

焊接残余应力调控技术的研究与应用进展

岳巨洲

中车沈阳机车车辆有限公司 辽宁 沈阳 110000

摘要：焊接残余应力是焊接过程中不可避免的问题，其产生机理复杂，对产品性能有显著影响。本文综述了焊接残余应力的产生原因、对产品性能的具体影响，以及当前调控焊接残余应力的主要技术，包括优化焊缝结构设计、合理布置焊接顺序、随焊锤击调控、热时效调控和力学形变调控等。这些技术为降低焊接残余应力、提高产品性能提供了有效手段。通过合理的调控策略，可以显著提升焊接构件的加工精度、尺寸稳定性和疲劳寿命。

关键词：焊接残余应力；调控技术；应用进展

引言

焊接工艺在制造业中至关重要，是连接结构的核心技术。但焊接过程中产生的残余应力严重影响构件性能，削弱加工精度和尺寸稳定性，甚至导致变形、失稳、开裂，危及产品寿命和安全。因此深入研究和开发焊接残余应力调控技术，对于提升构件质量、稳定性和安全性具有重大意义，是保障制造业持续发展的关键。通过有效调控残余应力，可优化焊接工艺，确保产品性能，推动制造业高质量发展。

1 焊接残余应力及产生机理

在焊接过程中，焊接残余应力的产生与焊件内部复杂的物理变化密切相关，当焊件处于高温区时，其周围环境温度相对较低，这种温差环境会使高温区产生局部压缩塑性变形，这是因为高温材料在冷却收缩时，周围低温部分对其产生了约束^[1]。在焊接操作期间，这种因局部受压而引发的塑性变形具有重要影响。由于低温区对高温区收缩的限制，高温区无法自由收缩，进而在焊件内部产生一种特殊的应力——温度应力。此应力与焊件在受热过程中所产生的应力方向相反。值得注意的是，焊接接头在温度从高到低变化时，会经历二次转变。这一过程中，材料的组织会发生改变，这种微观层面的变化会在宏观上体现为焊接部位体积和应力的变化。焊件的刚性在焊接残余应力和变形的产生中扮演关键角色。当焊件为刚性时，它能有效限制焊缝的变形，但与此同时焊件内部的应力会增大。如果要减小焊接接头的残余应力，焊接接头的变形需要达到一定程度。无论是焊缝的应力还是变形，在许多情况下都会对焊件的质量产生影响。过高的应力可能导致焊件出现裂纹，而过度的变形则可能使焊件的尺寸精度不符合要求，从而影响焊件在后续使用中的性能和安全性。焊接速度、焊接电流、焊接电压等焊接工艺参数也对焊接残余应力有着显著影

响。不合理的焊接工艺参数可能加剧温度梯度和不均匀收缩，从而增大残余应力。不同的焊接方法，如手工电弧焊、气体保护焊、埋弧焊等，因其热输入特点不同，所产生的残余应力状况也有差异。在实际焊接生产中，需要综合考虑焊件材料、结构和焊接工艺来有效控制残余应力。

2 焊接残余应力对产品性能影响

2.1 残余应力导致构件加工精度和尺寸稳定性降低

在焊接部件从生产到投入使用的一系列过程中，包括吊装、加工、运输、储存及服务阶段，环境温度和外部载荷会打破焊接残余应力的平衡状态。这种平衡一旦被打破，残余应力就会逐渐衰减并随时间动态分布。而应力的这种变化会促使部件的形状和尺寸发生改变，进而对加工精度和尺寸稳定性产生不良影响。焊接件尺寸不稳定主要源于两个因素：一是蠕变和应力松弛现象。比如低碳钢焊接件在常温下放置2个月后，因材料的蠕变、应力松弛，残余应力会降低。二是内部的不稳定因素。在使用过程中，初始残余应力较低时，应力松弛作用相对较弱；但随着使用温度升高，蠕变程度加剧，应力下降的比率也随之增加。这一系列变化都表明焊接残余应力对构件加工精度和尺寸稳定性有着显著的影响，可能导致产品无法满足设计要求和标准。

2.2 残余应力导致构件变形失稳开裂

焊接残余应力的存在有着多方面的危害，它不仅对接头的组装精度和尺寸公差有影响，而且在结构的力学性能方面也有着直接作用。在承受静载荷、动载荷以及卸载后的变形恢复过程中，结构的性能都受到焊接残余应力的干扰。切向残余应力往往会引发结构的弯曲现象，严重时还会导致裂缝产生。而法向残余应力则会造成结构在厚度方向上的变形。可以说焊接残余应力的大小、方向以及分布情况共同决定了零件的破坏程度。在

