DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2022.2214

GGV30 离合器压盘铸件残余应力研究

宋进林[1],刘兰俊[1],洪　军[2],张　亮[2]

(1. 合肥工业大学 材料科学与工程学院,安徽 合肥 230009; 2. 安徽海立精密铸造有限公司,安徽 含山 238100)

摘　要:有限元模拟软件能否准确模拟出铸件的宏观缺陷与残余应力,热物性参数具有重要的作用。本文以某企业生产的牌号为 GGV30 的离合器压盘铸件为研究对象,利用 ProCAST 和 JMatPro 软件对其热物性参数进行计算。通过文献调研和实验对比,发现由 JMatPro 软件计算出的热物性参数更接近实际压盘铸件水平。随后将由 JMatPro 软件计算的热物性参数导入 ProCAST 软件中,并针对企业的原始浇注系统,采用 ProCAST 软件对压盘在 4 种不同浇注温度下进行铸造过程温度场、应力场的数值模拟,得到其温度场和残余应力的分布变化情况。研究表明,浇注温度对压盘不同区域温度场分布和冷却速度的影响不同,导致对不同区域残余应力的影响不同。浇注温度的提高有利于降低压盘小凸耳、内圈和部分盘面区域的残余应力,但影响效果相对较小;对于压盘大凸耳区域,随着浇注温度的提高,残余应力明显增大。

关键词:压盘铸件;热物性参数;浇注温度;残余应力;数值模拟

中图分类号:TG224　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2022)11-1015-06

Research On the Residual Stress of GGV30 Clutch Pressure Plate Casting

SONG Jinlin[1], LIU Lanjun[1], HONG Jun[2], ZHANG Liang[2]

(1. Department of Materials Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Haili Precision Casting Co., Ltd., Hanshan 238100, China)

Abstract: Thermal physical parameters play a very important role in accurately simulating the macroscopic defects and residual stresses of castings through finite element simulation software. In this paper, the GGV30 clutch pressure plate casting produced by a certain enterprise was taken as the specific research object, with ProCAST and JMatPro software used to calculate its thermal physical parameters. By referring to the literature and comparing experiments, it is found that the thermal physical parameters calculated by JMatPro software are closer to the actual pressure plate casting level. Then, the thermal physical properties of the pressure plate calculated by JMatPro software were imported into ProCAST software. Aiming at the original pouring system of the enterprise, the temperature field and stress field in the casting process of the pressure plate were numerically simulated at four different pouring temperatures. The results show that pouring temperature has different effects on the temperature field distribution and cooling rate in different regions of the pressure plate, resulting in different effects on residual stress in different regions. The increase in pouring temperature is beneficial to reduce the residual stress of the small lug, inner ring and part of the pressure plate surface, but the effect is relatively small. For the large lug area, the residual stress increases obviously with increasing pouring temperature.

Key words: pressure plate casting; thermal physical parameters; pouring temperature; residual stress; numerical simulation

离合器压盘作为汽车零部件的一个重要组成部分[1],主要功能是控制离合器摩擦片与飞轮的接合与分离[2-3],对汽车的行驶安全具有重要意义。在离合器压盘的铸造过程中,由于不同部位的冷却速度差异大,导致整体产生温度梯度从而形成残余应力[4],影响其尺寸精度。若残余应力过大,在后续的工作过程中会发生变形甚至开裂[5],严重影响汽车行驶安全,因此,对其分布规律的预测显得尤为重要。借助数值模拟方法,可以很好地达到这一目的。在数值模拟过程中,材料的热物性参数对其铸造缺陷与应力的准确预测具有重要的作用[6]。材料热物性参数的获取方法主要有 3 类:直接测量、热力学计算以及参数反求。ProCAST 软件能够根据材料的化学成分计算其热物性参数。此外,专门的热物性参数计算软件JMatPro 中的铸铁模块也能通过输入化学成分得到计算结果,但计算结果是否准确还有待验证。针对这一问题,安南[7]通过 ProCAST 和 JMatPro

