



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110405372 A

(43)申请公布日 2019.11.05

(21)申请号 201910612527.2

(22)申请日 2019.07.09

(71)申请人 中国石油大学(华东)

地址 266580 山东省青岛市黄岛区长江西路66号

(72)发明人 蒋文春 张磊 万娱 叶培举  
张玉福 苏厚德 陈韶范 周予东

(74)专利代理机构 青岛智地领创专利代理有限公司 37252

代理人 陈海滨

(51)Int.Cl.

B23K 28/02(2014.01)

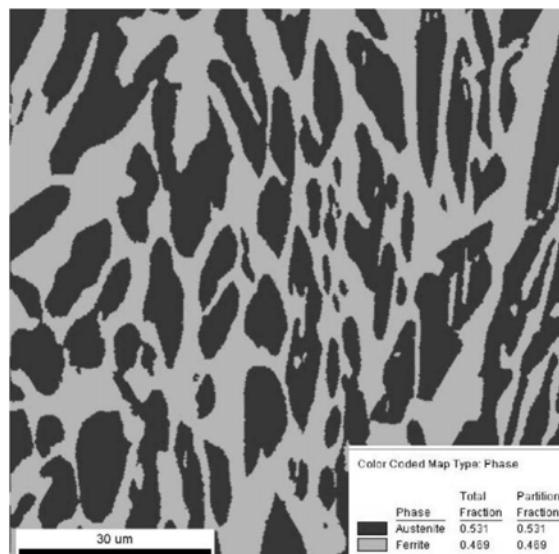
权利要求书1页 说明书5页 附图4页

(54)发明名称

一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法

(57)摘要

本发明涉及板壳式换热器技术领域，提供了一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法，通过电阻焊和氩弧焊的复合焊接方法降低双相不锈钢制板壳式换热器芯体的焊接残余应力，并调控双相不锈钢焊接接头的双相比例，避免析出脆性相，提高抗点蚀能力；采用的电阻焊和氩弧焊复合焊接方法能够有效降低残余应力，控制板片变形，在第一道电阻焊后进行第二道氩弧焊，除了起到双道密封的作用，密封效果更好，避免了因一道焊缝失效而导致的介质泄露；氩弧焊的热输入还可有效起到冶金作用，促进奥氏体相的析出，降低铁素体含量，优化两相比例，提升焊接接头的力学性能，增强了焊接接头的抗应力腐蚀开裂能力。



1.一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法,其特征在于,包括以下步骤:

- (1) 焊接前准备:清洗双相不锈钢换热板的待焊接部位;
- (2) 定位焊:将板片叠加定位,应用焊接工装加固;
- (3) 电阻焊焊接:将焊接滚轮定位在板片折边中间部位,导电滚轮在压力的作用下与板片表面紧密接触,进行电阻焊焊接;
- (4) 冷却:电阻焊焊接完成后进行充分冷却;
- (5) 氩弧焊焊接:于电阻焊焊缝中心向外2mm~8mm处进行氩弧焊焊接,同时保证上下板片的装配间隙小于0.2mm,完成双相不锈钢制板壳式换热器芯体的密封焊接。

2.根据权利要求1所述的一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法,其特征在于,所述双相不锈钢换热板的板片为厚度小于等于1mm的薄板;板片折边的宽度小于等于1.5cm。

3.根据权利要求1所述的一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法,其特征在于,进行电阻焊时,由传送装置靠摩擦力的作用自动运送板片,以达到在焊接及程序控制下实现快速自动作业,其最快线速度为1m/min。

4.根据权利要求3所述的一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法,其特征在于,电阻焊参数:焊接滚轮的宽度为6mm,焊接压力为20KN;导电滚轮的宽度为10mm,施加在导电滚轮上的压力为15KN;焊接滚轮由铬锆铜合金制成,导电滚轮由紫铜制成;焊接过程由焊接通电和休止两个程序组成,通电时间为0.3~0.6s,休止时间为0.6~0.1s,焊接电流为4kA,焊接速度为1m/min;接着接通电磁气阀,施加焊接滚轮和导电滚轮压力使滚轮与板片紧密接触、启动焊接程序,通电焊接,同时开启传送装置;焊接结束后,焊接滚轮抬起,待冷却后开始氩弧焊焊接过程。

5.根据权利要求1所述的一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法,其特征在于,氩弧焊焊接所用设备为WS-250IGBT逆变式直流氩弧焊机。

6.根据权利要求1所述的一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法,其特征在于,氩弧焊焊接中钨极直径为2.4mm。

