

气流渗透冷冻砂型性能特征试验研究

武俊腾 闫佳译 吕文杰 马嘉浩 王 宇 李伯君 徐 宏 毛红奎 刘昕钊
(中北大学材料科学与工程学院)

摘 要 冷冻铸造以水为粘结剂固化砂型,其作为一种新型的绿色铸造方法而被关注。重点研究了冷冻铸造型砂冷冻温度及成分配比等因素对冷冻铸型强度、透气性等性能的影响。研究了不同水量、粘土含量、冷却温度、砂子目数条件下铸型的性能,也分析了不同浇注温度下铸型的变化。结果表明,冷冻铸型在成本低的前提下整体性能优于树脂铸型且更环保。

关键词 凝固;熔化;冷冻法;成形

中图分类号 TG242.1 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Performance Characteristic of Airflow Permeation Frozen Mold

Wu Junteng, Yan Jiayi, Lü Wenjie, Ma Jiahao, Wang Yu, Li Bojun, Xu Hong, Mao Hongkui, Liu Xinzhaohao
(School of Materials Science and Engineering, North University of China)

Abstract: Taking water as a binder to solidify the sand mold, frozen casting is paid attention as a new green casting method. The effects of freezing temperature and composition proportion of frozen casting sand on the strength and air permeability of frozen casting mold were investigated. The mold performance under different water and clay contents, cooling temperatures and sand mesh conditions was explored experimentally, and the mold transition under different pouring temperatures were also systematically carried out. The results indicate that the overall performance of frozen casting is superior to that of resin mold under the premise of low cost, which is more environmentally friendly with widely application, and possesses positive significance for promoting the goal of carbon peak and carbon neutrality.

Key Words: Solidification, Melting, Freezing, Molding

在铸造行业中,树脂砂铸造的铸件尺寸精度高、表面光洁,但生产过程中有甲醛、苯酚、二氧化硫等有害气体产生。冷冻铸造法是在砂中加入水和粘土来代替树脂砂造型所需的粘结剂、以液氮为冷冻剂的造型方法,使铸型本身获得较高的强度及透气性^[1]。相较于树脂砂造型,冷冻砂生产过程中只产生水蒸气,且每吨冷冻砂的成本明显降低。因此,发展以回收型砂为基础的绿色铸造已成为铸造行业当前最为紧迫的任务之一。

冷冻铸造法是指采用砂子、膨润土加少量水做成湿型,在冰箱中以-20℃将铸型冷冻,但最后的铸型强度以及性能达不到生产要求^[2]。在20世纪70年代后期,该技术在日本受到了重视,在液氮等低温技术方面进行了实用化的研究并进行了工业化推广,但液氮与型砂作用不好,冷冻密度不均匀,消耗大量的液氮,且得到的冷冻铸型的强度低^[3-5]。国内对该冷冻铸造技术仍处于探索阶段,有研究者^[6]提出了数字化无模冷冻铸造,并基

于该技术系统地开展了A356铝合金在冷冻铸型中的凝固成形机理研究。有研究提出了一种新型的液氮渗流气冲制备铸型的方式,充分利用一次气冲与二次气流反弹使液氮渗入铸型,得到冷冻密度均匀且冷冻效果极佳的铸型^[7-15]。基于以上观点,本研究采用液氮气冲造型方法以保证铸型本身冷冻密度均匀,分别研究了不同水含量、粘土含量、砂子目数、冷冻温度对铸型性能的影响,并进一步开展了在环境温度下放置不同时间的铸型性能对比,系统地开展了冷冻铸型浇注试验,旨在为绿色铸造技术推广提供参考。

1 试验设备及方法

1.1 试验设备及流程

试验主要流程及所用设备见图1。制备标准圆柱试样所用模具尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 的标准双叶装

样筒,称取 143~147 g 的型砂,均匀填充到筒内后,用锤式制样机锤击砂样 3 次紧实,最终试样直径与高度均为 50 mm。制样完成后置于气冲造型机上进行液氮气冲冻结,10 s 后取出试样,连同装样筒置于型砂透气性测定仪上,初始气压为 100 MPa,打开开关等待机器显示屏数值稳定后读数。

获得冷冻标准圆柱试样后,随后放于 XQY-II 液压型砂强度测定仪平台上,中心设有标准试样专用夹具,上方有液压圆柱,液压柱以 1 mm/s 缓慢下降直至接触试样,然后缓慢加压至试样失去承载能力,此时所显压力值即为试样的抗压强度。

制备特制 8 字形标准模具,高为 66 mm,腰部宽度及厚度为 22.36 mm,将所制试样连同模具一起于气冲造型机中进行冷冻处理。将冷冻试样从模具中取出,置于 XQY-II 液压型砂强度测定仪上,夹具下方固定在仪器底座上,上方连接液压拉杆,液压杆以 0.5 mm/s 的速度拉伸试样直至断裂,此时仪器显示压力值即为试样的抗拉强度。

