

焊接件的金相制备

Struers

应用说明

直到19世界末，金属部件都是通过热锻工艺进行连接，这种工艺称为锻焊。如今，已开发出各种不同的实用焊接工艺。焊接已经成为一种制造工艺，广泛应用于不同成分、不同形状、不同尺寸的部件之间的连接。

许多类型的制造工业都广泛地采用各种焊接工艺。这些制造工业包括：

- 航空航天业，如机翼和机身的制造
- 造船与航海工业，如甲板及甲板上部结构用板的制造
- 陆路运输与汽车工业
- 采油和石化工业，如海洋采油平台与管道系统的制造
- 家用电器制造业，如大型家用电器与金属家具的制造



焊条电弧焊



为了进行过程控制、研究及失效分析，金相检测技术广泛应用于焊接各个领域，如在典型工件上焊道的数目及尺寸、熔深、热影响区的大小，以及气孔和裂纹之类的缺陷。由于不同材质的焊

接件性质不同，因此，选择一种适宜的金相制备方法是必要的。



多道次奥氏体不锈钢焊接件抛光及着色浸蚀后的截面。根据Lichtenberger和Bloech方法进行着色浸蚀。明场，6.5x

焊接件金相试样制备的困难

在切割过程中必须避免引入任何类型的热损伤，因为这些热损伤可能改变焊接部位的显微结构和性能。

必须对金相制备过程有一个全面的了解。只有这样，才能更好处理在焊接部位和焊接件截面因材料性能变化所导致的各种困难，才能保证不同硬度的显微组织显示在同一个平面上。



钢材焊接件上的热损伤



抛光与浸蚀后的截面显示出热损伤的渗透深度。明场，50x

解决方案

选择合适的砂轮和切割参数非常重要。只有这样，才能避免试样热损伤的产生。

应根据焊接件材料的种类选择并优化金相制样方法，以使焊接区软硬相、热影响区和母材之间的浮突减至最小。

热连接工艺

用于金属及合金连接目的的工艺方法有以下几种：

- 软钎焊*
- 硬钎焊**
- (焊接) 熔焊

区分(焊接) 熔焊与软钎焊及硬钎焊的特征为：

- 软钎焊(图1)和硬钎焊(图2)是在工件之间通过熔化熔点较低的焊料从而连接工件, 它无须熔化工件
- 熔焊则是在焊接部位处将工件材料加热到高于其熔点的温度, 以实现熔合的目的
- 上述的熔焊工艺过程将会导致材料的焊接部位附近发生化学上及冶金上的改变
- 这些显微组织变化可对焊接件的性能及服役性能产生深远影响

*软钎焊: 软钎焊是这样一种工艺, 两个金属部件采用熔点相对较低的第三种金属或合金进行连接。软钎焊是以第三种金属或合金的熔点低为明显特征, 这些第三种金属或合金的熔点一般都低于450° C (840° F)。软钎焊所使用的这些第三种金属或合金称为焊料。

**硬钎焊: 硬钎焊通常采用如下熔点的填料 (如对于青铜合金而言, 熔化温度为870° C 到 980° C或1600° F 到 1800° F), 这些填料的熔化温度远低于基材的熔点 (如对于低碳钢而言, 其熔点为1600° C (2900° F))。

