

Tech-Notes

Using Microstructural Analysis to Solve Practical Problem

金属焊接金相

Written by:

George Vander Voort (Buehler Ltd)



摘要：焊接是金属连接的非常重要的方法，其广泛应用至少已经有60多年了。为了确保产品质量，与多数加工方法一样必须对其加工过程进行控制，焊接也不例外。

简介

焊接是金属连接的非常重要的方法，其广泛应用至少已经有60多年了。为了确保产品质量，与多数加工方法一样必须对其加工过程进行控制，焊接也不例外。有许多构件由于焊接原因导致失效的实例，例如：在第二次世界大战期间T2油轮和商船的沉没。这使得焊接质量的控制显得尤为重要，在焊接过程中采用无损检测或者破坏性实验来研究焊接零件。可以在焊接零件表面的某个区域进行磨光和抛光从而完成金相检查。这些区域有焊接零件的热影响区或者靠近母材的区域（此区域被焊接的金属没有受到焊接过程产生的热量影响），无损检测是较为合理的检查方法，但是从焊接零件上截取试样用于破坏性检测也是相当常见的方法。焊接试样常用于评价焊接零件的质量、焊接材料、工艺的选择是否合理，焊接零件的机械性能是否达到要求。对失效的焊接零件进行分析，通常在无损检测之后，直接从焊接零件上截取试样进行金相检查。

焊接工艺

焊接的工艺方法有许多种。在焊接领域里，最常见的是手工焊接方法，但是它只是焊接工艺方法之一。虽然焊接还是一种较新的技术，但是锻接焊技术远早于其他焊接方法，因为它是最早的金属制造方法之一。除锻焊接之外的其他焊接技术大多都起源于二十世纪，特别在1940以后。气割和气焊工艺都使用氧乙炔火焰。此外还有电阻焊；例如：点焊、感应焊接、火花焊接和电弧焊接例如：钨极气体弧焊（GTA）和金属-惰性气体焊接（MIG）属于电极焊接（电焊条），水下电弧焊接，电阻焊接，电子束和激光焊接，还有摩擦焊等等，现在许多焊接技术都通过各种方法加以改进。其中有些工艺使用金属填充，通常焊缝处的化学成分不同于母材的成分致使焊缝强度高于母材。不使用金属填充的工艺，是使母材金属熔化从而形成焊口。图1所示一个熔焊焊口的基本特征示意图，主要有三个部分：母材，热影响区（HAZ）和焊缝金属。在焊接过程中，大量的热量产生于焊口处的熔化金属。