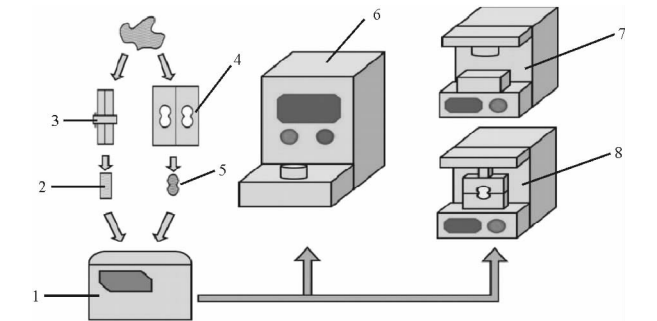


图 1 试验主要流程及设备

Fig.1 Flow chart and apparatus for experiment

1.造型机 2.标准圆柱试样 3.标准装样筒 4.标准 8 字试样模具
5.标准 8 字试样 6.ZTY 智能透气性测定仪 7.XQY-II 抗压强度测定仪 8.XQY-II 抗拉强度测定仪

1.2 测试材料

采用硅砂,其平均粒径为 160.5 μm ;使用的粘土含砂粒很少且有黏性,铸造合金为 ZL205A 铝合金,其密度为 2.82 g/cm^3 ,结晶间隔温度为 544~633 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 试验方法

1.3.1 硅砂的颗粒分布与形貌

利用 SDZ 型微机控制电磁微振筛砂机筛分硅砂的粒度分布。将标准筛按照筛孔孔径大小的顺序叠好,倒入 50 g 硅砂,调整好工作振幅,设定时间,结束后取出各号筛内的砂粒倒在白色蜡光纸上,筛内若镶嵌有砂粒,用毛刷轻轻刷下,再倒入玻璃皿内分别用天平称量记录。图 2 为硅砂的粒度分布,筛分后的硅砂尺寸为 0.1~0.7 mm,主要集中在 0.3 mm 处。使用 OLYMPUS BX51M 型光学显微镜观察硅砂的颗粒形态。其形态为不规则多边形,角系数分别为 1.2,见图 3。

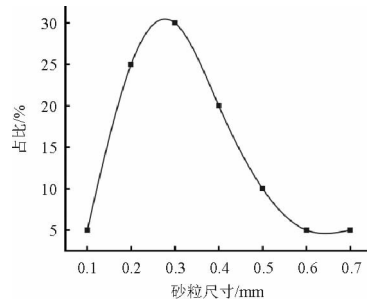


图 2 硅砂粒度分布

Fig.2 Size distribution of silica sand particle

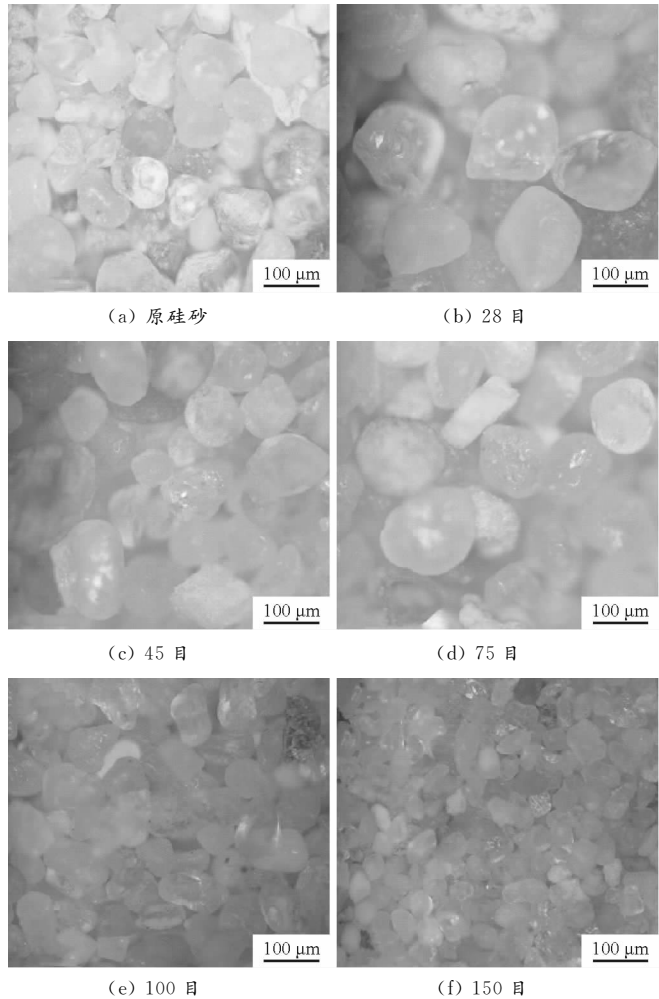


图 3 不同目数的硅砂微观形貌

Fig.3 Micro morphologies of silica sand with different meshes

1.3.2 试样冷冻

将适量硅砂、粘土与水按比例混合并搅拌均匀,型砂中水分含量应保持在 3%~5%,粘土含量为 5%。采用液氮渗流气冲造型法造型,具体步骤如下:在砂箱内放入模型,铺型砂,填砂高度大于 20 cm,简单振实。刮去多余型砂,打开小气冲阀,并导入液氮,采用保温装置保证导入液氮温度不高于-130 $^{\circ}\text{C}$ 。静置 2~3 min,待液氮充分渗入。通过抽气泵从外界抽取并压缩空气进行短时贮存,打开小气冲阀,完成小冲击预紧实。关闭小气冲阀,打开大气冲阀,完成大气冲紧实^[1-3]。然后起

