

随焊加载冷源或位移控制载荷的无应力焊接方法

管建军¹, 杨男¹, 钟宏远¹, 陈怀宁², 陈静², 石晓爱³

(1. 辽宁石油化工大学, 抚顺, 113001; 2. 中国科学院金属研究所, 中科院核用材料与安全评价重点实验室, 沈阳, 110016;
3. 中国石油天然气第八建设有限公司, 抚顺, 113006)

摘要: 应用一维杆模型论证了随焊加载冷源或位移控制载荷实现无应力焊接的原理. 应用数值模拟探讨了其实现方式, 对 7 种加载方案下杆件中心点应力、塑性应变等物理量的时程分布进行了数值模拟对比研究, 认为任意时刻外加位移控制载荷产生的机械应变和热输入满足一定条件时焊后残余应力为零. 随焊降低残余应力的工艺在焊件局部区域产生的变形速率与该局部区域的热膨胀或收缩变形量速率大小相同时, 降低残余应力的效果达到最优. 应用模型导出的原理对焊前预拉伸、焊前温差拉伸、动态温差拉伸、低应力无变形焊接 (LSND) 等工艺的原理和参数设置依据进行了讨论. 结果表明, 使焊件内部在冷却时产生足够大的拉伸塑性应变, 是降低焊接残余应力的有效途径.

关键词: 焊接结构; 残余应力; 随焊加载冷源; 位移控制载荷; 无应力焊接

中图分类号: TG 404 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20190829002

0 序言

为了控制焊接结构的应力, 焊接工作者提出了很多卓有成效的解决方案. 根据所施加工艺措施与焊接工艺相对先后顺序, 可划分为焊前、焊中和焊后三种处理方式三种模式. 焊前措施有预热、沿焊缝长度方向预拉伸^[1]、双向预置应力^[2]、温差拉伸^[3]、反变形等. 焊后措施可划分为三类^[4]: 蠕变形变法, 即焊后热处理; 力学形变法, 如过载拉伸、振动时效、锤击、爆炸处理; 温差形变法, 如低温拉伸、逆焊接温差处理^[5]等. 而目前研究较多的是焊中措施, 包括随焊碾压^[6]、随焊锤击^[7]、LSND^[8]、随焊旋转挤压^[9]等. 这些工艺措施都能有效的降低焊接残余应力, 焊接工作者对以上降低焊接应力的工艺作用机理进行了总结并做出了合理解释.

焊接残余应力跟焊接过程中产生的塑性变形有关, 文中设想如果创造条件减小焊接加热过程和冷却过程产生塑性变形, 则有可能降低焊接残余应力. 通过分析简单一维杆结构在中间加热到熔点以上温度时不同拘束状态下应力应变的时程分布, 提出了几种在一维杆上实现低焊接热应力、低焊接残余应力的工艺方法, 并探讨其工艺原理. 需要指出

的是, 出于降低理论推导和数值模拟难度的需要, 文中所称一维杆上的焊接不是将两个杆件焊在一起, 而是将一个杆件在中间重熔后再凝固. 另外, 为便于理解, 首先按材料本构方程与温度无关进行数学推导, 得到相应的解析表达式, 然后再考虑与温度相关的情况, 应用数值模拟手段针对提出的低应力方法进行研究及讨论.

1 理论研究模型

如图 1 所示一个左右两端受弹簧约束的长度为 L 的杆, 当杆内任意位置相对初始时刻产生温度变化 ΔT (为位置 l 的函数), 两侧初始内力为零的弹簧分别产生 Δx_1 和 Δx_2 的弹性变形, 当杆的变形也处于弹性状态时, 则根据力的平衡条件有

$$-K_1 \Delta x_1 = A\sigma = AE\varepsilon = -K_2 \Delta x_2 \quad (1)$$

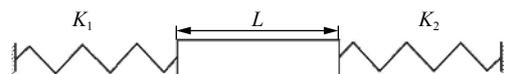


图 1 两端受弹簧约束的杆

Fig. 1 Model of spring-bound rod at both ends

当杆内存在热应变时, 其杆内应变 ε 表达式为

$$\varepsilon = \frac{L' - L_\alpha}{L} = \frac{(L + \Delta x_1 + \Delta x_2) - \left(\int_0^L (1 + \alpha \Delta T(l)) dl \right)}{L} \quad (2)$$