Basic Features of a Fusion Weld

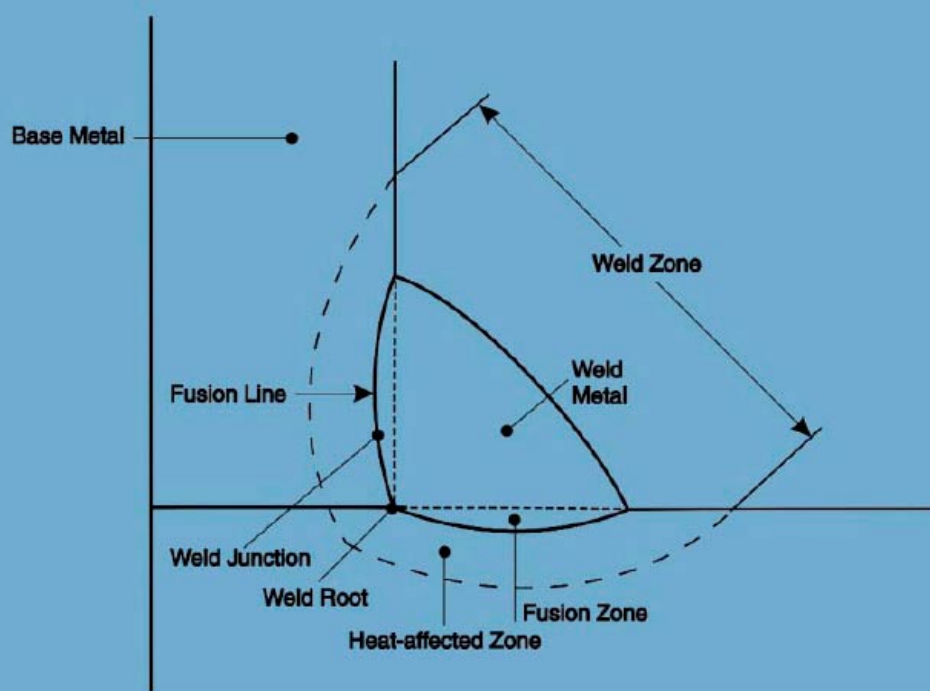


图 1. 角焊缝的相关基本名词术语

所使用的焊接工艺的不同和受到其他因素影响其热量的耗损也有很大不同，例如：对于较厚的焊接零件，焊缝处或者焊接“熔核”是浇筑的方式。可锻金属的焊接，从熔核到未受到影响的母材之间存在一个温度梯度，温度范围从金属或合金熔点以上一直到室温。这个温度梯度所带来的影响取决于被焊接的金属或合金。以钢为例，在多数情况下，熔核是完全熔化的填料金属。凝固过程发生在不同的冷却条件下，这取决于是否采用焊前预热或者焊后加热工艺、焊件的重量和室温等因素。自然而然，在熔化的熔核与未熔化的母材交界处存在一条熔合线。在熔合线以下，温度逐渐降低到室温。如果焊件是用钢制造的，热影响区（介于熔合线与未受到影响的母材之间）或者至少部分热影响区其温度达到钢的临界温度AC3之上，所以被完全奥氏体化。靠近熔合线处的晶粒最大的。在低温区，由于晶粒的再结晶和重新形核其晶粒尺寸非常细小，晶粒是否长大取决于晶粒形核后的温度高低。能否见到柱状晶粒取决于钢的脱氧的方法。在热影响区金属被加热到 $\alpha + \gamma$ 两相区，冷却方式的不同导致发生不同转变。如果温度低于临界温度AC1，原始组织将被回火或者开始发生球化。这是因为焊料金属与母材的化学成分不同而且有部分母材被熔化，从焊缝到熔合线的化学成分是变化的。熔核和热影响区的晶粒随着化学成分和相转变而变化。同时也如我们所预料的那样，也有一个硬度梯度存在。

在熔核和热影响区上可能有裂纹存在。如图2所示：常见的裂纹和孔洞术语。使用正确的术语来描述裂纹是非常重要的，大多数裂纹是根据其产生位置来命名的——焊口裂纹、根部裂纹和热影响区裂纹，这只是几个例子。有些裂纹的是以裂纹的走向与焊缝方向关系命名的——纵向和横向裂纹就是很明显的例子。有些裂纹是根据其产生原因命名的——氢致裂纹、去应力裂纹等等。参考文献1中讲述了许多关于焊接名词和术语。

