

灰铸铁件加工面孔洞缺陷的原因分析及对策

潘密¹, 杨宗明¹, 杨华¹, 周焱¹, 何程¹, 程婧璠^{1, 2, 3}

(1. 武汉重型机床集团有限公司, 武汉武重铸锻有限公司, 湖北武汉 430205; 2. 华中科技大学, 材料成型与模具技术国家重点实验室, 湖北武汉 430074; 3. 武汉软件工程职业学院机械工程学院, 湖北武汉 430205)

摘要: 采用金相方法对HT250灰铸铁铸件加工面孔洞缺陷的微观、宏观的形貌特征和产生原因进行了对比分析, 认为: 灰铸铁切削加工后形成的孔洞缺陷实际是灰铸铁中的石墨剥落而形成的, 石墨剥落时可能有部分附着基体跟随被剥落, 结合实际熔化、加工等控制工艺要求, 提出了预防和改善孔洞缺陷的具体措施。

关键词: 灰铸铁; 加工面; 孔洞; 石墨

灰铸铁的金相组织由金属基体和片状石墨组成, 两者共同决定了灰铸铁的性能。灰铸铁中石墨具有的二重性, 有使力学性能降低的一面, 又能赋予灰铸铁良好的减震性、较低的缺口敏感性、良好的减磨性, 因其独特的性能特点广泛地应用于汽车零部件、工程机械、机床铸件。

灰铸铁机床导轨铸件经过机械粗加工、精加工后, 其加工面会经常出现众多的非常小的不规则、凹陷的孔洞缺陷, 肉眼观察较大的孔洞缺陷明显有凹坑、黑点, 有的孤立存在, 有的聚集在一起, 这种孔洞缺陷在机械加工中都被“公认”为是灰铸铁件材质“缩松、疏松”缺陷, 特别影响外观, 严重时无法通过精加工达到相应的加工精度要求从而导致铸件报废。同时有文献称上述缺陷为麻点缺陷^[1-2], 认为是厚大部分石墨缓冷、石墨集结形成。因此, 对于铸造工作者来说, 很有必要对机床导轨经过机械加工后表面的这种孔洞缺陷的形成原因进行探究及找寻对策, 解决或者降低此类缺陷, 保证灰铸铁件加工面的质量, 提升铸件加工面外观质量。

作者简介:

潘密(1985-), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事铸铁合金及熔炼研究工作。电话: 18071074186, E-mail: ph8223422@163.com

通讯作者:

程婧璠, 女, 博士, 副教授, 高级工程师。电话: 027-87312191, E-mail: chengjingfan@hust.edu.cn

中图分类号: TG245

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2023)10-1350-07

收稿日期:

2023-02-27 收到初稿,
2023-05-20 收到修订稿。

1 试验方法

1.1 试验材料及成分范围要求

本文所用原料为Z18生铁、废钢、FeSi75铁硅合金、FeMn65铁锰合金, 铜、锡为纯合金。经20 t中频感应电炉熔炼, 1 460 °C出铁, 采用0.3%硅钡孕育, 孕育后的铁液成分范围按照表1范围进行控制, 1 360~1 380 °C浇注

阶梯试块后面分别简称第1组、第2组、第3组试块, 第1组与第2、3组不是同一炉次铁液。

表1 阶梯试块的成分控制范围

Table 1 Composition range of gray cast iron step test block

w_B /%

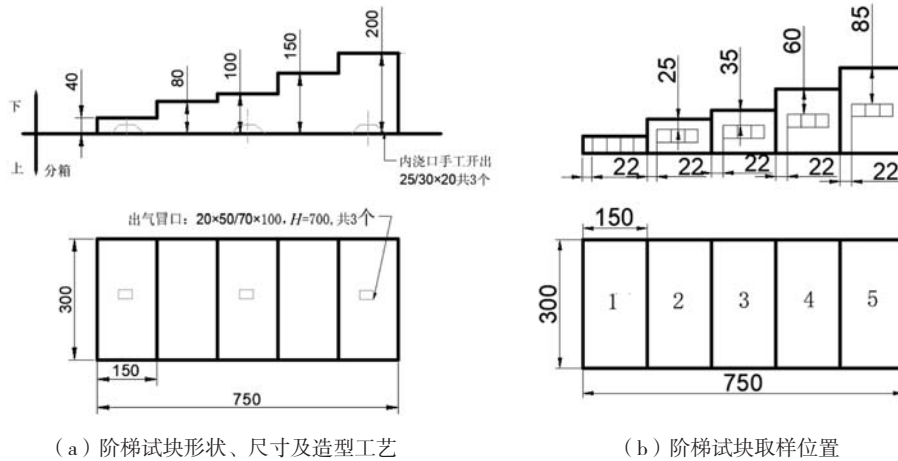
组别	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Sn	备注
1组	3.0~3.15	1.8~2.0	0.6~1.0	≤0.12	≤0.12	≤0.5	≤0.4	≤0.4	合金组
2组	3.0~3.15	1.8~2.0	0.6~1.0	≤0.12	≤0.12	≤0.5	≤0.4	≤0.4	合金+A组
3组	3.0~3.15	1.8~2.0	0.6~1.0	≤0.12	≤0.12	≤0.5	—	—	孕育组