式中: K_1, K_2 为弹簧的刚度系数; A 为杆的横截面积; σ 为应力; E 为弹性模量; ε 为应变 (相对于初始长度 L); α 为热膨胀系数; L' 为当前杆的长度; L_a 为自由热膨胀时杆的长度. 由式 (1), 式 (2) 得到杆内应变为

$$\varepsilon = -\frac{\int_0^L \alpha \Delta T dl}{AE(1/K_1+1/K_2)+L} \quad (3)$$

式 (3) 表明只要杆的两端弹簧的刚度非常小, 变形主要集中在弹簧上, 杆中产生的应变就可以忽略不计. 焊接时降低杆件的拘束是降低杆内应力、应变的有效方法.

如果杆的两边弹簧刚度均无限大, 相当于杆的两端刚性固定, 则由式 (3), 杆内的应变为

$$\varepsilon = -\frac{1}{L} \int_0^L \alpha \Delta T dl \quad (4)$$

式 (1) 和式 (2) 在任意温度下均成立, 为书写方便, 假设物性参数不随温度变化, 但屈服强度随温度变化. 对于两端刚性固定一维杆, 从式 (4) 可以得到如下推论.

(1) 焊接时只有局部区域温度迅速上升, 假设该区域长度为 L'' , 温升均匀为 ΔT , 则

$$\varepsilon = -\alpha \Delta T \frac{L''}{L} \quad (5)$$

当

$$\frac{\alpha \Delta T L''}{L} \leq \frac{R_{eL}}{E} \quad (6)$$

式中: R_{eL} 为屈服强度. 加热时杆内压应变不会超过屈服应变, 杆内不会发生压缩塑性变形. 冷却时也不会发生拉伸塑性变形, 实现弹性卸载, 最终杆内无残余应力产生.

(2) 不考虑相变潜热时, 焊接热输入仅使杆件温度改变, 则有

$$c\rho A \int_0^L \Delta T dl = \int_0^{t_h} P dt \quad (7)$$

式中: P 为热源功率; t_h 为热源作用时间; c 为比热; ρ 为密度.

结合式 (4), 在弹性变形阶段, 等截面杆的均匀应变仅与总热输入的大小有关, 即

$$\varepsilon = -\alpha \int_0^{t_h} P dt / c\rho AL \quad (8)$$

(3) 由式 (8) 可知, 若在杆件局部长度上施加热源, 其它位置同时施加低温冷源, 若在任意时刻两者热输入的代数和为 0, 即两者总功率相同, 杆内应变为 0. 则只要热输入能实现局部熔化, 即可实现无应力焊接.

若任意时刻热输入满足

$$\left| \int_0^{t_h} P dt \right| \leq \frac{c\rho AL R_{eL}}{\alpha E} \quad (9)$$

则不会发生塑性变形. 若同时存在热源和冷源, 当热源和冷源的总热输入的代数和绝对值满足式 (9), 则应用式 (8) 计算的热源产生的压应变 ε_- 和冷源产生的拉应变 ε_+ 满足

$$|\varepsilon_- + \varepsilon_+| \leq R_{eL}/E \quad (10)$$

任意时刻不会发生塑性变形, 且两者同时卸载后, 当存在对外散热 (在施加热源的区域当卸载热源后对外散热相当于施加了一个功率逐渐减少的冷源, 而在施加冷源的区域, 冷源卸载后, 对外散热相当于施加了一个功率逐渐减少的热源) 时, 最终的内应力为 0.

(4) 热源和冷源也可不同时施加. 可在施加热源之前施加冷源, 为不发生塑性变形, 冷源热输入绝对值应满足式 (9). 当冷源热输入绝对值较大时, 冷源作用区域杆件温度降幅会很大. 为降低杆件温度降幅, 防止温度过低材料变脆, 可以通过延长冷源作用时间或增加冷源作用区域长度来实现, 同时也意味着可以采用低功率冷源.

(5) 焊前预热杆件, 然后两端固定. 当完全冷却后再施加热源, 则可达到在施加热源之前施加冷源同样的效果.

