超声波振动锤击法消减焊接残余应力的应用

倪春华，叶俊豹
上海振华重工（集团）股份有限公司　上海　200123

摘要：主要介绍焊接残余应力和超声波振动锤击法消减焊接残余应力的原理及应用，并结合实际生产介绍超声波振动锤击法消减残余应力在厚板焊接中的作用。

关键词：超声波振动锤击法；焊接残余应力；厚板焊接

1　序言

我国是钢结构焊接生产大国，随着焊接技术的不断进步，对钢结构的焊接质量要求越来越严格，为此焊后对消除或降低焊接残余应力的工艺需求也同步提高。超声波振动锤击工艺是一种近年来新发展起来的焊后处理消应力技术，具有能耗低、效率高等特点。在大厚板的施焊中，因为构件刚性较大，所以在构件内部会产生很大的焊接残余应力。由于构件内部焊接残余应力的存在，随着时间及环境变化等因素的影响，会直接影响到结构件的静载、动载、疲劳和压曲强度，以及断裂柔韧性、尺寸稳定性及抗腐蚀能力等性能，所以钢结构制作过程中对消除或降低焊道残余应力的摸索就显得极其关键。本文以上海振华重工（集团）股份有限公司生产的新加坡龙门吊的厚板焊接为对象，研究超声波振动锤击法对厚板焊缝应力的影响，为后续生产

度板搅拌摩擦焊接头疲劳性能的研究[J].金属加工（热加工），2019（9）：8-10.
[3] TAN C，YANG J，ZHAO X，et al.Influence of Ni coating on interfacial reactions and mechanical properties in laser welding-brazing of Mg/Ti butted joint[J].Journal of Alloys and Compounds，2018，764：186-201.
[4] QIN G，LEI Z，SU Y，et al.Large spot laser assisted GMA brazing–fusion welding of aluminum alloy to galvanized steel[J].Journal of Materials Processing Technology，2014，214（11）：2684-2692.
[5] 雷振，秦国梁，林尚扬.激光与MIG/MAG复合热源焊接工艺发展概况[J].焊接，2005（9）：9-13.
[6] 吴志明，李金龙，彭章祝.轨道交通车体用铝合金材料及其焊接技术[J].金属加工（热加工），2021（2）：5-10.
[7] 韩晓辉，李帅贞，毛镇东，等.高速列车用6106-T6铝合金型材激光-电弧复合焊接工艺及接头性能[J].中国激光，2019，46（12）：86-94.
[8] 季卫东，陈辉.10mm厚6005A铝合金激光-MIG复合焊接[J].电焊机，2014，44（9）：128-132.
[9] 张林，冯曰海，刘思余，等.7A52厚板铝合金激光-MIG复合焊接组织与性能研究[J].热加工工艺，2019，48（3）：19-23.
[10] STEEN W M，EBOO M.Arc augmented laser welding[J].Metal Construction，1979，11（7）：332-333.
[11] 刘敬萱，沈健，李锡武，等.6005A-T5铝合金搅拌摩擦焊接头组织与疲劳性能[J].材料导报，2021，35（2）：2092-2097.
[12] 王磊，许雪宗，王克鸿，等.中厚板7A52铝合金光纤激光焊接接头组织与性能[J].焊接学报，2020，41（10）：28-31，37，98-99.
[13] 胥国祥，郭庆虎，胡庆贤，等.中厚板铝合金光纤激光+MIG复合热源焊残余应力的数值分析[J].机械工程学报，2018，54（2）：77-83.