收稿日期:2022-07-14

基金项目:企业委托技术开发项目(W2022JSFW0001)

作者简介:宋进林(1995—),硕士.研究方向:铸造成形工艺设计及数值模拟分析.电话:18895374375,Email:songjinlin95@163.com

通讯作者:刘兰俊(1964—),副教授.研究方向:铸造领域研究.电话:18919662359,Email: liulanjun@hfut.edu.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

软件计算了 AZ91D 镁合金热物性参数，并利用实验进行校正，获得了材料的准确热物性参数。王晓明[8]使用 JMatPro 软件计算了 K435 合金的性能参数，通过 ProCAST 软件对 K435 叶片缩松缺陷进行了数值模拟，模拟结果和实验结果基本吻合。结果表明，浇注温度对铸件残余应力有很大的影响[9]，铸件的收缩率、变形抗力、热物性参数等直接受温度的影响[10]。另一方面，浇注温度的改变可能会引起铸件冷却凝固过程中温度场变化，从而影响残余应力。因此，本文利用 ProCAST、JMatPro 软件计算压盘的热物性参数，通过查阅文献和实验对比，确定了最接近压盘铸件真实状态的各项热物性参数。通过改变铸造工艺参数浇注温度，研究了压盘铸件在 4 种浇注温度下温度场和残余应力的分布变化情况。

1　实验材料与方法

1.1　材料热物性参数的确定

对于铸件缺陷与应力的预测，温度是计算铸铁固相分数、导热系数的重要参数[11]，且密度随温度的变化能表征石墨化膨胀，这些都能够影响铸件的凝固过程。铸件在冷却凝固过程中不同部位因冷却速度不同而形成了温度梯度是其产生热应力的主要因素之一。其热应力公式为：

$$\sigma=\alpha\cdot\Delta T \tag{1}$$

式中，α 为热膨胀系数；T 为温度。

由式(1)可以看出，热膨胀系数 α 对热应力的影响显著。另外，弹性模量也是预测应力的重要参数。因此，将 ProCAST 与 JMatPro 软件计算所得压盘铸件的密度、导热系数、固相分数、弹性模量以及热膨胀系数随温度变化的曲线进行比较，通过查阅文献和部分实验进行校正，选择更为合适的计算结果，作为应力预测的输入参数。对于 ProCAST 中自定义材料性能参数，选择特征冷却速度为 2.7×10^{-4} K/s 的Back Diffusion 模型进行计算。之后，针对材料热物性参数在凝固过程中的变化，选用 JMatPro 软件对其进行计算。对于铁基合金，JMatPro 采用扩展 Scheil-Gulliver 模型(SGM)[11]。压盘铸件材料为GGV30 牌号的蠕墨铸铁，用直读光谱仪进行分析其化学成分，测试结果与软件输入值如表 1 所示。压盘的密度利用排水法测得，实验测得的室温密度为 7 091 kg/m^3。用LFA457 激光热导仪对压盘的导热系数进行测量，由于实验条件限制，在实验中对 5 个温度点下的导热系数进行测量，分别为 100、200、300、400、500 ℃，测试结果见表 2。2 款软件的热物性参数计算结果及实验测试结果如图 1 所示。

表1 压盘的化学成分 *w*/%

Tab.1 Chemical composition of the pressure plate

化学元素	C	Si	Mn	Cr	Cu	Mg	Ti	S	P	Fe
含量	3.60	2.55	0.27	0.02	0.17	0.014	0.01	0.008	0.012	Bal.