模、出模,得到铸型,随后在型腔内均匀喷涂绝热涂料。其中液氮量与所用型砂质量比为 0.75。在用液氮过程中要考虑液氮的气化,液氮与氮气的比值为1:696,液氮流速控制在 20~30 mL/s,气冲 3~5 s 完成小冲击预紧实,气冲 5~10 s 完成大气冲紧实。

1.3.3 浇注

称取 7 kg 硅砂,加入 5% 的黏土并充分混匀,再加入 8% 的水,充分搅拌均匀后制作铸型。具体步骤如下:用木质框制作底面积为 230 mm×190 mm,高为 115 mm 的长方形池,填入约 30 mm 高的型砂并春实平整;后将直径为 60 mm 的圆柱筒垂直放于预先填入的型砂平面的中心,然后再填入约 20 mm 厚的型砂春实平整用于固定圆柱模具;沿着圆柱径向以 5 mm 为起点依次取 5、10、15 和 20 mm 4 个测试点埋入热电偶测温线,将剩余型砂全部填入并春实平整;取出圆柱形模具,得到尺寸为 230 mm×190 mm×110 mm 的铸型,再与模底板一同转移到冷冻柜进行冷冻;待铸型温度达到 -30~-20 ℃,取出并浇注,浇注温度设有 760 ℃ 和 800 ℃ 两种,最后通过热电偶读取测试点温度并绘制温度-时间曲线。

2 试验结果及分析

2.1 不同冷冻温度对铸型性能的影响

图 4 为冷冻铸型强度与冷冻温度的关系。可以看出,砂型强度在 -20 ℃ 开始随着冷却温度的降低而不断升高,在 -60 ℃ 时达到 4.2 MPa。随着冷冻温度继续下降,砂型强度保持稳定,这是因为冰晶形态对于温度的敏感度几乎消失,此时冷冻温度将无法再影响砂型强度。

冷冻温度影响砂型强度的原因:①未冷冻铸型内部,水在黏土表面以自由水形式存在,此时水分子受重力影响会沉降到铸型下方,最终造成冷冻铸型上下密度不均,致使铸型内部受力不均匀,因此强度较低;而冷冻温度越低,冷冻速率越快,水分子沉降效果越微弱,最后得到的冷冻铸型密度均匀,型砂的强度出现上升的趋势;②测试过程中铸型内部的冰晶会在室温下进行消融,使内部水分子间作用力减弱,实际承担外力的水分子数降低,把具有冰晶形貌但无法发挥冰晶全部承载能力的冰晶强度称之为冻融强度。在冷冻时间相同的情况下,冷冻温度越低,冷冻效果越好,测试过程中冰晶的冻融强度就越大,测试时冰晶可以承受更大外力^[4],型砂的强度出现上升的趋势;③水分子由液态转变为冰晶体同样需要形核长大,而冷冻温度越低,水分子更趋向于形成细小的核心,而非长成大块完整的晶体。由于大体积晶粒内部存在诸多晶体缺陷会降低冰晶联结桥的

强度,因此一定范围内降低冷冻温度,可以使冰晶得到细晶强化,增强冰晶联结力从而提升铸型强度。

图 5 为不同冷冻温度下铸型的透气性测定。可以看出,冷冻铸型的透气性随着冷冻温度的降低而降低,大约在冷冻温度为 -65 ℃ 后保持稳定,原因是铸型内部本身存在许多孔隙,未冷冻前水分子自由移动而均匀填充孔隙,冷冻后水分子将形成规则的冰晶,而晶体生长往往具有一定的方向性,致使孔隙无法被充分填满从而形成供气体逃逸的气隙。这些气隙大小及数目受冰晶形态影响,冷冻温度越低,水相变以后形成的冰晶越趋向于形成无方向性的等轴晶,有利于填满原有孔隙。试验表明,在 -65 ℃ 时,绝大多数冰晶都已经发展为无方向等轴晶^[5]。同时,低的冷冻温度也会使冰晶数目增多,使冰晶均匀分散在砂粒之间将铸型中的孔隙分隔开,从而降低了铸型的透气性。

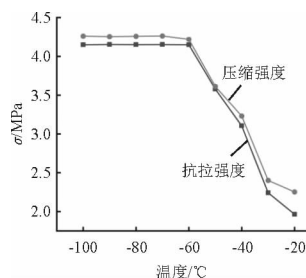


图 4 不同冷冻温度下铸型的抗拉强度及抗压强度测定
Fig.4 Determination of tensile strength and compressive strength of molds at different freezing temperatures

