

焊接残余应力产生机理及消除方法对比研究

林志虎

中国能源建设集团天津电力建设有限公司 天津 300180

摘要: 焊接残余应力对焊件质量与性能影响重大,深入研究其产生机理与消除方法十分必要。本文先阐述其产生机理,包括热应力、相变应力、组织应力及综合作用机制。接着介绍热处理法、机械拉伸法、振动法、爆炸法四种常见消除方法及原理。最后从消除效果、适用范围、成本与效率、对焊件性能影响四个方面进行对比研究,结果表明不同方法各有优劣,在实际焊接构件应力消除作业中,需依据焊件规格、应力控制标准等选取对应工艺。

关键词: 焊接;残余应力;产生机理;消除方法;对比

引言

在焊接领域,焊接残余应力是影响焊件质量与性能的关键因素,其产生机理复杂,涉及热应力、相变应力、组织应力及综合作用。为消除这些不利应力,衍生出热处理法、机械拉伸法、振动法、爆炸法等多种方法。然而,不同方法在消除效果、适用范围、成本与效率以及对焊件性能影响等方面存在差异。本文将深入剖析焊接残余应力的产生机理,详细介绍常见消除方法,并从多维度展开对比研究,为实际焊接作业提供科学选型依据。

1 焊接残余应力产生机理

(1) 热应力作用机制。焊接作业中,焊件局部受高温热源作用,整体形成不均匀的加热与冷却状态。焊件各区域受热、散热条件存在差异,热膨胀和冷收缩的变形量不一致,且焊件整体结构相互约束,进而产生热应力。加热阶段,焊件高温区域产生膨胀形变,受周边低温金属的限制,内部形成压应力。冷却阶段,前期高温区域发生收缩形变,同样受周边金属约束,内部形成拉应力。(2) 相变应力作用机制。合金钢等特种材料在焊接冷却过程中会发生金相相变,材料不同金相组织的比容存在固定差异,相变过程会伴随固定的体积形变。材料局部相变产生的体积形变受周边基体金属约束,无法自由释放,进而产生相变应力。相变产生的应力会与热应力叠加,直接改变焊件内部应力结构,让残余应力的分布状态更复杂。(3) 组织应力作用机制。焊接高温与冷却过程会使焊缝及热影响区金属发生组织转变,生成多种不同金相组织。各类金相组织的力学性能存在差异,在统一温度应力作用下,不同组织区域的形变程度各不相同,区域间的形变差异会催生组织应力。组织应力的数值与分布规律,主要由材料相变特性、焊接冷却速度决定,直接影响焊接残余应力的最终分布状态^[1]。(4) 综合作用机制。实际焊接工况下,热应力、相变应力、组

织应力不会单独存在,三类应力同步产生、相互制约、叠加作用。厚板焊接时的温度梯度、合金钢的组织相变等工况特点,会放大三类应力的耦合效果,导致焊件残余应力分布无固定规律,提升应力检测与调控的难度。

2 常见焊接残余应力消除方法

2.1 热处理法

热处理法消除焊接残余应力的核心原理为对焊件整体或局部加热至设定温度,恒温保温后缓慢冷却,促使焊件内部应力重新分布、逐步松弛,实现残余应力消除。焊件受热后材料屈服强度会出现下降,当内部残余应力数值超出材料屈服强度,焊件会产生塑性变形,完成应力释放。保温阶段可让焊件内部金属组织趋于均匀稳定,进一步消解残余应力。冷却阶段通过管控冷却速率,可规避新生焊接应力与结构应力。该方法分为整体热处理与局部热处理两类。整体热处理是将完整焊件置于热处理设备内,完成加热、保温、冷却全流程工序,适配体量小、结构形态规整的焊件。局部热处理仅针对焊件应力集中区域开展加热作业,可采用电阻加热、感应加热等工艺,主要用于大型焊件及不具备整体热处理条件的焊件加工场景。热处理法的应力消除效果稳定,可大幅降低焊件残余应力幅值,同步优化焊件力学性能与内部组织结构。该工艺的短板在于需配套专用热处理设备,工序处理周期长、能源消耗高。针对大尺寸、结构复杂的焊件,热处理过程易产生形变,生成新的内部应力,影响焊件成型精度与结构稳定性。

2.2 机械拉伸法

机械拉伸法消除焊接残余应力的核心,是向焊件施加反向拉伸荷载,借助材料塑性变形抵消、弱化内部残余应力。外力作用过程中,焊件原有残余应力会与外部拉伸应力相互叠加,构件局部应力数值超出材料屈服强度后,结构产生塑性形变,积存的残余应力随之释放。