表 2 压盘不同温度下的热导率

Tab.2 Thermal conductivity of the pressure plate at different temperatures

温度/℃	100	200	300	400	500
热导率/(W·m^{-1}·K^{-1})	38.76	39.55	38.27	37.37	36.23

图 1(a)为 2 款软件计算和实验测试所得的热导

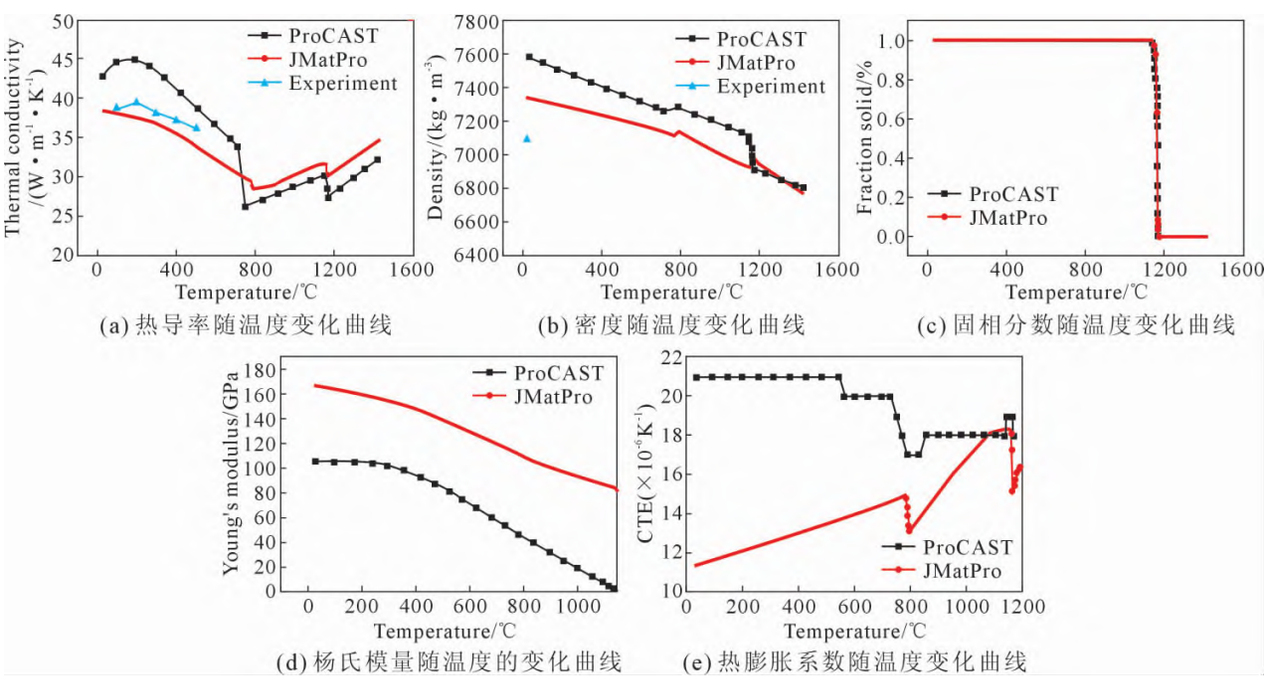


图 1　ProCAST、JMatPro 软件计算及实验测得的热物性参数对比图

Fig.1　Comparison of the thermal physical parameters calculated by ProCAST and JMatPro software and obtained by experiments

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

率随温度的变化曲线，发现 JMatPro 软件和 ProCAST 软件计算的结果曲线趋势大致相同。实验测得的热导率数据与 JMatPro 软件所计算的数据更为接近，因此用 JMatPro 软件对其导热系数的计算结果更为准确。图 1(b)为 2 款软件计算所得密度随温度的变化曲线，ProCAST 软件计算的密度结果明显偏大，JMatPro 软件计算的结果更贴近实际压盘铸件密度。图 1(c)为 2 款软件计算所得固相分数随温度的变化曲线，可以看到 2 条曲线几乎重合，但在 1 100 ℃之前，ProCAST 软件计算的固相分数没有相关点数据，且 JMatPro 软件计算结果的数据点更多，精度更高，故在本实验中选择 JMatPro 软件的计算结果建立压盘铸件的固相分数曲线。图 1(d)为 2 款软件计算所得杨氏模量随温度的变化曲线，通过查阅文献发现，蠕墨铸铁的弹性模量通常在120~160 GPa[13]，这与 JMatPro 软件计算所得的结果更加吻合，而 ProCAST 软件计算的弹性模量结果相对较低，更接近灰铸铁的弹性模量数值[14]。图 1(e)为 2 款软件计算所得的热膨胀系数随温度的变化曲线，可以看出，两款软件计算的热膨胀系数从数值和随温度变化趋势来看，存在明显差异。参考文献[15-16]的研究结果，可以看出 JMatPro 软件计算的结果符合这一变化趋势。因此，选择 JMatPro 软件的计算结果作为压盘铸件的热膨胀系数曲线。