1.2 试验过程和方法

试块采用呋喃树脂砂造型, 型腔刷锆英粉涂料, 试验试块采用阶梯试块, 各阶

梯壁厚分别为40 mm、80 mm、100 mm、150 mm、200 mm，且各个阶梯试块长度均为300 mm，宽度均为150 mm。阶梯试块形状、尺寸及造型工艺如图1a所

示，并对各组阶梯试块进行本体切割取样，取样位置示意图如图1b所示，所有试样均来自试块芯部（图1b方框中的第2根，由左向右数），后面统一简称试样。



(a) 阶梯试块形状、尺寸及造型工艺

(b) 阶梯试块取样位置

图1 阶梯试块形状、尺寸及造型工艺

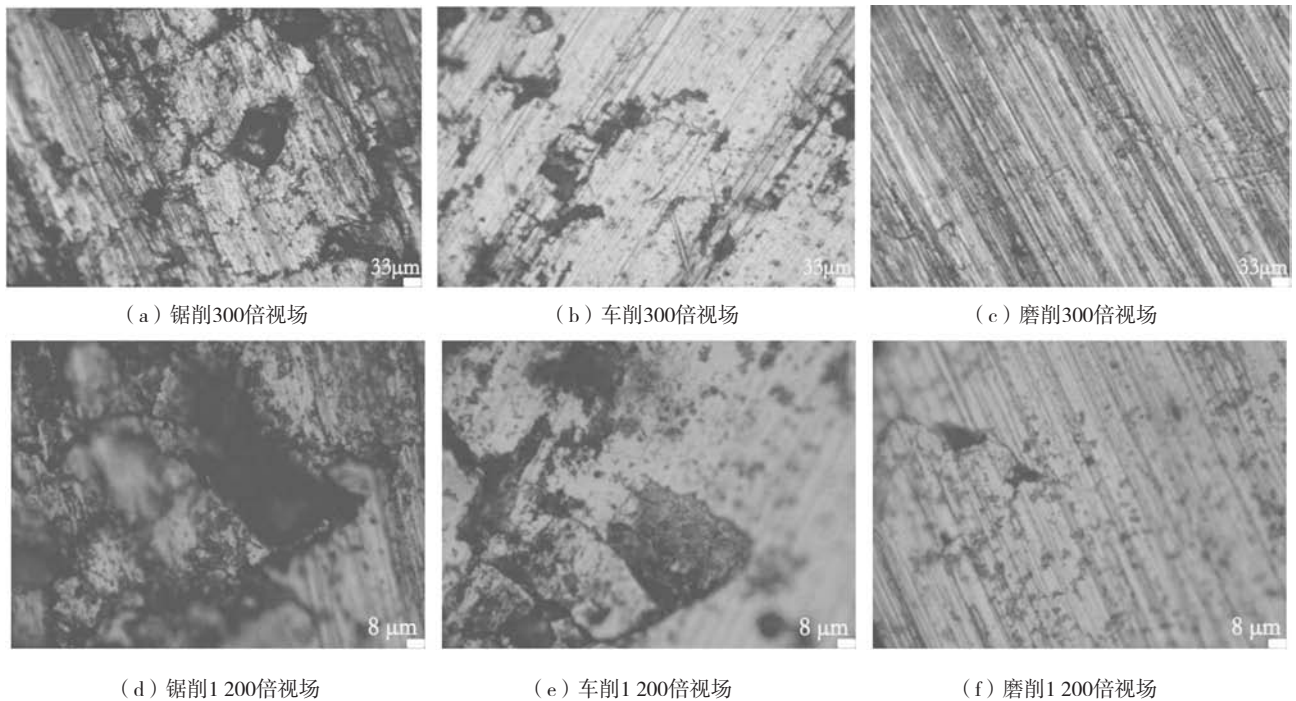
Fig. 1 Shape, size and molding process of step test block

对每一组每一阶梯试样（图1b中第2根）试样进行锯削、车削、磨削等不同形式的加工，观察不同加工形式下灰铸铁孔洞缺陷的宏观断面、微观形貌特征；对不同组试样进行同一加工，观察同一加工形式下灰铸铁孔洞缺陷的微观形貌特征，探究加工方式对孔洞缺陷的影响及孔洞缺陷的成因。

