

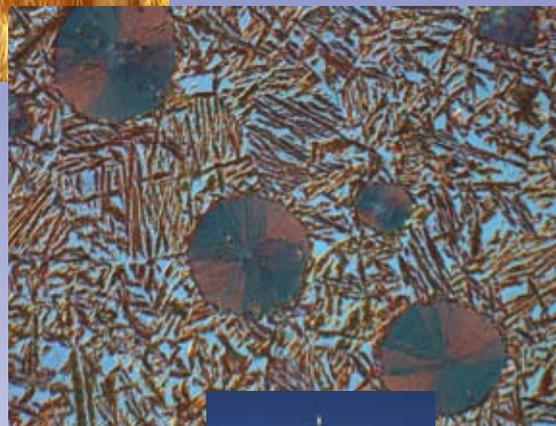
铁是种类最丰富的金属之一，可与碳及其它元素一起熔成合金，从而形成各种各样的铸铁与合金钢。中国早在公元前600年即开始制造铸铁，而欧洲则直到14世纪才掌握该技术。随着冲天炉技术的发展，铁的性能获得不断改进，其更加良好的可铸性拓展了日常生活中产品的应用范围。随着工业化的进程，铸铁已成为重要的建筑材料，自19世纪以来，许多建筑物都使用了铸铁材料，如：火车站、室内市场、以及植物园温室的拱顶，而钢铁桥梁与巴黎艾菲尔铁塔的出现，更表明铸铁在当时已得到广泛使用。



“铸铁”术语解释是指碳硅铁合金，通常含有2.5% - 4%的碳及1-3%的硅。铸铁是重要的工程材料，具有许多优点，主要包括优良的可铸性与切削加工性、以及适中的机械性能。

因其经济优势，铸铁广泛应用于汽车及机械工业领域。此外，特种铸铁

还可选用作海水泵泵壳、滚轧机轧辊、以及推土设备部件的材料。由于石墨形态对铸铁起着决定性的影响，因此，灰口铸铁的金相质量控制是加工过程中不可或缺一部分。使用标准的参考比较图表和/或图像分析技术，可通过未腐蚀的抛光样品确定石墨的形态、尺寸及分布。然后，根据技术标准，腐蚀样品，以检验基体的结构。