综上所述，最终决定采用 JMatPro 软件计算出的压盘铸件热物性参数，将其在 CAST 模块中导入 ProCAST 软件，作为对压盘铸件进行温度场、应力场模拟的基础。

1.2　压盘结构分析及铸造参数的设定

压盘铸件采用 Unigraphics NX10.0 实体建模，其三维结构如图 2 所示。压盘属于小型铸件，质量约为 2.05 kg。其整体结构类似一个圆盘，圆盘最外圈有 6 个凸耳。外形尺寸总长 254.7 mm，外圆直径为 215.9 mm，内圆通孔直径为 116 mm；边缘有呈

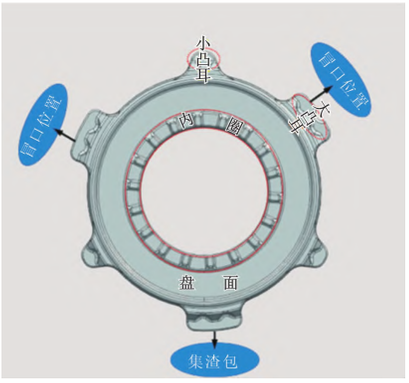


图 2 压盘的三维模型

Fig.2 Three-dimensional model of the pressure plate

120°分布的 3 个大凸耳结构，另有 3 个小凸耳与大凸耳错开 60°呈 120°分布，总体呈左右对称状。盘面平均壁厚为 10 mm，最大壁厚在凸耳处为 11.9 mm，最小壁厚在压盘内圈处为 5.5 mm。采用砂型铸造工艺，浇注方式为顶注式，这种浇注方式充型能力很好，有利于顺序凝固形成致密铸件，适用于形状复杂的薄壁件的充型。具体是在压盘上半部的 2 个大凸耳处设置内浇道和冒口，底部大凸耳单独设置 1 个集渣包；内浇道、横浇道和直浇道的截面比为 $\Sigma F_{内}$:$\Sigma F_{横}$:$\Sigma F_{直}$=1.0:1.8:1.8。并且是一箱两件，垂直分型。采用 PrcCAST 软件对其铸造工艺进行数值模拟，模拟过程工艺参数的设定如表 3 所示。

表 3 模拟参数的设定

Tab.3 The parameters of the simulation

模拟参数	设定
材料	铸件：GGV30 离合器压盘 砂型：树脂砂
砂型与铸件的界面换热系数	500 W·m^{-2}·K^{-1}
边界条件	浇注温度：1 379、1 399、1 419、1 439 ℃ 浇注时间：7.5 s 空冷
重力参数	9.8 m·s^{-2}
初始条件	砂型初始温度：T=25 ℃ 浇注初始温度：T=1 379、1 399、1 419、1 439 ℃
浇注方式	重力浇注

2　实验结果及讨论

2.1　压盘温度场及冷却速度分析

图 3 是浇注温度为 1 379 ℃，184 s 时压盘的温度场及选取的特征点图。可以发现，压盘在径向上呈现明显的温度梯度差异。对于冷却过程中压盘径向温度场的变化可大致分为 A 和 B 2 个区域。图 3 中用黑色箭头标明了区域 A 和 B 的降温顺序，区域 A 冷却过程中的降温顺序是小凸耳和内圈大致同时朝

