

冷铁组织演变对 ZL205A 合金铸件 线性偏析的影响

刘建辉, 杨 琴, 闻福林, 郑登智

(中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 四川绵阳 621900)

摘要: ZL205A合金密度小、塑性好且承受静载荷高, 工程应用中常采用冷铁抑制其铸件中缩松、裂纹等缺陷的产生, 但冷铁在重复浇注过程中组织的演变及其对铸件质量的影响少见报道。采用金相显微镜、扫描电镜、硬度计以及激光导热仪等设备, 通过对比使用次数不同的45号钢冷铁微观组织及性能, 发现45号钢经过升温缓冷后, 内部组织主要由铁素体和珠光体组成, 铁素体含量和晶粒尺寸经过多次热循环后均显著增大, 导致基体内位错密度显著下降从而提升了冷铁的热扩散系数。热扩散系数增大导致冷铁的激冷作用增强、ZL205A合金铸件凝固时收缩加剧, 冷铁缝隙对应铸件位置作为热节在增强的拉应力作用下产生热裂, 金属液填充热裂区域产生富Cu区形成线性偏析。

关键词: ZL205A合金; 冷铁; 热扩散系数; 线性偏析

ZL205A合金以密度小、成本低、承受静载荷高和塑性好等优势成为承载用铝合金铸件的首选材料^[1-2]。作为典型的Al-Cu-Mn系高强度铸造铝合金, ZL205A合金的凝固结晶温度范围较宽(633~544℃), 极易以糊状凝固方式进行凝固结晶, 表现为: 凝固初期, 高熔点 α -Al枝晶先凝固, 根据溶质再分配原则, 铸件先凝固的区域溶质Cu含量低, 而后凝固的液相中溶质Cu含量高。凝固末期, 溶质Cu富集的液体小熔池补充固态收缩产生的缩松、裂纹等缺陷, 使之愈合。这些补充缺陷形成的富Cu区域在铸件温度降至548℃时会发生二元共晶反应: $L \rightarrow \alpha(\text{Al}) + \text{Al}_2\text{Cu}$, 形成 Al_2Cu 共晶相。由于共晶相与 α -Al固溶体成分相差较大, 凝固后的铸件中会形成共晶偏析^[3]。

由于 Al_2Cu 共晶偏析的产生与缩松、裂纹等缺陷的产生密切相关, 防止铸件产生缩松、裂纹等缺陷可抑制共晶偏析产生^[4-6]。为此, 学者们提出了多种方式来预防或减轻ZL205A合金铸件中出现共晶偏析。如王建军等^[7]提出采用低压浇注工艺能明显降低ZL205A合金大型筒体类铸件共晶偏析。严青松等^[8]发现调控脉冲超声工艺参数能够提高Cu元素的有效分配系数并改变Cu元素的溶质再分配行为, 进而改善了ZL205A合金的共晶偏析现象。李玉胜等^[9]提出可通过浇注系统、冷铁和割筋协同作用, 同时保证ZL205A合金壳体铸件各部分同时凝固来抑制共晶偏析的产生。

作为一种行之有效且极易实现的工艺手段, 通过优化冷铁抑制ZL205A合金铸件中缩松、裂纹等缺陷的产生已被学者们广泛研究报道^[10-12]。然而, 目前已报道的文献主要集中于研究冷铁厚度以及放置位置对ZL205A合金铸件缺陷的影响, 冷铁在重复浇注过程中组织的演变及其对ZL205A合金铸件共晶偏析的影响未见报道。本文研究冷铁组织演变对ZL205A合金铸件线性偏析的影响, 以期为ZL205A合金铸件冷铁的使用和裂纹、共晶偏析等缺陷防治提供指导。

1 试样制备与方法

ZL205A合金化学成分(质量分数)为: 5.0%Cu、0.4%Mn、0.22%Ti、0.15%Zr、0.11%Cd、0.1%V、0.1%B、余量Al。预制锭在差压铸造设备中熔炼, 浇

作者简介:

刘建辉(1975-), 男, 高级工程师, 学士, 研究方向为铝合金铸造。电话: 0816-2497571

中图分类号: TG146.21

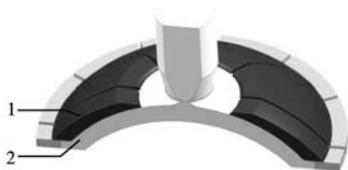
文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)10-1344-08

收稿日期:

2025-05-09 收到初稿,
2025-06-30 收到修订稿。

注温度在710 ℃左右。铸件与冷铁在砂型中的相对位置示意图如图1所示，铸件被其外侧多块冷铁包围，冷铁厚度为10 mm，冷铁间缝隙为8 mm。冷铁均需进行吹砂处理，确保表面没有锈迹油污等，再刷上一层桐油，并将经过0.5~0.8 mm筛孔过筛的干净石英砂撒于冷铁表面，砂层厚度在1 mm左右，并将余砂吹尽。冷铁随后放入烘烤室内在330 ℃保温30 min，而后随炉冷却至50 ℃。经检查，冷铁表面呈棕褐色，且砂层均匀牢固地附着于冷铁的工作表面。使用时，冷铁的工作表面不再涂刷涂料，过筛后均匀且牢固附着于冷铁表面的石英砂保证了每次使用时冷铁的工作表面粗糙度始终保持一致。根据冷铁距离铸件的位置变化，将冷铁分为距离铸件更近的内表面以及距离铸件较远的外表面。不同位置冷铁的组织演变由Meizs-ML9000金相显微镜和带有Gemini-SEM300电子背散射衍射（Electron backscatter diffraction, EBSD）系统的JSM-7200F扫描电镜（Scanning electron microscopy, SEM）进行分析表征，冷铁的硬度由HVS-1000维氏硬度计进行分析测试，冷铁的热扩散系数由LFA1000激光导热仪进行表征。



1. 冷铁 2. 铸件

图1 铸件与冷铁的相对位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the position of the casting and the chill

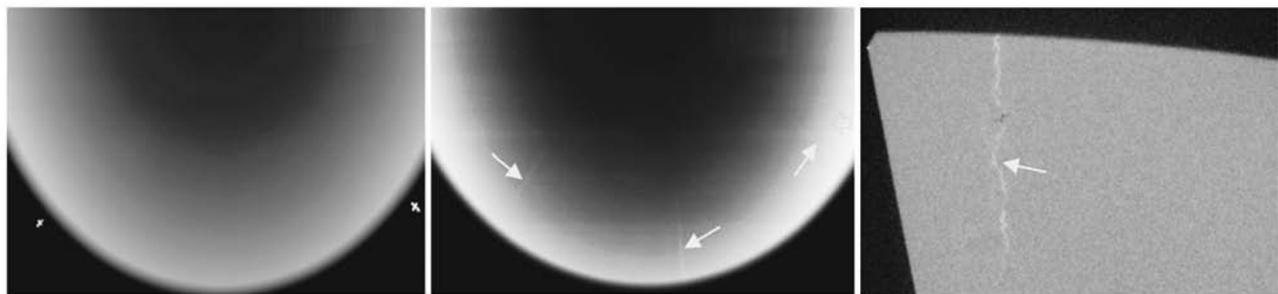
2 试验结果及分析

2.1 冷铁使用次数对 ZL205A 合金铸件线性偏析的影响

铸铁、石墨和钢均是冷铁常用的材质，工业生产中一般根据铸件材质、尺寸以及形状等要素的差异确定所用冷铁的材质。目前，已有少量学者提出不同冷铁材质、不同铸件大小等差异均会导致冷铁失效时使用次数的差异^[13]。本文研究发现，采用45号钢作为浇注ZL205A合金铸件的冷铁时，冷铁失效的主要表现为浇注30次后，冷铁缝隙处对应铸件位置出现线性偏析。具体表现为，采用新冷铁时，一批次45件产品均未出现明显的线性偏析，而同一型铸件、同一批冷铁在使用次数超过30次时，一批次45件产品中超过一半的产品多处冷铁缝隙处对应铸件位置出现明显的线性偏析。图2给出了新旧冷铁对应ZL205A合金铸件的无损探伤结果。这里，新冷铁指仅使用1次的冷铁，旧冷铁指使用次数达到30次的冷铁。可以看出，采用新冷铁浇注成形的铸件探伤底片上没有显示明显的缺陷，而采用旧冷铁浇注成形的铸件探伤底片上出现了多道线性缺陷。如图2（b）和图2（c）中黄色箭头所示，对应着冷铁放置的间隙，采用旧冷铁浇注成形的铸件存在亮白色的线性缺陷，根据射线探伤仪底片原理可知，这些亮白色的线性区域的形成应为ZL205A合金中的高比重合金元素Cu发生成分偏析所致。

2.2 热循环过程中冷铁组织演变规律

图3和图4给出了新旧冷铁不同位置、不同放大倍数的金相组织图。根据冷铁距离铸件的位置变化，冷



(a) 新冷铁浇注铸件RT结果

(b) 旧冷铁浇注铸件RT结果

(c) 旧冷铁浇注铸件中线性偏析的CT结果

图2 新旧冷铁对应铸件的无损探伤结果

Fig. 2 X-ray testing results of the castings using old and new chills

铁分为外表面和内表面。对比同一块冷铁不同位置的金相组织，金相组织并未因距离铸件位置的变化而改变，均由白色的铁素体和黑色的珠光体共同组成。对比不同的冷铁在相同位置和相同倍数下的组织，旧冷铁经过多次热循环后组织发生了明显的粗化，白色铁

素体和黑色珠光体均显著增大。

由于金相图片中铁素体和珠光体的对比度高且界面分明，本研究采用图像处理软件统计了新旧冷铁内部不同部位的铁素体含量。图5给出了新旧冷铁不同位置的铁素体含量统计图，图中铁素体含量对应的每