2 试验结果及分析讨论

2.1 同一试样不同加工方式下孔洞缺陷的宏观、微观形貌特征

通过对第2组同1根试样的3个面分别进行锯削、车削、磨削等不同方式的加工后，加工面的微观形貌如图2所示，宏观形貌如图3所示。



(a) 锯削300倍视场

(b) 车削300倍视场

(c) 磨削300倍视场

(d) 锯削1 200倍视场

(e) 车削1 200倍视场

(f) 磨削1 200倍视场

图2 同一试样的锯削、车削、磨削加工后微观形貌

Fig. 2 Micromorphology of the same sample after sawing, milling and grinding

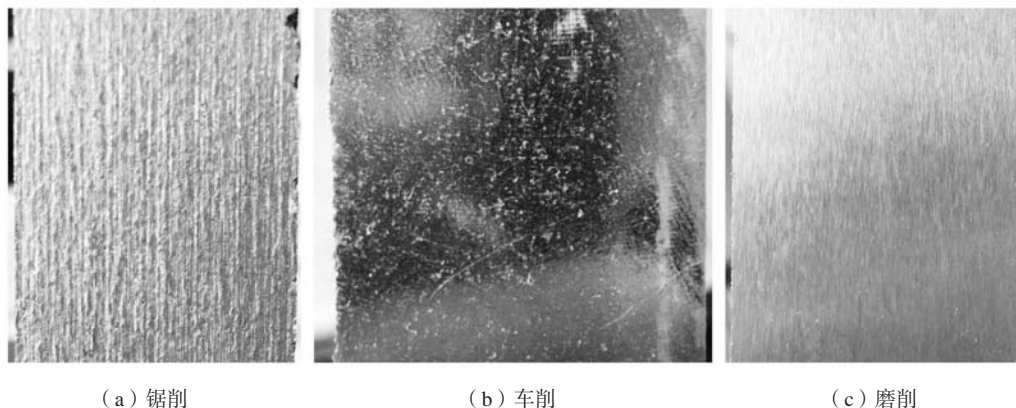


图3 同一试样的锯削、车削、磨削加工后宏观形貌

Fig. 3 Macromorphology of the same sample after sawing, milling and grinding 300x

通过对图2a、2d观察发现，锯削产生的孔洞直径较大、较深且有明显的异常剥落痕迹，孔洞之间可见连接纹路。通过对图2b、2e观察发现，车削产生的孔洞直径较小、深度较浅且在1 200光学显微镜倍下，孔洞凹坑内部明显可见有黑色物附着，类似灰铸铁中片状石墨“膜片”。通过对图2c、2f观察发现，磨削产生的孔洞直径更小、更浅，在300倍光学显微镜下，孔洞之间更加明显可见“连续印记”，这种孔洞凹坑更像是灰铸铁中的片状石墨“纹路”，在1 200倍光学显微镜下，较大孔洞尖角处明显与片状石墨连接。

由图2综合观察可以发现，其孔洞缺陷内部没有明显的枝晶特征，因此完全可以排除灰铸铁切削加工后形成的孔洞缺陷是灰铸铁件材质的疏松、疏松缺陷。

结合图3观察不难发现，对于同一种材质，3种加工方式下孔洞缺陷是越来越少，说明这种孔洞剥落是灰铁材质的“自然属性”，是本体材质的一部分。

同时再结合图2、图3观察，不同加工方式下孔洞确实有不同的特征，锯削肉眼可见较深的孔洞，车削后是比较孤立的孔洞现象，磨削后的孔洞明显减少，与微观反应的孔洞直径、深度等结果一致，由此也说明改善加工方式或者精度可以改善宏观灰铸铁加工面孔洞缺陷。

2.2 不同组试样同一加工形式下孔洞缺陷及金相的微观形貌特征

在低倍显微镜下，经过对3组阶梯试块进行切割后取得的共计15根试样，进行金相磨制并观察拍照，同时对15根试样的两个相同面分别进行车削、磨削加工，一面粗糙度要求Ra1.6（车削）、一面粗糙度要求Ra0.8（磨削），得到的低倍微观下孔洞的形貌特征如图4-6所示。

对于同组不同壁厚的阶梯试样，随着壁厚的增加，初生石墨（金相图片中黑色的点）的数量、大块

聚集的石墨都在增加，车削、磨削的孔洞缺陷长度、宽度也明显在增大，磨削加工面的孔洞缺陷点增大的更为明显，初生石墨、大块聚集的石墨增大趋势与孔洞缺陷增大趋势有明显的“同步现象”。由此也可以说明同种灰铸铁材质随着冷却速度的降低，加工后的孔洞缺陷增加。