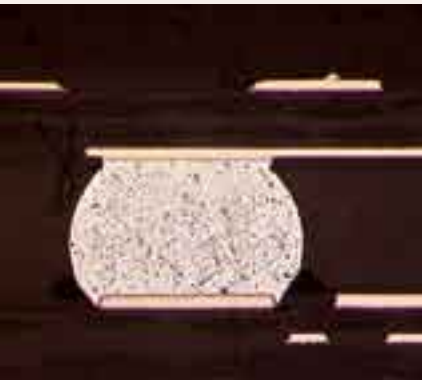
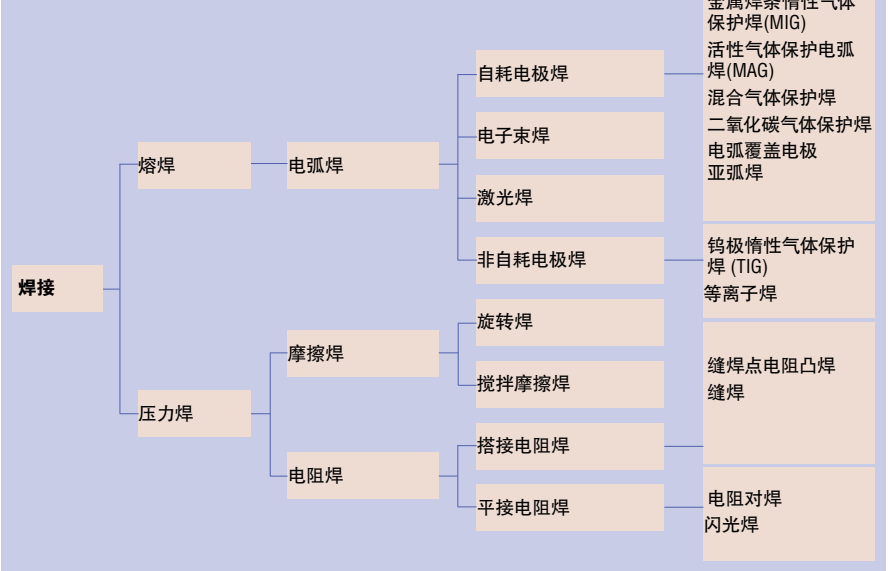


图1: PCB中铜导线间的钎焊点抛光截面。明场, 100x.

焊接工艺



下表列出了一些比较常用的焊接工艺



通常, 焊接被认为是两个或多个金属部件之间的连接, 连接过程中, 这些部件表面必须被加热到塑性状态 (如图3所示的摩擦焊) 或液态, 焊接过程中可附加第三种金属也可不附加, 可以加压或者不加压。

这些焊接工艺中的每一种都具有其自身特性, 这些特性包括熔深、焊接速度、熔渣生成、热量输入、焊接件特性等, 而这些特性又会反过来影响材料的显微组织特征。

因此, 对于任何一种特定焊接工艺效果的研究都需要对典型的焊接件试样进行仔细的金相检测, 无论这些检查的目标是焊接件宏观组织、焊接件的显微组织/性能关系, 还是为了鉴定缺陷的特征及来源。因此, 显微组织分析及诠释的准确性将依赖于试样的制备, 制样的整个过程中不能引入任何制样失误生成的现象。



机器人焊接



图2: 铜/不锈钢钎焊点的抛光截面。DIC, 100x.



图3: 压力摩擦焊接低合金钢上的熔合界面显示出热影响区与相关的塑性变形。明场, 25x



镍基合金的电子束焊接件横截面显示出焊接柱状显微组织及少数分散气孔。明场，50x



管道焊接

选取焊接件检测截面

可采用金相学原理及惯例对焊接断面进行检验以达到相关目标;下面将列举其中最常用的几种:

• 焊工鉴定试验

采用这种类型的测试,一名焊工在指定的条件下对一段合适的测试件进行焊接。然后,对该测试件通过测量、目测、及焊接件断面检查的方式进行检测。若焊接件达到既定标准,则批准该焊工焊接与测试件类型相同的工件。

• 工艺鉴定试验

采用这种类型的测试,待批准的对象是指定材料及焊接参数的焊接工艺。采用各种方式对完工的焊接件进行检验,其中包括一个制备好的贯穿焊接部位的金相截面。通常需要进行贯穿整个母材、热影响区及焊接金属的硬度测试。