实际使用中,当工作应力与残余应力共同作用时,若产生的塑性变形超出了构件的屈服强度,那么构件就会出现失稳现象,进而失去其应有的功能。在焊接件生产完成后,对其接头质量进行检测并合理调节应力是至关重要的环节。通过专业的检测手段,如无损检测技术等,可以准确评估接头质量和残余应力情况。然后采取相应的措施,如热处理、机械拉伸等方法来调整残余应力,确保其处于允许的范围内。这样可以有效避免应力集中,从而保障设备在后续使用过程中的安全性和可靠性,延长设备的使用寿命,减少因残余应力问题导致的安全事故和经济损失。

2.3 残余应力导致构件疲劳失效

在金属构件的使用过程中,残余应力与外部交变载荷叠加产生的影响不容忽视,当这两种应力共同作用时,在一定范围内会使金属构件不断积累塑性变形,这种塑性变形会促使应力集中区形成,进而改变原有的应力场分布^[2]。随着这种变化的持续,严重情况下会产生微裂纹。这些微裂纹就像隐藏在构件内部的“定时炸弹”,会极大地影响产品的疲劳寿命。因为在交变载荷的持续作用下,微裂纹会不断扩展,最终可能导致构件的断裂。值得庆幸的是,通过一系列有效的手段可以缓解这一问题。大量研究发现,焊后热处理、高频机械冲击、振动时效、喷丸强化等方法能够显著提高结构物的使用寿命。焊后热处理可以调整残余应力的分布,降低其峰值,使应力更加均匀;高频机械冲击能够在构件表面引入有益的压应力,抵消部分有害的残余拉应力,从而提高构件的抗疲劳性能。残余应力的不均匀分布是众多问题的源头,它对焊件的影响是多方面的。不仅会削弱焊件的承载力和稳定性,大幅缩短疲劳寿命,而且对制品的机械性能和使用安全也有着严重的负面影响。

3 焊接残余应力调控技术

3.1 优化焊缝结构设计

在焊接设计中,需围绕结构实用性这一核心展开,同时要以服务可靠性为前提,并受到技术和经济条件的约束。合理设计焊接接头意义重大,它既能保证结构具备足够的承载力,满足静载、动载以及复杂交变载荷等不同工况下的使用要求,又能有效缓解焊接应力集中问题,从而对结构失效方式加以控制,提升产品使用的可靠性。(1)焊接过程中不均匀应力的存在容易引发焊接缺陷。在节点焊接时,应着重减少塑性区的规模,并精准控制塑性区的分布与位置。从焊接工艺角度来看,要尽量减少焊接的数量和尺寸,严格把控内部应力源和加热区域。避免焊接点集中交叉排列,这样能使应力分布

更加均匀,防止应力在局部过度集中。降低结构受拉部位的连接数量,尤其要严禁在危险部位设置焊接,以此减少高应力区域的产生。采用低刚性连接方式也是一种有效的策略,它可以增强塑性形变的能力,促进应力的释放,避免应力在焊件内部过度积聚。(2)在设计过程中要充分考虑焊接区的可及性和使用便利性,这对于确保焊缝质量至关重要。只有保证焊缝质量良好,才能有效防止因焊缝部位应力集中而产生裂纹,从而提高焊件整体的质量和性能,延长其使用寿命,保障焊件在实际使用过程中的安全性和稳定性。

3.2 合理布置焊接顺序

焊接顺序直接关系到热源移动和材料冷却的先后次序,是控制焊接变形的核心要素。科学合理地安排焊接顺序,能够显著降低工件焊接后的残余应力,并使应力分布更加均匀合理,有效避免焊接后出现收缩、扭转、弯曲、变形等各类不良现象,进而大幅提高工件的使用性能和使用寿命。(1)在确定焊接顺序时,需遵循一系列原则。首先是先焊两端,后焊中间,这样可以有效控制焊接过程中的应力分布,减少因两端固定而产生的拘束应力。其次,先焊内侧,后焊外侧,有助于保证焊接结构的内部质量,避免外侧焊接对内侧已完成焊缝的影响。再者,先焊短焊缝,后焊长焊缝,能使焊接应力逐步释放,防止长焊缝一次性焊接产生过大的残余应力。先焊对接,后焊搭接或角接,有利于保证焊缝的连接强度和整体结构的稳定性。(2)对于不同类型的焊缝,也有相应的焊接顺序要求。焊接对接接头时,应按照先平对焊,再水平对焊,然后垂直对焊的顺序进行,确保焊缝质量和结构强度。焊接角焊缝时,则先进行垂直角焊,再进行平角焊,仰角焊转为平角焊,这样可以使角焊缝的应力分布更加均匀,减少变形。对于多层和多道焊缝,相邻层应交错进行,避免应力集中在同一位置,增强焊缝的整体性能。