奥氏体回火球墨铁，
Beraha彩色蚀刻
DIC, 500x



金相制备的难点

切割：白口铸铁非常坚硬，因此，很难切割。

研磨及抛光：石墨材质柔软，要保持

其实际形状及尺寸较困难。铁素体和/或奥氏体铸铁的基体较易出现变形与划痕。



图1: 带片状石墨的灰口铸铁: 抛光不足 200x



图2: 与图1相同的铸铁, 抛光正确 200x

解决方案

- 立方氮化硼切割轮
- 较硬抛光布上的金刚石抛光与最终的氧化抛光

铸铁制造及应用

图6:排气歧管、致密石墨铸铁



制造

铸铁在化铁炉或感应炉（通常装满生铁、铸铁屑、钢屑及其它添加剂）中熔化。合金成分及冷却速率将影响铸铁是固化为灰口铸铁还是白口铸铁。

冷却速率快，将会导致白色结晶，并形成碳化铁(Fe_3C 或渗碳体)。在共析转变时，快速的冷却速率将加快形成珠光体，反之，较慢的冷却速率则会形成石墨及铁素体。

球，或回火碳。通过熔合与热处理作用，可调节铸铁性能，以适用于某些应用场合，如：通过熔合钼与镍，可提高其耐热与耐蚀性能。各种铸铁及其主要应用场合简述如下。

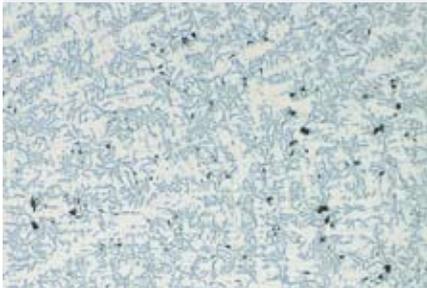


图3:带细片状石墨的灰口铸铁，未腐蚀 100x

带片状石墨 (FG) 的灰口铸铁，含有2.5-4%的碳、1-3%的硅及0.2-1%的锰。碳和硅可导致形成片状石墨及铁素体。微量的磷可提高灰口铸铁的流动性，并形成称为“斯氏体”的磷化物共晶体，而“斯氏体”可组成一种可提高耐磨性的类似网状的结构。片状石墨将在金属基体内形成凹口，从而降低其抗拉强度（特别是大片状时）。在非合金的灰口铸铁内，片状石墨精细均匀地分布在珠光体基体上，从而达到最佳的机械加工性能（参见图3、4）。



图4:珠光体基体下带片状石墨的灰口铸铁 200x

灰口铸铁具有较高的减振性，良好的滑动性及导热性，非常适合用作机座、钢琴阻尼片、发动机组、飞轮、活塞环、制动盘及鼓桶等。

带球状石墨 (SG) 的球墨铸铁，亦称作球墨铸铁，由相同原材料（如灰口铸铁）制作而成，但纯度要求更高。熔化时应避免含有铅、砷、锑、钛及铝，但应保持极微量的磷及硫。铸造前，往熔液内增加微量的镁，石墨将形成球状，而不是片状。

球墨铁的强度及柔韧性比类似混合物的灰口铸铁更高。球墨铁具备良好的机械加工性能，因此广泛应用于重载齿轮、活塞、滚压机轧辊、齿轮箱（图10）、阀门、管子及门铰链等。珠光体球墨铁是camand曲轴（曲轴经表面硬化处理，以增强耐磨性）的原材料（图8）。



图5:塑料压力铸造机器液压系统的ADI铸铁过滤器头

奥氏体回火球墨铁 (ADI)，即在840-950° C下对球墨铁进行奥氏体化，再在250-400° C下进行淬火处理，直至基体转化为奥铁体。这是类似针状的铁素体与渗碳残余奥氏体的混合物，从而赋予ADI铁较高的强度和柔韧性。其微观结构看似贝氏体，却不含碳化物。

高强度的ADI铁主要用作重型卡车、农场设备及推土设备的耐磨部件。ADI球墨铁还可用作承载动应力的部件，如：轴颈、齿轮传动件、曲轴、拖钩及轮毂等。

制作致密石墨铸铁 (GG) 所使用的原材料与制作球墨铁的材料相同。通过小心控制熔液中镁的添加量以进行球化处理，约80%的石墨形成致密石墨，而余下部分则形成石墨球。

因为石墨的形成非常关键，所以致密铸铁的质量控制非常重要。加工过程中，可接受略高的石墨球百分比，但应避免形成片状，因片状石墨将降低、甚至消除致密铸铁的优良性能。

致密石墨铸铁的强度、柔韧性、应力疲劳强度改变性能及抗氧化性均比灰口铸铁更好，更适宜于浇铸、机械加工，并具有更好的减震性能、导热性能，且在温度改变条件下的形状保持性能比球墨铁好。



图7:奥氏体回火球墨铁轮箱部件



图8: 曲轴、球墨铁

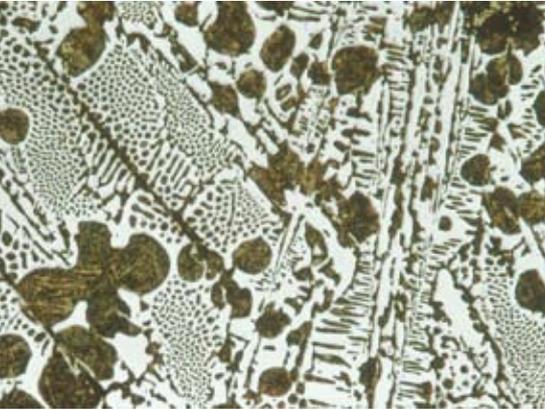
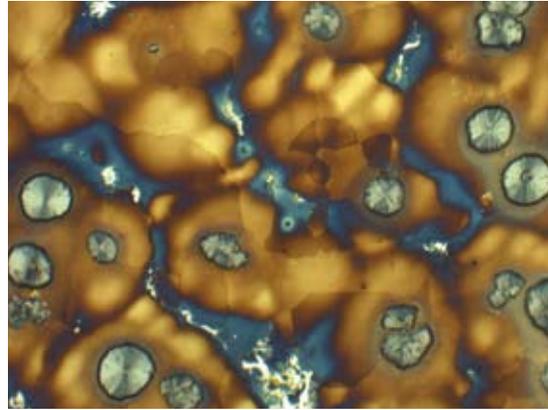