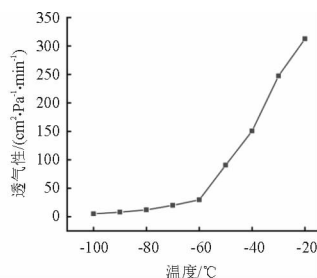


图 5 不同冷冻温度下铸型的透气性测定
Fig.5 Determination of air permeability of mold at different freezing temperatures

2.2 不同因素对铸型强度及透气性的影响

2.2.1 铸型强度测定

在浇注过程中,冷冻铸型型砂在熔融金属液的影响下由原来的冷冻状态会逐渐变成湿态砂最后变成干砂。故在此过程中会产生冷冻状态下铸型的黏结强度、微融化后的湿强度和浇注后的干强度 3 种强度。图 6 为不同黏土含量与水含量对型砂抗拉强度与抗压强度的影响。可以看出,砂水含量增加会使砂型强度显著提升,这是因为黏结强度主要取决于冰晶和砂粒之间的界面黏附力,在冷冻铸型中,水以冰晶形态存在于砂粒之间,并通过形成冰晶联接桥提升铸型强度,水量增加有利于冰晶包覆砂粒,从而提高其界面黏附力;在砂水含量一定时,随着黏土含量的增加,黏度反而降低,这是因为黏土作为黏结剂必须被水润湿后才表现出湿黏结性,只有黏土充分吸水后才能在表面形成完整的水化膜,从而相互连接起到"桥接"作用,在黏土含量较低时有利于型砂与水分的充分、均匀混合^[6],而黏土含量上升势必会造成水分浸润不足,从而削弱"桥接"作用,降低砂型强度;

型砂颗粒含水量的增加可以显著增加型砂颗粒之间冰晶联结桥的数量,从而增加冰晶与砂粒之间的有效自由黏结界面面积。黏土含量的增加可有效降低水分沉降对强度均匀性造成的影响。

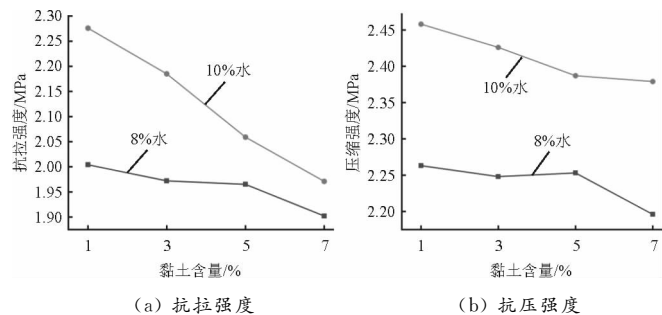


图 6 不同黏土含量与水含量对型砂抗拉强度与抗压强度的影响
Fig.6 Effect of different clay and water contents on tensile strength and compressive strength of molding sand

湿强度大小主要取决于砂粒粒径、水含量、黏土含量及铸型紧实度等因素。①在同样紧实条件下,砂粒越细,强度越高;粒度越分散,小颗粒越易于嵌入大颗粒之间,能增加砂粒间接触面积,故使强度增加;②黏土加入量多时需要的水分也多。粘土加入过量,强度保持稳定。在黏土用量一定时,随着水分的变化,强度先增大后减小。在水量不足时,黏土不能形成完整水化膜,故黏结力不够;水分过多时,黏土胶粒间出现自由水,黏结力显著下降,强度随之降低。此外,铸型的紧实度越大,其湿强度越大。

黏土砂干燥后,也有一定的干强度。如果型砂的干强度太差,失去水分以后表面就会发脆,容易被金属液冲坏。相反,型砂的干强度太高,铸型的落砂性差,铸件易产生应力和裂纹^[7]。而最理想的是提高表面层的干强度而不提高背层的干强度。黏土砂的干强度不是很高,除了受黏土本身粘结能力影响外,干强度还受黏土加入量和水的影响。黏土含量越高,干强度越高。黏土含量一定时,水分对型砂干强度的影响与对其湿强度的影响不一致。型砂的水分愈高,干强度也愈高。这是因为黏土中的水分越高,黏度就越小,在春实型砂的过程中,黏土颗粒容易进行更紧密地排列,所以烘干后聚合强度较高。

2.2.2 铸型透气性测定

在浇注的初始阶段,如果冰气化成的水蒸气不能被导出,而是积存在铸型内部,就会导致铸件产生气孔,甚至引起型腔内金属液与气体反应发生飞溅爆炸等事故。因此,冷冻铸型的透气性,尤其是在金属液进入型腔后的透气性十分重要。由于砂粒和水在低温下收缩或膨胀特性不同,两者不能同等量的收缩或膨胀,因此在低温下砂粒和水膜间的空隙增大,从而提高了冷冻铸型的透气性。冷冻铸型的透气性比普通黏土砂的透气性高得多,也高于水玻璃砂的透气性,一般不低于

500 cm²/(Pa·min)。

冷冻铸型的透气性主要取决于铸型中的冰晶黏结桥。冰晶联结桥主要存在于型砂颗粒表面,型砂颗粒含水量的增加可以显著增加型砂颗粒之间冰晶联结桥的数量,从而增加冰晶与砂粒之间的有效自由黏结界面面积^[6]。水与型砂二元混合体在冷冻过程中由于沉降会造成水分在型砂中分布不均匀,从而影响冷冻铸型的透气性。黏土具有很好的固水效果,添加黏土的含量会对铸型透气性产生显著影响。因此研究通过调节水含量和黏土含量的配比,获得具有不同透气性的冷冻铸型,进而分析金属充型过程中冷冻铸型的透气性大小。

