

覆砂工艺消减铝合金筒形件铸造残余应力的研究*

刘金水[†],刘思雨,高文理

(湖南大学 材料科学与工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:采用钻孔法测试铁型覆砂工艺 ZL205A 铝合金筒形铸件在不同覆砂厚度下的铸造残余应力,采集各覆砂厚度的凝固冷却曲线,研究覆砂厚度对铸件残余应力及凝固冷却过程的影响;利用 Von Mises 模型和 Mohr-Coulomb 模型,进行了覆膜砂铸造有限元仿真.研究表明:覆砂工艺能有效减少铸件残余应力.当覆砂厚度达到 7 mm 时铸件残余应力可以降低约 62%;覆砂厚度大于 7 mm 后,残余应力继续减小幅度减小.通过对覆膜砂铸造过程测得的凝固冷却曲线分析,建立了覆砂厚度与凝固冷却速率、晶粒大小及共晶温度之间的关系,为实际应用提供可靠的工艺参考.仿真结果显示两种模型模拟的计算结果都与实验趋势基本吻合,但同时也需要考虑到不同覆砂厚度下两种模型各自的适用性.

关键词:ZL205A;铁型覆砂;残余应力;有限元模拟

中图分类号:TG146.2

文献标志码:A

Research on Reduction of Casting Residual Stress for Aluminum Alloy Cylinder by Coated Sand Casting

LIU Jinshui[†], LIU Siyu, GAO Wenli

(College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to study the influence of coated sand thickness on casting residual stress and solidification cooling process, the casting residual stress of ZL205A aluminum alloy cylinder with different sand thickness was measured by drilling method, and the solidification curves were collected. The paper has carried out finite element simulation of coated sand casting processes for ZL205A aluminum alloy specimen by adopting Von Mises mold and Mohr-Coulomb mold. The results show that the residual stress of castings can be reduced by about 62%, when the sand thickness reaches 7 mm. The residual stress changes a little with the sustained increasing of sand thickness. To provide a reliable process reference, the relationship between sand thickness and solidification cooling rate, grain size and eutectic temperature was established by analyzing and comparing the temperature curve measured in coated sand casting process. The simulation results show that the calculated results of the two models are basically consistent with the experimental trend. But we also need to take into account the applicability of the two models under different sand thickness.

Key words: ZL205A; coated sand casting; residual stress; finite element simulation

* 收稿日期:2017-02-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51271076,51474101), National Natural Science Foundation of China(51271076,51474101)

作者简介:刘金水(1962—),男,湖北天门人,湖南大学教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail:13873110708@163.com

ZL205A 铝合金是目前国内强度最高的铸造铝合金,同时具有较好的塑性和韧性,因此在航空航天领域应用广泛^[1].筒形舱体铸件是航空航天飞行器的关键结构件,这类铸件尺寸大、结构复杂,承受冲击载荷和静载荷都较大,力学性能要求高.金属型铸造是生产此类高强度铸件的必要手段之一,但金属型铸造易导致铸件的残余应力过大.对于 ZL205A 铝合金来说,该合金结晶温度范围宽,线收缩较大,金属型铸造残余应力问题更为严重,已成为我国航空铸件领域面临的重大难题^[2].目前许多学者围绕 ZL205A 铝合金的合金化、熔体净化、细化晶粒等角度进行了研究,但是有关合金成形工艺的研究较少^[3].工业生产时还是沿用耗能耗时的热处理工艺来消除残余应力,且难以适用于大型铸件.对此,通过利用铁型覆砂铸造工艺减少铸件残余应力,该工艺能有效控制型芯的退让性,同时也能保证较高的冷却速度.由于铸件的多样性和复杂性,如果通过大量实验或者简单的经验公式来确定合适的覆砂厚度等工艺参数,不切实际也会造成很大浪费及误差.利用数值模拟来分析铸造残余应力是目前发展趋势^[4].本文利用国内 ZL205A 高强铝合金,进行了筒形铸件的浇注实验,分析不同覆砂厚度下铸造残余应力及铸件冷却规律,并分别将砂层模型设置为 Von Mises 模型和岩土力学的 Mohr-Coulomb 模型进行有限元模拟,对比真实测量所得的残余应力进行分析,为降低铸造残余应力提供数据参考及工艺研究方法.