(6) 当固定杆件一端, 另一端施加拉伸载荷, 拉伸载荷产生的应变相当于冷源产生的应变, 当其与施加热源产生的应变时时相同, 则也可实现无应力焊接. 拉伸载荷和冷源也可同时作用来降低两者的幅值. 若焊前杆件有 ε_+ 大小的拉应变, 同时作用有热输入为 p_-t_- 的冷源时, 根据式 (9), 当焊接热输入满足

$$\left| p_+t_+ - \frac{c\rho AL}{\alpha} \varepsilon_+ + p_-t_- \right| \leq \frac{c\rho AL R_{eL}}{\alpha E} \quad (11)$$

不会产生塑性变形. 等号成立时, 杆内瞬时应力为 0. 式中 p_+, p_-, t_+, t_- 分别为热源和冷源的功率和作用时间.

(7) 若杆件两端非刚性固定, 且可用弹簧等

效约束, 则上述结论中用 $L' = AE(1/K_1 + 1/K_2) + L$ 代替 L .

以上推论, 均利用有限元建模得到了证实, 限于篇幅, 验证从略. 从上述讨论得知, 当杆件的屈服强度不随温度变化时, 为避免焊接时产生屈服, 焊接加热时的热输入存在极限. 当焊前杆件内存在拉应变或应用冷源产生拉伸效应时, 热输入可以采用较大的值.

当杆件上某处温度超过力学熔点温度时, 屈服强度可忽略不计, 不妨设为 0. 根据式 (11), 拉伸载荷产生的应变应满足

$$\varepsilon_+ = \frac{\alpha}{\rho c A L} (P_+ t_+ + P_- t_-) \quad (12)$$

杆件不会产生塑性变形, 卸载后无残余应力. 式 (12) 的增量形式表达式为

$$\frac{d\varepsilon_+}{dt} = \frac{\alpha}{\rho c A L} (P_+ + P_-) \quad (13)$$

拉伸载荷产生的应变满足公式 (12) 时一定满足公式 (11). 由于材料温度变化时屈服强度也同步变化, 拉伸载荷任意时刻均满足公式 (12) 时, 焊接内应力为零, 焊接残余应力为零. 公式 (13)

意味着当加热过程和冷却过程中外加位移 (应变) 载荷在整个杆中产生的应变增量与作用到杆件上的热输入增量呈比例变化时可以实现无应力焊接. 实际焊接时, 加热过程的应变增量可以严格控制, 而冷却过程中杆件散热量不随时间线性变化, 可以用预估的冷却时间来均匀卸载外加位移载荷, 最终杆件内的应力会远低于正常焊接应力.

2 数值模拟试验

对于图 2 所示的杆件, 长度为 200 mm, 截面积 25 mm^2 , 左端固定. 所采用的材料为 20 钢, 热物性能参数见表 1 和图 3. 常温下其屈服应变为 0.115%. 杆件中间在 0.5 s 内施加宽度为 4 mm、总热输入为 1 200 J 体热流载荷, 然后热源卸载.

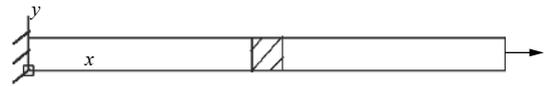


图 2 杆件加热及加载模型
Fig. 2 Heating and loading model of bar

表 1 材料的热物性能参数

Table 1 Thermophysical parameters of material

弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	热膨胀系数 $\alpha(10^{-5})$	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	导热系数 $\lambda/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	比热 $c/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	对流换热系数 $H/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1})$
211	0.3	1.2	7 870	37.8	440	5

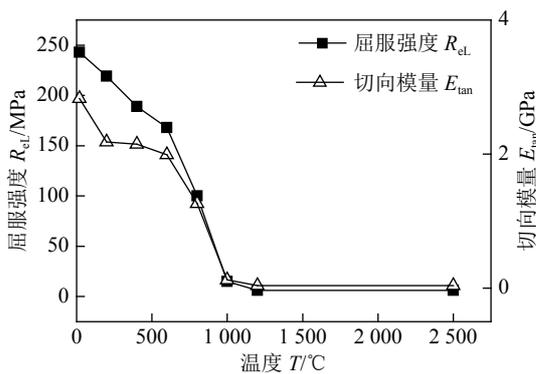


图 3 材料的屈服强度和切向模量

Fig. 3 Yield strength and tangent modulus of material

采用以下 7 种方案进行数值模拟对比研究: ①右端固定, 即正常焊接; ②右端施加位移控制拉伸载荷, 加热前一次性加载使得整个杆件产生 0.1% 拉伸弹性应变, 热源撤除后应变随冷却时间成比例递减卸载; ③前述同等大小载荷在加热载荷作用时间内与输入热量成比例线性递增加载, 热源

