

# 不锈钢金相制样



## 应用说明

**抗腐蚀性钢**中铬元素含量至少为11%，并总称为“不锈钢”。这组高合金钢中可分为4种类型：铁素体、马氏体、奥氏体、以及奥氏体-铁素体（双重类型）不锈钢。这些分类描述了合金钢室温下的显微结构，合金成分对其结构具有重大影响。

不锈钢的主要特性是其抗腐蚀性。通过添加一些特殊的合金元素，将有助于改进不锈钢的其它性能，如韧性与抗氧化性，从而进一步提高其抗腐蚀性。如：添加铌和钛元素，可吸收碳并形成碳化物，从而提高其抗晶间腐蚀性；添加氮元素可提高其强度；添加硫元素，可形成微小硫化锰颗粒，产生机械加工薄切屑，从而提高其切削加工性。不锈钢因其卓越的抗腐蚀性能与表面加工性能，在飞机制造、化工、医药食品工业、专业炊具设备、建筑、甚至珠宝加工等产业领域占有非常重要的地位。



飞机制造工业中高性能不锈钢零部件

在不锈钢制造加工的所有质量控制过程中，金相分析是其不可或缺的重要组成部分。主要金相测试包括晶粒大小测试、 $\delta$ 铁素体与 $\sigma$ 相测定、碳化物测定与分布等。此外，在研究腐蚀/氧化作用机理的失效分析过程中，金相分析也是常用手段之一。



图一：用40%氢氧化钠水溶液进行电解浸蚀的双炼型钢，蓝色为奥氏体钢，黄色为铁素体钢

### 金相制样困难之处

**研磨与抛光：**铁素体与奥氏体不锈钢的变形与擦伤。碳化物与杂质的残留。



3 μm抛光后的不锈钢表面，图示为研磨产生的形变



色彩腐蚀(Beraha II)后，未充分抛光的不锈钢，图示为形变

100x

### 解决方案：

彻底的金刚石抛光与用硅胶或氧化铝的终级抛光



# 不锈钢的制造与应用

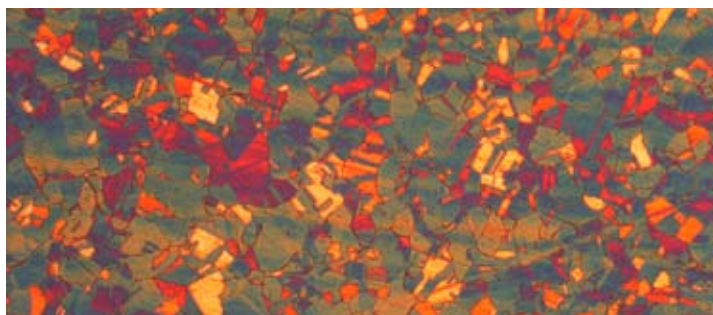
**高合金钢**的制造加工是一个熔化与再熔化的复杂过程。首先，将铁与经过完全分类的切屑混合物熔化于电弧炉中，然后铸造成钢锭或连铸成钢坯。在许多情况下，这些初成品将进一步加工为条状、棒状或板状结构。对于有更高质量要求的钢，初成品可用作二次加工的钢原料。二次加工是通过真空感应熔化与真空电弧再熔化或电渣再熔化，进行两次甚至三次再熔化的过程。再熔化过程亦可在压力或保护性气体环境下进行。二次加工的主要目的是降低杂质含量，如：氧化物、硫化物、与硅酸盐等，通过连续的再熔化过程提高纯度，从而制造出具有优良机械加工性能与物理性能的均质钢锭。

## 应用

不锈钢的抗腐蚀性在通过往铁中加入铬合金成份获得的，并取决于惰性表面氧化层的形成。当受到机械性损伤时，该氧化层可自发重建。腐蚀情况有各种不同类型，如点蚀、应力腐蚀、晶间腐蚀或振动腐蚀等。通过添加铬以外的合金元素，可提高某些特殊类型腐蚀的抵抗性能，如：添加钼元素将有助于提高抗点蚀性能。下面将简要介绍四种不锈钢的主要合金成分、性能及其应用实例。