7.根据权利要求6所述的一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法,其特征在于,氩弧焊焊接前,钨极伸出喷嘴的长度为4mm。

8.根据权利要求1所述的一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法,其特征在于,氩弧焊焊接中Ar流量为10L/min,预送气时间为1s,气体延时为0.3~16s。

9.根据权利要求1所述的一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法,其特征在于,氩弧焊的焊接电流为60A±10%,电流种类为直流负极性DCEN;氩弧焊的焊接速度为1mm/s。

10.根据权利要求1所述的一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法,其特征在于,氩弧焊后的冷却方式为风冷。

## 一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及板壳式换热器技术领域,具体涉及一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法。

### 背景技术

[0002] 换热器因其可以实现不同温度下介质的热量交换被广泛应用于核电、石油石化等各个行业,而板壳式换热器相比列管式换热器换热效率更高,结构更加紧凑;相比板式换热器,板壳式换热器的密封性能更好,耐高温、高压能力更强。相同压力损失的情况下,其占地面积仅为传统管壳式换热器的五分之一,但其传热系数为管壳式换热器的5倍以上,热回收率可达98%,耐压可达7MPa,耐高温可达600℃。

[0003] 板壳式换热器由壳体和内部芯体组成。芯体为由多个换热器板片背向叠合焊接而成的板对进一步焊接而成,目前的焊接密封方法主要有电阻焊,氩弧焊、电子束焊、等离子焊等。因换热器板片厚度一般小于1mm,用传统的焊接方法易导致焊接残余应力过大,板片易变形等问题,从而影响换热器的使用性能。

[0004] 双相不锈钢兼具铁素体和奥氏体不锈钢的优点,是一种强度高、耐腐蚀性能好的材料,其屈服强度和疲劳强度均优于奥氏体不锈钢,具有良好的焊接性能,热、冷裂纹倾向较小,是换热器的理想选材。铁素体和奥氏体的双相比的平衡是双相不锈钢优异性能的基础,若焊缝区铁素含量过高,会大大降低焊接结构的塑性及冲击韧性和耐腐蚀性能,因此采用合理的焊接方式进而控制在焊缝及热影响区双相比例是能否获得优质焊接接头的关键。而目前的焊接方法,在焊接后焊缝铁素体含量过高,导致焊接接头耐蚀性和冲击韧性大大降低,可能会导致换热器失效。

[0005] 目前能有效改善双向不锈钢焊接接头相比例的方法是焊后热处理,但目前换热器朝大型化发展,对换热器芯体进行整体热处理因尺寸受限是不现实的,因换热器板片很薄,焊缝所处的折边较小也不易实现局部热处理,因此必须考虑焊接实时调控。

[0006] 目前能有效降低焊接残余应力的方法有热处理法、超声冲击法、振动时效等,上述热处理方法不适用,其他方法均因换热器板片厚度过低易导致更大的变形而不适用。焊后残余应力消除方式不仅浪费时间,而且投入很大的人力物力。

[0007] 对于板壳式换热器板片焊接,归结主要存在以下技术问题,一般采用电阻焊、氩弧焊、电子束焊、等离子焊等,由于换热器板片厚度过小,上述焊接方法易产生焊接残余应力过大,板片变形过大等问题,影响产品的焊接质量,进而影响产品使用寿命;现有技术焊缝成型不良,产品易出现烧穿,咬边等问题,产品质量难以保证,生产成本高;因焊接热输入过大,冷却速度过快,焊缝及热影响区来不及析出奥氏体,导致铁素体含量过高,大大降低焊接结构的塑性及冲击韧性和耐腐蚀性能,导致换热器板片失效,介质泄露串流;传统的单道密封焊接可能出现焊接缺陷进而导致密封失效,因板壳式换热器的芯体整体焊接结构,一处失效可能导致整个换热器的报废。

## 发明内容

[0008] 本发明针对上述现有技术的不足,提供一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法,尤其指一种双相不锈钢制板壳式换热器芯体的密封焊接方法,在焊接过程中通过实时调控来降低焊接接头的残余应力,最大化提高结构完整性、增强抗应力腐蚀开裂能力,为一种能够显著提高工效,保证焊接质量的复合焊接方法。

[0009] 本发明采用以下的技术方案:

[0010] 一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法,包括以下步骤:

[0011] (1) 焊接前准备:清洗双相不锈钢换热板的待焊接部位;

[0012] (2) 定位焊:将板片叠加定位,应用焊接工装加固;