不同组同壁厚情况下，就初生石墨、大块聚集的石墨而言，孕育组最少，合金组次之，合金+A组最多；就孔洞缺陷而言，孕育组最小，合金组次之，合金+A组最大最多，初生石墨、大块聚集的石墨与孔洞缺陷大小亦存在“同步现象”。同时观察发现孕育组的孔洞缺陷分布的较其他2组更加均匀，强化孕育可以减少初生石墨的析出、让石墨分布的更加均匀，因而其孔洞缺陷也将会分布的更加均匀，合金+A组情况下，石墨虽然短小但其有明显聚集现象导致了加工后更多的石墨剥落而导致孔洞缺陷的增加。

因此，综合上述分析并可以推论：灰铸铁切削加工后形成的孔洞缺陷实际是灰铸铁中的石墨剥落^[2]而形成的，石墨剥落时可能有部分附着基体跟随被剥落。

2.3 石墨剥落导致形成孔洞缺陷的原因探讨

灰铸铁共晶转变生长中石墨和奥氏体是共生晶体生长方式^[3]，其过程如图7所示，石墨以形核基点并长大，同时基点会跟随石墨的生长而生长，最终灰铸铁中形成的A型石墨的三维形态如图8^[4]所示。

从图中观察后不难发现，笔者认为灰铸铁最终形成的石墨有支撑的“心部”（由基点长大而来，金相中二维显示个人认为是粗点、或者初生石墨）和“叶片”（接触铁液的前端部位，金相中二维显示个人认为是片状石墨的长度、宽窄）组成，“心部”、“叶片”的粗细决定了石墨的大小、长度以及基体对其包裹的松紧程度。当加工切削刀面刚好经过的是片状石墨的“心部”时剥落的石墨就会形成较大的孔洞