图 7 为不同黏土含量与水含量对型砂透气性的影响。可以看出,在黏土含量一定时,含水量为 8% 的铸型透气性高于含水量 10% 的,且最高可以达到 470 cm²/(Pa·min)左右,而含水量 10% 的铸型的透气性最高才达到 370 cm²/(Pa·min)左右。随着黏土含量与水含量的增加,铸型的透气性均下降。这是因为黏土存在于砂粒之间,随着黏土含量增加,砂粒间缝隙变小,气体逸出也随之减少,所以透气性降低。水以冰晶的形式存在于砂粒之间,随着水含量增加,冰晶的数量增加,冰晶联结桥增多,砂粒间冰晶面积增大,气体逸出也随之减少,导致透气性降低。

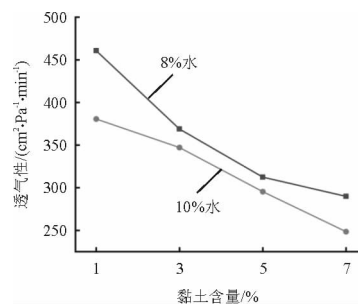


图 7 不同黏土含量与水含量对型砂透气性的影响
Fig.7 Effect of different clay and water contents on air permeability of molding sand

2.2.3 双因素优选法确定最优水含量、黏土含量

采用双因素优选法,先假定某因素不变而对另一个因素利用单因素法进行优选取得一个试验结果,再按相反方法取得另一个试验结果^[8]。在硅砂中分别加入 1%、3%、5%、7% 的黏土与 2%、4%、6%、8%、10% 的水进行正交试验,共 20 组,每组试验测三次,测定砂型的抗拉强度、抗压强度以及透气性的平均数值,由于黏土含量为 1%、3% 的砂型强度受黏土影响不明显,因此仅考虑黏土含量为 5%、7%。一般黏土砂最佳含水量为 4%,因此先固定水含量为 4%,用单因素优选黏土含量,得最优含量为 5%;固定另一黏土含量为 7%,对水含量进行单因素优选,得最佳含水量为 8%,两次优选得到两种水含量 4% 和 8%,结合黏土含量 5% 和 7% 可以得到 4 组数据。优选过程见图 8。

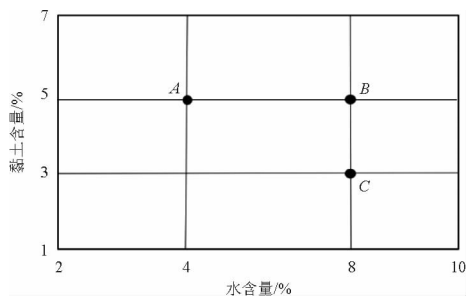


图 8 双元素优选平行线法示意图

Fig.8 Schematic diagram of two-element optimal parallel line method

为了保证结果的可靠性,取 4 个点做放大试验。1、2 点为优选前所认为的好点;3、4 点为优选后的好点。比较结果见表 1。

表 1 优选法下不同水含量与黏土含量对铸型性能的数据对比
Tab.1 Comparison of different water and clay contents on mold performance under optimization method

试验号	水含量/%	粘土含量/%	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	透气性/(cm ² ·Pa ⁻¹ ·min ⁻¹)
1	4	7	0.912	1.201	586.7
2	4	5	0.964	1.196	616.9
3	8	7	1.902	2.196	289.9
4	8	5	1.965	2.253	312.5

可见 2 点和 4 点为两次优选得到的好点,其中 4 点抗拉强度较 2 点高 1.001 MPa,抗压强度高 1.057 MPa,透气性为 2 点的 50.66%。在实际生产中,砂型强度是影响铸件品质最大的因素,决定铸件是否能抵抗金属液压力使其完整成形,强度越高越容易生产出复杂内腔结构;透气性影响着金属液的填充过程以及铸件的表面品质,而采用铸造涂料或者改善排气系统可以解决透气性带来的成形问题,因此 4 点采用率最高。证明用优选法选出的水含量为 8%、黏土含量为 5%的铸型整体性能最好^[8]。

2.3 不同粒径对铸型性能的影响

在冷冻造型中,型砂级配会对铸型的强度和透气性产生影响,细砂的配比越高,同一测试时间内“8”字试样的抗拉强度越高。图 9 为不同粒径砂子制备的铸型强度。可以看出,粒度较大时,砂粒数量越少,总表面积较小,搅拌时砂粒表面的粘土不易达到均匀,包覆层的厚度也较厚,但相邻颗粒间接触面较小,黏结强度小,这不利于提高强度;粒度较小时,砂粒之间距离缩小,表面混合粘土均匀,黏结强度大,极大提高了强度^[9]。而砂粒之间的孔隙不仅影响铸型强度,也同样影响铸型透气性。图 10 为不同粒径砂子制备的铸型透气性。可以看出,目数越小,砂粒之间的孔隙越大,铸型的透气性越好;目数越小,导致砂粒之间的孔隙减小,铸型的透气性降低^[4]。由于原砂表面有裂纹和空洞,同样质量的原砂,粒度越小,砂粒数量越多,总表面积越大,裂纹和空