[0013] (3) 电阻焊焊接:将焊接滚轮定位在板片折边中间部位,导电滚轮在压力的作用下与板片表面紧密接触,进行电阻焊焊接;

[0014] (4) 冷却:电阻焊焊接完成后进行充分冷却;

[0015] (5) 氩弧焊焊接:于电阻焊焊缝中心向外2mm-8mm处进行氩弧焊焊接,同时保证上下板片的装配间隙小于0.2mm,完成双相不锈钢制板壳式换热器芯体的密封焊接。

[0016] 上述技术方案的电阻焊焊接过程中,当焊接程序控制箱进入焊接通电程序时,就会有强大的电流通过导电滚轮和板片,因板片间接触部位的电阻较其他部位大很多,因此在板片间产生的大量焦耳热将板片熔化,并在滚轮的压力下将换热器板片焊接起来。

[0017] 进一步地,所述双相不锈钢换热板的板片为厚度小于等于1mm的薄板;板片折边的宽度小于等于1.5cm。

[0018] 进一步地,进行电阻焊时,由传送装置靠摩擦力的作用自动运送板片,以达到在焊接及程序控制下实现快速自动作业,其最快线速度为1m/min。

[0019] 进一步地,电阻焊参数:焊接滚轮的宽度为6mm,焊接压力为20KN;导电滚轮的宽度为10mm,施加在导电滚轮上的压力为15KN;焊接滚轮由铬锆铜合金制成,导电滚轮由紫铜制成;焊接过程由焊接通电和休止两个程序组成,通电时间为0.3-0.6s,休止时间为0.6-0.1s,焊接电流为4kA,焊接速度为1m/min;接着接通电磁气阀,施加焊接滚轮和导电滚轮压力使滚轮与板片紧密接触、启动焊接程序,通电焊接,同时开启传送装置;焊接结束后,焊接滚轮抬起,待冷却后开始氩弧焊焊接过程。

[0020] 进一步地,氩弧焊焊接所用设备为WS-250IGBT逆变式直流氩弧焊机。

[0021] 进一步地,氩弧焊焊接中钨极直径为2.4mm。

[0022] 上述技术方案中,焊接前应检查所用钨极是否符合当前焊接的板厚,否则将其更换成合适的钨极。

[0023] 进一步地,氩弧焊焊接前,钨极伸出喷嘴的长度为4mm。

[0024] 在进行氩弧焊前,钨极的伸出喷嘴的长度一般取钨极直径的1-2倍。

[0025] 进一步地,氩弧焊焊接中Ar流量为10L/min,预送气时间为1s,气体延时为0.3-16s。

[0026] 焊接前打开氩气瓶阀门,将氩气的焊接流量调至所需的流量,本方案Ar流量为10L/min,预送气时间为1s,气体延时为0.3-16s。

[0027] 进一步地,氩弧焊的焊接电流为60A±10%,电流种类为直流负极性DCEN。

[0028] 调整好合适的电流,具体的不同板厚的焊接电流,本方案焊接电流为60A±10%,

电流种类为直流负极性DCEN。

[0029] 进一步地，氩弧焊的焊接速度为1mm/s。

[0030] 进一步地，氩弧焊后的冷却方式为风冷。

[0031] 本发明具有的有益效果是：

[0032] 本发明通过电阻焊和氩弧焊的复合焊接方法降低双相不锈钢制板壳式换热器芯体的焊接残余应力，并调控双相不锈钢焊接接头的双相比例，避免析出脆性相，提高抗点蚀能力；在焊接过程中，焊缝处最高温度可达材料沸点而后温度急速下降，不均匀的温度场产生的不均匀的热应力会产生塑性变形，而本发明采用的电阻焊和氩弧焊复合焊接方法能够有效降低残余应力，控制板片变形，在第一道电阻焊后进行第二道氩弧焊，除了起到双道密封的作用，密封效果更好，避免了因一道焊缝失效而导致的介质泄露；氩弧焊的热输入还可有效起到冶金作用，促进奥氏体相的析出，降低铁素体含量，优化两相比例，提升焊接接头的力学性能，增强了焊接接头的抗应力腐蚀开裂能力；

[0033] 能够免除焊后热处理，不仅能节省时间空间，还能够节省大量的人力物力；

[0034] 利用电阻焊和氩弧焊的复合焊接方法，无焊渣，无火花、飞溅、噪音、烟雾、烟尘，较传统焊接方法，能减少未熔合及气孔，具有焊接速度快，焊接质量好等优点，明显改善作业条件，提高生产效率；