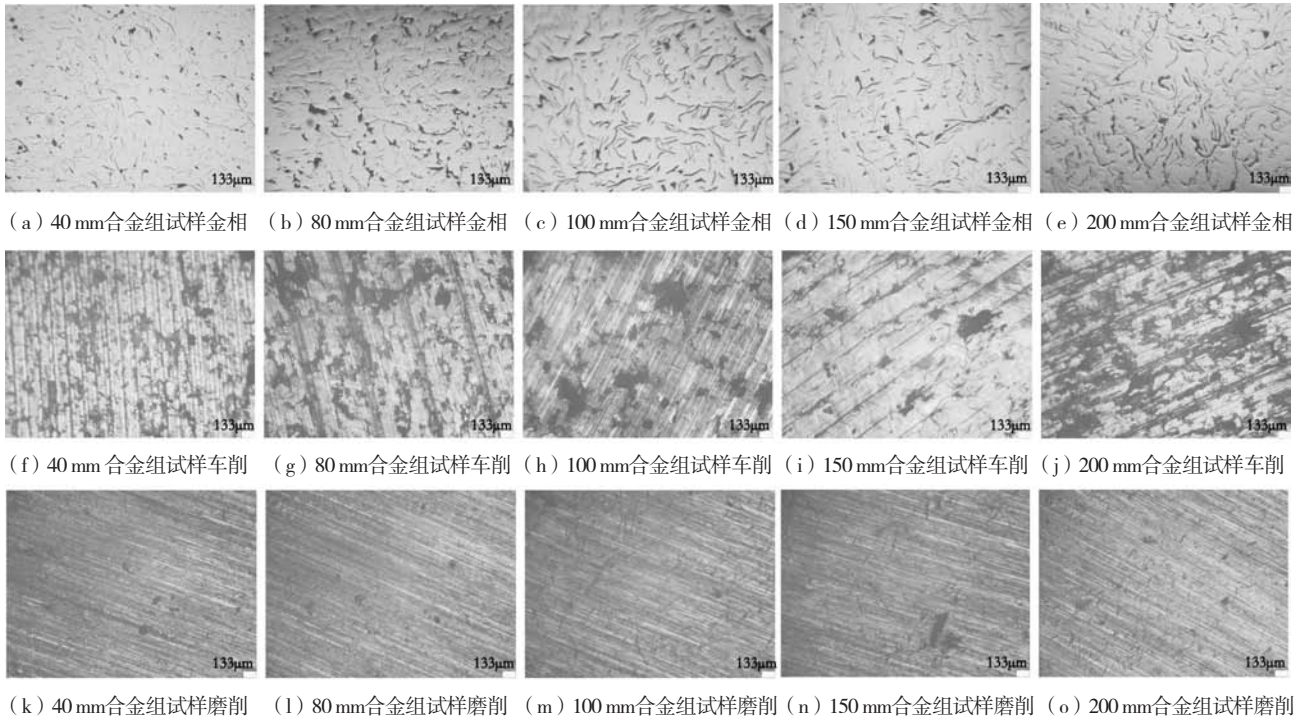


图4 第1组(合金组)阶梯试块微观形貌特征

Fig. 4 Microstructure characteristics of stepped test block of alloy group

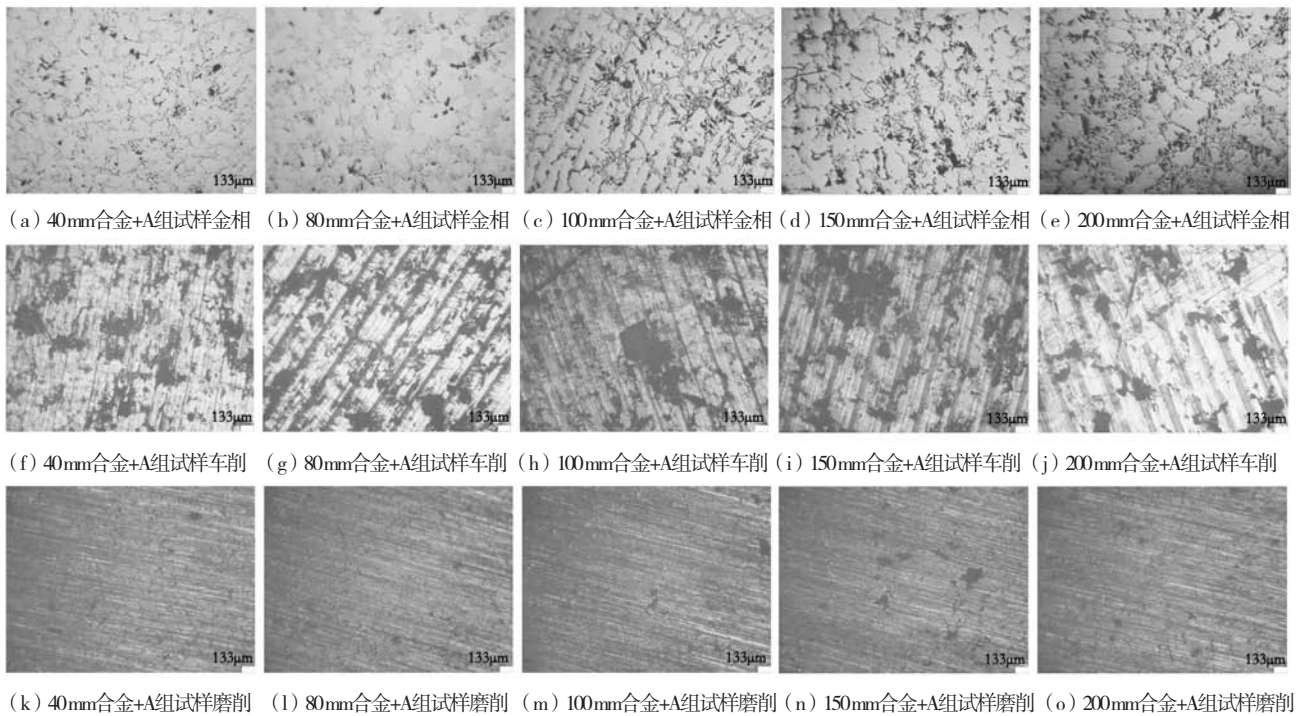


图5 第2组(合金+A组)阶梯试块微观形貌特征

Fig. 5 Microstructure characteristics of alloy+group A step test block

缺陷, 并且“心部”越粗其孔洞缺陷也就更大; 当加工切削刀面刚好经过的是片状石墨的“叶片”时剥落的石墨就会形成较小的长条、宽窄的孔洞缺陷, 并且

“叶片”越长、越宽其孔洞缺陷也就越长、越宽。如果石墨“心部”、“叶片”剥落后基体组织形成“孤岛”, 那么这部分基体也将会在后续的加工过程中被

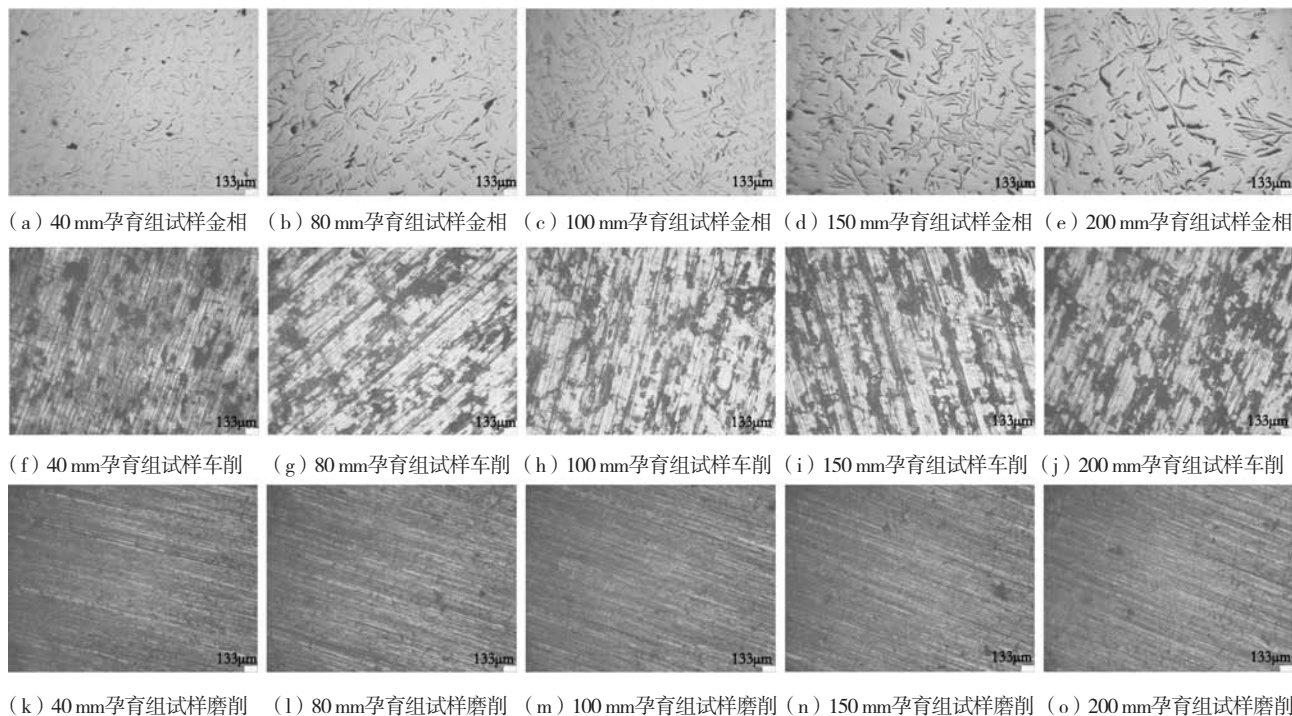


图6 第3组(孕育组)阶梯试块微观形貌特征

Fig. 6 Micromorphology characteristics of step test block of inoculation group

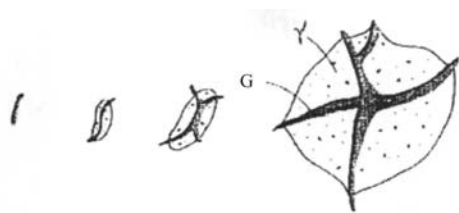


图7 灰铸铁共晶转变过程的示意图