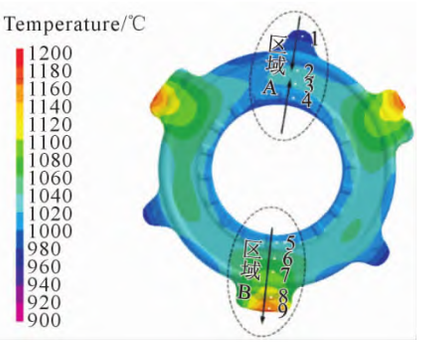


图 3 浇注温度 1 379 ℃下 184 s 时压盘的温度场及特征点选取示意图

Fig.3 Temperature field of the pressure plate at a pouring temperature of 1 379 ℃ for 184 s and selection of characteristic points

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

着压盘盘面进行。而区域 B 冷却过程的降温顺序是内圈朝着大凸耳的方向进行。区域 B 大凸耳处的温度梯度明显高于其他区域，这显然加剧了其在冷却过程中不同位置体积收缩的不匹配程度，使得各部分间的相互作用力加大，从而导致大凸耳区域出现更高的残余应力。为了详细分析压盘不同部位的实际冷却情况，下面选取压盘上 9 个特征点，详细分析各点冷却速度的差异性。图 4 是压盘上 9 个点温度随时间变化曲线。可以看出，在区域 A 内，点 1 的冷却速度最快，其次是点 4，点 1 的冷却速度稍大于点 4；点 2 和点 3 的冷却速度比较接近。在区域 B 内，点 5 的冷却速度最快，之后依次是点 6、点 7、点 8 和点 9，点 9 的冷却速度最慢。各点的冷却速度的大小关系为：1>4>2≈3>5>6>7>8>9。

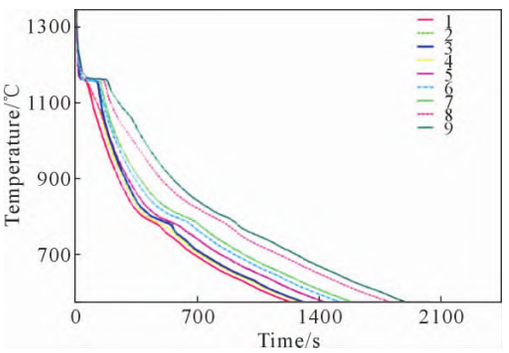


图 4 浇注温度 1 379 ℃下各特征点的温度变化曲线

Fig.4 The temperature change curve of each characteristic point at the pouring temperature of 1 379 ℃

对于区域 A，小凸耳处的点 1 属于独立突出的部位，位于压盘最边缘，其体积相对较小，且和型砂的接触面积大散热快，故其冷却速度快。内圈处的点 4，因内圈厚度只有 5.5 mm 且区域体积小，冷却速度也较快。盘面的平均厚度为 10 mm，且区域体积较大，相比之下，位于该处的点 2 和点 3 冷却速度较小。对于区域 B，位于内圈的点 5 冷却速度最大，受集渣包温度场的影响，靠近集渣包处点的冷却速度越来越慢，因此点 9 的冷却速度最小。点 6、点 7、点 8 随着距离集渣包距离越来越近，受其温度场的影响越来越大，因此这 3 点的冷却速度越来越小。

综上分析，压盘在冷却凝固过程中温度场的形成主要由自身结构的差异和浇注系统 2 个因素共同决定。

2.2 浇注温度对压盘残余应力的影响

浇注温度是铸造工艺中的一个重要参数。合适的浇注温度是获得高质量铸件的保证。浇注温度偏低，铁液流动性变差，则铁液充型困难，易产生冷隔、气孔等缺陷[17]。浇注温度越高，铁液收缩量变大，收缩受到型壳的约束，便会在铸件内部形成大的残余应力。但是浇注温度越高，相当于提高了铸型的温度，铸件与铸型之间的温差减小，铸件的冷却速度减小，各部分温度均匀性提高，相互间的制约力较小，因此残余应力较小[18]。根据企业实际生产经验和查阅文献，选择 1 379、1 399、1 419 和 1 439 ℃ 4种浇注温度以研究浇注温度对压盘铸件残余应力的影响。