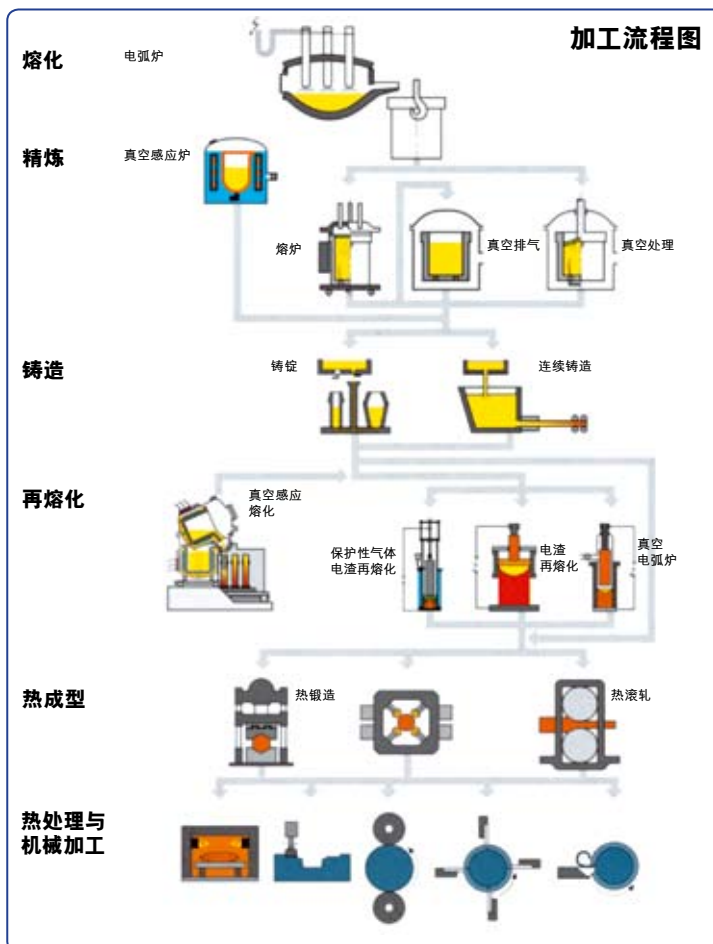
**铁素体不锈钢**：为不可热处理的合金钢，碳含量低、铬含量为11-17% 性能：具有磁性，可抗大气腐蚀，强度与刚度中等。 应用领域：电磁阀、刀片、轿车金属边饰等

**马氏体不锈钢**：为可热处理的合金钢，碳含量中等、铬含量为12-18%，镍含量为2-4%。性能：强抗腐蚀性，强耐高温性与抗蠕变性。应用领域：解剖刀、医疗手术刀、钩与手术镊、飞机传动装置系统及高性能部件等



图二：奥氏体钢，色彩腐蚀 (Beraha II)

100x



**奥氏体不锈钢**：不可热处理合金钢、碳含量0.03-0.05 %、主要合金元素为：铬（17-24 %）、镍（8-25%）、钼（2-4%）、并加入钛与铌以形成碳化物。性能：可延展性好、抗腐蚀性强、具有抗氧化酸、碱性、良好的冷成型性能、机械加工性能。 应用领域：螺钉、螺栓、人体移植、低温应用场合、化学容器与管道、医药食品工业、炊具设备等

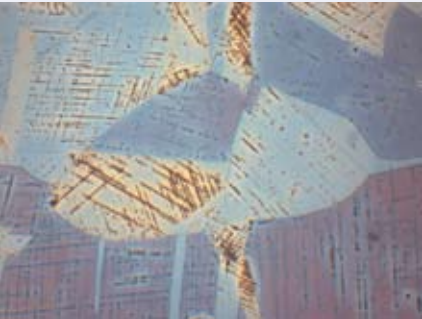
**奥氏体-铁素体不锈钢（双重类型）**：碳含量低、通常铬含量（21-24%），比奥氏体钢更高，镍含量（4-6%）更低，钼含量为2-3% 性能：腐蚀性介质环境下的抗疲劳性、良好的抗应力腐蚀性。应用领域：化工、环境与近海工程工业设备、建筑业