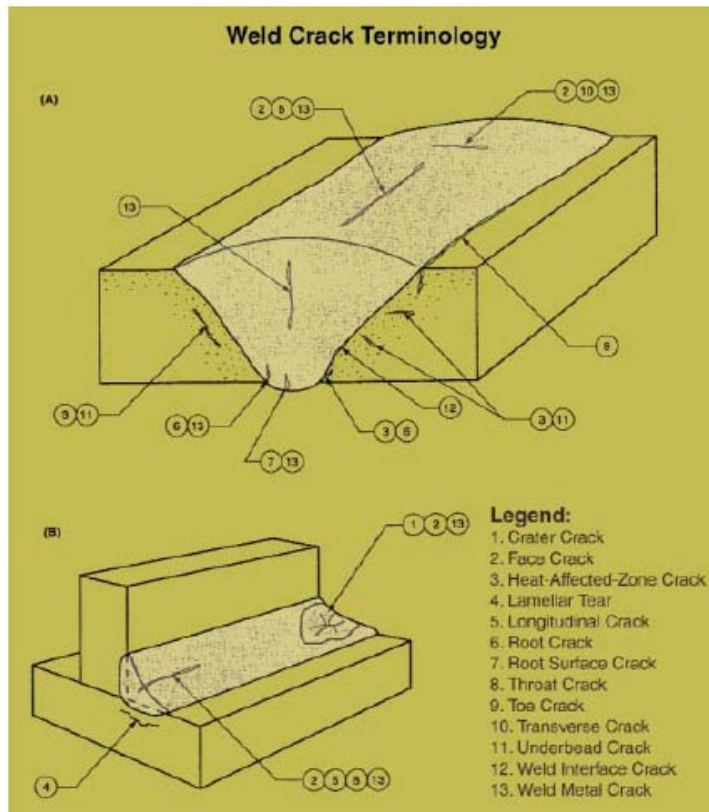


图2. 焊接裂纹的名词和术语 (AWS A3.0: 2001[1])。

检验方法

金相检验常用于焊缝的检查。为了检查之需必须从焊接零件

的焊口和热影响区截取一个或多个试样。当然最好是一个样品上能够包括三个区域。对于小的焊接零件这样做很容易。但是有些情况，例如：采用电渣焊工艺的大型厚板焊接，焊接的熔核非常大。虽然不像小的焊接零件那么简单，但是还是可以在焊接零件上截取到全部焊缝的横截面。样品在抛光状态下检查孔洞的类型，例如气孔和缩孔的评判，裂纹是出现在焊缝处还是热影响区，在这些区域是否存在缺陷（未熔合或者未焊透）。在焊接操作中是否有非金属夹杂物带入，对于非金属夹杂物主要是检查焊缝处和焊层之间的熔渣类夹杂物（对于多层焊接）。

焊接样品的取得和制备

有些焊接构件很大，失效发生在野外，因此只能用火焰切割方法进行样品的切割。这导致在切割区域附近产生很大的损伤区，这个区域宽度大约在10~15mm。当切割后的样品被送到实验室，再采用切割损伤较小的方法进行切割，如带锯或砂轮切割机进行切割。然后金相操作人员使用专用的金相砂轮切割机截取金相样品，使用金相砂轮切割机所产生的损伤层更小。焊接样品的形状不规则且尺寸较大，如果仍旧使用标准的1”，1.25”，1.5”或者2”（25, 30, 40 或者50mm）直径的镶嵌模具就不合适了，这样金相操作人员使用薄金属片来制作模具，在制作好的模具内表面涂抹脱模剂，把样品放置在模具里（此后模具与母材有一定的粘结），使用环氧树脂镶嵌样品。待树脂固化后，使用各种半自动设备对样品磨削和抛光。图3所示，使用环氧树脂镶嵌+客户自制的模具镶嵌的一个较大的焊接零件如果样品的切割过程特别仔细，切割面平整而且产生的损伤层最小的话，那么可以减少粗磨的时间。粗磨的目的无非是：要么是去除切割表面的粗糙层，要么是获得一个平整的样品表面。明智的做法：使用ApexHercules™ H抛光盘+较粗粒度的金刚石抛光剂进行磨光，如采用45um的MetaDi®金刚石悬浮抛光液。不但材料去除率非常高而且样品表面的非常平整。