图 5 为在 1 379、1 399、1 419、1 439 ℃浇注温度下压盘的残余应力分布云图。可以看出，压盘盘面区域的残余应力以拉应力为主，小凸耳区域以压应力为主，内圈和大凸耳区域既存在拉应力，又有压应力。从残余应力大小来看，盘面的应力值相对较小，应力整体分布均匀，且随着浇注温度的提高，这种均匀性越来越高。小凸耳和内圈处应力值相比盘面相对较大，随着浇注温度的升高，小凸耳和内圈区域高应力值及其分布范围越来越小。大凸耳区域为整个压盘铸件残余应力最大处。随着浇注温度的提高，大凸耳处的应力值越来越大。

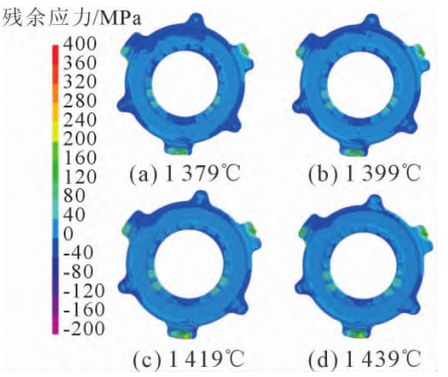


图 5 4 种浇注温度下压盘的应力云图

Fig.5 Stress cloud diagram of the pressure plate at four pouring temperatures

4 种浇注温度对应的压盘凝固时间如图 6 所示，在径向上，随着浇注温度的提高，小凸耳和内圈沿着盘面的凝固时间差异逐渐减小。当浇注温度为 1 379 ℃时，小凸耳和内圈区域的凝固时间差异较大，当浇注温度逐渐提高至 1 439 ℃时，小凸耳和内圈区域的凝固时间差异较小，因此，浇注温度的提高能降低小凸耳和内圈区域的温度梯度。这可能是因为，随着浇注温度的提高，铁液在充满型腔的过程中提高了铸型表面的温度，铸型对金属液的激冷作用也随之减弱，金属液与铸型之间的热交换强度也随之降低，从而导致压盘在砂型内的冷却速度有所降低，这种效果对冷却速度较快的区域如小凸耳和内圈区域影响明显。相比之下，在径向方向上，随着浇注温度的提高，大凸耳区域的凝固时间差异逐渐