Fig. 7 Schematic diagram of eutectic transformation process of gray cast iron

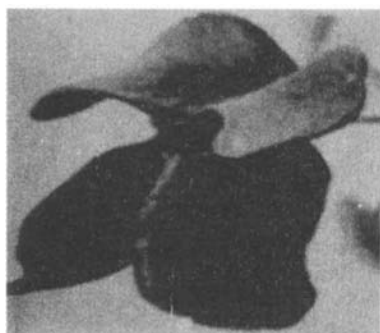


图8 灰铸铁A型石墨三维形态

Fig. 8 Three-dimensional morphology of gray cast iron type A graphite

剥落而形成更大的孔洞。

灰铸铁片状石墨的“心部”和“叶片”大小、生长等情况由成分、温度、凝固、速率、形核核心等相关因素决定。但是对于同种条件下随着凝固时间的推

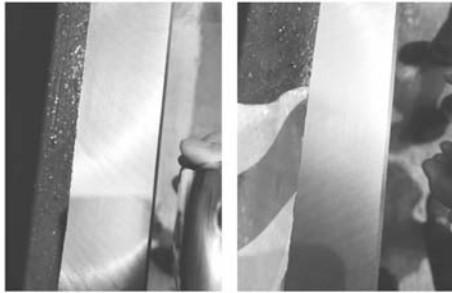
移凝固速度降低,石墨“心部”和“叶片”必然是会逐渐增大的,其带来的结果也就是加工后孔洞缺陷的增加。

结合同组阶梯试块不同的断面厚度,壁厚增加带来的结果就是实际凝固时间的增长,“心部”和“叶片”逐步长大后,亦即石墨大小、长度随着壁厚的增加而增大,由此车削、磨削同种加工面后石墨剥落也是逐渐增大的,宏观表现为孔洞缺陷的增加。同时,锯削、车削属于挤拉扯加工,因此会有较多的片状石墨的“心部”和其周边附着的基体组织被“连根拔起”,形成更大的孔洞缺陷,所以微观中显示的是坑洞;磨削属于挤压加工,撕扯力小,石墨的“心部”和“叶片”在这种情况下不易剥落,因此孔洞缺陷也较小,所以微观中显示的是石墨的“纹路”。