MW 20210302

提供借鉴。

2 焊接裂纹

焊接裂纹是大厚板钢结构焊接件中最常见的一种严重缺陷，在其焊接残余应力、构件本身刚性较大以及其他影响因素的共同作用下，焊接接头局部应力集中地区的金属结合力遭到破坏，焊缝沿此产生开裂，并会在力的作用下不断延伸扩展，最终导致构件断裂失稳，产生严重的质量问题及事故。为此如何避免裂纹产生，一直是焊接作业的重点之一。

焊接裂纹的产生是由多方面因素引起的，根据出现的类型，可简单分为冷裂纹、热裂纹、再热裂纹，其中冷裂纹在焊接生产过程中较为常见。其产生的三大影响因素为：①金属的含氢量偏高。②焊缝接头产生淬硬组织。③焊接拘束应力（或应变）。本文主要对冷裂纹的产生因素进行探讨。

新加坡龙门吊主梁为箱体结构，部分区域结构属于厚板焊接，板材为A709-50-2，其化学成分和力学性能见表1。板材最厚处可达50mm，采用药芯焊丝CO_2气体保护焊打底，埋弧焊填充盖面，焊材化学成分和力学性能见表2。焊接过程中由于板材本身的刚性，以及拼装后箱形梁所受拘束度的影响，焊接接头区域会存在较大的残余应力，所以焊后容易存在冷裂纹隐患。48h无损检测后也验证了这一点，部分焊接接头出现裂纹缺陷。针对这种情况，对产生缺陷的焊缝进行焊接返修，并对后续焊接接头采用超声波振动锤击法对构件进行消应力处理，进一步降低裂纹的产生倾向。龙门吊厚板焊接施工现场如图1所示。

表1 龙门吊板材化学成分及力学性能

牌号	化学成分（质量分数，%）					力学性能/MPa		供货状态
	C	Mn	P	S	Si	屈服强度	抗拉强度	
A709-50-2	0.23	1.35	0.04	0.05	0.15~0.40	≥345	≥450	CR

表2 龙门吊焊材化学成分及力学性能

焊接方法	牌号	规格 ϕ/mm	化学成分（质量分数，%）					力学性能/MPa	
			C	Mn	P	S	Si	屈服强度	抗拉强度
FCAW	SQJ501L	1.4	0.050	1.35	0.017	0.006	0.29	≥390	490~670
SAW	CHW-S3/ CHF101	4.8	0.057	1.63	0.022	0.01	0.36	≥390	490~670

a）箱形结构　　b）焊缝布置

图1 龙门吊厚板焊接施工现场

3 焊接残余应力

3.1 焊接残余应力的概念

钢板焊接时焊道熔池会产生局部高温，致使构件上出现不均匀的温度场，焊缝熔池中心处温度最高可达1600℃以上，随着距离的加大，周边区域温度下降至室温。因此高温部分钢板与邻近低温钢板区域，因钢板Z向厚度本身的刚性会产生一定的约束力，从而在焊道区域存在较高的内应力，并在焊接操作过程中随着时间和温度的变化而不停地变化，这称为焊接应力。

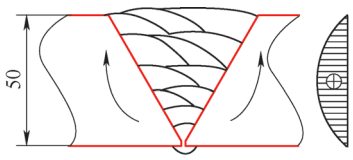
焊接应力较高的区域会超出钢材本身的屈服强度极限，从而出现塑性变形，这点在薄板焊接中较为常见。在厚板焊接中，由于钢材拘束力所造成的焊缝冷却过程中无法释放的应力，往往会残存在焊道区域，这种情况称为焊接残余应力。焊接残余应力随焊道的形态、方位、长度，以及焊接的工艺、先后次序、焊接速率等条件而显著不同。比较具有代表性的焊接残余应力为角焊缝焊脚处应力集中，最终导致产生的焊缝开裂现象。另外，焊件在高温下不仅发生塑性和热塑性，而且钢材在高温下的屈服强度和变形模量等都随温度升高而显著降低或变化[1, 2]。因而，显得对于残余应力的高精度计算难

度较大，当下对各类典型构件的残余应力常用试验方式进行测定。

在钢板厚度较小处，采用焊接形式连接的钢结构中，焊道的残余应力基本上都是两个方向的，即纵向及横向的残余应力，而在厚度方位的温度比较均匀，焊接残余应力相对较小。只在较大厚度的焊接钢结构中，板厚方位的残余应力才能达到较大的数值。