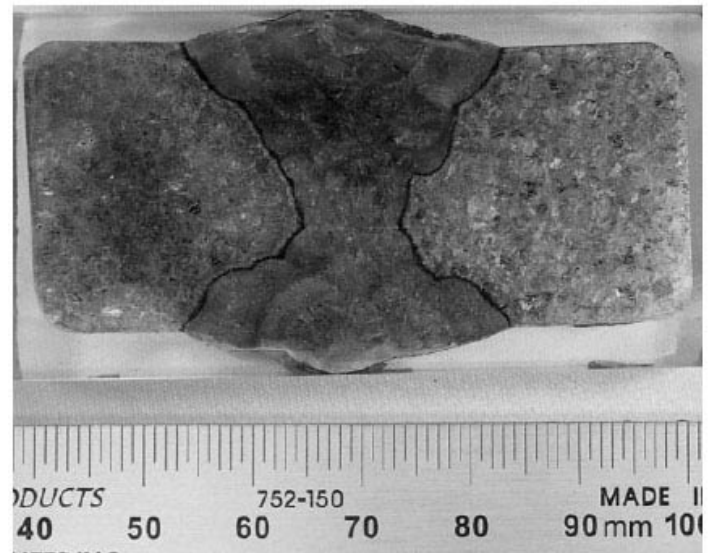


图3. 较大的焊接零件使用环氧树脂镶嵌在客户自制的镶嵌模具里

对于特别大的样品采用另一种方法，把焊接零件切割成厚度小于12mm的片状样品。在机加工车间使用Blanchard 或者其他类型的磨床将样品两面磨成平行的两个平面，然后使用双面胶带或粘结剂把样品粘结到平板型的样品夹持器上（该样品夹持器上没有试样孔）。（一定要粘接牢固），为了保证抛光机动力头在运行时不震颤，平板夹持器上粘接的样品要保证重量平衡和对称。但是要注意，只有当样品比夹持器上的

样品孔大时，才采用这种方法来制备样品。如（图4）

对于焊接的样品其磨光和抛光步骤与非焊接的金属或合金样品稍有不同。主要是焊接样品的抛光表面比普通样品要大，而且整个抛光面上的硬度高低不均匀。样品的局部区域是铸造组织。同时还有平衡态的锻造组织，通常平衡态组织不会影响样品的制备。表1中所列的两种方法通常适用于普通铁基合金的焊接样品制备，对于其他金属或合金焊接件的样品制备方法，读者可直接登录以下网址：<http://www.buehler.com>查看。

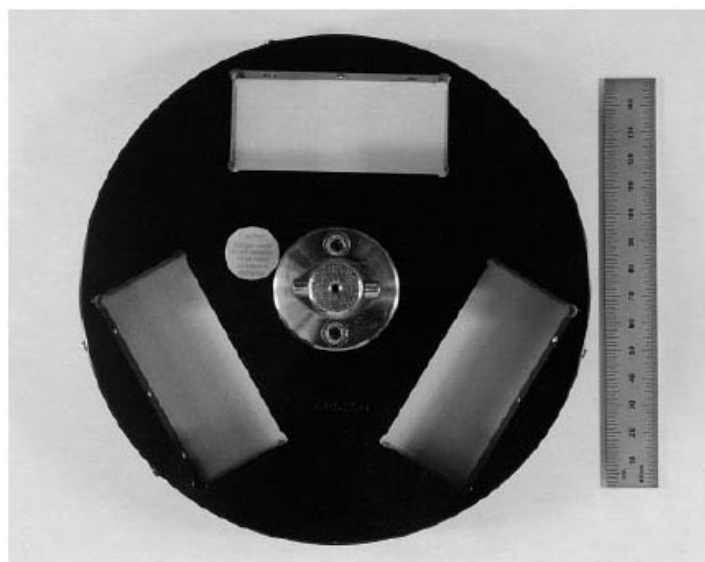


图 4. 直径为 7" (178mm) 样品夹持器 (样品盘直径为 12" 或 300mm), 用于不规则的较大样品 (1.375 x 3" 或 35 x 76mm)

