DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.10.020

铝合金铸件残余应力的形成机制与控制

何建刚,曾大新,史秋月,李峰光
(湖北汽车工业学院 材料科学与工程学院,湖北 十堰 442002)

摘　要:铸造铝合金在工业中应用广泛,铸件中的残余应力直接影响其尺寸稳定性和使用性能。铝合金铸件中残余应力的形成机制及检测与控制方法研究对提高铸件质量和使用性能具有重要意义。阐述了铝合金铸件在铸造和热处理过程中残余应力形成机制,综述了铝合金铸件残余应力的检测技术,分析了降低铝合金铸件中残余应力的途径与方法,指出了残余应力控制的研究与发展方向。

关键词:铝合金;铸件;残余应力;形成机制;应力检测;应力控制

中图分类号:TG247　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2021)10-0919-07

Residual Stress Forming Mechanism and Control in Aluminum Alloy Casting

HE Jiangang, ZENG Daxin, SHI Qiuyue, LI Fengguang
(School of Materials Science and Engineering, Hubei University of Automotive Technology, Shiyan 442002, China)

Abstract: Cast aluminum alloy is widely used in industry. The residual stress in the casting directly affects its dimensional stability and service performance. The research on the formation mechanism of residual stress in aluminum alloy castings as well as the detection and control methods is of great significance to improve the quality and performance of the castings. In this paper, the formation mechanism of residual stress in the casting and heat treatment process of aluminum alloy castings is described, the detection technology of residual stress in aluminum alloy castings is summarized, the ways and methods of reducing residual stress in aluminum alloy castings are analyzed, and the research and development direction of residual stress control is pointed out.

Key words: aluminum alloy; casting; residual stress; forming mechanism; stress measurement; stress control

铸件残余应力是铸件无外力作用时,以平衡状态存在于铸件内部的内应力。一般而言,铸件中的残余应力是有害的,它导致铸件在切削加工过程中或加工以后变形,影响零件的精度,还会引起零件在使用过程产生扭曲变形[1];当铸件的工作应力与残余应力方向相同,应力叠加时,将降低铸件的承载能力,加速疲劳裂纹的扩展[2-4];在腐蚀介质中,残余应力还影响材料的耐腐蚀性,严重时会引起应力腐蚀开裂[5]。铝合金铸件在工业上应用广泛,近些年在汽车轻量化发展的推动下,铝合金铸件在汽车上应用越来越多,对铸件残余应力的控制也提出了更高要求。因此,研究铝合金铸件残余应力的形成原因、检测技术和控制,对铝合金铸件的生产和应用有现实意义。本文作者阐述了铝合金铸件残余应力的形成机制,总结了铝合金铸件残余应力的检测技术及其发展,分析并提出了控制铝合金铸件中残余应力的途径和将来的研究方向。

1　铝合金铸件残余应力形成机制

铸造铝合金可分为可热处理强化和不可热处理强化两大类,不可热处理强化的铝合金铸件一般在铸态下使用,其残余应力是在铸造过程中形成的;可热处理强化铝合金铸件一般要经过高温固溶处理后淬火,铸造残余应力在高温固溶处理过程将消失,铸件使用状态的残余应力主要是淬火过程中产生的。

1.1　铸造过程残余应力的形成

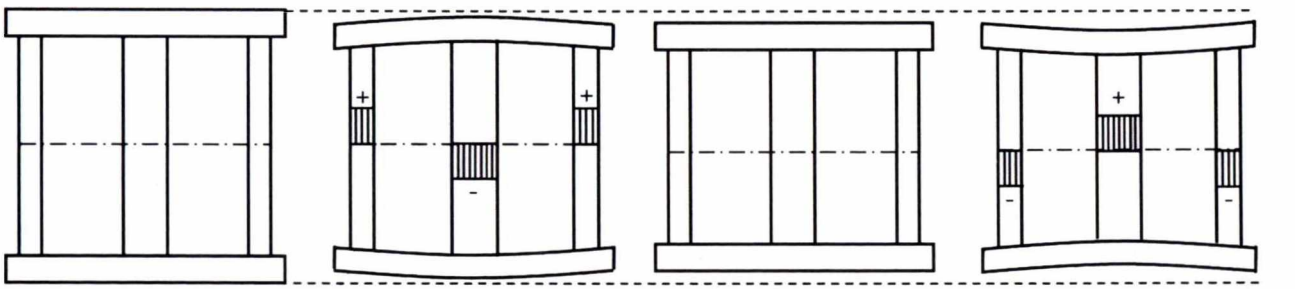
铝合金铸件在凝固与冷却过程中产生收缩,当收缩不能自由进行时,便在铸件内产生应力。导致铝合金铸件不能自由收缩的原因有两类,一类是铸件不同部位之间的相互约束;另一类是外界因素,如铸型、型芯、镶嵌件等,对铸件收缩的阻碍。两者产生应力的机制有所不同,前者是不同部位冷却速度不同,收缩不同步,相互制约而产生的应力,应力平衡于铸件内部,通常称之为热应力;后者是因外界阻止铸件