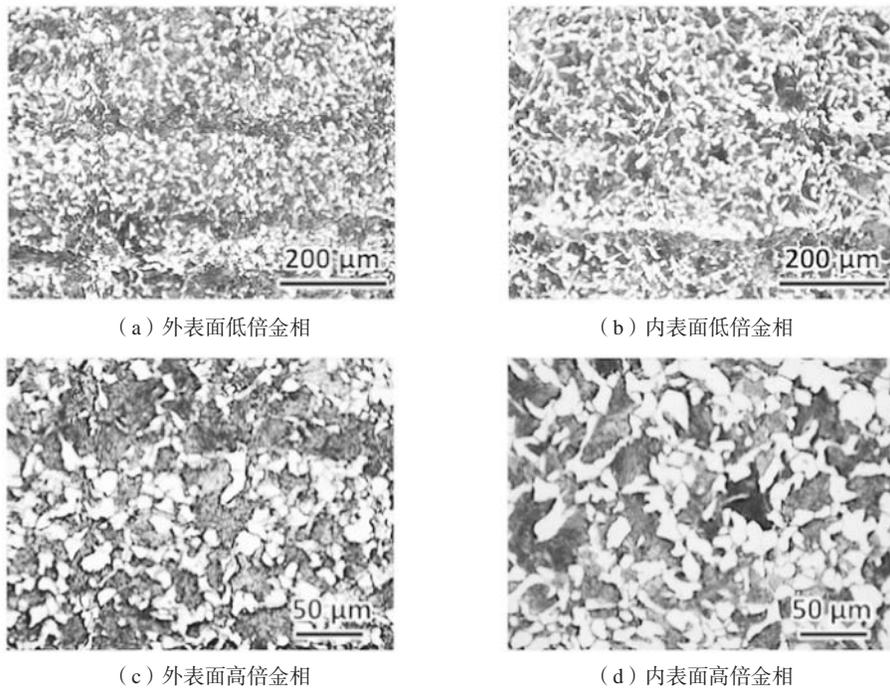


图3 新冷铁不同位置的金相组织图

Fig. 3 Optical microscope observations of different locations for the new chill

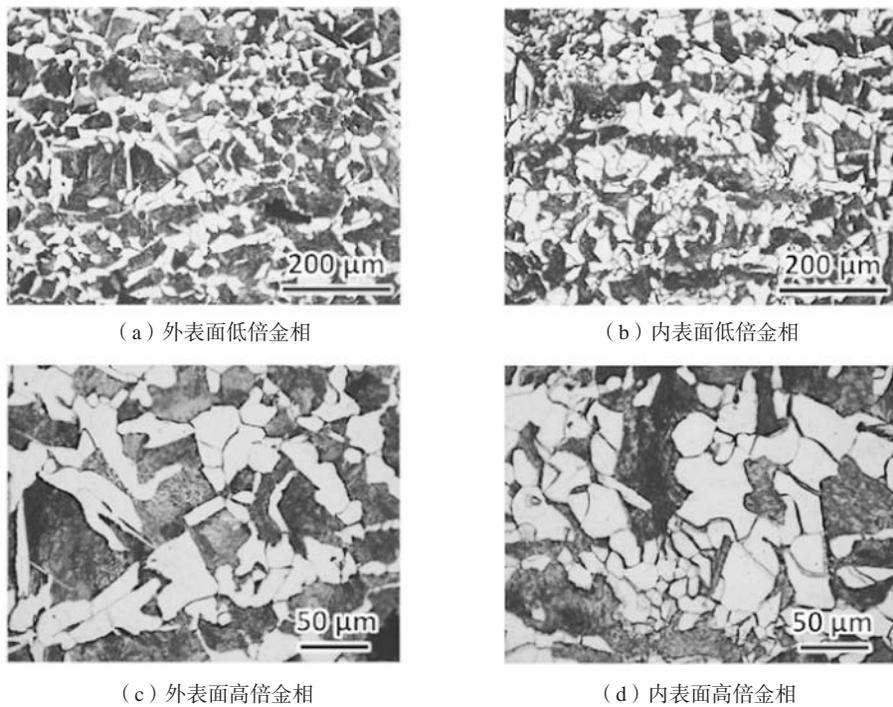


图4 旧冷铁不同位置的金相组织图

Fig. 4 Optical microscope observations of different locations for old chill

个值均是随机挑选多组金相图片进行统计后所得。对比同一块冷铁不同位置的统计结果，铁素体含量随着冷铁距离铸件位置的变化而改变，总体上看，内表面对应的铁素体含量高于外表面对应的统计值。对比不

