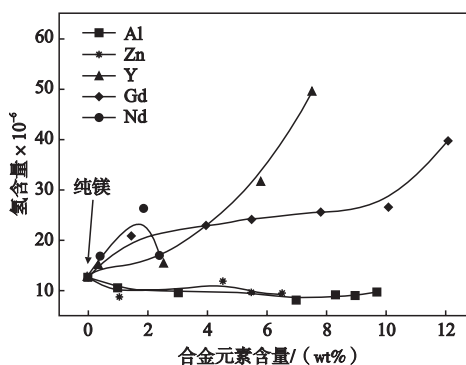


图7 合金元素对H溶解度的影响

Fig. 7 Influence of alloying elements on solubility of H

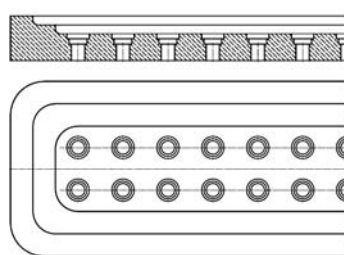


图8 镁合金半连续铸造方坯引锭结构优化示意图

Fig. 8 Schematic diagram showing optimized structure of dummy bar for magnesium alloy direct chill casting

合金熔体中氢溶解度的合金化元素，可减少铸坯内析出性气孔的形成。

(2) 优化铸造工艺，通过高温出炉，低温浇注，改善合金的含氧量及凝固状态；采用合理的缓流分液漏斗和直浇道高度、钢丝滤网；浇注初期，控制液流，避免熔体扰动，延迟铸锭见水时间，保证铺地完成前不出现冷隔，可有效解决气孔的形成。

(3) 对引锭结构进行优化设计，通过引锭凹槽的阶梯型设计和阶梯型排气孔的设置，可有效降低侵入性气孔的形成，确保铸坯的铸造过程稳定运行，它是切断侵入性气孔形成的重要途径。

## 参考文献:

- [1] LICHÝ P, CAGALA M. Microstructure and thermomechanical properties of magnesium alloys castings [J]. Archives of Foundry Engineering, 2012, 12: 49–54.
- [2] 曾荣昌, 柯伟, 徐永波, 等. 镁合金的最新发展及应用前景 [J]. 金属学报, 2001, 37 ( 7 ) : 673–685.
- [3] SHAO Z, LE Q, ZHANG Z, et al. Effect of ultrasonic power on grain refinement and purification processing of AZ80 alloy by ultrasonic treatment [J]. Metals & Materials International, 2012, 18 ( 18 ) : 209–215.
- [4] DARDEL Y. Hydrogen in aluminum: method of determination, effect of pore formation [J]. Metals Industry, 1950, 76: 203–206.
- [5] MIKUCKI B A, SHEAROUSE J. The effects and removal of hydrogen gas in AZ91 alloy [C]//Annual World Magnesium Conference, 1993: 62.
- [6] KUBO K, PEHLKE R D. Mathematical modeling of porosity formation in solidification [J]. Metallurgical Transactions B, 1985, 16 ( 2 ) : 359–366.
- [7] 谭亚新. 大规格镁合金板坯半连铸数值模拟研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [8] KITTLILSEN B, PINFOLD P. Recent developments in large format magnesium casting [C] //Light Metals, TMS Annual Meeting, 1996: 987-991.
- [9] BAKKE P, LAURITZEN J, ENGH T. Hydrogen in magnesium absorption, removal and measurement [J]. Light Metals, 1991: 1015–1023.
- [10] 许并社, 李明照. 镁冶炼与镁合金熔炼工艺 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [11] MAHMUT D M, OLUSEGUN J I. Application of a hybrid modal of mushy zone to macrosegregation in alloy solidification [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45: 279–289.

---

## Formation and Prevention of Blowholes in Magnesium Alloy Billets Cast by Semi-Continuous Casting

CHAI Shao-chun<sup>1</sup>, ZHAO Da-zhi<sup>2</sup>, CHAI Sheng-yue<sup>1</sup>, WANG Hai-zhi<sup>1</sup>, LE Qi-chi<sup>3</sup>

(1. Zibo Deyuan Metallic Materials Co., Ltd., Zibo 256000, Shandong, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 3. Key Lab of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

**Abstract:**

The formation features of the blowholes in the large-size magnesium alloy billets produced by semi-continuous casting were described. The formation mechanism of the blowholes in the alloys during the solidification was analyzed and studied. And the effective measures for decreasing the blowholes formation and improving the solidification quality of the billets were taken. The results show that the solidification state of the melt can be improved and the precipitating blowhole in the castings can be decreased by increasing properly the content of the alloying elements what can decrease the solubility of hydrogen in the melt, by adjusting the pouring temperature and the pouring rate, and by optimizing the pouring system. Furthermore, the formation of the intrusive blowholes can be avoided effectively and the quality of the billets can be improved by the optimization design of the dummy block.

**Key words:**

magnesium alloy; semi-continuous casting; blowholes; dispersed shrinkage

---