收稿日期:2021-04-08
基金项目:国家科技重大专项(2018ZX04027001-009)
作者简介:何建刚(1995—),湖北汉川人,硕士生.研究方向:铸造铝合金.电话:15926151970,
Email:1993975437@qq.com
通讯作者:曾大新(1962—),湖南临湘人,教授,博士.研究方向:金属材料加工.电话:13986918926,
Email:zengdx@huat.edu.cn

收缩而产生应力，应力与外界阻碍物体平衡，这样形成的应力称之机械阻碍应力，铸造铝合金残余应力的形成与这两种应力有关。

铝合金铸件热应力作用下形成残余应力机制可用图 1 来说明，图中所示框型铸件由中间粗杆、两侧细杆及横梁组成，先忽略铸型对铸件收缩的阻碍，假设充型结束时金属温度均匀。在凝固与冷却的初始阶段，细杆冷却速度快，粗杆冷却速度慢，尽管粗杆与细杆的冷却速度不同，收缩不同步，冷却速度慢的粗杆中固相骨架尚未形成时，不产生应力，如图 1(a)。第二阶段，从粗杆固相形成骨架开始，粗杆与细杆都有一定强度，此阶段细杆冷却速度仍快于粗杆，细杆收缩得多，而粗杆收缩得少，由于粗杆与细杆相互约束，导致细杆内产生拉应力，粗杆产生压应力，因合金在高温下的屈服强度低，粗杆和细杆可分别通过压缩和拉伸塑性变形释放一部分应力，但粗杆内仍留有压应力，细杆留有拉应力，如图 1(b)。第三阶段，温度低的细杆冷却速度减慢，粗杆的冷却速度转变为快于细杆，而其收缩多于细杆，使得粗杆与细杆的应力减少，在某一时刻，粗杆与细杆的应力将消失，如图 1(c)。最后阶段，粗杆与细杆继续冷却，到达室温，由于此前粗杆的温度高，到达室温时的收缩多，结果粗杆转为受拉，细杆受压，因此时合金的屈服强度比较高，应力难以通过塑性变形释放，残留于铸件内，即成为残余应力，如图 1(d)所示。残余应力的大小决定于前两阶段产生的塑性变形大小及合金的弹性性质；凝固与冷却过程中发生了不均匀的塑性变形是产生残余应力的根本原因。

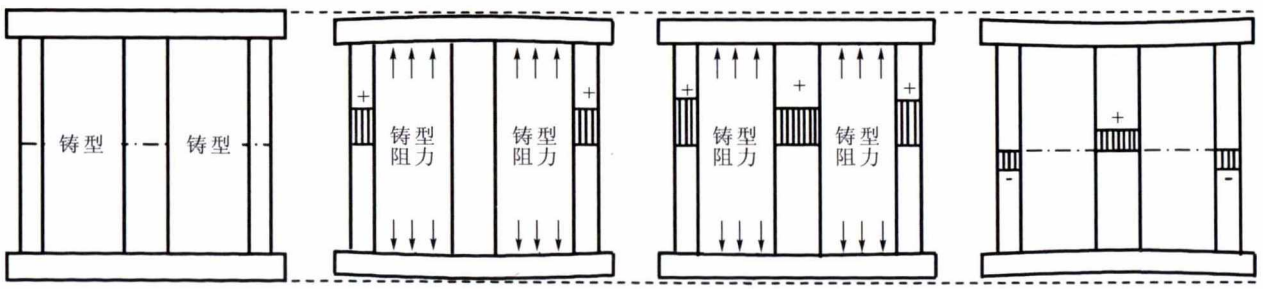
机械阻碍应力往往被认为是临时应力，在残余应力形成中的作用被忽略。在上述框形铸件中，如果考虑铸型对收缩的阻碍，铸件的凝固和冷却过程与自由收缩时相似，但粗杆与细杆的受力状态发生改变。图 2 说明了铸型阻碍收缩时残余应力的形成机制，在凝固与冷却初始阶段，冷却速度慢的粗杆中固相骨架尚未形成时，冷却速度快的细杆收缩受到铸型阻碍，细杆内形成拉应力，此时粗杆无应力，如图 2(a)。第二阶段，从粗杆固相形成骨架并产生线收缩开始，粗杆的收缩也受到铸型的阻碍，粗杆和细杆收缩产生的收缩力都大部分作用在铸型上，没有相互作用，粗杆和细杆都处于拉应力的状态，如图 2(b)。铸件继续冷却时，粗杆和细杆保持拉应力状态，但应力继续增大，如图 2(c)。当铸件从铸型中取出后，铸型的机械阻碍应力消除，粗杆和细杆都产生收缩，一般铸型不是完全刚性，结果粗杆收缩量比细杆略大，粗杆受拉，细杆受压，形成残余应力，应力大小与铸型刚度有关，铸件呈现微小变形，如图 2(d)。由于在此过程中，粗杆没有受到细杆收缩产生的压应力而发生压缩变形，粗、细杆间的相对塑性变形量减少，其残余应力比自由收缩时的残余应力小。