图9: 白口铸铁、带莱氏体的珠光体、奥氏体铸铁 (3% Nital+改进的Beraha's试剂的蚀刻) 200X



应用: 高速旋转柴油发动机汽缸盖、轮轴及齿轮箱、排气歧管(图6)、涡轮增压压机机座。

白口铸铁 内含1.8-3.6%的碳、0.5-1.9%的硅及1-2%的锰。较快的冷却速率可防止碳如石墨那样降解。相反, 碳在熔液中形成碳化铁 (Fe_3C , 又称渗碳体)。白口铸铁的结构由初生奥氏体转变而得的大块状珠光体与共晶莱氏体(室温为小粒状珠光体和白色渗碳体基体组成)(图9)。镍硬合金(8-9%的铬、5-6%的镍)具有马氏体基体(含铬碳化物)。

白口铸铁具有较高的抗压强度, 形成合金后将在高温下保持较高的强度及硬度。白口铸铁含有大量的碳化物, 特别是在形成合金后, 具有极佳的耐磨性。可用作喷丸清理的喷嘴、滚轧机轧辊、轧碎机、粉碎机及球磨机缸套等。

冷却外部灰口或球墨铁, 等内部逐渐冷却后, 即可以制成中心柔韧、表面坚硬的白口铸铁部件(冷硬铸铁)。

回火石墨(TG)的可锻铸铁

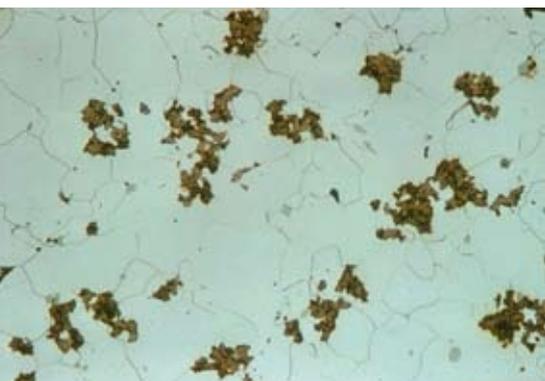
对白口铸铁进行热处理, 即可制造出可锻铸铁。通过两个阶段的长时间热处理(回火), 白口铸铁即可转变为铁素体或珠光体的可锻铸铁。首先, 碳化铁中的碳元素进入熔液, 然后通过逐渐冷却作用, 降解为不规则的石墨球, 即所谓的“回火碳”。

珠光体可锻铸铁可经过硬化处理。因为经济原因, 特别是因为应用领域非常接近, 可锻铸铁逐渐被球墨铸铁取代。

奥氏体铸铁

至少含有20%的镍及1-5.5%的铬的铸铁, 具有奥氏体基体(含有片状或球状石墨)。奥氏体铸铁可作为不锈钢的经济替代物, 因其浇铸方便, 因此, 特别适合薄壁、复杂形状零部件的精密铸造。

奥氏体铸铁的主要特性包括: 对海水及碱性介质的耐蚀性、高强度、及高温下的水垢热阻性。特别适合应用于海上环境, 如: 大型泵壳及脱盐装置的其它部件、化工厂的零部件套管与内衬、腐蚀性气体的压缩机、气涡轮及涡轮增压机的机壳。