如果样品制备特别困难的话，最好在制备过程中加上1 μm 金刚石抛光步骤，抛光3分钟。追加3 μm 金刚石抛光步骤原因也是如此。如果样品较大，相应的样品制备时间需要增加。在第一或第二步骤可以任选一步使用ApexHercules™ H或者S 刚性磨光盘 (RGD)。H型盘其材料去除率高，适用于所有铁基合金样品。当样品硬度低于200 HV时，使用S型盘比较合适。表 2 所列就是这种制备方法。如果在制备过程中加上1 μm 金刚石抛光步骤后，样品制备仍旧困难，那么就应该追加3 μm 金刚石抛光步骤，时间为3分钟。

焊接零件的检验

孔洞、裂纹和夹杂物的检查总是在样品抛光后，侵蚀前进行。随后使用适当的侵蚀剂腐蚀样品，用于研究样品的宏观和微观组织。有时焊缝处的材料成分完全不同于母材的成分，因此对于母材和热影响区合适侵蚀剂，而对于焊缝就不太合适，反之也依然。对于抛光后的样品，使用微观组织侵蚀剂通常完全能够显示宏观组织的细节。有些研究表明，实验人员在磨光样品之后就使用宏观组织侵蚀剂来侵蚀样品，用于宏观组织研究。但是这样的样品不适合于研究微观组织，必须把样品抛光。

大多数常用的侵蚀剂都可以用于显示焊接件的显微组织，实践证明使用彩色侵蚀方法能够更好的显示晶粒结构、偏析、残余应力和变形。可是这些侵蚀剂应用并不广泛。这是因为彩色侵蚀对于样品制备的要求更高。但是使用先进的制样设备和合适的耗材这样的要求很容易达到。图5 所示是一个低碳钢焊接样品采用彩色侵蚀与普通侵蚀后晶粒结构的对比，显而易见彩色侵蚀的优点所在。两种侵蚀剂都显示焊接金属的铸态组织结构，彩色侵蚀剂在显示母材和热影响区的晶粒结构方面显示出巨大的优势。

Table 1. Generic Method for Preparing Ferrous Weld Specimens

Surface	Abrasive/ Size	Load Lb. (N)	Base Speed (rpm)/Direction	Time (min)
CarbiMet® waterproof paper	120/P120-, 180/P180- or 240/P280-grit SiC water cooled	6 (27)	240-300 Comp.	Until Plane
UltraPol™ cloth	9 μm MetaDi® Supreme diamond suspension	6 (27)	120-150 Comp.	5
TexMet® 1000 or TriDent™ cloth	3 μm MetaDi Supreme diamond suspension	6 (27)	120-150 Comp.	4
MicroCloth® or ChemoMet® cloths	~0.05 μm MasterMet® colloidal silica or MasterPrep™ sol-gel alumina suspensions	6 (27)	120-150 Contra	2

Table 2. Generic Method for Preparing Ferrous Weld Specimens Using a Rigid Grinding Disc

Surface	Abrasive/ Size	Load Lb. (N)	Base Speed (rpm)/Direction	Time (min)
ApexHercules™ H disc	45 μm MetaDi Supreme diamond suspension	6 (27)	120-150 Comp.	Until Plane
ApexHercules™ H disc	9 μm MetaDi Supreme diamond suspension	6 (27)	120-150 Comp.	5
TexMet® 1000 or TriDent™ cloth	3 μm MetaDi Supreme diamond suspension	6 (27)	120-150 Comp.	4
MicroCloth®, NanoCloth™ or ChemoMet® cloth	~0.05 μm MasterMet® colloidal silica or MasterPrep™ sol-gel alumina suspensions	6 (27)	120-150 Contra	2