撤除后按冷却时间成比例递减卸载; ④右端固定, 拉伸载荷为零, 在加热区域外同步施加总热输入与其大小相同即 -1 200 J 的均布体冷源载荷, 与加热热源同步卸载; ⑤冷源载荷、拉伸载荷与热源载荷同步施加, 冷源总输入量为 -400 J, 最大拉伸位移量为杆长的 0.055 4%; ⑥加载热源时右端固定, 卸载热源后右端施加按冷却时间线性增加位移控制“压缩”载荷, 即杆件右端向左移动, 最大位移量为初始杆长的 0.083 2%; ⑦加载热源时右端固定, 卸载热源后, 在热源作用区域外加载总热输入为 -1 200 J 均布体热源载荷, 冷源作用时间为 0.7 s. 方案②和方案③中最大拉伸应变变量 (0.1%) 满足公式 (11) (代入 20 °C 屈服强度), 方案⑤和方案⑥中最大拉伸应变变量均按公式 (12) 计算, 其中方案⑥对加热过程未施加外加载荷, 视冷却过程中杆件对外对流换热等效为施加一个总热输入为 -1 200 J 的冷源.

方案③用于验证公式 (13), 方案④用于验证推

论(3), 方案⑤用于验证公式(11). 方案②是结合推论(4)和推论(6)提出的, 用于验证推论(4). 方案⑥用于验证冷却过程产生的收缩得到补偿后杆内无残余应力的设想. 方案⑦则提出应用外加载荷使高温区金属冷却时产生拉伸塑性应变来抵消冷却收缩应变, 从而降低残余应力的设想.

应用商用有限元分析软件 Ansys 建立相应的数值模型, 计算结果表明, 上述方案中不施加冷源时杆件中心点的温度最大达到了 1 563.72 °C, 施加同等大小冷源时中心点最高温度为 1 558.44 °C, 均超过了材料熔点. 所加热源可以实现杆件局部区域的熔化.

图4为不同边界方案下杆件中心点应力时程曲线图. 各方案的焊接残余应力依次为 163.1, -44.2, -35.2, -0.04, -1.8, -12.5, 27.3 MPa. 从 1 s 内的时程图可以看到, 0.5 s (即热源作用时间) 以内, 方案①、方案⑥和方案⑦的时程曲线完全一致, 存在较大的压应力. 方案②即焊接前一次性加载拉伸载荷时杆件内存在较大拉应力, 随着热输入的增加而降低, 但在 0.3 s 后随着杆件中间部位温度升

高到 1 000 °C 以上时由于屈服强度的降低而迅速降低. 比较方案②和方案③可知, 在焊接过程同步施加与热输入增量成比例的外加载荷时杆内应力更低. 方案③中初始时刻拉应力较低, 但随着温度升高, 拉应力增加, 说明随着屈服强度的降低, 所施加外加载荷已不再满足公式(11). 由于产生了拉伸塑性应变, 因此在施加反向等量位移控制载荷时, 杆内存在压应力. 方案④中由于冷源作用区域大, 该区域对外吸热量大于热源作用区域的对外散热量, 使得实际瞬时总热输入不为零, 应力全程表现为压应力, 最大压应力为 -3.04 MPa. 但施加冷源区域温度最低为 -51.15 °C. 方案⑤在 0.5 s 前 (即施加热源时) 为压应力, 最大压应力为 -0.29 MPa, 0.5 s (热源撤除) 后逐渐转变为拉应力, 最大为 50.41 MPa, 最后降低为 -1.77 MPa. 方案⑥表明热源作用过程中不施加额外措施, 热源撤除后若能施加与热收缩应变等量的压缩应变也可实现焊后低残余应力. 由于不能准确的预估杆件散热量随时间的变化关系, 方案②、方案③、方案⑤和方案⑥前期拉伸载荷卸量过小导致杆件内存在较大的拉应力.