3.2 厚板中沿板厚方向的焊接残余应力

厚板施焊是需采用多层多道焊的，在焊道厚度方向将产生焊接残余应力，并且焊道表面与中间的温度分布不均匀，也会产生残余应力，其分布位置及方向与焊接参数密切相关。因此在厚板焊道区域的双向（纵向和横向）焊接残余应力，沿焊道厚度方向也是变化的，50mm厚板V形坡口多层焊沿厚度上的残余应力分布如图2所示。一般情况下，当焊道厚度在25mm以下时，基本上可以把焊接残余应力看成是平行双向的，可以不将厚度方位及沿厚度方位平面应力的大小变化作为参考。厚度方位垂直残余应力若与平面双向残余应力较接近时，很容易使此区域材料变脆。



a）厚度方向残余应力分布

b）纵向残余应力分布　　c）横向残余应力分布

图2 50mm厚板V形坡口多层焊沿厚度上的残余应力分布

4 超声波振动锤击法

4.1 超声波振动锤击法的原理

超声波振动锤击处理技术的实现，是由超声波发生器、超声波换能器、变幅杆和手持式冲击头来组成的超声波振动锤击设备来完成的。超声波振动锤击设备原理如图3所示。

由图3可知，设备接通电源经过超声波换能器转化为动能，传递到变幅杆产生高频率振荡推动冲击头，在熔合线区域以20kHz/s以上的频率锤击焊道，

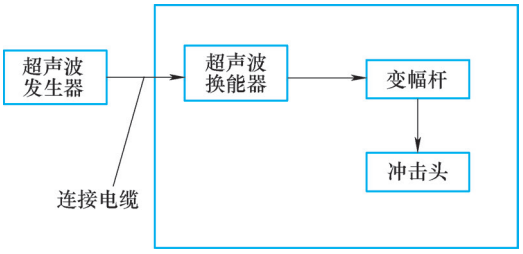


图3 超声波振动锤击设备原理

使锤击范围表面产生特定深度的塑性变形，以此有效地改变熔合线的表层形态，使其平顺过渡，减少焊缝的应力集中数值，使得焊道附近特定区域的母材得到改善，重新调整了焊接残余应力场[3]。振动锤击在应力集中区域表面产生压应力，将有效地改善、均匀化和消除焊接残余应力，从而改善焊缝的疲劳强度。

超声波振动锤击具有对熔合线焊脚区域一定深度的表层进行消除或降低应力的作用，如果采用对焊道进行全覆盖锤击时，被锤击的表面会形成更大数值的压应力，这样对残余应力的消除会起到更好的效果。此外，采用熔合线区域锤击消除应力；可以有效地改善该区域的熔合瑕疵及减少应力集中；可使焊接接头疲劳强度提高50%~120%，疲劳寿命延长5~100倍，并且可使金属在腐蚀环境下的抗腐蚀能力提高约400%。

4.2 超声波振动锤击法的特点

超声波振动锤击消除残余应力的特点是将冲击头锤击加速度控制在2×10^5m/s以上，作用时间一般为10^{-5}~10^{-6}s，过程中在焊缝锤击区域表面的温度会急剧上升及冷却，并在交变冷热循环及外应力撞击的作用下，使得锤击区域浅表层约0.1mm形成白化层，在表面1~1.5mm区域为主要塑性变形层，可消除焊脚处表层的微小裂纹和熔渣缺陷，起到阻止裂纹萌生的作用。

4.3 超声波振动锤击法的操作工艺

超声波振动锤击应在焊缝变形矫正、外观检测及无损检测合格后，且在焊缝外形修补、检测合格后进行。工艺流程为焊接→外观检查和无损检测→清除焊脚熔渣、飞溅→打磨后上色→实施超声波锤击处理→锤击检查。