2.4 铸件强化孕育试验验证

在同一种HT250的机床床身铸件上,采取不同孕育的对比试验,设置对比试验组为:其他工艺相同,A组床身铸件采用包底孕育,B组床身铸件采用包底孕育+二次孕育(孕育量0.1%,强化孕育)。经过上述方案实际生产的床身铸件经过加工后的导轨面的质量情况如图9-10所示。

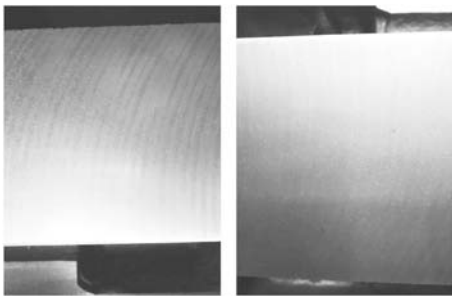
强化孕育处理是有效改善并提升铁液石墨形核能力能细化灰铸铁中的片状石墨(“叶片”减薄),减少初大石墨析出、石墨聚集(初生石墨减少、石墨细



(a) 无二次孕育 (b) 0.1%硅锑二次孕育

图9 XK2625床身精加工后油槽导轨面(壁厚50 mm)情况

Fig. 9 Oil groove guide surface (wall thickness 50 mm) of XK2625 bed after finishing



(a) 无二次孕育 (b) 0.1%硅锑二次孕育

图10 XK2625床身精加工后正导轨面(壁厚120 mm)情况

Fig. 10 The condition of the front guide rail surface (wall thickness 120 mm) of XK2625 bed after finishing

化即石墨“心部”会变细),那么A、B组经过同样的加工方式加工后,在宏观情况下,B组的孔洞会少于A组。

结合上图可以看出,采用强化的二次孕育组,床身铸件导轨本体无论是油槽处还是正导轨处,其加工后的孔洞缺陷都少于不进行二次孕育组,事实情况下也确实B组的孔洞会少于A组,由此证实上述灰铸铁切削加工后形成的孔洞缺陷实际是灰铸铁中的石墨剥落的推论是正确的。

3 铸件加工面孔洞缺陷(石墨剥落)的预防措施

综合以上分析可知,灰铸铁中加工面孔洞剥落就是加工过程中石墨的剥落,那么灰铸铁中细化石墨、减少初生石墨并防止石墨大规模聚集、制定合理加工工艺、改变加工方式等措施是解决上述问题的主要预防措施。结合实际熔化、加工等控制工艺要求,下面给出几种预防措施,可能需要几种同时一起使用,才能达到消除孔洞缺陷(石墨剥落)。

3.1 强化孕育处理

同等情况下,生产厚大、大型的灰铸铁件其工艺

已经充分考虑冷却的条件下,操作中2次及以上强化孕育或者选取不同的2种以上孕育剂(选择长效、细化石墨)进行孕育处理是有效改善并提升铁液石墨形核能力,减少初大石墨析出、石墨聚集,同时改善基体组织的均匀性以及石墨的包裹均匀性,从而改善石墨形态,亦可以改善加工后的石墨剥落程度,降低孔洞缺陷的形成,是生产中最优且最经济的使用方法,强化孕育最终还是需要以临近浇注孕育最为有效。

3.2 降低生铁提升废钢

同等情况下,采用降低生铁使用量,建议生铁使用量不超过30%,有条件的可降低至10%以下,可以有效减少生铁中初生石墨的遗传性,同时废钢配料比不低于50%甚至全废钢,由此提升废钢和提高外来增碳剂使用形成更多细小的异质石墨核心的合成铸铁工艺^[4]进行熔炼,从而改善石墨形态,亦可以改善加工后的石墨剥落程度,降低孔洞缺陷的形成。

3.3 提升铁液的过热温度

铁液过热、静置有利于消除生铁中粗大石墨遗传的影响,当温度高于1 500 ℃,可将初生石墨溶解到结晶临界半径以下,并使晶粒边界上的氧化物夹杂减少^[5-6],经过净化的铁液,石墨将会变小有利于改善石墨形态,亦可以改善加工后的石墨剥落程度,降低孔洞缺陷的形成。但过热温度提高,液态铁液自然降温时间将会延长,这不利于后期细小石墨的生长环境,因此需要结合生产现场进行必要的快速降温以达到提升过热温度消除粗大石墨遗传的同时防止液态铁液停留过长而导致的初生石墨增加问题。