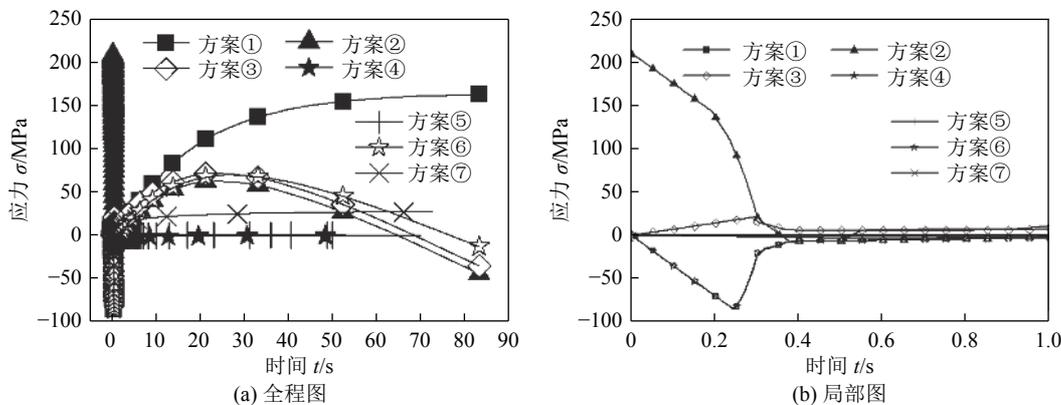


图4 不同边界方案下杆件中心点应力时程曲线图

Fig. 4 Stress-time-history curves at the center point of bar under different boundaries. (a) full time-history curves; (b) local time-history curves

方案⑦并不是基于前述式(11)~式(13)提出的. 文献[10]认为“设法使焊缝产生拉伸塑性变形以抵消、补偿已产生的压缩塑性变形”是一部分消除焊接残余应力工艺的原理. 方案⑦设想利用金属在高温条件下屈服强度低的特点, 应用冷源在杆件内部产生拉伸应变, 使高温区产生与压缩塑性变形相当的拉伸塑性变形, 则能大幅降低焊接残余应力. 方案⑦基本达到了这一目标, 由于未计入热源和冷源在其作用过程中对外散热的影响, 残余应力

稍高一些. 为达到更理想的消除应力效果, 对冷源的作用时机有细致的要求.

图5为不同边界方案下杆件中心点塑性应变时程曲线. 各方案下的残余塑性应变依次为 -5.33%, 3.89%, 1.04%, 0%, 0%, -5.33%, -1.75%. 由于边界条件完全相同, 方案①、方案⑥和方案⑦在热源作用的 0.5 s 内是完全相同的. 由于方案⑥外加载荷不产生塑性应变, 因此最终方案①、方案⑥塑性应变全程相同. 方案⑦中则在 0.859 5 s 后塑性应

变幅值降低, 方案②在杆件中心点升至较高温度时由于屈服强度降低导致形成很大的拉伸塑性应变. 方案③则由于加载拉伸位移 (应变) 较大而产生了拉伸塑性应变, 方案④、方案⑤则在全程未产生塑性应变. 方案③、方案⑤表明依据公式 (13) 制定的加载载荷更为理想, 方案③、方案⑥表明加热过程中产生的压缩塑性应变并不是焊接残余应力产生

的根本原因, 焊后冷却过程中自由热收缩应变未完全得到完全补偿才是根本原因. 随焊消除焊接残余应力的工艺可以着眼于如何产生与冷却散热导致的冷却收缩变形量相对应的“回缩”变形量. 方案⑦中残余塑性应变约为方案①的 32.8%, 而其残余拉应力约为方案①的 16.7%, 残余应力的下降幅度更大一些, 其中的原因需要进一步研究.