同的冷铁在相同位置和相同倍数下的组织，旧冷铁内部的铁素体含量相对于新冷铁的统计值发生了显著提升。

图6和图7给出了新旧冷铁不同位置的SEM观测结

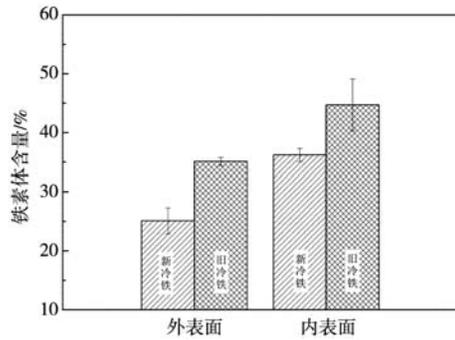
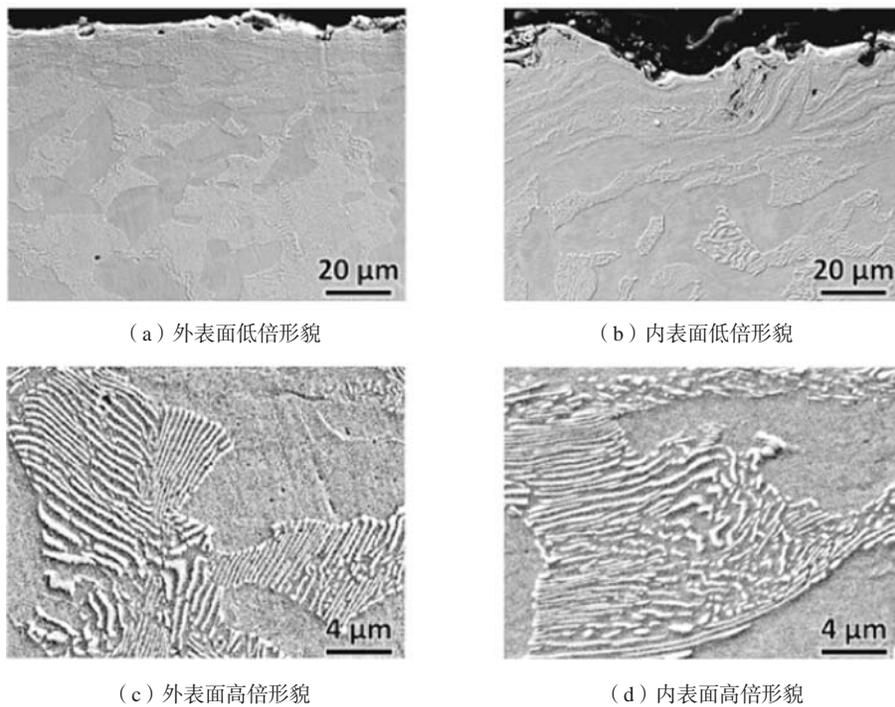


图5 新旧冷铁不同位置的铁素体含量统计图

Fig. 5 Statistical results of the ferrite contents at different locations of old and new chills

果。可以看出, SEM观测结果和金相观测结果基本一致, 对比同一块冷铁不同位置的SEM观测结果, 组织形貌并未因距离铸件位置的变化而发生改变, 均由铁素体和片层状的珠光体共同组成。对比不同的冷铁在相同位置的低倍组织形貌, 旧冷铁经过多次热循环后组织发生了明显的粗化, 铁素体和片层状珠光体尺寸均显著增大。对比不同的冷铁在相同位置的高倍组织形貌, 经过多次热循环后, 珠光体片层间距发生了明显降低。

图8和图9给出了新旧冷铁不同位置的EBSD分析测试结果, 上中下三行结果分别对应着晶粒取向分布图、晶界取向差分布图以及局部平均取向差图。可以



(c) 外表面高倍形貌

(d) 内表面高倍形貌

图6 新冷铁不同位置的SEM观测结果

Fig. 6 SEM observations at different locations of the new chill

看出, 新冷铁内部晶粒没有明显的择优取向, 经过多次热循环后的旧冷铁内部晶粒也没有发生明显的择优取向转变, 但晶粒尺寸显著增加, 具体晶粒尺寸结果如表1所示。根据铁素体是 α -Fe内固溶有一种或数种其他元素、晶体点阵为体心立方的固溶体, 渗碳体是一种具有复杂晶格结构的间隙化合物, 而珠光体是铁素体和渗碳体组成的混合物这一事实, 结合晶界取向差分布图, 可以看出, 铁素体对应着仅存在晶界取向差大于 10° 的区域, 而珠光体对应着外部晶界取向差大于 10° 且内部存在着大量晶界取向差在 $2^\circ \sim 10^\circ$ 范围的区域。另外, 局部平均取向差图表明, 珠光体对应区域位错密度明显高于铁素体对应区域。