# 不锈钢制样困难之处

铁素体不锈钢柔软性好，而奥氏体钢延展性好。这两种钢都容易产生机械变形。终抛光工艺过程通常使不锈钢具有良好的反光效果，但是，如不进行完全预抛光，腐蚀后可能重新出现变形（如图3所示）。因马氏体不锈钢硬度高，所以相对较易抛光。一般而言，应注意保护不锈钢中的碳化物。



图三：奥氏体钢抛光不完全，腐蚀(Beraha II)后显示变形

## 不锈钢制样建议

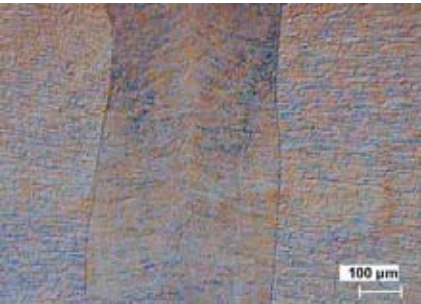
强烈建议对于柔软或具有扩展性的不锈钢，应避免使用非常粗糙的研磨纸或在高压环境下作业，因为这样可能导致深度变形。作为一般原则，对于粗磨，应使用与样品区域及表面粗糙度一致的精制粗砂。

通过使用金刚石在刚性盘 (Largo) 上、或使用某些类型的不锈钢在DP-Plan布上，进行精磨。精磨后，使用金刚石在一中度柔软的布上进行完全抛光，并用氧化硅(OP-S)或氧化铝(OP-AA)进行终抛光，以消除精磨擦痕。这一步必须进行得非常彻底，并可能需要花费几分钟时间。如终抛光进行得比较完善，则对比效果（参见“浸蚀”一节）可更好。如在研磨第一步就有形变，且未在精磨过程中得以消除，则该形变将始终留有痕迹，且不可能通过终抛光将其消除。不锈钢样品的制样方法如表1所

示，在半自动TegraSystem系统上制作30 mm的单个样品；表2则表示6个不锈钢样品的制样方法，使用Struers MAPS或 AbraPlan/AbraPol制作已镶或未镶的65x30 mm样品。

### 电解抛光

对于研究工作或快速全面结构检验而言，电解抛光与浸蚀是对不锈钢进行机械抛光的一个可选方案，因其不会产生机械变形。对于显微结构检查而言，应用电解抛光可以得到很好的结果（如图4所示），但该方案不适宜于碳化物的测定。碳化物容易被冲走或显得有所增大。在进行电解抛光之前，需在金刚砂纸上将样品手工研磨至至1000#砂纸。初始表面愈精细，电解抛光的效果就愈好（请参见下面的制样方法）。



图四：不锈钢焊点，电解抛光与腐蚀

电解液:	A3
面积:	1cm <sup>2</sup>
电压:	35V
流量:	13
时间:	25秒
External etching with stainless steel etching dish:	
10% aqueous oxalic acid	
Voltage:	15V
Time:	60 sec

电解抛光与不锈钢腐蚀的制样方法。用SiC纸320#、500#及1000#每分钟手工研磨一次。

步骤		PG	FG
	表面	SiC-砂纸 220#	MD-Largo
	悬浮液		DiaPro Allegro/Largo
	润滑液	水	
	转/分钟	300	150
	压力 [N]	25 /每试样	40 /每试样
	时间	按需要	5 分钟

### 抛光

步骤		DP	OP
	表面	MD-Dac	MD-Chem
	悬浮液	DiaPro Dac	OP-S/OP-AA
	转/分钟	150	150
	压力 [N]	20 /每试样	15 /每试样
	时间	4 分钟	2-3 分钟