1 实验方法

1.1 铸造实验

为研究不同覆砂厚度对筒形铸件残余应力的影响,设计了高为 230 mm,最大外径 $\Phi 150$ mm 的筒形铸件,如图 1 所示.在其金属芯表面覆上厚度不同的水玻璃覆膜砂,同时为了保证浇注铸件质量相同,金属铁芯直径也相应减少,即覆砂层外径保持一致.覆膜砂配方是擦洗砂:水玻璃:有机酯(质量比)为 100:4:0.4.原砂为 40~70 目细沙,含水量 0.2%.ZL205A 铝合金为实验室自行熔炼,浇注温度为 700 °C.覆砂厚度的设计参考了文献^[5],具体方案如表 1 所示.

表 1 覆砂工艺方案

Tab.1 Scheme of coated sand casting

方案	A 组	B 组	C 组	D 组	E 组
砂层厚度/mm	0	4	7	10	全砂砂芯

浇注过程利用美国 N9213 温度采集器连接 K 型 HH-K-24 热电偶测量铸件的凝固冷却曲线.铸件冷却后利用钻孔法测量铸件残余应力.设备为西格玛 SRSS3-1 型应力检测仪,测量位置为铸件上提前设计的平台表面,如图 1 所示.Z 方向与 Y 方向的残余应力即为平台的周向与轴向残余应力.

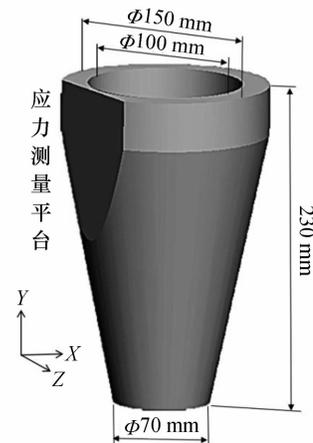


图 1 铸件尺寸

Fig.1 The size of casting

1.2 有限元模拟过程

材料的热物理性能及模型是有限元模拟的基础.因此对 ZL205A 的主要热物理参数进行了测试与计算,并对模拟所用模型进行设置.

ZL205A 的热膨胀系数采用德国耐驰 DIL402 在 Ar 气保护下测量,导热率在 JMatPro 中计算,所得结果见表 2.在材料的力学性能中,将 ZL205A 铝合金设置为热弹塑性模型,除了定义材料的杨氏模量、泊松比和热膨胀系数外,还需要设置材料的高温力学性能.ZL205A 铝合金的铸态力学性能参考了文献^[6]及进行部分高温拉伸,所得结果参见表 3.

表 2 ZL205A 铝合金导热系数及热膨胀系数

Tab.2 Thermal conductivity and thermal expansion coefficient of ZL205A aluminum alloy

温度/°C	导热系数 $\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1})$	热膨胀系数 $\alpha/(^\circ C^{-1})$
25	174.18	—
200	188.11	24.77×10^{-6}
300	189.20	25.81×10^{-6}
400	188.50	26.20×10^{-6}
500	186.10	—

表 3 ZL205A 温度相关的弹性模量与屈服应力
Tab.3 Temperature function of young's modulus
and yield stress of ZL205

温度 /°C	弹性模量 E/GPa	屈服强度 σ_s /MPa	温度 /°C	弹性模量 E/GPa	屈服强度 σ_s /MPa
25	75.62	181.60	400	57.75	50.56
200	67.30	158.59	500	14.34	9.31
300	62.76	86.23	600	0.40	5.00

覆膜砂的机械性能是计算铁型覆砂工艺应力场的敏感参数,而对于砂型力学性能的描述,虽然在有限元仿真中已被广泛关注,但由于其十分复杂,尚未很好地被解决.传统数值模拟中砂型的强度模型是沿用经典材料力学中等向强化的 Von Mises 屈服条件,此模型简单实用,所需材料参数少且易于实验获得,但其也忽略了砂层受到铸件与模具的约束所产生的围压及内摩擦特性等对型砂强度的影响.岩土力学中根据土所处围压环境对 Von Mises 模型中加上一个静水因子进行修正,这就是 Mohr-Coulomb 准则^[7-9].为了考量这两种模型模拟覆膜砂力学性能的准确性,以及保证应力模拟精度,将砂型塑性部分分别设置成这两种本构模型,对比这两种模型下铸造残余应力的计算结果.