洞的数量也就相对越多,浸入到这些裂纹和空洞里的黏土就越多,而这些黏土与较远的砂粒起不到黏结作用,所以这些缺陷的存在将会消耗更多的黏土,强度因而会升高,透气性会降低。

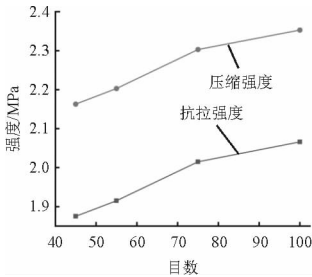


图 9 不同粒径砂子制备的铸型强度

Fig.9 Strength of mold prepared by sands with different sand sizes

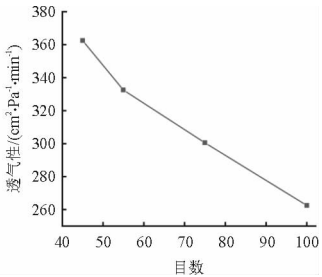


图 10 不同粒径砂子制备的铸型透气性

Fig.10 Air permeability of molds prepared by sands with different sand sizes

在冷冻造型中,使用 45、55、75 和 100 目的型砂。同时,可以根据铸件对铸型强度的要求,分别对这 4 种级砂中的砂级配进行适当调整。用达到完全强度的试样的极限破坏载荷数据,计算试样的单轴抗压强度:

$$R = P/A$$

式中, R 为单轴抗压强度,MPa; P 为试样极限破坏荷载,N; A 为试件横截面积,mm²。

透气性变化采用分配权重计算,得到型砂配比为 20%的 45 目,26%的 55 目,40%的 75 目和 14%的 100 目。

2.4 金属液浇注入冷冻铸型后不同区域分析

图 11 是浇注温度分别为 760 ℃和 800 ℃的铸型温度变化。冷冻铸造充型过程中,热量的传输过程主要包括:金属液、冷冻铸型及气幕内部的热传导、合金潜热的释放、金属液与铸型及气幕间隙的对流传热^[10]。图 12 为浇注后铸型表面形貌。当浇注合金进入冷冻铸型的瞬间,决定铸型与金属液温度变化快慢的主要因素是金属液与铸型及空气间的对流。考虑到空气的热传导能力很低,所以基本上可以认为金属与铸型间形成气幕内的对流传热能力,决定了充型过程中金属液的降温快慢

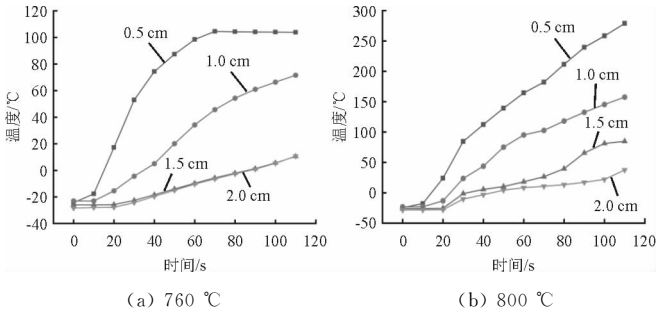


图 11 浇注温度为 760 ℃和 800 ℃的铸型温度变化

Fig.11 Mold temperature variation at pouring temperature of 760 °C and 800 °C

以及冷冻铸型内铸型的脱水硬化和熔化区域大小。尤其是铸件具有复杂薄壁结构或存在如局部消融冷却等情形时,金属液前端已接触铸型壁面,融冰的水蒸气通过升华相变,可在金属液与铸型型壁之间形成一层气幕将液态金属与冰型隔开,水蒸气升华反应为表层金属凝固提供了强大的过冷度,获得表层细晶组织^[11-12]。由此可见,考虑冰型表面气化反应过程对金属凝固、流动行为和冷冻铸型干性失水层、湿性融化层体积分数的影响,对提高冷冻铸造充型过程的控制具有重要的作用。

由图 12 可知,冷冻铸型干性失水层在浇注结束 20 s 后,紧贴铸件的部分铸型温度骤增到 20 ℃ 左右,硅砂颗粒间起到联结作用的水分丢失,水分的气化以及高

温环境导致硅砂与黏土干化,该部分铸型抗拉强度、抗压强度几乎消失,干性失水层服役结束,铸件表层金属已经冷却,铸型失效^[13]。但铸件内部并没有完全冷却,铸件与贴壁铸型间处于传热阶段,贴壁铸型与稍远距离铸型处于传热阶段,前者传热系数远高于后者,因此干性失水层厚度变化速率远高于远离铸件的部分铸型。此时促进铸件继续凝固的主要原因是未完全失效但也不处于冷冻状态的铸型,即湿性融化层。剩余仍处于冷冻状态的铸型边缘定义为冷冻层。湿性融化层与冷冻层之间的传热系数远低于干性失水层与湿性融化层之间的传热系数,故冷冻层厚度变化速率低于湿性融化层^[14]。