2.3 热循环过程中冷铁性能演变规律

具有体心立方晶格结构的铁素体内部的溶碳能力很差, 当温度降低至室温时, 铁素体的溶碳量进一步下降至0.0008%。因此, 铁素体的性质与纯铁非常相似, 即强度和硬度低但塑性好。珠光体是由铁素体和渗碳体组成的混合物。与铁素体不同, 渗碳体是含碳量为6.69%的一种具有复杂晶格结构的间隙化合物, 其性质为硬度高且脆性大。因此, 珠光体的性质介于铁素体和渗碳体之间, 表现为强韧性好且硬度适中^[14]。此外, 金属材料的硬度与晶粒尺寸也存在密切的联系, 一般对于同一种金属材料, 晶粒尺寸越大, 其硬度越小。这是由于晶粒尺寸增大, 晶界数量减少, 对位错

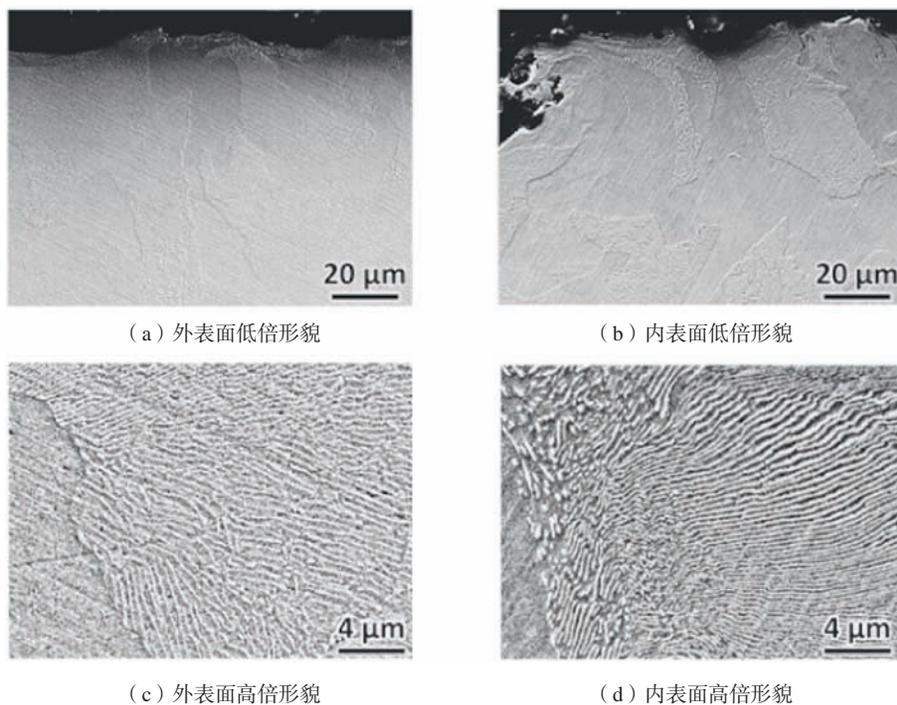


图7 旧冷铁不同位置的SEM观测结果
Fig. 7 SEM observations of different locations of the old chill