Von Mises 模型即等效应力模型,当应力达到屈服应力时发生塑性变形,即描述为:

$$f = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} - \sigma_y \quad (1)$$

式中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 是主应力; σ_y 是单轴屈服应力.当 $f = 0$ 时砂层发生屈服,随后发生塑性变形,满足关联流动法则,材料强度描述为:

$$\sigma = \sigma_0 + H \epsilon^{pl} \quad (2)$$

式中: H 是塑性模量; ϵ 是塑性变形量.

岩土力学的 Mohr-Coulomb 模型与 Von Mises 模型不同,屈服标准是由剪切应力和围压定义.其表达式为:

$$\tau = \sigma \tan \theta + c \quad (3)$$

式中: τ 为剪切应力; c 为内聚力; θ 为内摩擦角.内聚力又叫粘聚力,是同种物质内部相邻各部分之间的相互吸引力.摩擦强度又分为滑动摩擦和咬合摩擦,两者概化为摩擦角,与最大主应力 σ_1 及最小主应力 σ_3 有关.在 Mohr-Coulomb 模型中材料屈服会随着主应力的增加逐渐上涨,强度曲线即是在各种应力条件下 σ_1 与 σ_3 之差的包络线,如图 2 所示.

由于专业铸造软件 ProCAST 中并没有相关的岩土力学模型,在 ABAQUS 中进行 Mohr-Coulomb

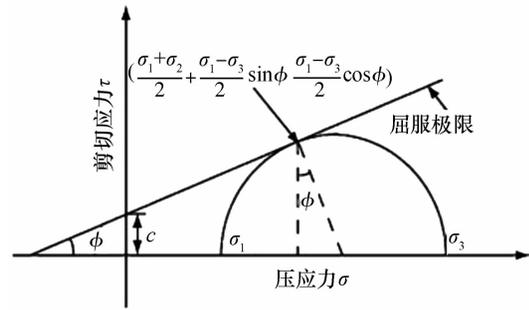


图 2 莫尔-库伦强度曲线

Fig.2 Fracture criterion of Mohr-Coulomb

模型的计算.为保证两种软件计算的一致性,将 ProCAST 中铸件充型后的温度场导入 ABAQUS 作为初始条件进行应力计算,减小不同软件计算带来的误差,具体操作参考文献[10].实验测得 Von Mises 模型所需参数:室温单轴抗压强度为 1.9 MPa, 200 °C 时为 1.0 MPa, 400 °C 时为 0.6 MPa.在 Mohr-Coulomb 模型中除了需设置材料的弹性外,还需在塑性阶段设置材料的摩擦角、内聚力等参数,所需数据摩擦角为 32°、内聚力为 25 MPa,来自参考文献[11].

模型的简化与假设:1) 温度对应力是单向作用;2) 砂层是连续的,弹性模量和屈服强度等物理性质是均匀的;3) 忽略界面反应对计算的影响.

2 结果及分析

2.1 铸造实验结果及分析

钻孔法测得铸件残余应力随覆砂厚度变化如图 3 所示.其中覆砂厚度为 0 mm 时即为金属型铸造,应力测量处 Z 方向(周向)的残余应力较大,达到 134.3 MPa;覆砂厚度为 4 mm 时 Z 方向残余应力为 89.5 MPa;当覆砂厚度为 7 mm 时残余应力的消减效果较好,Z 方向应力降至 50.4 MPa,相对金属型铸造减少了约 62%;厚度为 10 mm 时降到了 33.4 MPa,应力减小幅度减小;当利用全砂砂芯铸造时,Z 方向残余应力为 30.1 MPa.对于覆膜砂铸造过程中 Y 方(轴向)向残余应力其绝对值较小,各组应力水平无较大变化,覆膜砂工艺影响不明显.