图 6 所示， AISI/SAE 1006碳钢焊件，使用2%硝酸酒精侵蚀剂和 Klemm’ s I彩色侵蚀剂侵蚀后焊缝处的低倍组织照片，硝酸酒精溶液是一种不错的侵蚀剂。图 6a， 所示，从母材到热影响区直到焊缝处金属的组织转变。请注意在热影响区中的黑点，在高放大倍数下可以观察到细小的珠光体由于微区形变转变成奥氏体，而且这个区域富含碳。彩色侵蚀后这些点状组织不容易观察到。另一方面，图6b. 所示，使用彩色侵蚀方法在显示晶粒尺寸和形状上要比硝酸酒精侵蚀剂好得多。图7 所示，焊缝(a) 热影响区 (b) 和母材(c) 显微组织。注意母材上有铁素体和在晶界上薄片状碳化物。在热影响区上可以观察到黑点，这表明该处温度较高，碳化物溶解到奥氏体中，但是没有足够的时间使碳成分均匀，随着温度下降这些富碳区域转变成类似于珠光体组织。铸态的低碳铁素体晶粒、细针状组织和弥散分布的细小碳化物组织是典型的焊接组织。

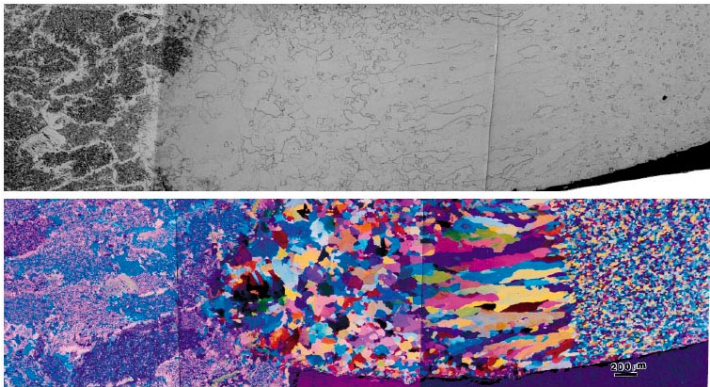


图 5. 低碳钢焊接件， 侵蚀剂 2% 硝酸酒精 (上图)和 Klemm’ s I (下图) 使用彩色侵蚀方法清晰显示晶粒结构。最左边是焊缝金属铸态显微组织，最右边标尺上方母材显微组织。 在中间的是热影响区，在靠近熔合线附近从起初的晶粒粗大不规则晶粒逐渐变成形状规则的小晶粒，随后是柱状晶粒直到最后是母材上非常细小的等轴的铁素体晶粒。

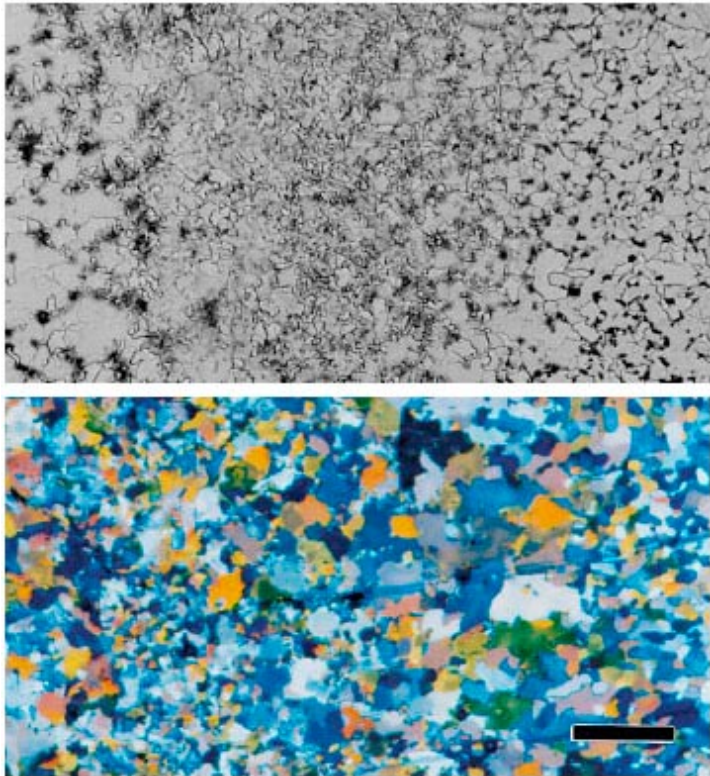


图 6. 1006碳钢焊件，熔合线处的低倍组织，侵蚀剂 2% 硝酸酒精 (上图)和 Klemm’ s I侵蚀剂 (下图) 偏振光+灵敏色片 (标尺长度： 200 μ m)。