[0035] 氩弧焊的热输入很小，产生的热影响区也小，而热影响区是焊件最薄弱的部位，因此能够明显提升焊接质量。

## 附图说明

[0036] 图1为基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法的示意图；

[0037] 图2为焊缝处织构图；

[0038] 图3为本发明的残余应力测试值与数值模拟结果对比 (a为Mises应力；b为横向残余应力；c为纵向残余应力)；

[0039] 图4为不同焊接方式的残余应力对比 (a为Mises应力；b为横向残余应力；c为纵向残余应力)；

[0040] 图5为电阻焊后未冷却与充分冷却的情况对比；

[0041] 图6为电阻焊与氩弧焊焊缝间有无间距对比。

[0042] 其中，1为换热器板片，2为电阻焊焊缝，3为氩弧焊焊缝，4为电阻缝焊系统，5为氩弧焊系统。

## 具体实施方式

[0043] 下面结合附图对本发明进行具体的说明：

[0044] 实施例1

[0045] 结合图1，一种基于残余应力调控的双相不锈钢换热板复合焊接方法，包括以下步骤：

[0046] (1) 焊接前准备：焊接操作前撕去覆盖在双相不锈钢换热器板片上的保护膜，检查焊缝及其周边有无氧化物、油脂、涂层等，用丙酮清洗焊缝部位，以避免因污垢而引起熔核成型不良，甚至产生夹杂等焊接缺陷；

[0047] (2) 定位焊:焊接严格按照图纸要求,在将板片按图纸尺寸要求叠加定位好后,应用焊接工装加强、加固,以避免在焊接过程中产生过大的焊接变形;

[0048] (3) 电阻焊焊接:将焊接滚轮定位在板片折边中间部位,导电滚轮在压力的作用下与板片表面紧密接触。当焊接程序控制箱进入焊接通电程序时,就会有强大的电流通过导电滚轮和板片,因板片间接触部位的电阻较其他部位大很多,因此在板片间产生的大量焦耳热将板片熔化,并在滚轮的压力下将换热器板片焊接起来;

[0049] 焊接过程中,由传送装置靠摩擦力的作用自动运送板片,以达到在焊接及程序控制下实现快速自动作业,最快可达1m/min的线速度;

[0050] 焊接过程的动作如下:首先设定规范参数,焊接滚轮的宽度为6mm,焊接压力为20KN,导电滚轮宽度10mm,施加在导电滚轮上的压力为15KN,焊接滚轮由铬锆铜合金制成,导电轮由紫铜制成,焊接过程由焊接通电及休止两程序组成,通电时间为0.3-0.6s,休止时间为0.6-0.1s,焊接电流为4kA,焊接速度为1m/min;接着接通电磁气阀,施加滚轮压力使滚轮与板片紧密接触、启动焊接程序,通电焊接,同时开启送进装置;最后焊接结束后,焊接滚轮抬起,待冷却后开始氩弧焊焊接过程。

[0051] (4) 氩弧焊焊接:于电阻焊焊缝中心向外5mm进行氩弧焊焊接,保证上下板片的装配间隙小于0.2mm,完成双相不锈钢制板壳式换热器芯体的密封焊接。

[0052] 选定设备:WS-250IGBT逆变式直流氩弧焊机;

[0053] 焊接前应检查所用钨极是否符合当前焊接的板厚,否则将其更换成合适的钨极,本焊接方案取钨极直径2.4mm;

[0054] 在进行氩弧焊前,钨极的伸出喷嘴的长度一般取钨极直径的1-2倍,本方案取4mm;

[0055] 焊接前打开氩气瓶阀门,将氩气的焊接流量调至所需的流量,本方案Ar流量为10L/min,预送气时间为1s,气体延时为0.3-16s;

[0056] 调整好合适的电流,具体的不同板厚的焊接电流,本方案焊接电流为60A±10%,电流种类为直流负极性DCEN;

[0057] 设置合适的焊接速度,本方案焊接速度为1mm/s;

[0058] 氩弧焊后的冷却方式为风冷。完成双相不锈钢制板壳式换热器芯体的密封焊接。

[0059] 对采用本发明焊接的双相不锈钢制换热器薄板进行电子背散射衍射技术(EBSD)测试,对焊缝区域进行组织分析。如图2所示,在30μm标尺下,灰色部分为铁素体,黑色部分为奥氏体,两相组织分布均匀。经Image-Pro Plus软件计算,铁素体含量为46.9%,奥氏体含量为53.1%,证明本发明方法能很好的平衡两相比例,保证双相不锈钢的优良性能。