(a)无应力　(b)粗杆开始线收缩后的应力　(c)应力释放　(d)铸件冷却到室温形成残余应力

图 1 铝合金铸件自由收缩时残余应力形成过程

Fig.1 Residual stress forming process of aluminum alloy casting under the condition of free shrinkage



(a)无应力　(b)细杆开始而粗杆未开始线收缩的应力　(c)粗杆和杆同时线收缩后的应力　(d)去除铸型后的残余应力

图 2 铝合金铸件受阻收缩时残余应力形成过程

Fig.2 Residual stress forming process of aluminum alloy casting with restraint of mold to shrinkage

对比上述自由收缩与受阻收缩时残余应力的形成过程可见，铸型对收缩的阻碍影响残余应力的形成过程，从而影响残余应力的大小与分布。铝合金铸件大多数采用金属型铸造，金属型缺少退让性，机械阻碍应力大；就砂型铸造而言，铝合金的强度比黑色金属低，铸件在凝固与冷却过程的前期受铸型阻碍更容易产生塑性变形；另外，有些铝合金铸件中镶铸黑色金属，例如，铝合金汽车发动机缸体中大多镶铸铸铁缸套，镶铸件阻碍铝合金收缩使得铸件中产生很大的残余应力[6-7]，因此，在铝合金铸件残余应力的研究与生产控制中，应重视机械阻碍应力的作用。

1.2　热处理过程残余应力的形成

大多数铝合金铸件要进行热处理强化，主要工艺是固溶处理后进行时效处理。固溶处理是将铝合金加热到高温保持，使过剩相充分溶解到固溶体中后淬火，铝合金铸件热处理残余应力主要产生于淬火过程。

铝合金淬火过程中没有组织转变，残余应力是由于热应力产生的，其形成过程可用断面为方形的铸件淬火来说明，如图 3 所示。在淬火开始前，铸件经长时间高温固溶处理，铸造残余应力完全消除，铸件内部温度均匀，无应力存在。在淬火起始阶段，铸件进入淬火冷却介质后，表层冷却速度快，心部冷却速度慢，表层与心部形成很大的温差，表层的收缩量大于心部，其收缩受到心部阻碍，使得表层处于受拉状态，而心部处于受压状态，表层在拉应力作用下发生塑性变形而释放一部分应力，还残留部分拉应力，如图 3(a)所示。随着冷却的进行，铸件表层由于温度低，冷却速度下降，心部冷却速度加快，表层收缩比心部收缩得少，使得内应力减少，直至内应力可能完成消失，如图 3(b)所示。铸件继续冷却时，应力反转，铸件中心受拉应力，外表层受压应力，在冷却到淬火介质的过程中应力不断增大，由于此时铸件变形抗力大，不能通过塑性变形释放应力，铸件温度到达淬火介质温度时的应力即为残余应力，如图 3(c)所示。从这一过程也说明了，淬火残余应力的形成也是由于冷却过程中的热应力导致铸件发生了不均匀的塑性变形，没有塑性变形就没有残余应力。

2　铝合金铸件残余应力检测方法

用于铝合金铸件残余应力检测方法有许多种，可分成有损检测和无损检测两大类。有损检测是采用机械加工方法分离或去除铸件局部的材料，测量此时应力释放产生的应变，然后通过弹性力学原理计算出残余应力，这类方法也称为机械检测法。无损检测方法是通过测量与残余应力有关联的物理量，根据该物理量与残余应力的关系，计算出对应的残余应力。

2.1　有损检测法

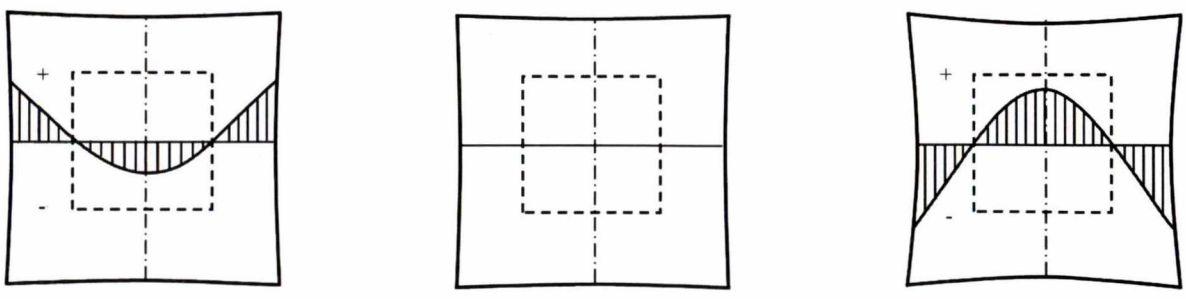
铝合金铸件残余应力有损检测方法主要有钻孔法、切割法、环芯法、剥层法等，其中钻孔法、切割法应用最多。