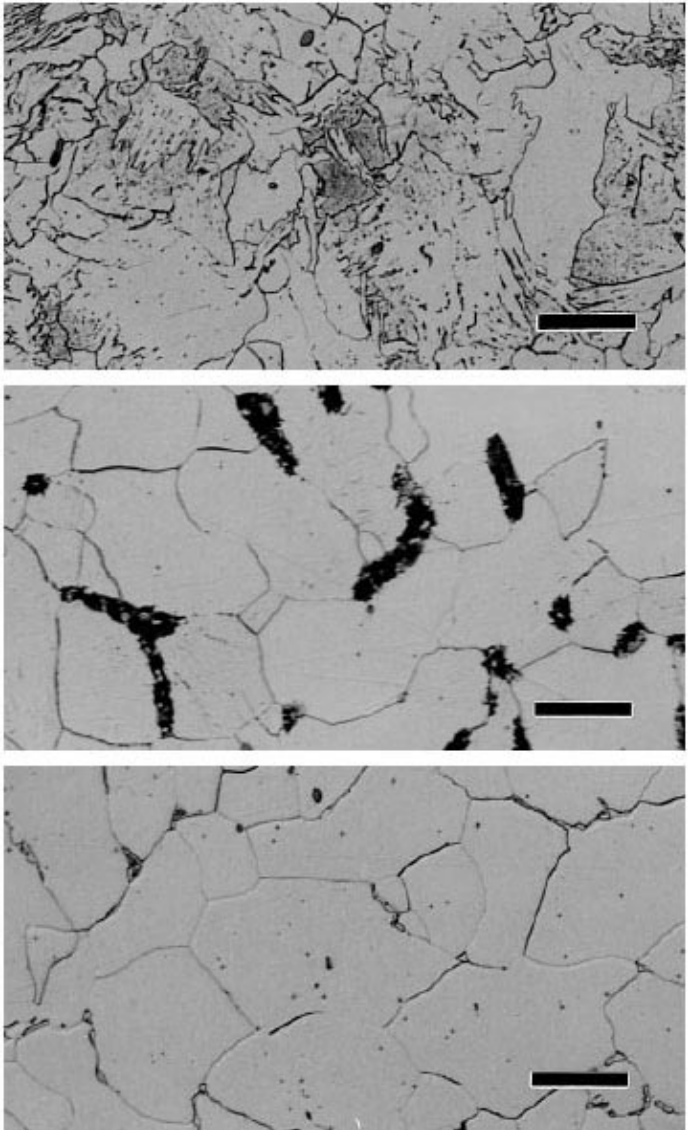


图 7. 所示，1006碳钢焊缝 (上图)， 热影响区(中图) 和母材(下图) 的显微组织 (侵蚀剂 2% 硝酸酒精(标尺长度： 200 μ m)。

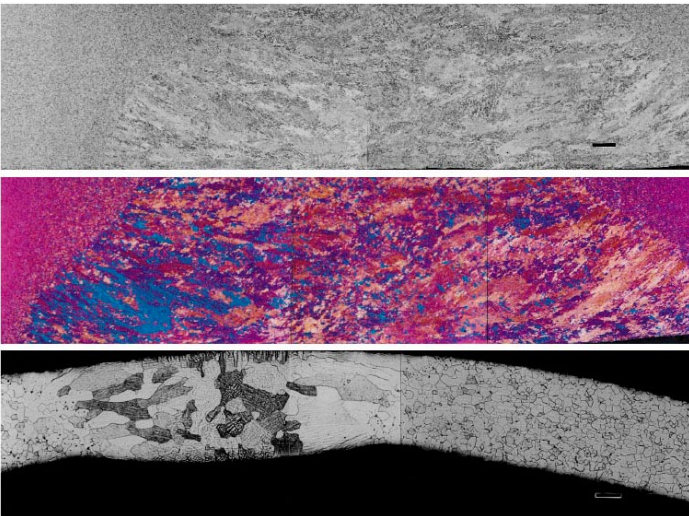


图 8a. 采用GTA焊接的 Trimritel马氏体不锈钢，焊接+热处理后显微组织， 侵蚀剂: Vilella’ s 侵蚀剂
图 8b. Beraha 氨基磺酸侵蚀剂 (中图) 标尺长度: 200μm
图 9. (下图) 29-4 (29Cr-4Mo)铁素体不锈钢薄壁零件显微组织，侵蚀: 60% HNO3 水溶液电解侵蚀，电压: DC 1.5V， 标尺长度: 100μm)。

有的焊接零件在焊接后进行热处理，这样晶粒将被细化并且热影响区将消失，图8所示Trimritel马氏体型不锈钢(Fe - 0.23%C - 14.25%Cr - 0.65%Ni - 0.7%Mo)焊接件的显微组织，采用GAT工艺进行焊接然后热处理（843 °C 空冷至 788 °C，空冷）。图 8a 所示，侵蚀后的显微组织，侵蚀剂：Vilella's侵蚀剂。焊缝的铸态组织（255HV）清晰可见，但是没有热影响区。母材（197HV）晶粒细小。图8b，使用Beraha 氨基磺酸侵蚀剂（100 mL水+ 3 g偏亚硫酸氢甲+2 g 氨基磺酸+ 1 g氟化氢铵）焊缝组织显示非常好，晶粒尺寸从熔合线到HAZ上的母材转变。热处理后HAZ区域的晶粒细化了，但是比母材上的晶粒还是要粗大些，彩色侵蚀清晰显示晶粒尺寸从熔合线到母材处的变化。使用Vilella's侵蚀剂显示晶粒尺寸变化最明显，至少在这个放大倍数下是这样（50X）。并非所有的金属和合金都适用于彩色侵蚀，铁素体不锈钢采用彩色侵蚀就相当困难，尤其薄壁的管件对于金相工作者可能更是个挑战。