[0060] 分别利用X射线衍射法和压痕应变法对采取本复合焊接方法焊接的板片进行残余应力测试,并将结果与数值模拟值进行对比。其中,垂直焊缝方向为横向残余应力,沿着焊缝方向为纵向残余应力,因为板片厚度不足2mm,所以不考虑沿着板片厚度的法向残余应力。由图3所示,纵坐标表示残余应力值,单位为兆帕(MPa);横坐标表示距离板片边缘的距离,单位为毫米(mm),图中方形点曲线表示用X射线衍射法测得的焊接接头残余应力分布,圆形点表示用压痕应变法测得的焊接接头残余应力分布,三角形表示用数值模拟计算而得的焊接接头残余应力分布。可以发现,在一定的误差范围内,实测的值和数值模拟的值吻合良好,证明了数值模拟方法的准确性。

[0061] 对比例1

[0062] 不同焊接方式对比：

[0063] 进一步用数值模拟方法针对换热器板片常用的的焊接方法与本发明进行计算对比,分别是激光焊,电阻焊,电阻焊+氩弧焊。模拟计算结果数据提取路径见图1示意。由图4所示,图中方形点曲线表示用激光焊加工的焊接接头的残余应力分布,圆形点表示用电阻焊加工的焊接接头的残余应力分布,三角形表示用电阻焊+氩弧焊的复合焊接方法加工的焊接接头残余应力分布。通过图4对比可以看出,与激光焊和电阻焊相比,电阻焊+氩弧焊的复合焊接方法能够显著降低焊接残余应力。

[0064] 对比例2

[0065] 电阻焊后无冷却过程,直接进入氩弧焊焊接:

[0066] 当电阻焊焊接过程结束后进入氩弧焊焊接步骤时,无充分冷却至室温直接进行氩弧焊焊接。通过数值模拟计算针对以下两种情况进行对比:

[0067] 情况1:电阻焊后立即进行氩弧焊(未冷却);情况2:电阻焊后充分冷却再进行氩弧焊焊接(充分冷却)。

[0068] 其结果见图5所示,采用本发明方法,也就是充分冷却后再进行氩弧焊焊接,焊后残余应力峰值减小约80MPa。

[0069] 对比例3

[0070] 电阻焊与氩弧焊焊缝间距对比:

[0071] 情况1:电阻焊焊缝和氩弧焊焊缝间无间隙;情况2:电阻焊焊缝和氩弧焊焊缝间间隙2mm。

[0072] 其结果见图6所示,采用本发明方法,也就是电阻焊焊缝和氩弧焊焊缝间保持2mm间隙(或者更大),残余应力较无间隙的情况焊后残余应力峰值减小70MPa左右。

[0073] 电阻焊与氩弧焊焊缝间应保持不小于2mm的间隙,从而起到双道密封的作用。焊缝位置是整体结构最为薄弱的位置,焊缝也是存在缺陷概率最大的地方,为了防止氩弧焊对电弧焊焊缝的影响,保证双道密封的有效性,两道焊缝的间距不应小于2mm。

[0074] 当然,上述说明并非是对本发明的限制,本发明也并不仅限于上述举例,本技术领域的技术人员在本发明的实质范围内所做出的变化、改型、添加或替换,也应属于本发明的保护范围。