• 产品质量控制

采用这种类型的测试,对一定数目的具有代表性的焊接件截取断面并对这些断面进行检验,将这些断面截取与检验作为整个生产过程的一部分。

• 失效分析

• 研究与开发

两个层面的金相检验

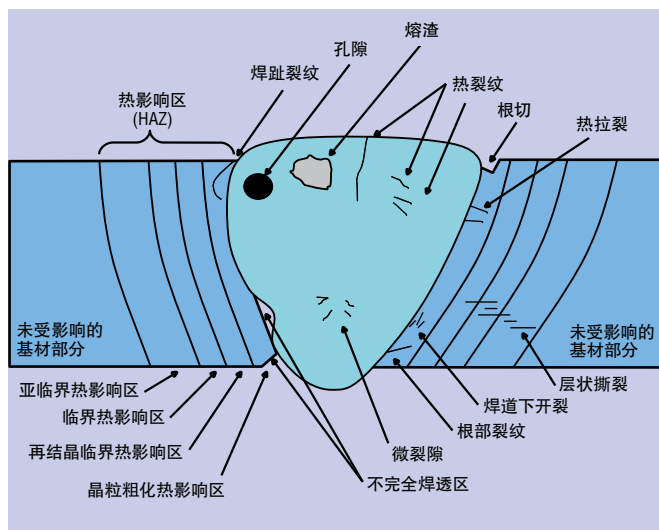
通常,要对贯穿焊接件的金相试样进行两个不同层面的检验:

宏观层面: 采用最大到50倍放大倍率的体视显微镜进行检验。

微观层面: 采用放大倍率更大(最大到1000倍)的光学显微镜进行检验。

宏观检验通常在贯穿焊接部位的不镶样截面上进行,且仅采用切割和粗/精研磨技术。最终的表面光洁度足够用于浸蚀,接下来,对焊接件的宏观特征进行检验。

对于微观检验技术及焊接件截面贯穿硬度测试而言,试样必须经过抛光,表面平坦。这涉及到切割、镶样、研磨和抛光。从制备一开始就必须清楚过程中任一阶段都有可能引入制样瑕疵。对于焊接截面而言尤为如此,因为不仅在相对短距离内焊接件会发生显微组织变化,而且,焊接件还可能会涉及到显微组织/性能不同金属之间的连接。



图中指明了单道焊接件中热影响区的不同区域可能出现的焊接缺陷

焊接件微观截面金相制备方法介绍

切割

对于大多数的焊工鉴定试验而言，一般都建议从起焊点到终焊点贯穿切割获得宏观焊接件截面。正是在这些位置上，技术方面不熟练的焊工容易发生焊接缺陷。

对于可焊性及其他方面的研究而言，截面必须真正具有代表性。通常，采用火花切割进行初步切割。例如，可采用该技术从一个较大的工件上截取适用的焊接试样，然后，采用磨料湿切割工艺切割宏观/微观断面，注意免受初始热切割所产生的热损伤影响，这个极为重要。

为了将切割造成的变形降至最低且避免对切割表面造成热损伤，采取以下措施非常重要：

- 选用合适类型的砂轮
- 采用合适的进给速度
- 在切割过程中要保证足够的冷却液供应

镶嵌

一般而言，由于时间方面的限制，及较好的初磨表面通常足以满足宏观检验需要，用于过程测试的宏观截面都采用非镶嵌试样。如果可选用半自动制备方法的，则有多种可以适应非镶嵌焊接件截面的试样夹具。如果有必要进行镶样，则可选用热压镶嵌或冷镶嵌。然而，在检验较大焊接件截面时进行镶嵌，可采用司特尔UnoForm矩形冷镶嵌模组，其可容纳尺寸高达120x60x45mm的截面。

机械制样

宏观截面

以往，用于宏观检验的焊接件截面一般都采用依次细化的SiC砂纸通过手工方式制备，最终的抛光砂纸为1200#。

通常情况下，对于贯穿母材、热影响区及焊接金属的硬度测试而言，采用这种方式也就足够了。这种方式还适用于进行宏观浸蚀以及焊接件试样宏观检验。SiC砂纸由于其使用寿命（1-1.5分钟）的原因具有一定的应用局限，而且这种局限性会随着试样横截面尺寸的增大而更为显著。

作为替代手工制样的研磨/精磨技术，司特尔MD-Piano磨盘具有一系列优势：

- 磨削寿命更长
- 可在相当长的时间内保持恒定的材料磨削率
- 适用材料硬度范围宽 (HV150-2000)
- 更经济

MD-Piano磨盘是一种树脂粘结金刚石磨盘，其被开发用于HV150-2000硬度范围材料的粗磨与精磨。而且，这种磨盘的粒度与80#，120#，220#，600#和1200#SiC砂纸相当。