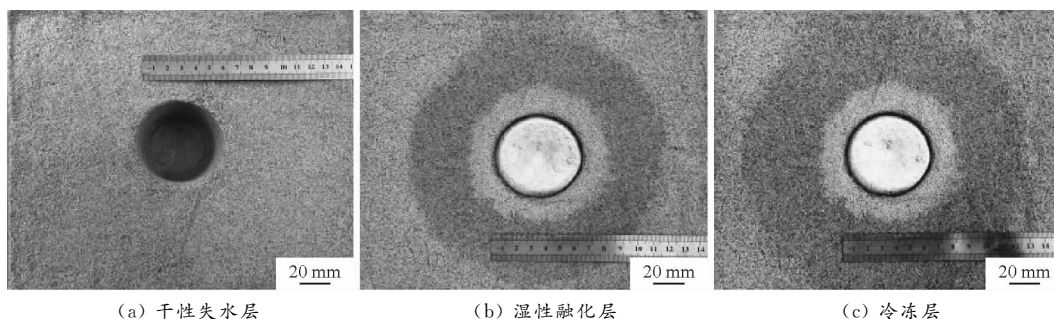


图 12 浇注后铸型表面形貌

Fig.12 Morphologies of mold after pouring

随着铸件逐渐凝固,干性失水层、湿性融化层、冷冻层的厚度变化速率也开始降低。同时,浇注的金属液温度也同样影响 3 个层的厚度变化速率。以浇注 ZL205A 铝合金为例,在 760 ℃ 和 800 ℃ 下浇注,两试验数据关系见图 13。可以看出,浇注温度越高,铸件与干性失水层、干性失水层与湿性融化层、湿性融化层与冷冻层的传热系数越大,3 个层的厚度变化速率也越大。

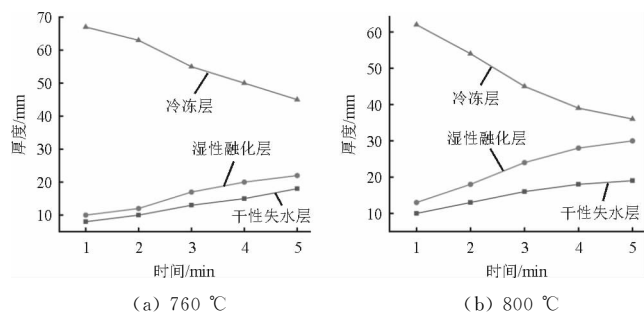


图 13 在 760 ℃ 和 800 ℃ 浇注下干性失水层、湿性融化层、冷冻层厚度变化

Fig.13 Thickness variation of dry dehydration layer, wet melted layer and frozen layer at pouring temperature of 760 ℃ and 800 ℃

3 结 论

(1) 硅砂中加入 5% 的黏土以及 8% 的水所获得冷冻铸型强度最高且透气性适中,满足铸造要求。在该配比下铸型强度随冷冻温度降低而增大,直到冷冻温度在 -60 ℃ 后,铸型强度保持稳定;铸型透气性随温度降低

而不断下降。

(2) 硅砂粒径通过影响黏土联接力间接影响铸型强度,粒径越大,铸型的抗拉强度与抗压强度越小。

(3) 铸型融化分层进行,且浇注温度越高,融化层向外拓展速度越快,越有利于砂型的自行溃散。

参 考 文 献

- [1] 星山康洋,三宅秀和.负压冷冻铸型铸造及其铸件特性[J].铸造技术,2015,36(5): 1 225-1 228.
- [2] 李文彬.电子冷冻铸造[J].机械工人,1989(1): 50-53.
- [3] KALPAKJIAN S, SCHMID S R. Manufacturing Processes for Engineering Materials: International Edition[M]. Reading: Addison-Wesley, 1984.
- [4] 蒋董洪.我国铸造业技术创新和产业升级发展现状研究[J].中小企业管理与科技(下旬刊),2014(5): 131.
- [5] 福田喜伸,彭惠民.冻结铸型铸造法的开发[J].国外机车车辆工艺,2011,48(6): 18-21, 36.
- [6] 单忠德,杨浩秦,刘丰,等.数字化无模冷冻铸造成形方法研究[J].稀有金属材料与工程,2020,49(12): 4 321-4 328.
- [7] 张润林,南海,魏华胜,等.壳型铸造和冷冻铸造近净形铸造技术[J].新技术新工艺,2001(12): 22-23.
- [8] SMIRNOV A S, SUVOROV S V. Two-factor optimization in the brachistochrone problem[J]. Physics and Mathematics, 2022, 15 (2): 124-139.
- [9] 齐琦,管伟明,温颖远.砂粒径对相似材料力学特性的影响机理[J].中国矿业,2020,29(6): 133-138.
- [10] 斯乾.铸造生产的大变革—砂型冷冻铸造[J].安徽工学院学报,1985(1): 89-96.
- [11] 陈宗民,薛冰,杨思一.冷冻铸造及其基本工艺技术问题[J].现代铸铁,2005(5): 30-33.
- [12] 黄良余.无公害铸造工艺——冷冻铸造[J].特种铸造及有色合金,1996(1): 46-47.