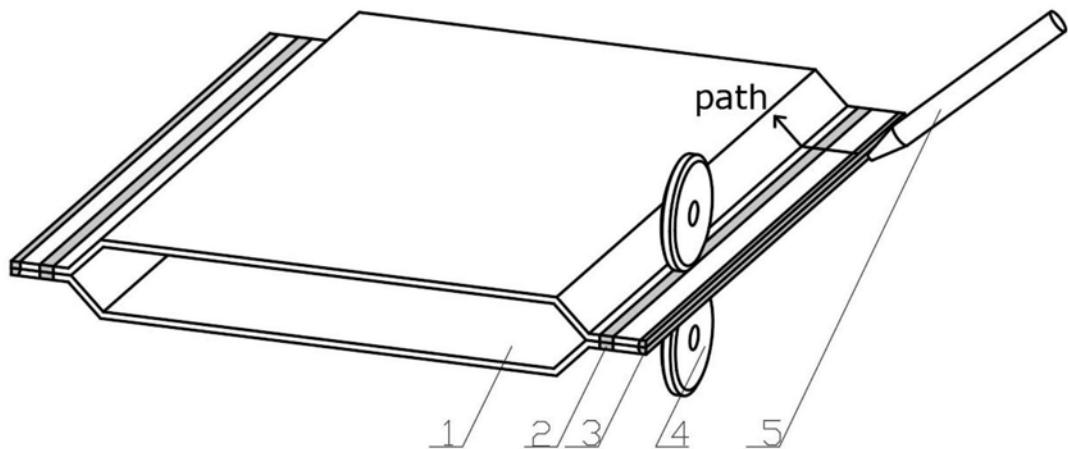


图1

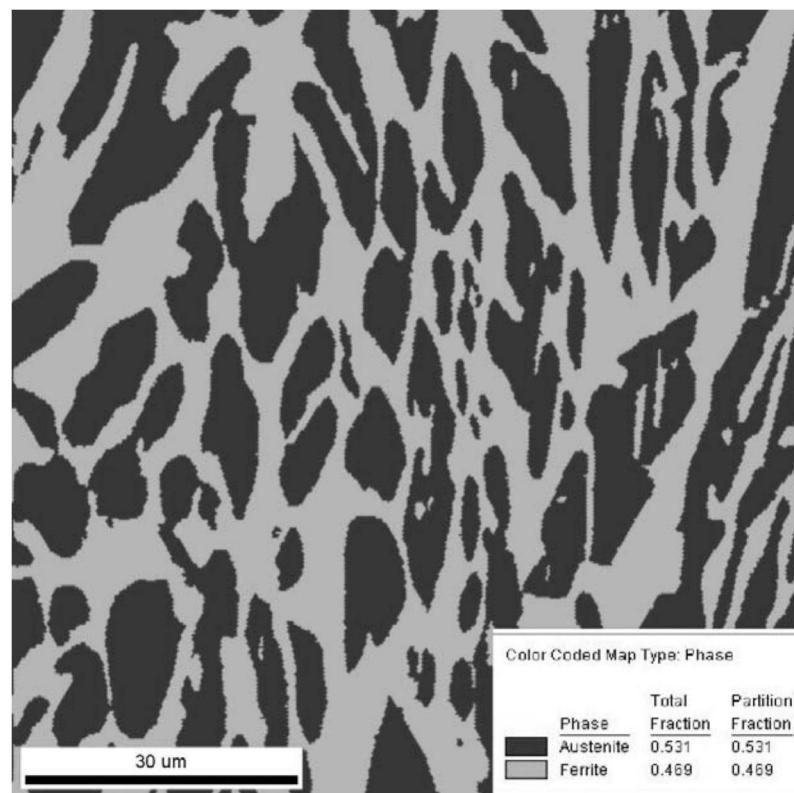


图2