微观截面

由于在焊接过程中发生相变或由于焊接件中含有不同金属等原因，焊接件试样可能会在材料硬度方面存在广泛的差异。焊接金属有可能会包含较硬的析出相或某些



碳钢中贯穿MIG焊接件的研磨及浸蚀后宏观截面，采用4%Nital试剂进行浸蚀。明场，6.5x

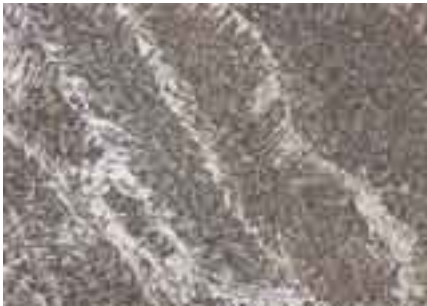
固有的焊接缺陷。因此，采用合适的制备方法以确保显微组织的浮突最小并保持所有的显微组织基本元素非常重要。在这种情况下，最好采用自动或半自动制备设备，因为可保证提供抛光一致性及可重复性，从而保证显微组织分析的精确性。本文不能对所有焊接材料的金相制备方法都进行详细介绍。但是，下文将介绍其中的4种主要方法，这些方法涵盖了比较常用的焊接材料。

碳钢与低合金钢焊接件				
步骤	PG	FG	DP 1	DP 2
表面	MD-Piano 220	MD-Allegro	MD-Plus	MD-Nap
悬浮液		DiaPro Allegro/Largo	DiaPro Plus	DiaPro NapB
润滑剂	水			
每分钟转数	300	150	150	150
力(牛顿)	150	210	180	150
时间	1 分钟	4 分钟	4 分钟	1 分钟

适用于夹持在试样座中6个镶嵌试样，30毫米直径。作为DiaPro的代用品，可将9μm、3μm及1μm DP-悬浮液 P与蓝色DP-润滑液结合使用。



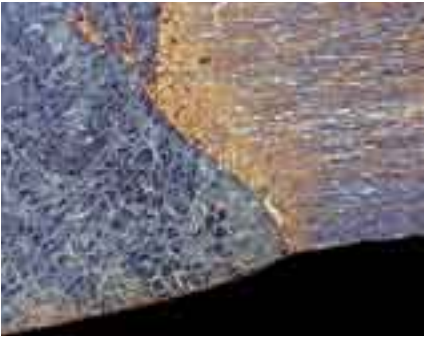
不同焊接件的矩形镶嵌试样



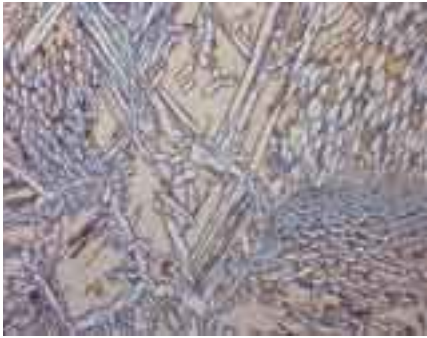
MAG焊接碳钢的抛光与浸蚀后微观截面。显微组织包括针状初晶铁素体，采用2% Nital试剂进行浸蚀。明场，200x

不锈钢焊接件				
步骤	PG	FG	DP 1	DP 2
表面	SiC-Paper 220#	MD-Largo	MD-Dac	MD-Chem
悬浮液		DiaPro Allegro/ Largo	DiaPro Dac	OP-AA
润滑剂	水			
每分钟转数	300	150	150	150
力(牛顿)	150	180	150	120
时间	1 分钟	5 分钟	4 分钟	2 分钟

适用于夹持在试样座中的6个镶嵌试样，30毫米直径。可用MD-Plan代替MD-Largo。作为DiaPro的代用品，可将9μm及3μm DP-悬浮液P与蓝色DP-润滑剂结合使用。可采用MD-Nap和DiaPro NapB取代MD-Chem和OP-AA。