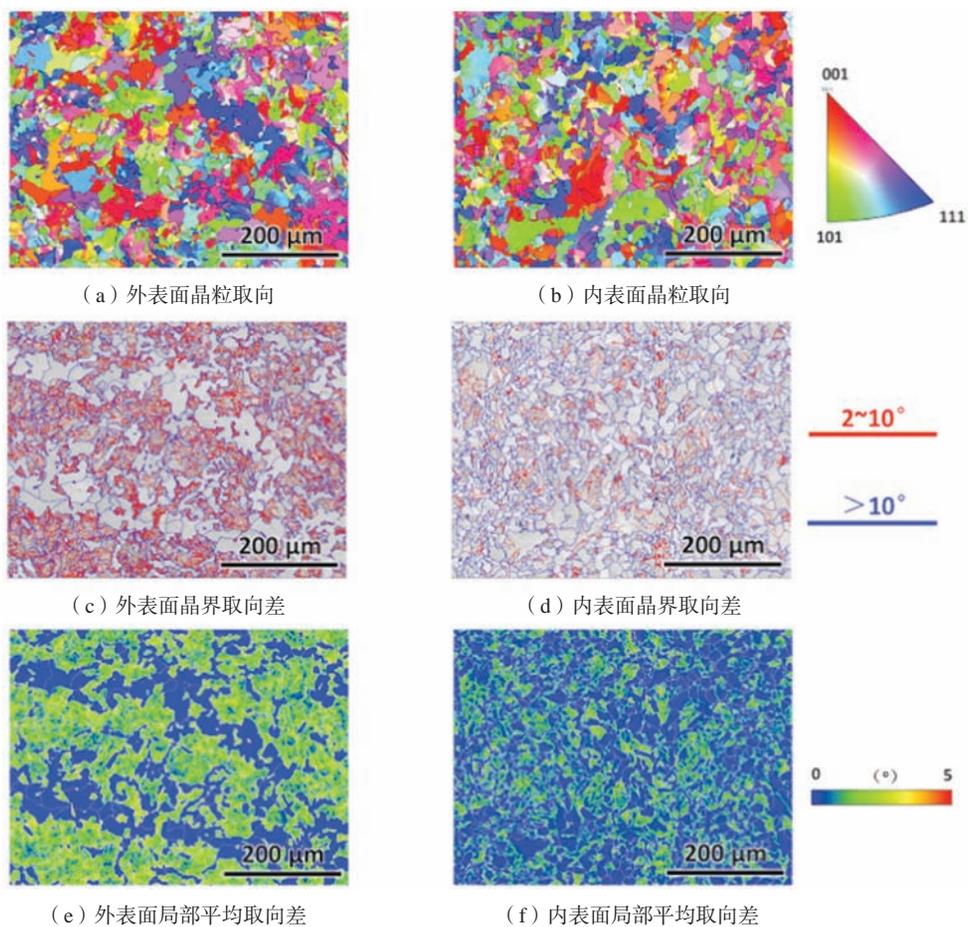


图8 新冷铁不同位置的EBSD分析测试结果
Fig. 8 EBSD analysis test results at different locations of the new chill

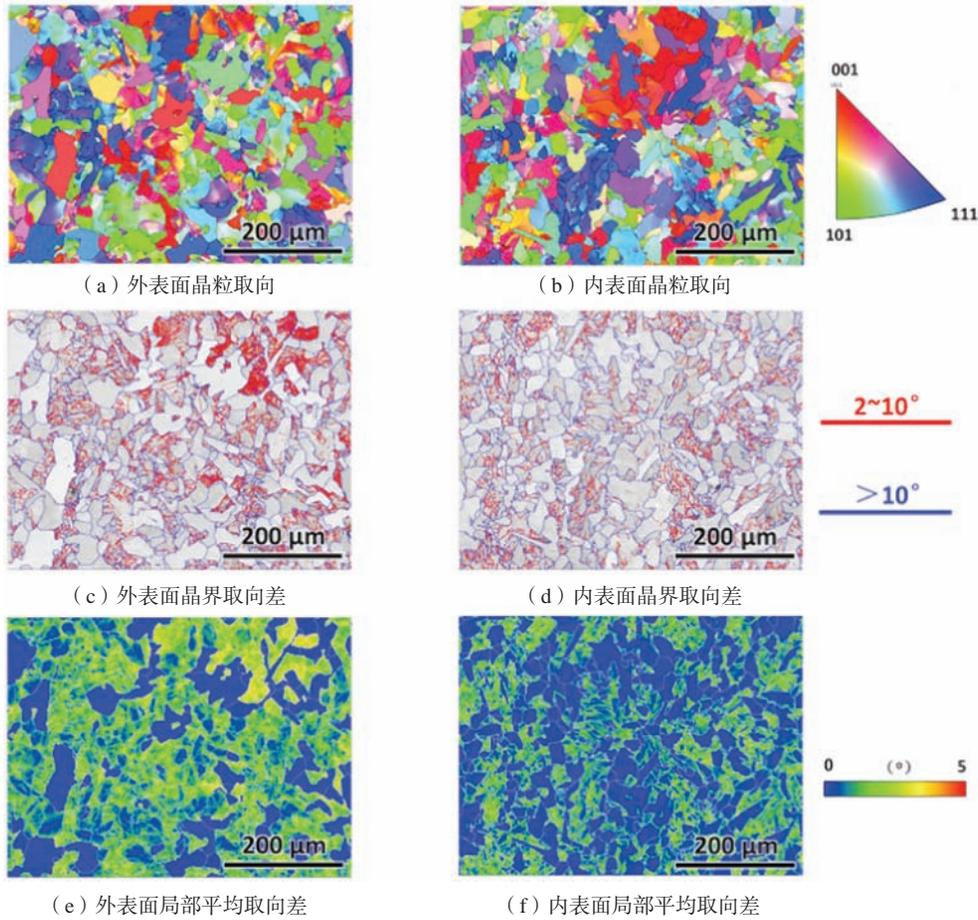


图9 旧冷铁不同位置的EBSD分析测试结果

Fig. 9 EBSD analysis test results at different locations of the old chill

运动的阻碍减少，金属材料的硬度随之降低。图10给出了新旧冷铁不同位置的硬度测试结果。对比同一块冷铁不同位置的硬度测试结果，可以发现，距离铸件更近的内表面对应的硬度低于距离铸件更远的外表面对应的硬度。对比不同的冷铁在相同位置的硬度测试结果，可以发现，经过多次热循环后，旧冷铁不同位置的硬度均低于新冷铁不同位置的硬度。将新旧冷铁

不同位置的硬度测试结果与新旧冷铁不同位置的铁素体含量统计图（图5）和晶粒尺寸统计结果（表1）进行对比，可以发现，硬度变化趋势与铁素体含量和晶粒尺寸的变化趋势相吻合，即铁素体含量越高、晶粒尺寸越大，对应位置的硬度越低。