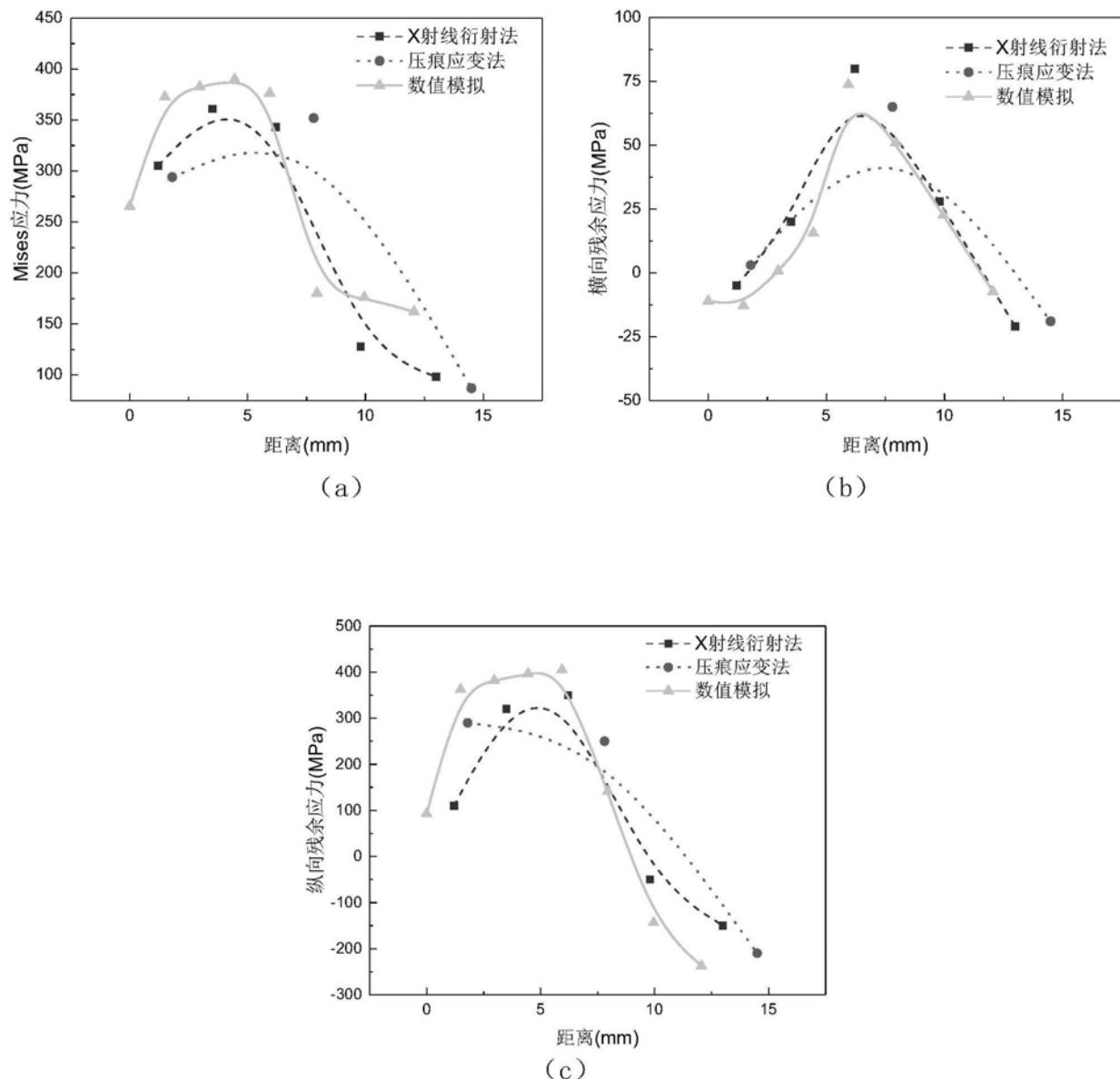


图3

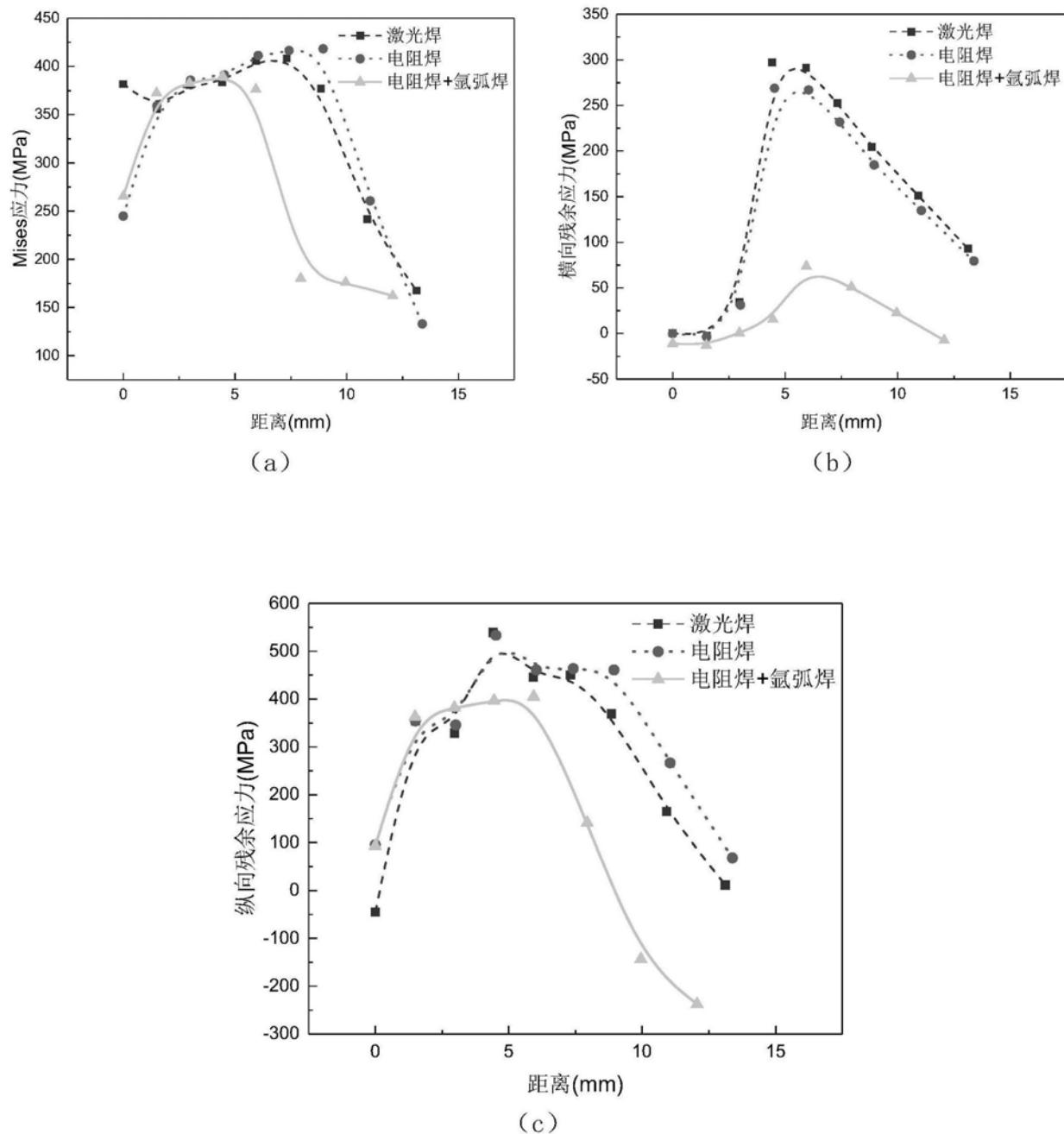


图4