外部荷载撤除后,焊件内部应力完成重新分配,整体残余应力数值显著下降,达到消应力处理的目的。该工艺的实施方式分为多种形式,可使用专用夹具完成焊件拉伸作业,也可依托液压设备提供稳定拉伸作用力。针对管状焊接构件,可采用内压膨胀的处理方式,通过介质加压使管壁产生扩张拉伸形变,实现残余应力消除。机械拉伸法工艺流程简单,配套设备结构简易,整体处理耗时短,可高效完成焊件残余应力消减工作^[2]。该工艺存在明确适用局限,仅可应用于结构规整、规格尺寸偏小的焊件,大型及结构复杂焊件无法有效施加均匀拉伸荷载。同时,拉伸作业过程中,焊件易出现局部形变,结构表面及内部也可能产生损伤缺陷。

2.3 振动法

振动法主要用于消除焊件残余应力,核心原理是借助振动设备向焊件施加交变载荷,让焊件产生持续振动。焊件振动过程中,其内部原本存在的残余应力会和外部施加的交变应力相互叠加作用。当叠加后的应力数值达到材料疲劳极限时,焊件内部局部区域会出现细微塑性变形,原本固化的残余应力会随之释放、衰减。通过反复的循环振动加载,焊件内部残余应力会持续松弛,逐步降低直至消除,以此完成焊件应力优化处理。振动法包含两种作业方式,分别为自由振动法和强制振动法。自由振动法的作业模式,是将焊件放置在弹性支撑结构上,通过外力敲击的方式让焊件自主产生振动。强制振动法需要依托专用振动设备,直接对焊件输出交变作用力,控制焊件按照固定频率与振幅完成定向振动作业。该处理方法整体设备配置简易,作业操作流程简单,投入成本较低,能够适配不同规格、不同形态的焊件加工。但该技术存在明显短板,残余应力消除效果有限。针对高残余应力的焊件,需要延长振动处理时长才能达标,且设备作业过程中会产生噪音污染。

2.4 爆炸法

爆炸法是工业中消除焊件残余应力的常规工艺。该工艺利用炸药爆炸产生的冲击波作用于焊件结构,炸药在焊件表面或内部起爆后,会产生高强度冲击波,促使焊件材料发生高速塑性变形。材料产生塑性变形的过程中,焊件内部固化的残余应力会得到释放并重新分布,达到消减焊件残余应力的目的。爆炸法的核心优势是作用时间短,冲击波可瞬时完成焊件应力调整,解决构件内部应力集中问题,整体处理效率和应力消除效果良好,多用于大型厚壁焊件的残余应力处理作业。工艺施工参数需依据焊件实际工况确定。施工前需核查焊件材质、外形、结构尺寸等基础条件,以此确定炸药类型、装药量及爆

炸作业位置。爆炸作业属于高危施工环节,施工全过程需落实安全管控标准,配备完整的安全防护措施,规避人员、设备及环境安全风险,保障施工合规开展^[3]。该工艺存在明显应用局限,作业风险等级高,操作人员必须持有专业资质,作业需配备专用设备。施工参数管控标准严格,装药量、爆炸点位、作业间距等参数出现偏差,均会对焊件本体结构造成损伤。

3 焊接残余应力消除方法对比研究

3.1 消除效果对比

不同焊接残余应力消除方法的应力消减效果存在明显差异,各方法的适配场景与消减比例具备固定区间。热处理法是现阶段残余应力消减效率较高的处理方式,对常规焊接构件的残余应力消减幅度可达80%至90%,是目前应力消除最为彻底的主流工艺。机械拉伸法的应力处理效果次之,该工艺可有效弱化焊件内部残余应力,整体应力消减幅度稳定在60%至80%,适用于多数常规焊件的应力调控作业。振动法的残余应力消除能力相对有限,应力消减区间为30%至60%,整体处理效果弱于前两种工艺。爆炸法的处理效果具备明显的构件尺寸适配性,工艺针对性较强。该方法应用于大型厚壁焊接构件时,残余应力消除效果突出,能够有效改善构件内部应力状态。但在小型焊件的应力处理工作中,爆炸法的应力消减能力受限,处理效果无法达到热处理法与机械拉伸法的工艺标准。实际焊接构件应力消除作业中,可依据焊件规格、应力控制标准选取对应工艺。