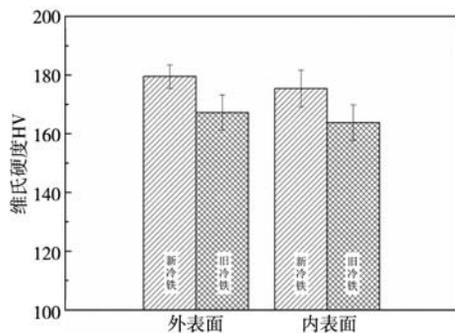


图10 新旧冷铁不同位置的硬度测试结果

Fig. 10 Hardness test results at different locations of the old and new chills

表1 新旧冷铁不同位置的晶粒尺寸结果

Tab. 1 Grain size results at different locations of the old and new chill irons

新冷铁	晶粒尺寸/ μm	旧冷铁	晶粒尺寸/ μm
外表面	33.53 ± 10.41	外表面	43.89 ± 15.17
内表面	28.84 ± 9.39	内表面	41.68 ± 14.53

图11给出了新旧冷铁不同位置的热扩散系数测试结果。对比同一块冷铁不同位置的热扩散系数结果，可以发现，距离铸件更近的内表面对应的热扩散系数高于距离铸件更远的外表面对应的热扩散系数。对比不同的冷铁在相同位置的热扩散系数测试结果，可以发现，经过多次热循环后，旧冷铁不同位置的热扩散

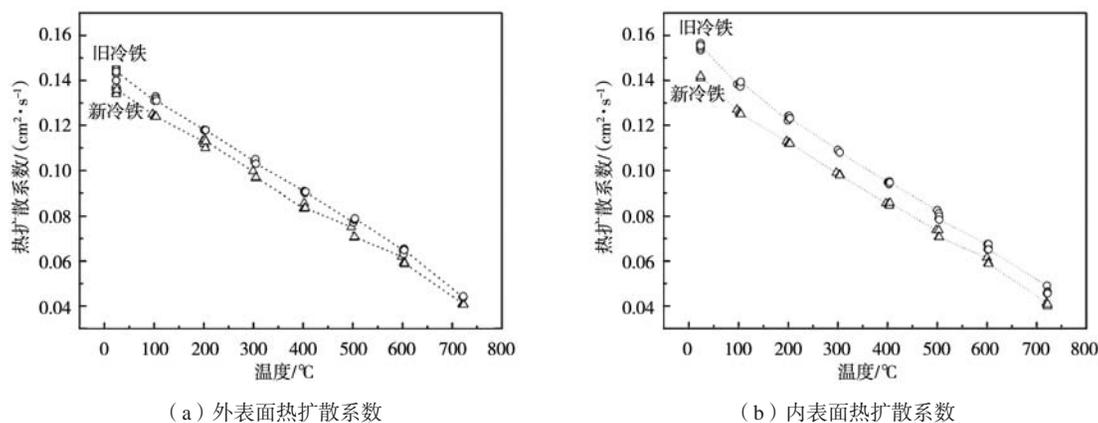


图11 新旧冷铁不同位置的热扩散系数

Fig. 11 Thermal diffusivity coefficient of the old and new chills at different locations

系数均高于新冷铁不同位置的热扩散系数。

通过研究热循环过程中冷铁组织演变规律,我们发现多次热循环后,旧冷铁中铁素体含量和晶粒尺寸均显著增大。组织的局部平均取向差结果表明,铁素体的位错密度小于珠光体的位错密度,铁素体含量的增大则意味着组织内部的位错密度降低。需要说明的是,本研究中浇注温度为710 $^{\circ}\text{C}$,并未达到珠光体向奥氏体转化的起始温度,我们认为在该温度下反复加热冷铁,铁素体含量明显增加的原因为:冷铁内外表面经过机加工后形成一层变形层(如图6和图7所示),在后续循环加热冷却过程中,碳钢表面存在脱碳发生的倾向,加之表面变形层中存在高密度的缺陷,这为碳元素扩散提供了更多通道,致使表层脱碳更加严重,脱碳最终导致铁素体含量提高。另外,晶界上存在着大量的空位、位错等缺陷,晶粒尺寸增大意味着晶界在组织中的占比减少,同样也能降低缺陷密度。WILZER J等^[15]系统的研究了合金元素、热处理对钢的导热性能的影响,发现合金元素种类、数量以及热处理方式及温度均能显著影响电子和声子对热的传导进而影响钢的导热性能,减少位错等缺陷的密度则能够有效提升声子对热的传导从而增加钢的导热能力。由