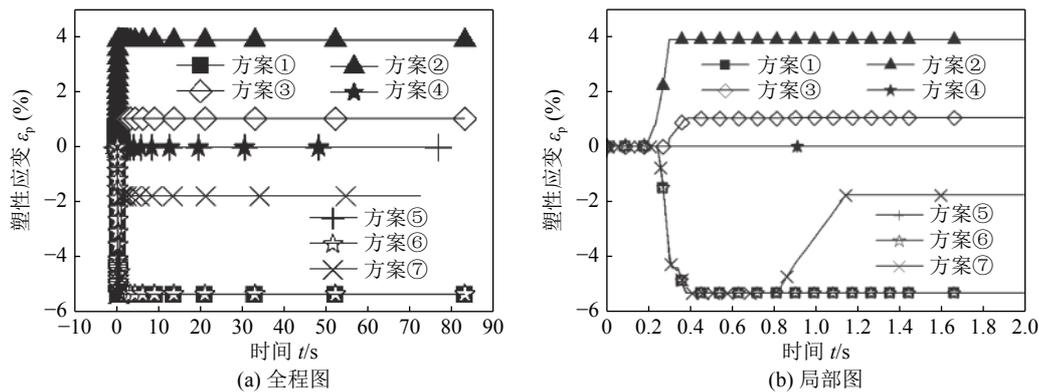


图 5 不同边界方案下杆件中心点塑性应变时程曲线图

Fig. 5 Plastic strain-time-history curves at the center point of bar under different boundaries. (a) full time-history curves; (b) local time-history curves

3 讨论

应用理论分析和数值模拟验证了如下推断: 如果焊接升温过程中整个焊件内部的随焊加载拉伸弹性变形量与受热部位自由热膨胀变形量相当, 自由热膨胀没有受到阻碍, 冷却过程中拉伸弹性变形量伴随自由热收缩变形量而同等幅度的减小, 则杆件内部会实现完全的无应力焊接.

随焊加载拉伸弹性变形量可以采用机械拉伸 (位移控制) 的方法来实现, 也可应用冷源对杆件降温或者同时组合应用这两种方法或其它方法 (如磁致伸缩) 来实现.

Zhou, Zhang 等人^[1, 11]报道了预拉伸对焊缝残余应力和变形的影响. 预拉伸实际上即为文中的方案②, 为了追求较低的焊接应力, 方案②在热源撤除后, 拉伸载荷随着热量的散失逐渐降低. 需要指出的是, 文中认为拉伸载荷应由公式 (12) 中的物性参数、焊件尺寸及总热输入来决定, 而不应依据材料常温屈服应力或应变来决定.

温差拉伸由于不需要机械拉伸装置而显得比机械拉伸适应性好, 易于实施. 其通过加热焊缝全长两侧区域, 在焊件上预置一马鞍形温度场, 使焊缝区承受预拉伸^[12-14]. 温差拉伸主要依靠焊件本身

自拘束来获得足够的拉伸应变. 在预置温差拉伸的基础上已发展出动态温差拉伸^[15-17], 在动态温差拉伸中两侧的加热热源既可超前焊枪, 也可与焊枪平行, 或者跟随在焊枪之后. 前者可以降低焊缝加热时热膨胀受到的阻碍, 后者可以增加焊缝冷却时热收缩的阻碍. 两侧加热热源的功率则根据研究者的经验进行选取, 需要研究两侧加热火炬的功率与焊枪功率的对应关系.

LSND 工艺实际上是在动态温差拉伸的基础上, 通过加大熔池周围力学熔点等温线以外区域的冷却速度使得力学熔点等温线以内区域产生更大的拉伸塑性应变来实现降低焊接残余应力的目的. 方案⑦在原理上与之类似. 文中的研究过程中发现, 外部激冷不能在温度处于 1 000 °C 以上区域进行, 当高温区金属温度下降到 1 000 °C 以下时, 外部激冷所起作用有限, 其原因还需进一步的研究.

4 结论

(1) 随焊加载冷源或位移控制载荷可以实现无应力焊接, 所施加载荷的大小应由材料的物理性能参数、焊件尺寸及总热输入来决定.

(2) 随焊加载的冷源或位移控制载荷可以和热源不同步施加,但同步施加的效果要好。同步施加时位移控制载荷的变化速度与工件内部的热量变化速度成正比。

(3) 无需采取措施消除加热过程中杆件所受的压缩塑性应变,只要冷却过程中任意时刻外加位移控制载荷产生的“回缩”变形量(相对于温度最高时的杆件几何位置)与冷却过程中因热散失导致的热收缩变形量大小相同时,杆件残余应力为零。