金属型铸造中 ZL205A 铝合金线收缩时会受到铁芯的巨大阻力,产生较大的收缩阻碍应力.随覆砂厚度增加,收缩阻碍应力逐渐释放.覆砂厚度为 4 mm 时,虽然覆膜砂有较好的退让性,但砂层受到铸件及金属型芯的阻碍,难以溃散,砂层紧实后,应力急剧上升,铸造残余应力消减不足.当砂层厚度增加

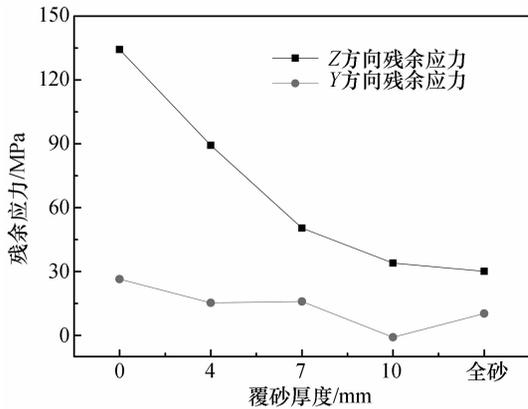


图3 不同覆砂厚度的残余应力

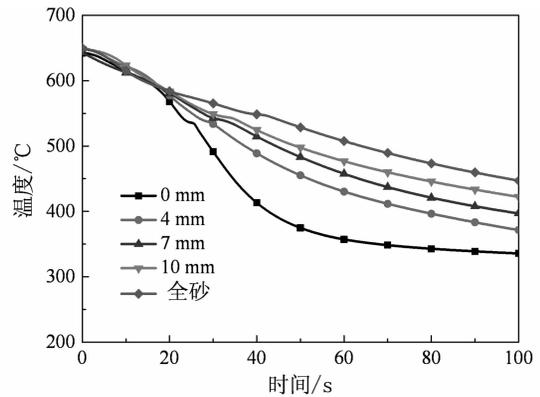
Fig.3 Comparison of the residual stress with different thickness of coated sand

到7 mm后,砂层不易紧实,残余应力消减效果较好.此后随覆砂厚度增加,由于铸件的收缩有限,残余应力减小幅度较小.

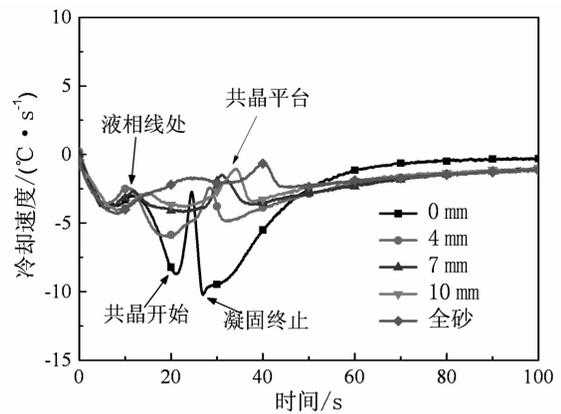
覆砂工艺对铸件冷却速度有影响,对比不同覆砂厚度下的冷却曲线如图4(a)所示.由于铁型覆砂铸造铸件冷却速度较大,很难在凝固冷却曲线上直接捕捉到我们需要的明确信息.将温度曲线与其一阶微分曲线(见图4(b))对比可知:在液相线处之前,不同覆砂厚度下ZL205A铝合金冷却速度差异较小.因为浇注初期由于ZL205A合金铝液与模具及覆膜砂温差较大,此时覆砂厚度对铸件冷却影响较小.到达液相线处时(α -Al形核率最大点),由于覆砂厚度的不同,各组冷却速度差异逐渐增大,一直持续到共晶阶段开始.在此阶段中,随覆砂厚度从0 mm增加到全砂砂芯,各组的平均冷却速度依次下降,分别为7.59 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$,4.76 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$,3.93 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$,3.73 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 和2.01 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$.同时随砂层厚度的增加冷却速度下降幅度减小.对比不同覆砂厚度下铸件100倍偏光照片(见图5).同时根据JB 7946.4-1999-T《铸造铝铜合金晶粒度》对晶粒分级,随覆砂壁厚从0 mm增至全砂砂芯,晶粒度等级分别为7级,6级,5级,5级和4级,晶粒逐渐变大.