此,本研究认为图2所示的旧冷铁缝隙处产生线性偏析的原因为:随着冷铁使用次数的增加,冷铁的激冷作用增强,当熔体充型到达冷铁位置发生强烈的凝固收缩,在冷铁间的缝隙处产生的拉应力显著增强,导致铸件凝固过程中的热裂倾向显著增加,热裂产生后在压力作用下金属液对其进行填充产生富Cu区,富Cu区域在铸件温度降至548 $^{\circ}\text{C}$ 时发生二元共晶反应: $L \rightarrow \alpha(\text{Al}) + \text{Al}_2\text{Cu}$,形成 Al_2Cu 共晶相,即产生线性偏析。

3 结论

(1) 采用45号钢作为冷铁材料浇注ZL205A合金时,使用一定次数后铸件出现线性偏析缺陷。

(2) 45号钢作为冷铁经过升温缓冷后内部组织主要由铁素体和珠光体组成,铁素体含量和晶粒尺寸经过多次热循环后均显著增大,导致基体内位错密度显著下降,从而提升了冷铁的热扩散系数。

(3) 热扩散系数增强导致冷铁激冷作用增强、铸件凝固时收缩加剧,冷铁缝隙对应铸件位置作为热节在增强的拉应力作用下产生热裂,金属液填充热裂产生富Cu区,从而形成线性偏析。

参考文献:

- [1] 贾洋江,陈邦峰. ZL205A合金高强优质铸件在大飞机上的应用[J]. 材料工程, 2009(1): 77-80.
- [2] 樊振中,王端志,王鲲鹏,等. 大型环类铝合金铸件结构与工艺设计[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(7): 804-809.
- [3] 史晓平,李玉胜. ZL205A合金偏析缺陷研究[J]. 铸造, 2011, 60(10): 1022-1026.
- [4] 周永江,左强,范学焱,等. ZL205A合金铸件中偏析的形成机理与预防措施[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(2): 125-127.
- [5] 贤福超,郝启堂,李新雷,等. ZL205A合金晶界偏析行为研究[J]. 铸造技术, 2012, 33(12): 1391-1393.

- [6] 郑卫东, 阮磊, 厉沙沙, 等. 晶粒细化工艺对ZL205A合金偏析缺陷的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (7): 792-795.
- [7] 王建军, 丁方政, 郑卫东, 等. ZL205A合金大型筒体类铸件偏析缺陷控制技术研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (4): 396-401.
- [8] 严青松, 芦刚, 王清, 等. 脉冲超声工艺对ZL205A合金微观组织及偏析的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29 (2): 279-285.
- [9] 李玉胜, 翟虎, 闫卫平, 等. ZL205A合金壳体铸件线性偏析缺陷形成机理研究 [J]. 铸造, 2006, 55 (11): 1170-1173.
- [10] 孙浩, 崔恩强, 张娜, 等. ZL205A合金舱体低压工艺设计及数值仿真应用 [J]. 上海航天, 2019, 36 (2): 131-135.
- [11] 张西生, 赵磊, 周正海. 低压铸造ZL205A铸件缺陷分析及工艺优化 [J]. 金属加工 (热加工), 2016 (15): 25-27.
- [12] 师素粉, 樊红军, 张建平, 等. 大型复杂ZL205A铝合金骨架铸造工艺设计与优化 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (9): 2021-2024.
- [13] 纪汉成. 浅谈铸造激冷系统的设计和冷铁标准化 [J]. 铸造工程, 2019 (4): 28-38.
- [14] 张红昆, 张延, 陈磊, 等. 铁碳合金相图研究 [J]. 科技创新与应用, 2021 (31): 36-39.
- [15] WILZER J, KUPFERLE J, WEBER S, et al. Influence of alloying elements, heat treatment, and temperature on the thermal conductivity of heat treatable steels [J]. Steel Research International, 2015, 86 (1): 1234-1241.

Effect of Microstructure Evolution of Chill on Linear Segregation of ZL205A Alloys

LIU Jian-hui, YANG Qin, WEN Fu-lin, ZHENG Deng-zhi

(Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract:

ZL205A alloys exhibit low density, good plasticity, and high static load capacity. In engineering applications, chills are commonly employed to suppress defects such as shrinkage porosity and cracks in castings. However, few studies report the microstructure evolution of the chills during repeated casting processes and their impact on casting quality. Experimental investigations were conducted using optical microscopy, scanning electron microscopy, hardness testing and laser thermal conductivity analysis. By comparing the microstructure and properties of C45 steel chill with different service times, it is found that the microstructure of C45 steel was mainly composed of ferrite and pearlite after heating followed by slow cooling. The ferrite content and grain size increased significantly after multiple thermal cycles, resulting in a significant decrease in the dislocation density and an increase in the thermal diffusion coefficient of the chill. The increase of thermal diffusion coefficient led to the enhancement of the chilling effect of the chill, which intensified the shrinkage tendency and thus the occurrence of the hot cracking during the solidification of the ZL205A alloys. As a result, the molten metal filled the hot cracking area to produce a Cu-rich region, and linear segregation occurred in the ZL205A alloys.

Key words:

ZL205A alloys; chill; thermal diffusion coefficient; linear segregation