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

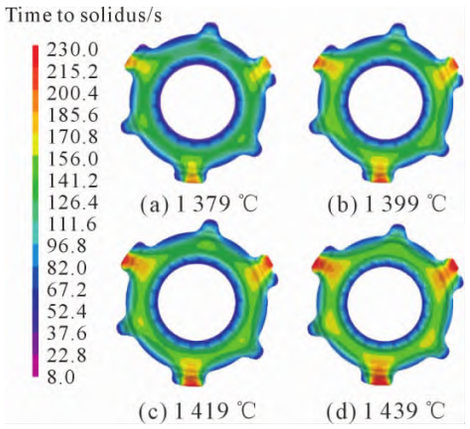


图 6 4 种浇注温度下压盘的凝固时间

Fig.6 Solidification time of the pressure plate at four pouring temperatures

增大。浇注温度为 1 379 ℃时,大凸耳区域的凝固时间差异较小,当浇注温度逐渐提高至 1 439 ℃时,大凸耳区域的凝固时间差异显著增大,这必然将加大大凸耳区域在冷却凝固过程中的温度梯度。这是因为与大凸耳连接的集渣包体积相对较大,浇注温度提高,高温保持时间长,集渣包的降温速度相比大凸耳慢得多,因此大凸耳上靠近集渣包的点(点 9)受集渣包温度场影响较大,冷却速度随着浇注温度的提高明显降低,而大凸耳上远离集渣包处的点(点 8)受集渣包温度场影响较小,浇注温度对其冷却速度的影响相比点 9 较小。基于以上分析,可以发现随着浇注温度的提高,间接加大了大凸耳上 2 点(点 8 和点 9)间的温度梯度,而温度梯度的增大也是大凸耳处残余应力升高的主要原因。对于盘面,其凝固时间随浇注温度的变化规律不明显。从整体盘面应力来看,浇注温度的提高有利于均匀其应力分布。

为了更详细地反映浇注温度对压盘不同部位残余应力数值的影响,统计了 4 种浇注温度下 9 个特征点的残余应力数值,如图 7 所示。可以看出,区域 A 内 4 个特征点的残余应力均随着浇注温度的提高而降低。点 1 和点 2 的应力降低幅度稍大。点 3 和点 4 因其温度场受浇注温度的影响较小,残余应力降低幅度也相对较小。区域 B 内的 5 个特征点,内圈上点 5 的残余应力随着浇注温度的提高而降低,降低幅度不大。盘面上的点 6 和点 7,大凸耳上的点 8 和点 9 的残余应力均随着浇注温度的提高而升高,且升高幅度越来越大。当浇注温度由 1 379 ℃提高到 1 439 ℃时,点 9 的残余应力值由 207 MPa 增加到 292 MPa,增幅达到 85 MPa。考虑到浇注温度对压盘大凸耳点 9 处的应力值影响较大,而上文通过对压盘在 4 种浇注温度下的凝固时间分析可知,浇注温度的提高会增大大凸耳区域的温度梯度,但不能定量得到大凸耳区域温度梯度差异性的大小,为了详细分析浇注温度对大凸耳区域温度梯度的影响,从而研究温度梯度对残余应力的影响,选取压盘上 2 点(点 8 和点 9)在同一时刻的温度差并进行比较(图8)。

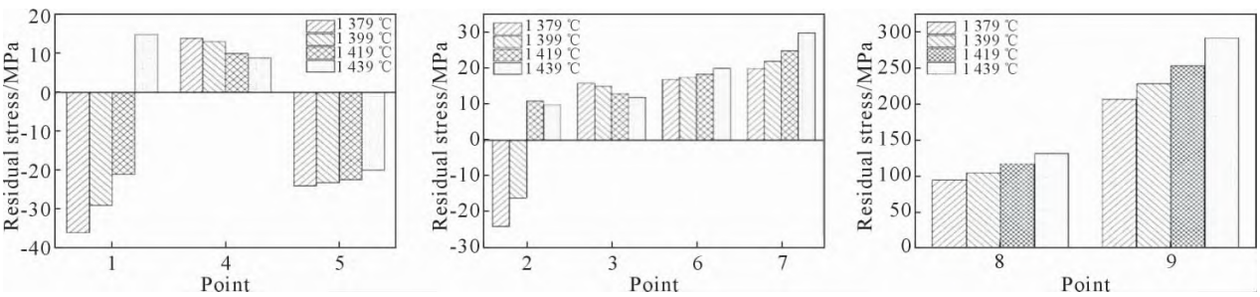


图 7 各特征点的残余应力值

Fig.7 Residual stress at each feature point

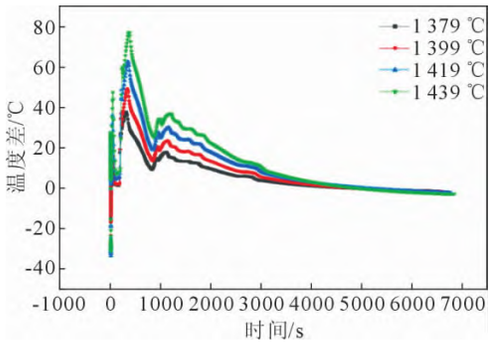


图 8 4 种浇注温度下点 8 和点 9 的温度差曲线

Fig.8 Temperature difference between point 8 and point 9 at four pouring temperatures