对于共晶阶段,随覆砂厚度从0 mm增加到全砂砂芯,共晶平台逐渐平坦.共晶开始后冷却曲线峰值(共晶形核率最大点)出现的时间及温度依次

分别为24.6 s/536.2 $^{\circ}\text{C}$,28.5 s/537.8 $^{\circ}\text{C}$,31.1 s/541.4 $^{\circ}\text{C}$,34.4 s/542.2 $^{\circ}\text{C}$ 和40.2 s/548.46 $^{\circ}\text{C}$,共晶温度逐渐上升,共晶平台出现时间逐渐变晚.综上可知,覆砂厚度的增加可以有效减少筒形件周向残余应力,但也会粗化晶粒,降低共晶过冷度,全砂芯铸造时相比覆砂铸造,冷却速度下降严重低至2.01 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$.同时哈尔滨工业大学程卫鑫在薄壁筒形件的全砂铸造过程发现:铸件内壁变形抗力小,铸件收缩时壁厚不均会导致各处变形量差异大^[12].适当增大机械阻碍应力可以保证铸件内径倾向均匀收缩,避免失圆.所以选择合适的覆砂厚度,对于减少铸造残余应力,并保证铸件力学性能和控制铸件变形量是十分必要的.



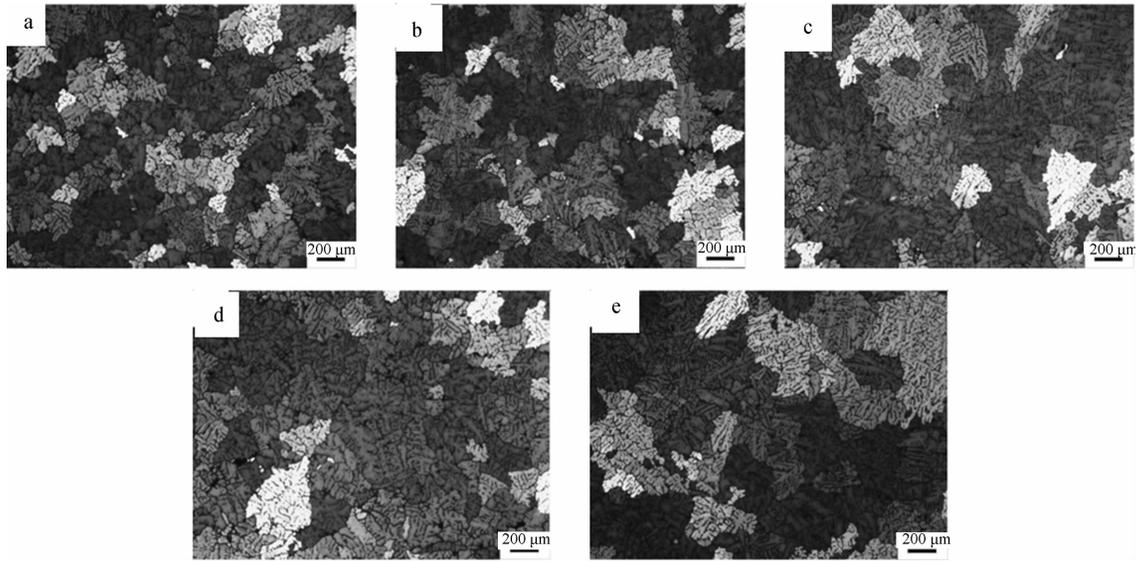
(a)冷却曲线



(b)冷却曲线一阶偏导

图4 不同覆砂厚度冷却曲线及其一阶偏导

Fig.4 Comparison of the temperature curves and it's derivative with different thickness of coated sand



(a)金属型铸造,(b)覆砂厚度 4 mm,(c)覆砂厚度 7 mm,(d)覆砂厚度 10 mm,(e)全砂芯铸造

图 5 ZL205A 不同覆砂厚度铸造金相组织

Fig.5 Microstructure of the ZL205A

2.2 模拟结果及分析

以覆砂厚度 4 mm 的铸件为例,两种模型 Z 方向应力计算结果如图 6 所示,两种模型计算的应力云图相似.应力采集处 Z 方向拉应力较大,与实验结果相同.