Zn 中间层对镁/钢搅拌摩擦搭接焊组织与性能的影响

沈小琨^{1,2,3} 赵一帆^{1,2,3} 万 葛^{1,2,3} 刘 省^{1,2,3} 胡心彬^{1,2,3}

(1.湖北工业大学材料与化学工程学院; 2.绿色轻工材料湖北省重点实验室;
3.车用轻质材料与加工湖北省工程实验室)

摘 要 对 AZ31B 镁合金板和 DP600 高强钢进行搅拌摩擦搭接焊试验,研究了旋转速度和添加不同厚度 Zn 箔中间层对镁/钢搭接接头宏观形貌、微观组织及力学性能的影响。结果表明,Zn 箔中间层的添加对镁/钢搭接接头强度有明显影响,接头剪切载荷随 Zn 箔中间层厚度和旋转速度的增大呈先增大后减小的趋势。当焊接速度为 80 mm/min、下压力为 0.1 mm、旋转速度为 900 r/min、Zn 箔中间层厚度为 0.05 mm 时,接头剪切强度达到最大值 104 MPa,此时接头断口表现为韧脆混合断裂。Mg 与 Zn 在镁/钢界面处发生反应生成 MgZn、MgZn₂、Mg₂Zn₃、Mg₂Zn₁₁ 金属间化合物。通过第一性原理计算 Mg-Zn 系金属间化合物的弹性常数及模量,结果显示此类化合物中除 MgZn 呈现较小的脆性外,其他均呈塑性。

关键词 镁合金;高强钢;搅拌摩擦搭接焊;中间层

中图分类号 TG146.22;TG113.25 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.012.011 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of Zn Interlayer on Structure and Properties of Mg/Steel Friction Stir Lap Welding

Shen Xiaokun^{1,2,3}, Zhao Yifan^{1,2,3}, Wan Ge^{1,2,3}, Liu Sheng^{1,2,3}, Hu Xinbin^{1,2,3}

(1.School of Materials and Chemical Engineering, Hubei University of Technology;
2.Hubei Provincial Key Laboratory of Green Materials for Light Industry;
3.Hubei Engineering Laboratory of Automotive Lightweight Materials and Processing)

Abstract: Friction stir lap welding experiments between AZ31B magnesium alloy plate and DP600 high strength steel plate were carried out. The effects of rotation speed and addition of Zn foil intermediate layer with different thickness on the macro morphologies, microstructures and mechanical properties of magnesium/steel lap joints were investigated. The results indicate that the addition of Zn foil intermediate layer has significant effects on the strength of magnesium/steel lap joint, where the shear load of the joint is firstly increased and then decreased with the increase of the thickness of Zn foil intermediate layer and rotation speed. The shear strength of the joint reaches the maximum value of 104 MPa and presents a mixed ductile-brittle fracture mode when the welding speed, down pressure, rotating speed and thickness of Zn foil intermediate layer are set to 80 mm/min, 0.1 mm, 900 r/min and 0.05 mm, respectively. Mg reacts with Zn at the magnesium/steel interface to form MgZn, MgZn₂, Mg₂Zn₃ and Mg₂Zn₁₁ intermetallic compounds. The elastic constants and modulus of Mg-Zn intermetallic compounds are calculated by first principle method. The results reveal that most of these intermetallic compounds exhibit plastic behavior except for MgZn with minor brittle performance.

Key Words: Magnesium Alloy, High Strength Steel, Friction Stir Lap Welding, Intermediate Layer

收稿日期:2022-11-11;修改稿收到日期:2023-01-05

基金项目:中央引导地方科技发展专项资金资助项目(2019ZYD015)

第一作者简介:沈小琨,女,1999 年出生,硕士研究生,武汉(430068),E-mail:1402686981@qq.com

通信作者:胡心彬,男,1970 年出生,教授,武汉(430068),E-mail:huxbshu@163.com

引用格式:沈小琨,赵一帆,万葛,等. Zn 中间层对镁/钢搅拌摩擦搭接焊组织与性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(12):1 647-1 653.
SHEN X K, ZHAO Y F, WAN G, et al. Influence of Zn interlayer on structure and properties of Mg/steel friction stir lap welding[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(12):1 647-1 653.

[13] 林涛,全晓军,郑平.连续冷冻铸造制备超长定向孔隙毛细芯[J].工程热物理学报, 2021, 42(11): 2 926-2 932.

[14] SAIKAEW C, WIENGWISSET S. Optimization of molding sand composition for quality improvement of iron castings[J]. Applied Clay Science, 2012, 67-68: 26-31.

[15] AOYAMA K, KATO T, KATO F. Development of frozen mold castings system at the bronze casting[J].Journal of Japan Foundry Engineering Society, 2014, 86(9): 734-738.

(编辑:彭瑾)