钻孔法的原理是在残余应力被测表面粘贴应变计，在应变计中心钻一个小孔，通过应变计测得小孔临近区域因残余应力释放引起的应变，然后根据应力与应变的关系计算得到二维平均残余应力。钻孔法方法操作比较简便，测量精度较高，使用成本比较低，因此在铝合金铸件残余应力检测中有较多应用[9-11]。

切割法是将应变计粘贴在被测铸件的表面，采用切割方法将被测点与周围部分分离，获得应力释放前后应变量，然后利用所测得的应变计算出表面残余应力。这种方法需要破坏铸件，但测量精度比较高，操作不复杂，一些铝合金发动机缸体的残余应力的测试中应用了这种方法[7,12-13]。

2.2　无损检测法

无损测量法包括 X 射线衍射法、中子衍射法、超声波法等，在铝合金铸件残余应力检测中应用的



(a)初始阶段形成的应力　(b)应力随着心部冷却速度变得快于表层而释放　(c)冷却到室温形成残余应力

图 3　铝合金铸件淬火残余应力的形成过程

Fig.3　Forming process of residual stress in aluminum alloy casting during quenching process

主要是X射线衍射法[8,14]、中子衍射法[8,15-16]。X射线衍射法的是基于金属晶体的晶面间距受到残余应力作用时发生变化，致使X射线衍射谱发生偏移，根据偏移量的大小计算残余应力。X射线衍射法能在较短的时间内无损地测定铸件表面指定位置的残余应力，但其设备昂贵，测量深度较浅。中子衍射法测量原理与X射线衍射法相同，但中子衍射相比X射线衍射法具有更大的穿透深度，可测定铝合金表层以下更深范围内的应力。

上述残余应力测量方法各有特点，不同方法的可测深度有较大的差异(见图4)，设备价格、测量精度、使用成本及应用的方便程度也都不同，各种方法都有一定的局限性，难以对结构复杂的铸件残余应力大小与分布进行准确的测定。将残余应力测试方法与有限元数值模拟技术结合，用测试结果作为数值模拟条件或验证与修正模拟结果，可以突破现有实验测试方法的局限，获得铸件残余应力大小与分布，是研究与发展的方向。

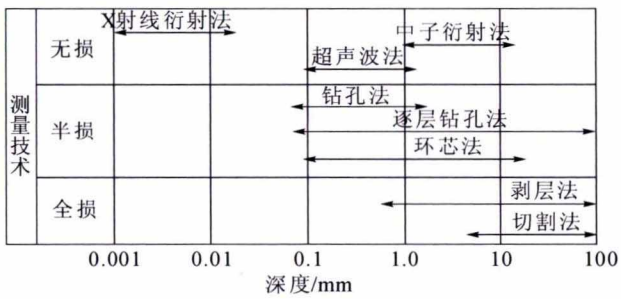


图4 残余应力检测方法的测量深度及工件是否有损[17]

Fig.4 Penetration depth of residual stress measurement methods and if the methodology is destructive or non-destructive

3 铝合金铸件残余应力控制

3.1 铸造过程形成残余应力的控制

残余应力形成机制的分析表明，铝合金铸造残余应力是铸件凝固和冷却过程中形成的热应力与机械阻碍应力共同作用的结果，热应力是铸件凝固与冷却过程中不均匀的冷却速度造成的，其大小与合金的弹塑性质有关，由此可知，铸造残余应力的控制应从铝合金的性质、铸型性质、铸件结构、铸造工艺等方面来考虑。

在合金性质方面，弹性模量、线膨胀系数、导热系数、屈服强度等影响铸件残余应力。一般情况下弹性模量和线膨胀系数越大，铸件的残余应力越大。P. Hofer 等[18]研究高压铸造铝合金铸件的残余应力与变形。结果表明，热膨胀系数大的AlSi10MgMn合金比AlSi12(Fe)合金的热膨胀系数大，其残余应力与变形也大。为了减小铸件残余应力，在满足铸件性能要求的前提下应选择弹性模量、线膨胀系数小的合金。