双相不锈钢的焊接件-基材金属界面。机械制备；采用40%氢氧化钠水溶液进行电解浸蚀。明场，25x



相同的材料。焊接件显微组织主要包括δ铁素体和奥氏体。明场，200x

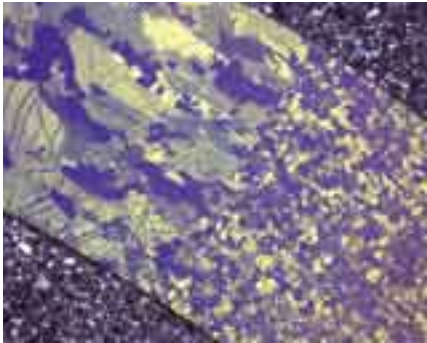
钛焊接件			
步骤	PG	FG	OP
表面	SiC-Paper 220#	MD-Largo	MD-Chem
悬浮液		DiaPro Allegro/Largo	OP-S*
润滑剂	水		
每分钟转数	300	150	150
力(牛顿)	150	180	120
时间	1 分钟	5 分钟	5-10 分钟

适用于夹持在试样座中的6个镶嵌试样，30毫米直径。作为DiaPro的代用品，可将9μm DP-悬浮液 P与蓝色DP-润滑剂结合使用。

*注：OP-S添加有10-30% (体积) 过氧化氢(30%)



焊接区域。一级钛中的全熔透焊接件机械抛光截面。焊接件显微组织含有α相魏氏组织。带有灵敏调色片(λ 1/4-plate)的偏振光，50x



相同的材料。母材-热影响区界面。带有灵敏调色片(λ 1/4-plate)的偏振光，50x

铝焊接件 (搅拌摩擦焊)				
步骤	PG	FG	DP	OP
表面	SiC-Paper 320#	MD-Largo	MD-Mol	MD-Chem
悬浮液		DiaPro Allegro/ Largo	DiaPro Mol	OP-S
润滑剂	水			
每分钟转数	300	150	150	150
力(牛顿)	120	150	120	100
时间	1 分钟	5 分钟	4 分钟	1-2 分钟

适用于夹持在试样座中的6个镶嵌试样，30毫米直径。作为DiaPro的代用品，可将9μm及3μm DP-悬浮液 P与蓝色和红色润滑剂结合使用。



铝搅拌摩擦焊，用Barker技术电解浸蚀，15V电压持续3分钟。带有灵敏调色片(λ 1/4-plate)的偏振光，25x



电解抛光/浸蚀

有时，在车间生产控制应用中，为了获取焊接件横截面试样使用的电解抛光/浸蚀，以满足宏观检验的需要。这时，在砂轮切割机上切取截面，接下来，在单次研磨阶段完成之后，对试样进行电解抛光和浸蚀以制取合适的宏观检验截面。这种技术的优势体现在以下几个方面：

- 速度快
- 操作简便
- 接触酸性浸蚀剂最少
- 更适用于那些单纯采用化学方法不易进行浸蚀的不锈钢及其他类型的金属

对于那些需要进行精细显微组织分析の場合，应将试样用1000#砂纸研磨后再进行电解抛光与浸蚀。



Inconel625合金的微脉冲钨极惰性气体保护焊试样的机械抛光与电解浸蚀截面，采用10%的草酸进行浸蚀；电压为10伏特，持续10秒。明场，2.5x



相同的材料。焊接件中的显微组织包括初晶固溶体及细小未溶相。截面显示：基材中熔合面附近基材出现显著的晶粒粗化。明场，10x

浸蚀

各种材料的常见焊接试样用化学浸蚀剂和电解浸蚀剂列举如下。

材料	浸蚀剂	备注
碳钢与低合金钢	100 ml 乙醇(95%) 或甲醇(95%) 1-5 ml 硝酸(Nital)	良好的通用试剂；可增加到15 ml硝酸以用于宏观浸蚀
	100 ml 蒸馏水 10 g 过硫酸铵	良好的宏观浸蚀
不锈钢	480 ml 蒸馏水 120 ml 盐酸 (32%) 50 g 三氯化铁	宏观浸蚀
	100 ml 蒸馏水 10 g 草酸	以4-6伏特电压进行电解浸蚀，持续数秒
	100 ml 蒸馏水 5 ml 硫酸 (95-97%)	以2-4伏特电压进行电解浸蚀，持续数秒
镍合金	100 ml 蒸馏水 5 ml 硫酸 (95-97%)	以3-6伏特电压进行电解浸蚀，持续数秒
铜合金	100 ml 蒸馏水 10 ml 氢氧化铵 (25%) 及几滴过氧化氢水溶液 (3%)	现制现用
铝合金	100 ml 蒸馏水 15 g 氢氧化钠	宏观浸蚀