图 6 覆砂 4 mm 铸件 Z 方向残余应力云图
Fig.6 Residual stress field of Z direction with 4 mm coated sand thickness

以覆砂厚度 4 mm 时的铸造温度场为例进行分析,温度场模拟结果如图 7 所示.一方面是由于金属模具外壳壁厚上小下大,热流指向模具厚壁处.另一方面,由于铸件上下部分半径存在差异,上部半径大,径向收缩大于下部,导致铸件上部与模具之间的间隙大于铸件下部,铸件传热总体向下.所以由铸件表面与铸件内部冷却差异形成的热应力较小,铸件残余应力以收缩阻碍应力为主,铸件表面呈现出周向拉应力.Y 方向上由于铸件至下而上冷却,热应力较小.同时 Y 方向收缩阻力较小,铸件冷却后残余应力小,也与实验结果一致.

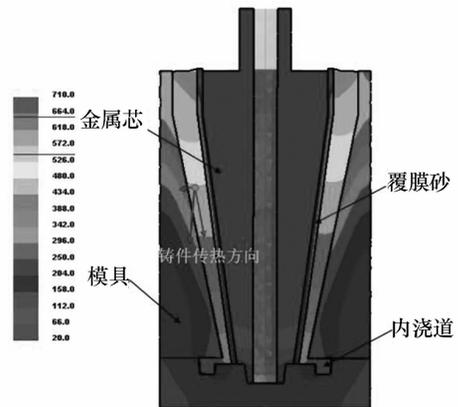


图 7 覆砂厚度 4 mm 铸造温度场模拟结果
Fig.7 The result of temperature field with 4 mm coated sand thickness

由于此覆砂工艺只将金属芯表面覆砂,对铸件与模具外壳导热影响较小.覆砂厚度的增加,导致温度梯度向模具外壳少量偏移,铸件最后的补缩位置

向砂层靠近,如图8所示.最后凝固的位置靠近砂层,会减小铸件壁厚中心处因最后凝固而产生的拉应力;而对于铸件外表面,其冷却速度大于内部,随覆砂厚度的增加,内外温差加大,本应该导致表面压应力略微上升,但是其与收缩阻碍应力叠加后总的残余应力均表现为拉应力.由此可看出不同覆砂厚度虽然改变了铸件表面的热应力,但收缩阻碍应力一直占主导作用.所以利用铁型覆砂工艺增加砂层退让性来实现应力的释放是有效的.

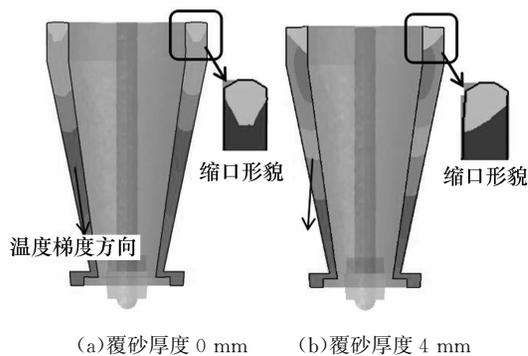


图8 铸件截面温度场对比

Fig.8 Comparison of the temperature field of casting section

不同覆砂厚度的铸造模拟结果如图9所示.不同覆砂厚度铸造下,两种模拟方式与实际应力测量都有相同的趋势.利用 Mohr-Coulomb 模型计算的残余应力均大于 Von Mises 模型运算的结果.砂厚度为 4 mm 时 Mohr-Coulomb 模型与实际值的偏差较小, Von Mises 模型偏差较大.当覆砂厚度大于 4 mm 后, Mohr-Coulomb 模型偏差增加, Von Mises 模型偏差减小.