铸型性质从两个方面影响铸件残余应力，一是影响铸件冷却过程中温度分布的均匀性，另一是影响铸件的收缩。为了减少铸件冷却过程中各部位的温差，降低残余应力，可以预热铸型；对于砂型铸造，可在铸件厚大部位放置冷铁，或采用蓄预系数大的型砂；对于金属型铸造，可在厚大部位布置冷却水道，也在金属型上覆砂来控制冷却速度，从而减少残余应力[19]。铸型的退让性显著影响机械阻碍应力的大小，而机械阻碍应力影响残余应力的形成过程，因此铸型的退让性会影响残余应力的大小与分布。一般认为铸型的退让性越好，残余应力越小，但有研究表明[20]，利用机械阻碍作用可以减少残余应力，前文对框型铸件残余应力形成过程的分析也说明了铸型的机械阻碍减少残余应力。因此，铸型退让性对残余应力的影响可能不是单向的，可能与铸件结构有很大的关系，值得进一步研究。

铸造工艺方面，浇口和冒口的位置影响铸件温度分布的均匀性及对铸件收缩的阻碍，设计时应加以考虑；适当提高浇注温度，以降低凝固及其后的冷却速度，增加铸件在铸型中的冷却时间，降低开箱温度，有利于降低残余应力。

铸件结构影响铸件冷却时各部位的温度差，还影响铸型对铸件收缩的阻碍程度，因此对残余应力有很大影响。为了减少残余应力，铸件的壁厚差应仅可能减少，并考虑各部位的散热条件，尽可能使得铸件均匀冷却。

由上述可见，影响铸件残余应力的因素众多，而且一些因素存在交互作用，对于结构复杂的铸件，难以掌握其形成规律并有效控制。数值模拟技术有助于解决这一问题[6,19]，用数值模拟技术预测铝合金铸造残余应力大小与分布、优化控制措施，是未来的发展趋势。

3.2 热处理过程形成残余应力的控制

热处理强化是大部分铝合金铸件生产中的重要环节，其过程包括固溶处理和时效处理。铝合金在固溶处理温度的屈服强度都很低[21]。因此，铸造过程形成的残余应力在固溶处理过程中被消除，铸件最终残余应力决定于固溶处理后的淬火与时效处理，淬火产生残余应力，时效处理释放残余应力，热处理残余应力控制主要是减少淬火残余应力与增加时效过程残余应力的释放。

3.2.1 减少淬火残余应力

影响淬火残余应力的工艺因素主要是淬火介

质、介质温度及淬火温度。用于铝合金的淬火的介质主要是水和聚合物水溶液，聚合物水溶液的冷却特性比水好，且其冷却速度可通过改变浓度来调节，能在满足淬火冷却速度要求的前提下减小残余应力[21]。淬火介质温度影响冷却速度，从而影响铸件残余应力，Mohamed 等[22]研究了 A356 和 A319 铝合金铸件淬火后的残余应力，结果显示两种铝合金在 20 ℃的冷水中淬火的残余应力都明显高于 60 ℃温水中淬火的残余应力。一般而言，冷却速度越快，则铸件冷却过程中温度梯度越大，残余应力越大，为了减少残余应力，淬火介质和介质温度应选择在确保铝合金中过饱和固溶体无过剩相析出的前提下，冷却速度尽可能小。值得注意的是，当铸件含有镶铸件时，冷却速度对残余应力的影响可能相反，有研究发现镶嵌铸铁缸套的铝合金发动机缸体在温水和冷水中淬火的残余应力都比空气中冷却的残余应力小[13]。

淬火的温度对残余应力有很大的影响，作者研究 ZL109 合金试验铸件淬火后的残余应力表明，淬火温度从工艺范围下限 510 ℃到上限 530 ℃，残余应力增加 30%。这可能是由于温度的变化一方面影响了合金的屈服强度，另一方面也影响了铸件冷却过程中温度梯度，为了减少残余应力，淬火温度应尽可能低。

3.2.2 增加时效过程残余应力释放

铝合金铸件淬火产生的残余应力在时效过程中会释放，释放的大小决定于时效温度和时间，温度越高、时间越长，残余应力释放越多。研究表明温度比时间对铝合金铸件淬火应力的释放更敏感[13,23]。Mohamed 等[13]研究时效处理对 B319 铝合金缸体残余应力释放的影响，结果表明，在 250 ℃下短时间的时效，残余应力释放显著；而 160 ℃下时效时应力释放不明显。Godlewski 等[23]研究 E319 铝合金时效处理时残余应力释放的结果表明，在 190 ℃下时效处理 65 h，残余应力只降低 5%；在 260 ℃下处理 5 h，残余应力降低 50%。作者研究时效处理对 ZL109 合金实验铸件残余应力释放的影响，实验铸件在 520 ℃固溶 6 h 后水淬后分别在 160 ℃、180 ℃下保温 16 h 后测量残余应力，结果显示残余应力分别降低 21%、33%。