由图 8 可以看出,浇注后直到约 3 000 s,浇注温度为 1 439 ℃时的温度差值最大,大约在 400 s 时温差达到 77 ℃;1 379 ℃的浇注温度下,2 节点之间的温差最小,最大温差约为 38 ℃;3 000 s 之后,4 种浇注温度的外界冷却条件相同,温差值减小并逐渐趋于相等。随浇注温度的提高,2 点间温差的增大是受到集渣包温度场的影响,这在上文已经分析,故这里不再赘述。温差增大,必然会导致残余应力增大,这也是特征点 9 残余应力大幅增加的主要原因。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 结论

(1)实现了 GGV30 压盘铸件热物性参数库的构建,为 ProCAST 有限元模拟的实现奠定了基础。JMatPro 软件计算所得的数据准确程度优于 ProCAST 软件的材料数据库，其计算的各项参数结果更接近实际铸件。

(2)数值模拟的结果表明,压盘温度场的形成受其自身结构和浇注系统布局的影响，温度场的不均匀是导致残余应力形成的主要原因。

(3)受压盘结构和浇注系统的影响,浇注温度对压盘不同区域温度场的影响是不同的。浇注温度的提高，有利于减小小凸耳和部分内圈区域的温度梯度,降低该区域的残余应力。相反,浇注温度的提高,会提高大凸耳区域的温度梯度，增大该区域的残余应力。

参考文献:

[1] 阮建刚. 改善离合器压盘金相组织和性能的措施[J]. 铸造,2000 (7): 428-430.

[2] 陈浩. 离合器压盘热变形与应力分析方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.

[3] 朱茂桃,司俊领,姚鹏,等. 离合器压盘温度场与应力场分析及改进[J]. 科学技术与工程,2020, 20(2): 821-826.

[4] 童思艺. 利用铸件余热减少铸造残余应力[J]. 铸造,2008, 57(5): 509-512.

[5] NEJAD R M, SHARIATI M, FARHANGDOOST K, et al. Rolling contact fatigue analysis of rails under the influence of residual stresses induced by manufacturing [J]. Scientia Iranica, Transactions B: Mechanical Engineering, 2019, 26(3): 1427-1437.

[6] 吴凯. 灰铸铁消失模铸造数值模拟系统的开发与应用[D]. 武汉:华中科技大学,2016.

[7] 安南. AZ91D 镁合金构件铸造残余应力有限元模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业学,2021.

[8] 王晓明. K435 高温合金叶片凝固过程与应力数值模拟及铸造工艺优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.

[9] 时建松. 发动机缸体残余应力的数值模拟[D]. 合肥:合肥工业大学,2010.

[10] 贾亮. 机架构件铸造应力数值模拟及工艺优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.

[11] 唐玉龙. 球墨铸铁件缩孔缩松缺陷预测的数值模拟研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2019.

[12] 李超. 钛合金铸件应力的测量与数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.

[13] 宋洪达. 蠕墨铸铁力学性能的热分析预测[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2021.

[14] GUSTAFSSON E, HOFWING M, STRÖMBERG N. Residual stresses in a stress lattice-Experiments and finite element simulations[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (9): 4320-4328.

[15] 王敏毅,黄颖,林有希. 钇基重稀土蠕墨铸铁的高温性能研究[J]. 福州大学学报(自然科学版),2012, 40(4): 501-507.

[16] 陈宏智,李绍裘,赵世群. 稀土蠕墨铸铁气缸盖的研究[J]. 内燃机工程,1982(3): 10-15.

[17] 冀晓鹏,龙思远. 压铸件铸造残余应力影响因素研究[J]. 铸造技术,2018, 39(9): 2004-2007.

[18] 李璐瑶. Ti-48Al-2Cr-2Nb 熔模铸造性能与组织的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net