当处理化学试剂及使用化学浸蚀剂时，遵循推荐的安全规范非常重要。

金相学

宏观截面

通过浸蚀后的宏观截面可鉴定出焊接件金属的边界、热影响区、熔合边界、晶粒生长、多道焊接中的每一道，以及诸如裂纹、气孔、孔洞、不完全焊透及未熔穿等焊接缺陷。



深熔深带焊碳钢的宏观截面。截面采用5%的硝酸化乙醇腐蚀液进行浸蚀。明场，2.5x

微观截面

焊接件上某些更为常用的金相检验方法现详细介绍如下：

面积分数/采用计点法进行各个组成相鉴定及其面积分数的计算，如奥氏体不锈钢焊接件中 δ 铁素体。



明场，100x



明场，500x

奥氏体不锈钢焊接件的抛光浸蚀截面显示出岛状 δ 铁素体及小面积的珠光体



晶粒尺寸/焊接件金属与热影响区中晶粒粗化区与细化区的晶粒尺寸测量。

铝焊接件显示出焊接件、基材金属与热影响区中各种显微组织。
浸蚀剂: 100 ml 蒸馏水+2 ml 氢氟酸。
明场, 100x

硬度鉴定—通常贯穿母材、热影响区及焊接件金属进行硬度/显微硬度测试, 以确保焊接区及热影响区的材料均达到相关要求。



钢焊接件



焊接件金属与热影响区中显微组织转变产物的**类型/形象/鉴别**。

双相不锈钢焊接件中的热影响区。
采用40%氢氧化钠溶液进行电解浸蚀。
明场, 200x

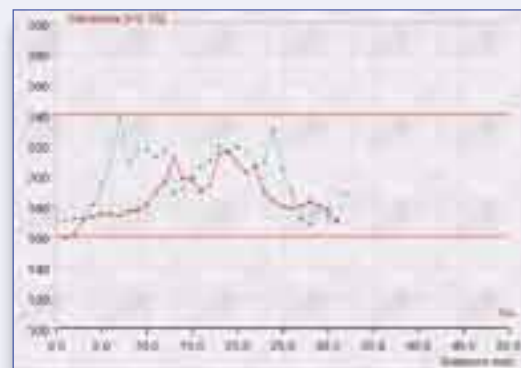


焊接件固有缺陷的分析/鉴定及特征描述。

自动MAG焊接钢部件的表层下气孔。采用10%硝酸—乙醇腐蚀液进行研磨与浸蚀。
明场, 2x



带有硬度压痕的焊接件
(根据 DIN EN 1043标准)



曲线显示了用Duramin-A300测量获得的硬度变化



低合金钢角焊接件下的热影响区裂纹。
明场, 5x



奥氏体不锈钢焊接件中的气孔。
明场, 100x

总结

本文对焊接件试样金相制备应用进行介绍。需要根据焊接件材料的物理属性选择合适的制备方法。在制备过程的所有阶段都必须小心谨慎行事以确保焊接件区域的显微组织及性能的正确分析结果，这一点非常重要。

应用说明

焊接件的金相制备

Bill Taylor, Anne Guesnier, Struers A/S
丹麦, 哥本哈根

致谢

我们向Struers S.A.S的Brigitte Duclos 女士表示感谢！感谢她为我们提供第7页中所示的显微照片：

铝焊接件显示出焊接件、基材金属及热影响区中各种显微组织。

双相不锈钢焊接件中的热影响区。

奥氏体不锈钢焊接件中的气孔。

参考文献

Process and Physical Metallurgy 《工艺与物理冶金》；
J. E. Garside
2nd Edition 1967.

Metallographic and Materialographic Specimen Preparation
《金相试样与材相试样制备》，K. Geels, ASTM, 2007.

Metallographic etching 《金相浸蚀》. 2nd Edition, G. Petzow, ASM,
Metals Park Ohio, 1999.