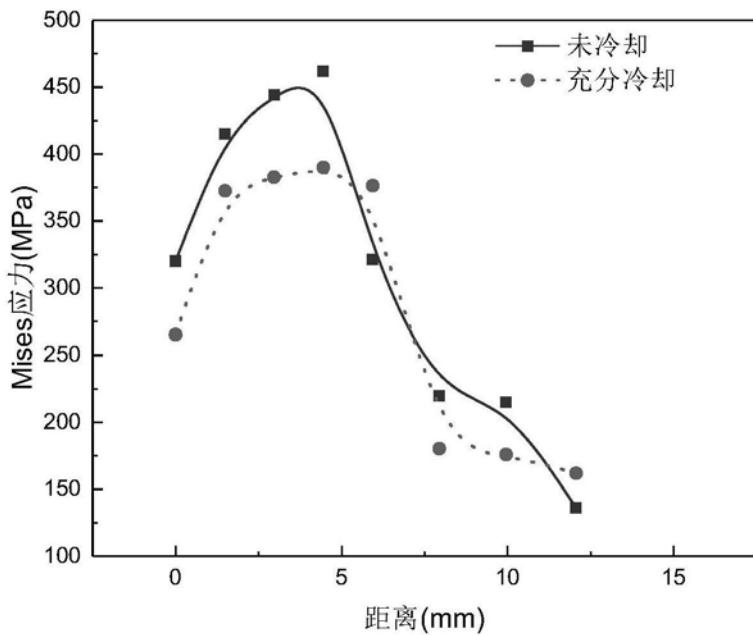


图5

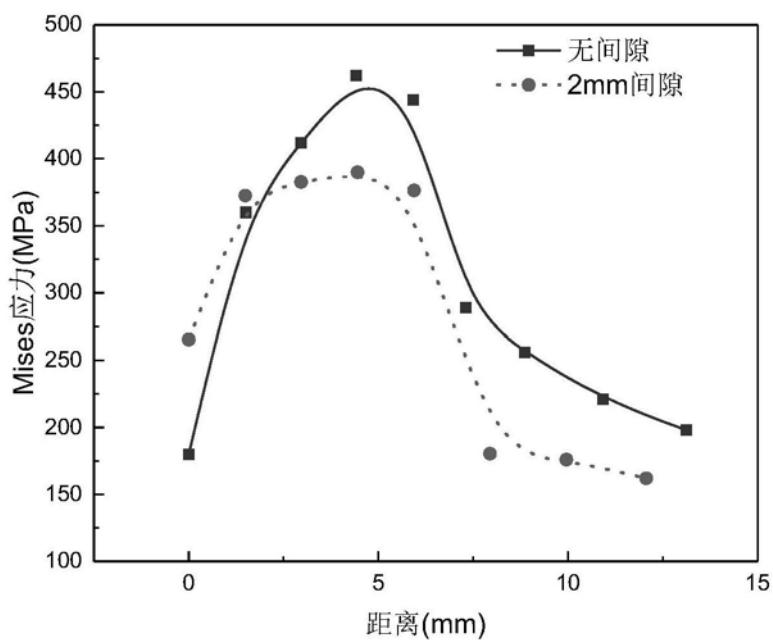


图6