铁素体可锻铸铁

200x



图10: 球墨铁差速齿轮箱

铸铁制备 难点

合金白口铸铁非常坚硬（维氏硬度：600），因此，很难切割（特别是大截面）。必须指出的是，无论其硬度如何，金刚切割轮均不适合切割白口铸铁。

铸铁样品制备时主要困难是如何使石墨保持最初的形状及尺寸。尽管显微镜下观察到的石墨图像为二维，但不要忘记它实际是三维结构。这意味着在研磨与抛光过程中，石墨的外形可能已发生轻微改变，而一定比例的石墨已经过非常微浅的切割，仅在基体内留下些微部分。因此，石墨的完整性不能完全保证是永远存在的。特别是大片状或片状结块更容易失去石墨。因此，无法始终保证石墨球留存或抛光完好。可锻铸铁中，石墨将以瓣状体或回火碳形式存在。此石墨形态极其脆弱，制备时，极难保持原态。



图11: 抛光不足, 使石墨球覆盖有玷污金属 200X

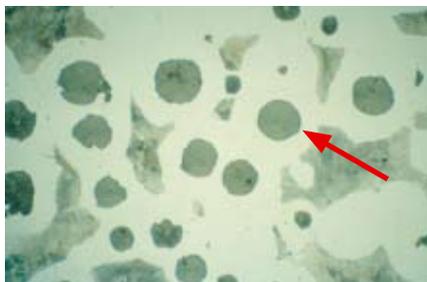
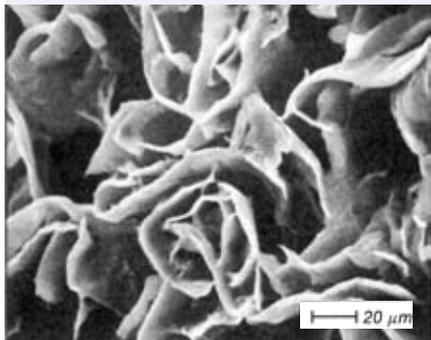
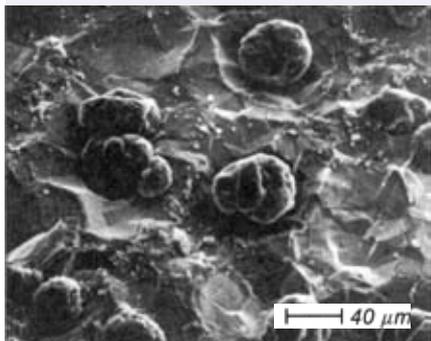


图12: 正确的抛光显示出石墨球的形状及尺寸适合评定 200X

一个普遍的制备错误是：研磨后弄脏的基体金属清除不够，而这将模糊石墨的实际形状及尺寸（比较图11及图12）。此情况对于容易出现变形及划痕的铁素体或奥氏体铸铁而言尤其普遍。对于这些材料而言，完全碳化硅抛光与终抛光非常重要。而在一些场合下，金相学分析是铸造质量系统中不可或缺的一部分，这进一步加大了对带石墨的铸铁进行制备的困难。



带片状石墨的灰口铸铁扫描电子显微镜照片



带石墨球的球墨铁扫描电子显微镜照片



图13: 试样夹具, 用于铸造生产线上质量控制样品的半自动抛光

因时间限制，通常，用手工方法很难使制备结果保持一致；而因试样几何尺寸的不同，自动制备方法也不是合适的选择方案。然而，由于试样的设计通常都是任意的，因此，可对其尺寸与形状进行改变，以满足自动制备系统的需要（图13）。一些制造商已成功地执行了此项方案，可进行更高效的制备，并提高对石墨的评定结果。

铸铁的大部分标准显微检查都是通过100x放大倍数来完成的，这可以使石墨显示为黑色。如碳完全留存，则只有使用更高的放大倍数才能检验出来。抛光完好的石墨呈灰色（图14）。