由上可见，选择较高的时效温度、较长的时效时间可降低铝合金铸件热处理残余应力，但在 T6 处理的工艺范围内，时效处理释放的残余应力是有限的。

以上降低铝合金铸件残余应力措施大多数是单因素分析得出的，由于许多因素是相互影响的，并且应力大小还与铸件的成分[24]、组织[22,25]及铸件的壁厚与结构[13,22]等因素有关，综合考虑多因素的铝合金铸件热处理残余应力预测与控制工艺优化存在困难。利用数值模拟能够模拟复杂过程的优势，模拟预测铝合金热处理残余应力，是近些年来的研究热点[9,11,21,26]，可以预见，随着计算机与数值模拟技术的发展，数值模拟将成为铝合金铸件残余应力预测与控制工艺优化的重要手段。

3.3 残余应力的消减

铝合金铸件生产后若残余应力过高，不能满足使用要求，可选择下面的方法来消减。

(1)退火处理　退火处理是将铝合金铸件加热到 300 ℃温度左右，保温一段时间后炉冷却到室温，从而消减铸件的残余应力。退火处理只适用于不可热处理强化的铝合金铸件，对于热处理强化的铝合金铸件，由于退火会导致强化相聚焦长大而降低强度，不能采用这种方法来消减残余应力。

(2)振动时效　振动时效是用激振设备对铸件进行循环激振，激振在铸件内产生应力与铸件的残余应力叠加超过材料的屈服极限时，铸件内发生微观的塑性变形，从而使残余应力释放[27]。振动时效不影响铸件的力学性能，对可热处理强化和不可热处理强化的铝合金铸件都适用，但对于批量生产的小件显得处理效率低。

(3)深冷处理　深冷处理是将铸件由室温冷却至深冷温度(往往是浸入液氮中，冷却至 -196 ℃)，待铸件内外温度均匀后又从低温状态快速升至高温，产生与淬火相反的热应力，从而实现残余应力的消减[28]。可分为两种类型，一类是在淬火后立刻进行深冷处理，之后进行时效处理；另一类是在时效处理后进行深冷处理。Mohamed[13]研究深冷处理对 Al-Si 合金发动机缸体残余应力的影响，结果表明，在淬火后进行深冷处理释放残余应力 30%左右，循环深冷处理可使残余应力进一步释放。李敬民等[29]研究不同深冷处理工艺对 ZL204 铝合金残余应力消除效果的影响，结果表明，深冷处理的残余应力消除效果明显好于传统的去应力时效处理，固溶后直接进行深冷处理的效果好于时效处理后进行深冷处理。深冷处理对于一些尺寸较大、结构复杂的铸件难以实现，成本也很高。

上述消减残余应力的方法都有一定的局限性，在特殊需要是可以选用。一般工业生产上铝合金铸件残余应力的控制主要是通过优化铸件结构、铸造及热处理工艺来实现。

4 结束语

铝合金铸件在铸造过程形成的残余应力是铸件凝固与冷却过程中不同部位相互牵制阻碍自由收缩和铸型与型芯阻碍自由收缩，导致发生了不均匀塑性变形的结果，铸型与型芯的阻碍影响残余应力的大小与分布，研究铝合金铸件残余应力的形成时不能忽视。铝合金铸件固溶处理后的淬火产生很大残余应力，其后的时效热处理可释放部分应力，T6 处理释放的应力有限。

现有残余应力检测技术都有局限性，难以对结构复杂的铸件残余应力大小与分布进行准确的测定，将残余应力测试方法与有限元数值模拟技术结合，可以突破现有实验测试方法的局限，是研究与发展的方向。

影响铝合金铸件残余应力的因素众多，而且一些因素存在交互作用，对于结构复杂的铸件，难以掌握其形成规律并有效控制，数值模拟技术有助于解决这一问题，随着技术的不断进步和完善，将成为铝合金铸件残余应力预测与控制工艺优化的重要手段。

参考文献：

[1] LOMBARDI A, RAVINDRAN C, SEDIAKO D, et al. Determining the mechanism of in-service cylinder distortion in aluminum engine blocks with cast-in gray iron liners [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45: 6291-6303.

[2] LADOS D A, APELIAN D. The effect of residual stress on the fatigue crack growth behavior of Al-Si-Mg cast alloys mechanisms and corrective mathematical models [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37(1): 133-145.

[3] 刘金水，雷衡兵，高文理，等. 铸造残余应力对铝合金副车架疲劳寿命的影响 [J]. 湖南大学学报（自然科学版），2018，45(6): 28-34.

[4] LI P, MAIJER D M, LINDLEY T C, et al. Simulating the residual stress in an A356 automotive wheel and its impact on fatigue life [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2007, 38 (4): 505-515.

[5] 陈恒，卢琳. 残余应力对金属材料局部腐蚀行为的影响[J]. 工程科学学报，2019，41(7): 929-939.