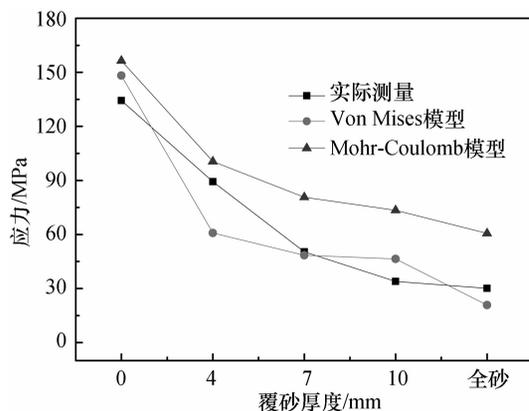


图9 铸造残余应力模拟结果与实测结果对比

Fig.9 Comparison of residual stress between simulation and experiment

由砂层受力模式可知:当覆膜砂受到外力挤压时,最初开始发生弹性变形.随着压力的增大,机体

类似脆性断裂.随着砂层紧实度的提高,砂粒之间直接接触增多,沙子间摩擦加剧,围压上升,砂层的形变抗力提升^[13].岩土等材料在围压的作用下,峰值强度会上升,但同时岩土材料的强度还受到材料尺寸效应影响,即材料强度会随着样品尺寸的变化而变化.彭永伟等人^[14]研究了煤样不同尺寸下围压的作用效果,发现体积小的样品在围压加卸载条件下渗透率/孔隙率变化比尺度大的样品更为敏感,其渗透率/孔隙率随围压的增大减小剧烈,而岩土样品的渗透率/孔隙率越小岩土组成结构越致密,所对应的岩土材料峰值强度越大.即当围压增大时小尺寸材料强度的增长幅度比大尺寸材料更大.

对比覆砂铸造过程,当覆膜砂层厚度为 4 mm 时,砂层相对较薄体积小,砂层受压破碎后,易迅速紧实,受到较大围压作用,且此时围压对砂层强度影响较大,而 Von Mises 模型忽略了围压等因素的影响,计算结果偏差大.并且同济大学陈曦等^[15]将 5 种岩土的本构模型进行对比,也发现忽略围压的 Von Mises 模型计算的承载力结果会明显低于实际值.当砂层厚度大于 7 mm 后,覆膜砂层相对较厚,砂层的紧实度提高较为困难,当覆膜砂发生断裂时,砂层的主体还是以水玻璃为胶连的连续结构,围压小,且在尺寸效应影响下,砂层较厚时围压对材料强度的敏感性较小,利用 Von Mises 模型计算的结果偏差较小. Mohr-Coulomb 模型考虑到了围压及岩土的剪胀性的影响,修正了材料在 4 mm 时的强度计算结果,减小了偏差.但此模型在砂层较厚时误差加大,这是由于此模型的材料参数需在三轴压缩试验下测得,目前难以测量到高温下砂层的参数,对比温度场模拟结果,随覆砂厚度从 4 mm 增至全砂砂芯,距铝液界面 1 mm 处砂层最高温度分别达到了 305 °C, 345 °C, 360 °C 和 415 °C.砂层实际强度减弱,此模型计算误差增大.

3 结论

1) 利用铁型覆砂工艺消减筒形铸件残余应力效果明显.当覆砂厚度为 7 mm 时, ZL205A 铝合金筒形铸件周向残余应力可减小约 62%;当覆砂厚度大于 7 mm 后,残余应力减小幅度减小.

2) 随覆砂厚度增加,铸件冷却速度减小.覆砂厚度分别为 0 mm, 4 mm, 7 mm, 10 mm 及全砂芯时, ZL205A 铝合金晶粒大小等级分别为 7 级、6 级、5 级、5 级和 4 级,晶粒逐渐变大.利用覆砂工艺解决

金属型铸造应力过大问题,需综合考虑到覆砂厚度对残余应力、晶粒大小及铸件变形量等的影响,合理选择覆砂厚度。

3)采用 Mohr-Coulomb 模型及 Von Mises 模型来求解覆砂铸造的应力场问题,两者结果与实际趋势吻合,但均存在一定偏差。对于不同覆砂厚度的铁型覆砂铸造的应力问题可以选取不同模型来求解,以得到更精确的结果。Von Mises 模型的误差主要存在于当覆砂较薄时,砂层的围压及剪胀性对砂层力学性能影响较大; Mohr-Coulomb 模型与实际结果的偏差主要来自缺乏高温下材料的有关参数。