3.4 增加合金

同等情况下,加入阻碍石墨化的Mn、Cr等经济合金元素,同时添加少量细化、促进、稳定珠光体的Sn、Sb等合金元素,有利于细小石墨的形成亦可以改善加工后的石墨剥落程度,降低孔洞缺陷的形成,但同时需要防止硬质点而导致切削难度增加及崩碎切屑而带来更多的石墨连同基体的剥落,灰铸铁机床铸件中Mn建议不超过1.2%,Cr建议不超过0.5%,Sn建议不超过0.1%,Sb建议不超过0.03%。

3.5 加快冷却速度

同等情况下,加快冷却速度可以设置更多、更厚的冷铁和加快砂型传热及降低浇注温度等具体措施,这都能有效的细化共晶团和有利于细小石墨的形成,亦可以改善加工后的石墨剥落程度,降低孔洞缺陷的形成。

3.6 降低碳、硅含量

降低碳、硅含量可以直接细化石墨，亦可以改善加工后的石墨剥落程度，降低孔洞缺陷的形成，但此种方式使用不当容易造成铸件出现缩松缺陷、“孔洞缺陷”，建议优化并强化孕育、降低浇注温度等措施联合使用。

3.7 合理的加工切削量及方式

加工往往有粗加工、精加工，粗加工进给量越大，那么被挤压撕扯的石墨形成的剥落孔洞也就更大更多，后一步工序必须考虑前序石墨剥落凹坑的深度制定精加工的切削深度，一方面减小前序石墨剥落坑洞的面积，另一方面减少新的石墨剥落，精加工的切削深度可以是粗加工的1/10，同时降低进给量，两者有效结合方能改善因石墨剥落而形成的孔洞缺陷。增

加、改变加工工序，精加工后改为磨削，石墨剥落明显减少甚至消失，最终可以改善石墨剥落程度，降低孔洞缺陷的形成。

4 结论

灰铸铁切削加工后形成的孔洞缺陷不是灰铸铁件材质的缩松、疏松缺陷表现。灰铸铁切削加工后形成的孔洞缺陷实际是灰铸铁中的石墨剥落。石墨剥落而形成的孔洞与石墨“心部”（初生石墨、大块石墨聚集）密切相关，细化石墨减少初生石墨降低大块石墨聚集可以降低石墨剥落程度，降低孔洞缺陷的形成。改善加工工艺或在精加工后增加磨削工序可以明显降低石墨剥落程度，降低孔洞缺陷的形成。

参考文献:

- [1] 许德隆. 灰铸铁件加工面麻点状小孔缺陷的分析及防止 [J]. 现代铸铁, 2009 (6): 82-87.
- [2] 曾华宾. 如何消除灰铸铁缸体麻点缺陷 [J]. 装备制造技术, 2020 (4): 186-188.
- [3] 李传斌. 灰铸铁和球墨铸铁凝固过程中的几个问题 [J]. 现代铸铁, 2015 (3): 74-80.
- [4] 潘密, 周万强, 张杰, 等. 中频电炉熔化对机床灰铸铁件硬度的影响 [J]. 现代铸铁, 2021 (4): 11-14.
- [5] 潘密, 邵斌, 杨宗明, 等. QT350-22AL厚大断面低温球墨铸铁铸件熔炼生产工艺 [J]. 铸造, 2022, 71 (9): 1169-1172.
- [6] 王丽萍, 李大勇, 郭二军, 等. 厚大断面RE—Mg球铁喷粉净化及球化效果的研究 [J]. 铸造技术, 2007, 28 (7): 899-903.

Analysis of the Causes and Countermeasures of Machined Surface Defects of Gray Iron Castings

PAN Mi¹, YANG Zong-ming¹, YANG Hua,¹ ZHOU Yan¹, HE Cheng¹, CHENG Jing-fan^{1,2,3}

(1. Wuhan Wuzhong Casting and Forging Co., Ltd., Wuhan Heavy Duty Machine Tool Group Corporation, Wuhan 430205, Hubei, China; 2. State Key Laboratory of Material Forming and Mold Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. School of Mechanical Engineering, Wuhan Software Engineering Vocational College, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract:

The microscopic and macroscopic morphology characteristics and causes of the hole defects in the machined surface of HT250 gray cast iron castings were compared and analyzed by metallographic method. It is believed that the hole defects formed after the machining of gray cast iron are actually caused by the peeling of graphite in gray cast iron, and some of the attached matrix may be followed by the peeling of graphite. Combined with the actual melting, machining and other control process requirements, specific measures to prevent and improve hole defects are proposed.

Key words:

gray cast iron; machined surface; hole; graphite