锤击操作者应通过专业培训，熟悉超声波锤击设备的使用原理，严格按照《产品使用说明书》进行作业。在进行振动锤击前应清理锤击区域的焊

渣、飞溅、油污等杂物，锤击区域需保持干燥状态。清理后在锤击范围内的表面涂抹颜色，涂抹范围为焊缝及两侧焊脚外沿10mm宽的母材热影响区。超声波振动锤击时，采用近似于锤体自重产生的力度，且锤击范围匀称地覆盖熔合线及规定的振动锤击部位，锤击表面不得出现褶皱重叠和细小裂纹的缺陷。超声波振动锤击完成后，不得对被锤击区域进行补焊、打磨等干扰锤击效果的任何处理。

超声波锤击区域应为焊缝两侧焊脚区域，对于对接焊缝，可以是焊缝两侧焊脚区域以及焊缝区域（见图4）。

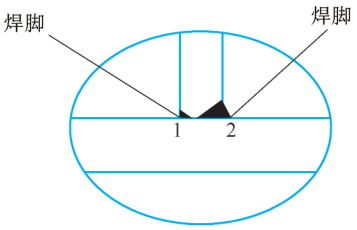
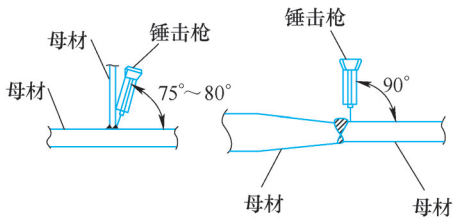


图4　角焊缝锤击区域

注：1、2为焊接顺序。

关于锤击枪锤头的使用以及锤头角度的要求：对接接头和T形接头均使用扁平锤头。根据锤击部位不同，针对对接接头锤头与母材焊道夹角约为90°，将锤头对准熔合线；针对T形接头锤头与水平板面夹角为75°~80°，将锤头对准焊道间内凹沟槽线（见图5）。



a）T形接头　　b）对接接头

图5　锤击角度

超声波振动锤击法在使用过程中，锤头应沿着熔合线或焊缝移动，最佳移动速率控制在0.5m/min左右，匀速进行，每段往复处理4遍。然后根据图样要求将对接焊道余高修磨至与母材平顺过渡，T形接头焊道光滑过渡，锤击时电流控制在1.5~2A。针对角接焊缝，应锤击焊脚位置，锤击时电流控制在1.5~2A。

在新加坡龙门吊项目上，考虑到厚板焊接存在焊接残余应力，为此在厚板拼板焊接的制作过程中进行了超声波锤击消除应力处理，效果尤为显著。与以往项目的厚板焊接对比，大大减少了冷裂纹的产生，避免了厚板焊接出现的大量返修工作，提高了生产效率，对项目的按期交付起到了一定的作用，如图6所示。

图6　超声波振动锤击法消应力现场应用

5　超声波振动锤击法消除残余应力的优势

由于超声波振动锤击法能同时对焊接残余应力、表面微观裂纹和瑕疵、熔合线的几何形态及表面强化起到优化作用，因此能有效提高焊缝的疲劳性能，有事半功倍的效果。消除应力设备外形尺寸小，基本不占用施工场地，不受构件的材料性能、轻重及形态的限制，使用起来比较方便。并且，该处理方法环保、节能、安全、无污染。

6　结束语

本文主要介绍了超声波振动锤击法消除应力处理的方法，以及振动锤击法在生产过程中的应用案例。目前，在港口机械生产制造过程中，大厚板焊接是比较普遍的现状，超声波振动锤击法不失为一种有效消除焊接残余应力的手段。无论是从经济性，还是从环保性来说，超声波振动锤击法都有其独特的优势。虽然该处理方法还尚未广泛应用到实际生产中，但是其显著的效果也是不可否认的，具体还需要在试验和操作中去发现和掌握。

参考文献：

[1] 宋佩辉，李兆辉.大吨位叉车门架立柱的焊接应力和焊接变形的研究与应用[J].金属加工（热加工），2005（11）：59-60.

[2] 王者昌.关于焊接应力应变问题的再探讨[J].焊接学报，2006（8）：108-112，118.

[3] 王东坡，周达.超声冲击法提高焊接接头疲劳强度的机理分析[J].天津大学学报，2007（5）：623-628.

MW 20210302