(4) 当杆件高温部位在冷却时产生足够大的拉伸塑性应变,能有效降低焊接残余压缩应变,从而降低焊接残余应力。

参考文献

- [1] Zhou G T, Liu X S, Jin C, *et al.* Welding deformation controlling of aluminium-alloy thin plate by two-direction pre-stress method[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2009, 499(1-2): 147 - 152.
- [2] 赵耀邦. 双向预置应力控制焊接变形及防止热裂纹研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [3] Ilman M N, Kusmono, Muslih M R, *et al.* Mitigating distortion and residual stress by static thermal tensioning to improve fatigue crack growth performance of MIG AA5083 welds[J]. *Materials & Design*, 2016, 99: 273 - 283.
- [4] 宋天民. 焊接残余应力的产生与消除 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2004.
- [5] 陈怀宁, 陈亮山, 林泉洪, 等. 逆焊接加热处理防止复板结构应力腐蚀开裂的研究 [J]. *焊接学报*, 1999, 20(S1): 22 - 26.
Chen Huaining, Chen Liangshan, Lin Quanhong, *et al.* Study on preventing stress corrosion cracking of composite plate structure by anti-welding heating treatment[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1999, 20(S1): 22 - 26.
- [6] Liu X S, Wang P, Zhou G T, *et al.* Controlling of stress and distortion in thin copper plate by welding with trailing peening[J]. *Rare Metals*, 2007, 26: 216 - 219.
- [7] 徐文立, 黎明, 刘雪松, 等. 动态低应力小变形无热裂随焊锤击焊接技术研究 [J]. *材料科学与工艺*, 2001, 9(1): 6 - 10.
Xu Wenli, Li Ming, Liu Xuesong, *et al.* Research on dynamic low stress, small deformation and non-thermal cracking welding with hammering[J]. *Material Science and Technology*, 2001, 9(1): 6 - 10.
- [8] 关桥, 郭德伦, 李从卿. 低应力无变形焊接新技术——薄板构件的 LSND 焊接法 [J]. *焊接学报*, 1990, 11(4): 42 - 48.
Guan Qiao, Guo Delun, Li Congqing. New technology of low stress and non-deformation welding - LSND welding method for thin plate[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1990, 11(4): 42 - 48.
- [9] 李军. 随焊旋转挤压控制铝合金薄板焊接应力变形及防热裂研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [10] 王者昌. 关于焊接残余应力消除原理的探讨 [J]. *焊接学报*, 2000, 21(2): 55 - 58.
Wang Zhechang. Discussion on the principle of eliminating residual stress in welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2000, 21(2): 55 - 58.
- [11] Zhang W, Fu H, Fan J K, *et al.* Influence of multi-beam preheating temperature and stress on the buckling distortion in electron beam welding[J]. *Materials & Design*, 2018, 139: 439 - 446.
- [12] 郭绍庆, 袁鸿, 徐文立, 等. 温差拉伸和随焊激冷配合使用控制焊接变形 [J]. *焊接学报*, 2004, 25(6): 82 - 86.
Guo Shaoqing, Yuan Hong, Xu Wenli, *et al.* Tand quenching with welding with combination of thermal tensioning and quick cooling to control welding deformation[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, 25(6): 82 - 86.
- [13] Burak Y I, Besedina L P, Romanchuk Y P, *et al.* Controlling the longitudinal plastic shrinkage of metal during welding[J]. *Avt. Svarka (Automated Weld.)*, 1977, 3: 27 - 29.
- [14] Michaleris P, Dantzig J, Tortorelli D. Tortorelli. Minimization of welding residual stress and distortion in large structure[J]. *Welding Journal*, 1999, 78(1): 361 - 365.
- [15] Pazooki AMA, Hermans MJM, Richardson IM. Finite element simulation and experimental investigation of thermal tensioning during welding of DP600 steel[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2017, 22(1): 1 - 15.
- [16] Li M S, Ji S D, Yan D J, *et al.* Controlling welding residual stress and distortion by a hybrid technology of transient thermal tensioning and trailing intensive cooling[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, 24(6): 527 - 537.
- [17] 杨建国, 谢浩, 闫德俊, 等. 随焊干冰激冷冷源尺寸对焊接残余应力影响的有限元分析 [J]. *焊接学报*, 2017, 38(2): 14-18.
Yang Jianguo, Xie Hao, Yan Dejun, *et al.* Finite element analysis of the influence of cooling source size on welding residual stress [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2017, 38 (2): 14-18.

第一作者简介: 管建军, 男, 1977 年出生, 博士, 讲师; 主要从事焊接新工艺, 石油化工静设备延寿及失效评估方面的工作; 发表论文 30 余篇; Email: jjguan-hj@163.com.

(编辑: 毕江)