[6] MOTOYAMA Y, EBIHARA N, SHIAGA H, et al. Thermal stress analysis of residual stress in a cylindrical aluminum casting with cast-in GCI liner, taking recovery behavior effect into account[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2018, 49 (11): 5619-5635.

[7] AGUILAR-NAVARRO J A, GONZAONZÁ lez-Ló pez J R, Hernández-Sandoval J, et al. Innovative methodology for measuring residual stress in engine blocks[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106: 3649-3658.

[8] LI K, XIAO B, WANG Q. Residual stresses in as-quenched aluminum casting [J]. SAE International Journal of Materials and Manufacturing[J]. 2009, 1(1): 725-731.

[9] WANG Q G, CHANG C C, ZHANG G H, et al. Modeling of residual stresses in quenched cast aluminum components[J]. SAE International Journal of Materials & Manufacturing, 2011, 4 (1): 844-852.

[10] 张洋，龚宪生. 发动机缸盖残余应力的测量及分析[J]. 机械科学与技术，2013，32(2): 274-278.

[11] XIAO B, LI K, WANG Q, et al. Numerical simulation and experimental validation of residual stresses in water-quenched aluminum alloy castings[J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2011, 20(9): 1648-1657.

[12] CARRERA E, RODRÍGUEZ A, TALAMANTES J, ed el. Measurement of residual stresses in cast aluminum engine blocks[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 189 (1): 206-210.

[13] MOHAMED S S, SAMUEL A M, DOTY H W, et al. Development of residual tresses in Al-Si engine blocks subjected to different metallurgical parameters[J]. International Journal of Metalcasting, 2020, 14(5): 25-S36.

[14] LEE E, WALDE C, MISHRA B. Effects of cooling rate on precipitate evolution and residual stresses in Al-Si-Mn-Mg casting alloy [J]. Metals & Materials International, 2018, 15(5): 54-56.

[15] LOMBARDI A, SEDIAKO D, MACHIN A, et al. Effect of solution heat treatment on residual stress in Al alloy engine blocks using neutron diffraction[J]. Materials Science & Engineering, 2017, 697(2): 238-247.

[16] YUMI K, JUN K, KEITARO I, et al. Internal residual stress measurement of aluminum alloy castings using neutron diffraction[J]. SAE International Journal of Engines, 2012, 5(2): 446-451.

[17] WYATT J E, BERRY J T, WILLIAMS A R. Residual stresses in aluminum castings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 191(3): 170-173.

[18] HOFER P, KASCHNITZ E, SCHUMACHER E. Distortion and residual stress in high-pressure die castings: simulation and measurements[J]. JOM, 2014, 66(9): 53-57.

[19] 刘金水，刘思雨，高文理. 覆砂工艺消减铝合金筒形件铸造残余应力的研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版)，2017，44(12): 1-7.

[20] 罗暑生. 机械阻碍应力对铸造残余应力影响的研究 [J]. 铸造技术，2005，26(3): 211-213.

[21] ROBINSON J S, TANNER D A, TRUMAN C E. 50 th anniversary article: the origin and management of residual stress in heat-treatable aluminium alloys[J]. Strain, 2014, 50(3): 185-207.

[22] MOHAMED S S, SAMUEL A M, DOTY H W, et al. Relation between residual stresses and microstructure evolution in Al-Si alloys based on different casting parameters [J]. Philosophical Magazine, 2019, 99(3): 284-305.

[23] GODLEWSKI L A, SU X M, POLLOCK T M, et al. The effect of aging on the relaxation of residual stress in cast aluminum[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(10): 4809-4818.

[24] ROBINSON J S, REDINGTON W. The influence of alloy composition on residual stresses in heat treated aluminium alloys[J]. Ma-

（下转第 927 页）

2　发展趋势

经过多年的发展，熔模精密铸造技术已经有了很大的发展，今后各种制壳工艺将会长期共存。在传统工艺上，由于水玻璃制壳工艺在环境因素和产品质量上的不足，硅溶胶制壳工艺将向降低成本、环境友好、产品质量优良等方向发展将部分代替水玻璃制壳工艺。同时，3D 打印技术在精铸领域的应用，将在新产品开发、缩短产品开发周期和模具制造成本及高端精密铸件生产提供有效的技术支持。而型壳直接 3D 打印技术的出现将使实现工序简单、快速、绿色铸造变为可能。

3　结论与展望

虽然目前已经有了很多种型壳制备方法，不管采用何种工艺方法制备型壳，型壳制备方法和过程对型壳性能影响很大，而型壳的性能对铸件质量起着决定性作用。通过对型壳制备技术对铸件质量的影响进行分析，提出预防和解决方案，解决型壳开裂问题，浇铸出合格铸件对提高铸件质量、合格率、提高经济效益非常重要。

参考文献：

[1] 沈昀，郑功，冯辰铭. 熔模精密铸造技术研究进展[J]. 精密成形工程，2019(1): 54-62.