3.3 随焊锤击调控

随焊锤击调控是一种在焊接过程中有效控制残余应力的方法。其原理是使用锤子对焊接区及其周边区域进行锤击操作。在这个过程中,焊缝金属得以扩展,这种扩展能够消除部分焊点在冷却收缩过程中产生的收缩应力,从而降低焊点的残余拉伸应力。第一,在焊接进行时,焊接处处于回复弹性状态,此时焊接材料呈现出较高的可塑性和韧性,这为锤击调控创造了有利条件,能够使锤击取得良好的效果。锤击的力度把控至关重要。如果锤击力量过大,可能会导致焊接表面产生裂纹,这种裂纹通常表现为一层薄片形式。适度的锤击能够显著

降低焊接过程中焊缝处以及热影响区的残余应力，并且可以使锤击表面一定深度范围内的剩余拉应力转变为压应力。这种应力状态的改变对于焊件的质量和性能有着积极的影响，能够增强焊件的抗疲劳性能和稳定性。第二，通过采用焊接或位移控制负载的方式，可以实现低应力焊接。在整个过程中，减少残余应力的关键在于确保焊件在冷却阶段能够充分地形成塑性变形。这是因为充分的塑性变形可以有效缓解因温度变化导致的收缩不一致问题，从而避免应力过度积聚，保障焊件的质量和结构完整性，提高焊件在实际使用中的可靠性和安全性，延长其使用寿命。

3.4 热时效调控

热老化控制作为焊接过程中的重要环节，主要包含焊前预热处理、焊后热处理以及火焰改性等方法。（1）在进行焊接操作前，对整个或部分对接焊件实施均匀的预热处理意义重大。这样做能够有效减缓焊接界面的温度梯度，而温度梯度是引发诸多焊接问题的关键因素。通过预热，可避免热裂纹的产生，因为过大的温度梯度会使焊件在冷却过程中产生不均匀收缩，从而导致裂纹。也能防止脆弱的马氏体形成，以及减少残余应力的积聚，为后续焊接提供良好的基础。（2）焊后热处理也是常用的调控手段之一，它对于大多数金属焊件的残余应力降低效果显著。不过其应用存在一定局限性，对于易过老化的沉淀硬化合金，可能会因热处理导致合金性能改变；对于热膨胀系数差异较大的异种焊接接头，易引发新的热应力问题；对于易产生热裂纹或应力释放裂纹的部件，热处理可能会加重这些缺陷，因此在这些情况下需谨慎使用焊后热处理来控制残余应力。

3.5 力学形变调控

热老化控制是焊接过程中不可或缺的重要环节，其中涵盖了焊前预热处理、焊后热处理以及火焰改性等多

种方法。第一，焊前对整个或部分对接焊件进行均匀预热处理，具有重要意义，焊接界面的温度梯度是引发诸多焊接问题的关键所在，而预热能够有效减缓这一梯度，过大的温度梯度会使焊件冷却时产生不均匀收缩，进而导致热裂纹，通过预热可避免此类问题，还能防止脆弱的马氏体形成，减少残余应力的积聚，为后续焊接创造良好条件^[1]。第二，焊后热处理作为常用的调控手段，对大多数金属焊件降低残余应力效果明显。其应用并非万能，存在一定局限性。对于易过老化的沉淀硬化合金，热处理可能改变合金性能；对于热膨胀系数差异较大的异种焊接接头，易引发新的热应力问题；对于易产生热裂纹或应力释放裂纹的部件，热处理可能加重缺陷。因此在这些特殊情况下，使用焊后热处理控制残余应力时必须谨慎权衡，根据具体焊件的特性和要求，选择合适的调控方法，以确保焊接质量和焊件性能。

结语

综上，焊接残余应力调控技术是提升焊接构件性能的关键。采用优化焊缝设计、合理焊接顺序、随焊锤击、热时效及力学形变等方法，可有效降低残余应力，提高构件精度、稳定性和疲劳寿命。展望未来，随着科技进步，更多高效、环保的调控技术将被研发，为制造业注入新动力，推动行业高质量发展，确保焊接构件性能卓越，满足多元化需求，为制造业繁荣贡献力量。

参考文献

- [1]郭政伟,龙伟民,王博,等.焊接残余应力调控技术的研究与应用进展[J].材料导报,2023,37(2):144-150.
- [2]程勇杰,王燕霜,林江海,等.表面残余应力影响因素和调控技术的研究进展[J].表面技术,2022,51(11):138-152.
- [3]王泽溪,郭逸轩.焊接残余应力检测与调控技术研究现状[J].现代制造技术与装备,2023,59(9):14-17.