注意：带石墨的铸铁不适合电解抛光，因石墨会被电解液蚀掉。但是，如需要快速鉴别基体的微观结构，则可使用电解抛光及蚀刻（图15）。



图14: 抛光完好的片状石墨 500x

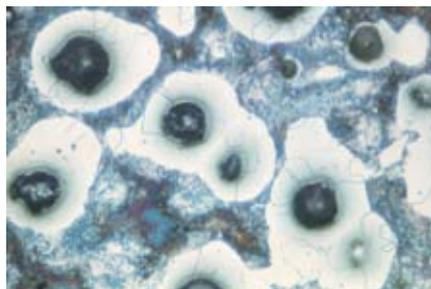


图15: 经电解抛光及蚀刻的球墨铁上可以看到石墨周围的珠光体基体及铁素体。石墨被冲掉。

研磨			
步骤	PG	FG	
表面	MD-Piano 220	MD-Allegro	
悬浮液		DiaPro Allegro/Largo	
润滑油	水		
转/分	300	150	
压力 (牛顿)	180	180	
时间	直至平滑	5分钟	

研磨			
步骤	PG	FG	
表面	SiC-paper 220#	MD-Largo*	
悬浮液		DiaPro Allegro/Largo	
润滑油	水		
转/分	300	150	
压力 (牛顿)	180	180	
时间	直至平滑	5分钟	

抛光			
步骤	DP 1	DP 2	
表面	MD-Dac	MD-Nap	
悬浮液	DiaPro Dac	DiaPro Nap B	
转/分	150	150	
压力 (牛顿)	240	180	
时间	4分钟	1-2分钟	

抛光				
步骤	DP 1	DP 2	OP**	
表面	MD-Dac	MD-Nap	OP-Chem	
悬浮液	DiaPro Dac	DiaPro Nap B	OP-U	
转/分	150	150	150	
压力 (牛顿)	180	120	60	
时间	4分钟	1-2分钟	1分钟	

表1: 白口铸铁制备方法

选择方案: DiaPro金刚石悬浮液可分别由P, 9 μm、3 μm及1 μm DP悬浮液代替, 同时使用蓝色润滑油

表2: 带石墨的铸铁的制备方法

*如留存石墨非常困难, 可尝试使用MD-Plan布进行精磨。

**此步骤可选。选择方案: DiaPro金刚石悬浮液可分别由P, 9 μm、3 μm及1 μm DP悬浮液代替, 同时使用蓝色润滑油

铸铁制备推荐方法

切割: 切割坚硬的白口铸铁时, 推荐使用立方氮化硼砂轮。对于大型切割而言, 自动切割比手工切割更高效。切割带石墨的铸铁: 根据需要切割的铸铁的硬度, 推荐选择氧化铝砂轮。

冷镶嵌: 质量控制样品通常是未冷镶嵌制备。为了对样品进行分析, 推荐使用热压冷镶嵌。对于柔软及中等硬度的铸铁, 推荐使用酚醛树脂 (MullitFast); 对于较硬类型的铸铁, 使用增强型树脂 (Iso-Fast, DuroFast) 更适宜。

研磨及抛光:

传统上, 一般使用碳化硅砂纸来研磨带石墨的铸铁。近年来, 金刚石研磨已代替碳化硅, 以对多部分铸铁进行精磨, 因其能保持样品平坦, 而并不凸现石墨 (比较图16及图17)。较硬的白口铸铁及ADI铸铁可使用金刚石(MD-Piano220)进行粗磨, 也可使用金刚石(MD-Allegro, 参见表1)进行精磨。柔软及中等硬度的铸铁 (带铁素体、奥氏体或珠光体基体) 可使用碳化硅砂纸进行粗磨, 使用金刚石(MD-Largo, 参见表1)进行精磨。

因抛光时, 铸铁极易遭到腐蚀, 因此推荐使用无水金刚悬浮液A, 及黄色润滑油。制备数据针对6样品 (30毫米), 样品装入试样夹具中。



图16: 使用金刚砂砂纸精磨灰口铸铁, 仍显示有刮擦痕迹。



图17: 同图16材料。使用金刚石在MD-Largo上进行精磨制备, 显示良好的边角防护效果。



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

清洁: 由于多数铸铁极易遭到腐蚀, 因此应使用冷却水快速清洁样品。样品在任何情况下都不得与水接触。推荐使用酒精进行全面清洗, 并使用强流暖气进行快速干燥处理。如仍然出现腐蚀, 则推荐使用无水酒精进行清洗。