[2] 景宗梁，车顺强. 熔模铸造表面层制壳工艺的研究 [J]. 铸造，2010(8): 803-807.

[3] 李爱宗. 熔模铸造铜花管离心浇注工艺的研究 [J]. 特种铸造及有色合金，2017，37(7): 750-751.

[4] 杨斌，孙少纯，郭常振，等. FDM 技术在熔模铸造生产中的运用[J]. 铸造技术，2018，39(2): 374-378.

[5] 徐贵强，郑蕊，包学春，等. 薄壁汽车零部件精铸工艺设计[J]. 特种铸造及有色合金，2019，39(11): 1229-1231.

[6] 鞠富，徐贵强，郝素斌，等. 某阀体浇注系统工艺设计[J]. 特种铸造及有色合金，2017，37(7): 729-731.

[7] 樊振中. 熔模精密铸造在航空航天领域的应用现状与发展趋势[J]. 航空制造技术，2019，62(9): 38-52.

[8] 姜耀林，邵中魁. 3D 打印在快速熔模精密铸造技术中的应用[J]. 机电工程，2017，34(1): 48-51.

[9] 蓝勇. 熔模精铸型壳强化技术研究与应用[J]. 铸造，2012，61(2): 161-164.

[10] 景宗梁，陆黎明，陆洲. 水玻璃型壳新型硬化剂的研制及应用[J]. 特种铸造与合金，2010，30(12): 1127-1129.

[11] 籍君豪. 精铸硅溶胶型壳质量的控制 [J]. 特种铸造与合金，2008，28(9): 702-706.

[12] 吕志刚. 我国熔模精密铸造的历史回顾与发展展望 [J]. 铸造，2012，61(4): 347-356

[13] 段望春，高佳佳，董兵斌，等. 3D 打印技术在金属铸造领域的研究现状与展望[J]. 铸造技术，2018，39(12): 2895-2900.

[14] 傅骏，蔺虹宾，周棣华，等. 基于 3D 打印的艺术品模具快速熔模铸造实践[J]. 热加工工艺，2016 (13): 99-100.

[15] UPADHYAY M, SIVARUPAN T, MANSORI M E. 3D printing for rapid sand casting-A review [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 29: 211-220.

[16] 杨来侠，白祥，徐超，等. 基于 SLS 的诱导轮快速熔模铸造工艺研究[J]. 铸造，2019，68(10): 1121-1126

[17] 姜耀林，邵中魁. 3D 打印在快速熔模精密铸造技术中的应用[J]. 机电工程，2017，34(1): 48-51.

[18] 杨恩泉. 3D 打印技术对航空制造业发展的影响[J]. 航空科学技术，2013(1): 13-17.

[19] 陈光辉，崔爱红，崔国起. 变速箱壳体 3D 打印熔模铸造工艺分析[J]. 铸造，2017，66(9): 948-951.

[20] 郭璐，朱红. 陶瓷 3D 打印技术及材料的研究现状[J]. 陶瓷学报，2020，41(1): 22-28.

[21] 李涤尘，杨强，鲁中良，等. 一种基于 3D 打印技术的氧化钙基陶瓷铸型制造方法：中国专利：CN201710284229.6 [P]，2017-08-08.

[22] 董选普，黄乃瑜，吴树森，等. 复杂薄壁金属零件的快速制造技术[J]. 铸造，2001(6): 321-324.

[23] 蔡基利，吴和保，刘富初，等. 微滴喷射快速成形 Al_2O_3 陶瓷微球的性能[J]. 材料工程，2018，46(11): 84-89.

（上接第 924 页）

terials Characterization, 2015, 105(50): 47-55.

[25] LOMBARDI A, ELIA D F, RAVINDRAN C. et al. Interplay between residual stresses, microstructure, process variables and engine block casting integrity [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43: 5258-5270.

[26] YANG X W, ZHU J C, LAI Z H, et al. Finite element analysis of quenching temperature field, residual stress and distortion in A357 aluminum alloy large complicated thin-wall workpieces[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23 (6): 1751-1760.

[27] 李名扬，张朋朋，郑骥，等. 振动时效在大型铝合金薄壁环中的应用[J]. 金属热处理，2015，40(6): 145-148.

[28] LADOS D A, APELIAN D, WANG L. Minimization of residual stress in heat-treated Al-Si-Mg cast alloys using uphill quenching: mechanisms and effects on static and dynamic properties[J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 527(13): 3159-3165.

[29] 李敬民，李凤春，滕宇，等. 深冷处理在 ZL204 铝合金中的应用[J]. 金属热处理，2021，46(1): 80-83.