司特尔(上海)国际贸易有限公司
中国上海市杨浦区大连路970号
海上海9号楼702室
邮编: 200092
电话: +86 (21) 5228 8811
传真: +86 (21) 5228 8821
struers.cn@struers.dk

Struers A/S
Pederstrupvej 84
DK-2750 Ballerup, Denmark
Phone +45 44 600 800
Fax +45 44 600 801
struers@struers.dk

DEUTSCHLAND
Struers GmbH
Karl-Arnold-Strasse 13 B
D-47877 Willich
Telefon +49 (0)2154) 486-0
Telefax +49 (0)2154) 486-222
verkauf.struers@struers.de

ÖSTERREICH
Struers GmbH
Zweigniederlassung Österreich
Ginzkeyplatz 10
A-5020 Salzburg
Telefon +43 662 625 711
Telefax +43 662 625 711 78
stefan.lintschinger@struers.de

SCHWEIZ
Struers GmbH
Zweigniederlassung Schweiz
Weissenbrunnstrasse 41
CH-8903 Birmensdorf
Telefon +41 44 777 63 07
Telefax +41 44 777 63 09
rudolf.weber@struers.de

CZECH REPUBLIC
Struers GmbH
Organizační složka
Havlíčková 361
CZ-252 63 Roztoky u Prahy
Tel: +420 233 312 625
Fax: +420 233 312 640
david.cernicky@struers.de

POLAND
Struers Sp. z o.o.
Oddział w Polsce
ul. Lirowa 27
PL-02-387 Warszawa
Tel. +48 22 824 52 80
Fax +48 22 882 06 43
grzegorz.uszynski@struers.de

HUNGARY
Struers GmbH
Magyarországi fióktelep
Puskás Tivadar u. 4
H-2040 Budaörs
Phone +36 (23) 428-742
Fax +36 (23) 428-741
zoltan.kiss@struers.de

SINGAPORE
Struers A/S
627A Aljunied Road,
#07-08 BizTech Centre
Singapore 389842
Phone +65 6299 2268
Fax +65 6299 2661
struers.sg@struers.dk

JAPAN
Marumoto Struers K.K.
Takara 3rd Building
18-6, Higashi Ueno 1-chome
Taito-ku, Tokyo 110-0015
Phone +81 3 5688 2914
Fax +81 3 5688 2927
struers@struers.co.jp

CHINA
Struers Ltd.
Office 702 Hi-Shanghai
No. 970 Dalian Road
Shanghai 200092, P.R. China
Phone +86 (21) 5228 8811
Fax +86 (21) 5228 8821
struers.cn@struers.dk

USA
Struers Inc.
24766 Detroit Road
Westlake, OH 44145-1598
Phone +1 440 871 0071
Fax +1 440 871 8188
info@struers.com

CANADA
Struers Ltd.
7275 West Credit Avenue
Mississauga, Ontario L5N 5M9
Phone +1 905-814-8855
Fax +1 905-814-1440
info@struers.com

SWEDEN
Struers A/S
Smältvägen 1
P.O. Box 11085
SE-161 11 Bromma
Telefon +46 (0)8 447 53 90
Telefax +46 (0)8 447 53 99
info@struers.dk

FRANCE
Struers S.A.S.
370, rue du Marché Rollay
F- 94507 Champigny
sur Marne Cedex
Téléphone +33 1 5509 1430
Télécopie +33 1 5509 1449
struers@struers.fr

NEDERLAND/BELGIE
Struers GmbH Nederland
Electraweg 5
NL-3144 CB Maassluis
Tel. +31 (0) 10 599 72 09
Fax +31 (0) 10 599 72 01
glen.van.vugt@struers.de

BELGIQUE (Wallonie)
Struers S.A.S.
370, rue du Marché Rollay
F- 94507 Champigny
sur Marne Cedex
Téléphone +33 1 5509 1430
Télécopie +33 1 5509 1449
struers@struers.fr

UNITED KINGDOM
Struers Ltd.
Unit 25a
Monkspath Business Park
Solihull
B90 4NZ
Phone +44 0121 745 8200
Fax +44 0121 733 6450
info@struers.co.uk

IRELAND
Struers Ltd.
Unit 25a
Monkspath Business Park
Solihull
B90 4NZ
Phone +44 (0)121 745 8200
Fax +44 (0)121 733 6450
info@struers.co.uk

www.struers.cn