图 9 所示，焊接的薄壁管道（厚度：0.015 ”，0.38mm），材料：铁素体不锈钢29-4（29%Cr - 4% Mo），侵蚀：60% HNO3 水溶液电解侵蚀，电压：DC 1.5V。焊口比管道壁稍微厚点，可以观察到具有枝晶结构的粗大晶粒，正常的等轴晶粒位于心部，柱状晶粒位于焊口处的外部。在这个样品上没有观察到HAZ区，这是由于管道焊接后可能被回火。

参考文献:

1. "Standard Welding Terms and Definitions," AWS A3.0:2001, The American welding Society, Miami, Florida.

如果你有问题希望得到解决，或者你有解决某一问题的办法并认为对我们的读者有帮助，请写信、打电话、或发传真到：

BUEHLER Ltd.
41 Waukegan Road, Lake Bluff, Illinois 60044
Web Site: <http://www.buehler.com>

BUEHLER ASIA
Benny Leung
benny.leung@buehler.com.hk
Room 3, 5/F Vogue Centre, 696 Castle Peak Road, Lai Chi Kok, Kowloon, HK
Web Site: <http://www.buehler-asia.com>

BUEHLER CHINA
李明
Thomas.li@buehler.com
天津大学材料科学与工程学院25楼C座C0205室
Web Site: <http://www.buehler-asia.com>



The Science Behind Materials
Preparation & Analysis