参考文献

- [1] 贾洋江,陈邦峰.ZL205A 高强铸造铝合金的性能及应用[J].轻合金加工技术,2009,37(11):10—12.
JIA Panjiang, CHEN Bangfeng. The properties and application of high strength ZL205A casting aluminum alloy [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2009, 37(11): 10—12. (In Chinese)
- [2] 杜旭初,洪润洲,刘建军,等.大型复杂高强度 ZL205A 铝合金骨架铸件的研制[J].铸造,2014,63(4):371—374.
DU Xuchu, HONG Runzhou, LIU Jianjun, *et al.* Research on casting technique of large complex high strength ZL205A alloy skeleton casting [J]. China Foundry, 2014, 63(4): 371—374. (In Chinese)
- [3] 李元元,郭国文,罗宗强,等.高强韧铸造铝合金材料研究进展[J].特种铸造及有色合金,2000(6):45—47.
LI Yuanyuan, GUO Gouwen, LUO Zongqiang, *et al.* Development of high strength-toughness cast aluminum alloy [J]. Special Casting Nonferrous Alloy, 2000(6): 45—47. (In Chinese)
- [4] LEE S M, LEE W J. Finite-element analysis on thermomechanical behavior of a marine propeller casting in the sand-casting process [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, 4(3): 388—394.
- [5] 黄列群.铁型覆砂铸造及其应用[J].机电工程,1999,16(3):55—58.
HUANG Liequn. Casting technique of sand-lined iron-mold and its application [J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 1999, 16(3): 55—58. (In Chinese)
- [6] 蔡庆,张晓波,张亦杰,等.基于 ProCAST 数值模拟 ZL205A 热裂行为的研究[J].铸造技术,2015(6):1503—1506.
CAI Qing, ZHANG Xiaobo, ZHANG Yijie, *et al.* Research of hot tearing behavior of ZL205A alloy based on ProCAST numerical simulation [J]. Foundry Technology, 2015(6): 1503—1506. (In Chinese)
- [7] 张翼飞,吴浚郊,须寅.采用非线性有限元模拟粘土砂湿型造型紧实过程[C]//中国机械工程学会年会.北京:机械工业出版社,2002:233—234.
ZHANG Yifeng, WU Junjiao, XU Yian. The nonlinear finite element numerical simulation in the compacting process of molding sand [C]//The Chinese Mechanical Engineering Society annual Meeting. Beijing: China Machine Press, 2002: 233—234. (In Chinese)
- [8] MOTOYAMA Y, INOUE Y, SAITO G, *et al.* A verification of the thermal stress analysis, including the furan sand mold, used to predict the thermal stress in castings [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(12): 2270—2277.
- [9] 曹文贵,张升.基于 Mohr-Coulomb 准则的岩石损伤统计分析方法研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2005,32(1):43—47.
CAO Wengui, ZHANG Sheng. Study on the statistical analysis of rock damage based on Mohr-Coulomb criterion [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2005, 32(1): 43—47. (In Chinese)
- [10] AFAZOV S M, BECKER A A, HYDE T H. FE prediction of residual stresses of investment casting in a Bottom Core Vane under equiaxed cooling [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2011, 13(1): 30—40.
- [11] 崔可锐.岩土工程师实用手册[M].北京:化学工业出版社,2007.
CUI Kerui. Geotechnical engineers practical manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007. (In Chinese)
- [12] 程卫鑫.ZL205A 薄壁筒形件铸造过程变形及控制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学材料科学与工程学院,2016.
CHENG Weixin. Deformation and its control of ZL205A shell cylindrical castings [D]. Harbin: School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 2016. (In Chinese)
- [13] 原隆一,梅屋薰.粉体压缩のレオロジー[J].Journal of the Research Association of Powder Technology Japan, 1982; 19.
HARA R, UMEYA K. Rheology on powder compaction [J]. Journal of the Research Association of Powder Technology Japan, 1982; 19. (In Chinese)
- [14] 彭永伟,齐庆新,邓志刚,等.考虑尺度效应的煤样渗透率对围压敏感性试验研究[J].煤炭学报,2008,33(5):509—513.
PENG Yongwei, QI Qingxin, DENG Zhigang, *et al.* Experiment alresearch on sensibility of permeability of coal-samples under confining pressure status based on scale effect [J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(5): 509—513. (In Chinese)
- [15] 陈曦,周德源.五种本构模型在钢管混凝土有限元中的比较[J].工程力学,2009,26(6):116—121.
CHEN Xi, ZHOU Deyuan. Comparison among five constitutive models in finite element analyses of concrete-filled steel tube [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(6): 116—121. (In Chinese)