3.2 适用范围对比

不同焊接残余应力消除方法的适用场景存在明显区别,各方法的应用条件均有明确限定。热处理法的适配性较广,可应用于各类材质、不同结构形态的焊接构件,但该方法存在使用局限,大型、结构复杂的焊件处理时,对配套热处理设备规格与操作技术标准有着较高要求,常规工况难以落地应用。机械拉伸法的应用限制性较强,仅能用于外形规整、整体尺寸偏小的标准化焊件,无法适配异形、大体积及结构复杂的焊接构件。振动法的适配范围更广,不受焊件形状和尺寸的限制,可适配各类常规及特殊焊接结构,能够有效弥补热处理法的应用短板,可对无法开展热处理加工的大型焊接结构进行应力消除处理^[4]。爆炸法的应用针对性极强,仅适配大体积、厚壁结构的焊接构件,多用于工业重型焊接结构的残余应力消除,不适用于小型、薄壁及精细结构焊件,应用场景相对固定且单一。

3.3 成本与效率对比

不同的消除技术在设备投入、能耗消耗、处理时长

及整体使用成本上存在明显差异,实际应用效率各有优劣。热处理法是常规消应力手段,该技术的实施必须配套专用热处理设备,设备购置与运维投入较高,作业过程能耗消耗量大。同时,热处理整体处理流程耗时久,作业周期偏长,综合使用成本在各类方法中处于较高水平。机械拉伸法的配套设备结构简易,无需复杂辅助装置,人员操作流程简单,上手门槛低。该方法的工序流程精简,整体处理周期较短,作业效率稳定,设备投入、能耗及人工成本均处于较低区间,综合经济性优势显著。振动法所需设备造价低廉,设备组装与操作流程简便,作业环节无需高额能耗与人工投入,单批次工件处理耗时短,整体作业效率高,是低成本、高效率的消应力方式。爆炸法的应用条件较为特殊,作业过程中需使用爆炸耗材,同时要配置专用安全防护设备,设备与耗材投入成本偏高。该方法作业风险等级高,现场需落实全方位安全管控措施,规范的安全操作流程会占用大量作业时间,不仅进一步增加综合成本,还会直接制约整体处理效率,整体经济性与作业效率相对较高。

3.4 对焊件性能的影响对比

不同的焊接残余应力消除技术,对焊件综合性能产生的影响存在明显差异,各项工艺的性能影响特点具备较强的唯一性。热处理法是适用性较强的残余应力消除工艺,该工艺在清除焊件内部残余应力的基础上,能够优化焊件内部金相组织结构,调整焊件基础力学性能参数,有效提升焊件本体的韧性与塑性指标,稳定焊件整体使用性能,是兼顾应力消除与性能优化的处理方式。机械拉伸法的应力消除原理具备局限性,工艺实施后会在焊件表层留存部分拉应力,该残留应力会直接作用于焊件结构,改变焊件疲劳受力状态,降低焊件疲劳使用寿命,对焊

件长期服役的疲劳性能产生负面作用。振动法的工艺作用相对温和,处理过程不会对焊件组织结构和力学参数造成明显改变,对焊件原有各项性能的干扰程度极低,整体性能稳定性较好。爆炸法的工艺可控性较差,对操作流程、参数控制要求极高^[5]。工艺参数把控不到位的情况下,焊件表层极易生成细微裂纹类结构缺陷,这类缺陷会破坏焊件结构完整性,直接弱化焊件强度、韧性等核心力学性能,导致焊件整体服役性能下降。

结语

综上所述,热处理法、机械拉伸法、振动法和爆炸法在消除焊接残余应力上各有优劣。热处理法消除效果好且能优化性能,但成本高、周期长;机械拉伸法效率高、成本低,但适用范围窄且影响疲劳性能;振动法成本低、适用广,但消除效果有限;爆炸法对大型厚壁构件效果好,但危险系数高、成本大。实际作业中,需综合考量焊件规格、应力要求、成本预算等因素,合理选择合适方法,以实现高效、经济的残余应力消除。

参考文献:

- [1]王志华,李鹏程.焊接残余应力控制与消除方法研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(5):069-072.
- [2]刘冬飞,徐海龙,黄佳建.焊接结构残余应力产生原因及调控方法[J].广船科技,2025,45(1):67-69+75.
- [3]贾杰.焊接残余应力对压力容器稳定性影响的分析[J].冶金与材料,2025,45(4):136-138.
- [4]岳阳,王树明.高强异形厚板焊接残余应力分布及消除方法研究[J].交通科技,2025(3):33-35+50.
- [5]李洋.锻造过程中的残余应力控制与消除技术研究[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(5):135-138.