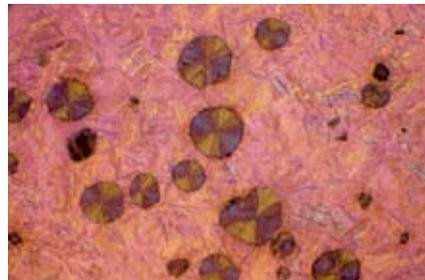
蚀刻: 最初, 应在无蚀刻下显微检查铸铁样品, 以评定石墨的形状、尺寸及分布情况, 以及可能存在的铸造孔隙度。最初评定结束后, 应对样品进行1 - 3% Nital的蚀刻处理, 以观察微观结构。根据合金成分, 可使用以下Beraha试剂, 以对蚀刻进行着色处理, 并可进行修改:
 100毫升水
 200毫升盐酸
 24克二氟化铵

100毫升的此储液添加1克焦亚硫酸钾
注意: 使用化学物品时, 必须遵守标准的安全防范规则!

结语

铸铁为铁基合金, 主要含有2.5%-4%的碳及1-3%的硅。碳或者以灰口铸铁内石墨的形态存在, 或者以白口铸铁内的碳化铁及合金碳化物的形态存在。金相制备的难点是如何使片状、球状、或以调制方式存在的石墨保持实际形状及尺寸。研磨时, 基体会玷污石墨, 除非进行十分彻底地金刚抛光, 否则, 将不会显示石墨的实际形状。带软铁素体基体的铸铁极易玷污、发生变形及刮擦。推荐使用碳化硅砂纸进行粗磨, 然后使用金刚石进行精磨及抛光。可选择使用硅胶进行简短的终抛光。

白口铸铁非常坚硬, 推荐使用立方氮化硼砂轮进行切割。



3% Nital, pol. light奥氏体球墨铁, 200X
 3% Nital蚀刻, pol.灯光

注意: 不得使用金刚切割轮, 应使用金刚石进行粗磨、精磨及抛光作业。集成在线铸造的半自动制备设备比手工制备效果更好, 因其石墨评定具有可靠性与可再现性。

作者

Elisabeth Weidmann, Anne Guesnier,
 Struers A/S, Copenhagen, Denmark

致谢

感谢德国比勒费尔德的CLAAS GUSS GmbH为我们提供样品材料, 并允许我们复制第1页的铸件照片、图5及图7。特别感谢Christine Bartels博士及Ute Böhm的慷慨支持。

感谢GF Eisenguss GmbH, Herzogenburg, Austria允许我们复制图6、图8及图10。感谢Zentrale für Gussverwendung, Düsseldorf允许我们复制第4页上的2张SEM照片。

参考书目

文献来自Zentrale für Gussverwendung,
 Düsseldorf

Vera Knoll, Gusseisen, 2003

金属手册. 简装版参考书. ASM, Metals Park, Ohio, 44073, 1997

ASM手册, 第9卷, 金相学及微观结构, ASM, 2004
 Schumann, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1968

Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, W. Domke,
 Verlag W. Giradet, Essen, 1977



USA and CANADA
Struers Inc.
 24766 Detroit Road
 Westlake, OH 44145-1598
 Phone +1 440 871 0071
 Fax +1 440 871 8188
 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.vught@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

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
 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

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
 Milady Horákové 110/96
 CZ-160 00 Praha 6 – Bubeneř
 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 Tiivadar u. 4
 H-2040 Budaörs
 Phone +36 (23) 428-742
 Fax +36 (23) 428-741
 zoltan.kiss@struers.de

SINGAPORE
Struers A/S
 10 Eunios Road 8,
 #12-06 North Lobby
 Singapore Post Centre
 Singapore 408600
 Phone +65 6299 2268
 Fax +65 6299 2661
 struers.sg@struers.dk