注意: DiaPro 金刚石悬浮液可用DP金刚石悬浮液 P,9 μm与3 μm加蓝色润滑剂进行替换







表一： 不锈钢样品的制样方法如所示，在半自动 TegraSystem系统上制作30 mm的单个样本

## 浸蚀

浸蚀不锈钢需要一些经验与耐心。有关浸蚀剂方面的文献资料非常多，建议尝试各种不同方法以为某些特殊材料建立单独的储备液，这些特殊材料在实验室中经常需要制样。

由于不锈钢具有强抗腐蚀性能，因此需要使用强酸才能显示其结构。当对这些浸蚀剂进行操作时，务必遵守标准安全预防规程。在许多实验室中，文献中提到的浸蚀剂需根据要侵蚀的材料的性质作出相应修改，这种修改甚至超出个人偏好范围之外。为了达到较好的浸蚀效果，有必要进行全面的最终氧化抛光。

研磨

步骤		PG	FG
	表面	Stone 150#	MD-Largo
	悬浮液		9 µm
	润滑液	水	蓝色
	转/分钟	1450	150
	压力 [N]	300	300
	时间	按需要	9 分钟









结构图解

**铁素体不锈钢**不响应热处理, 但其性能受到冷工作环境下的影响。在室温下, 铁素体不锈钢具有磁性。其退火条件下的显微结构含有铁状颗粒, 其内嵌有细小的碳化物。用于机械加工的铁素体不锈钢含有大量的硫化锰以方便自由切割 (如图5所示)。

**马氏体不锈钢**响应热处理。通过快速冷却, 可形成马氏体, 然后通过回火处理可优化其性能。该合金具有磁性, 取决于热处理工艺过程的不同, 显微组织结构将在纯马氏体与精细回火马氏体之间变化。半成品合金成分不同, 尺寸各异, 从而要求各种热处理温度与次数。  
 $\delta$  铁素体 (如图6所示) 通常是一种多余的金属相, 因为在700 - 950° C温度之间, 铬含量很高, 不锈钢退火时间很长,  $\delta$  铁素体将变为硬脆的铁-铬金属间  $\delta$  相。加热高达1050° C后, 随即进行淬火, 将消除  $\delta$  相, 同时钢亦变脆。

抛光

步骤		DP 1	DP 2	OP
	表面	MD-Mol	MD-Nap	MD-Chem
	悬浮液	6 µm	1 µm	OP-S/OP-AA
	润滑液	蓝色	蓝色	
	转/分钟	150	150	150
	压力 [N]	300	150	150
	时间	6 分钟	4 分钟	2-3分钟

表二:6个不锈钢样品的制样方法, 使用Struers MAPS or AbraPlan/AbraPol制作或卸载 65x30 mm样本。

下面列出了几种常用的、被证明是有效的浸蚀剂。

化学腐蚀

注意: 使用这些化学试剂时, 请务必遵循相应的安全规程。

马氏体钢

925 ml乙醇  
25 g苦味酸  
50 ml盐酸

奥氏体钢

1) 擦洗浸蚀剂  
500 ml蒸馏水  
300 ml盐酸  
200 ml硝酸  
50 ml氯化三铁饱和溶液  
2.5 g氯化二铜

2) 100 ml水  
300 ml盐酸  
15 ml双氧水(30%)

3) V2A浸蚀剂

100 ml水  
100 ml盐酸  
10 ml硝酸

在室温或50° C环境下进行浸蚀

色彩浸蚀剂Beraha II

储备液  
800 ml蒸馏水  
400 ml盐酸  
48 g氟化氢铵  
对于100 ml该储备液, 添加1-2 g焦亚硫酸钾以进行浸蚀

电解浸蚀

**奥氏体-铁素体不锈钢 (双重类型)**  
40%氢氧化钠水溶液

不锈钢:

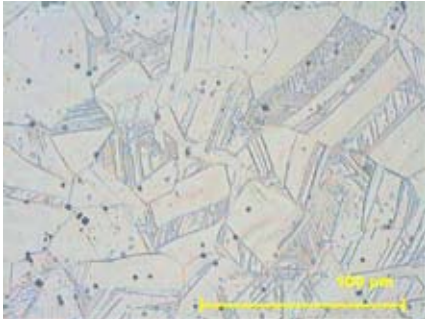
10%草酸水溶液



图五: 铁素体不锈钢含有硫化锰与多条的碳化物, 用10%草酸进行电解腐蚀后 200x



图六: 含有 $\delta$ 铁素体的回火马氏体不锈钢, 使用苦味酸浸蚀 75x

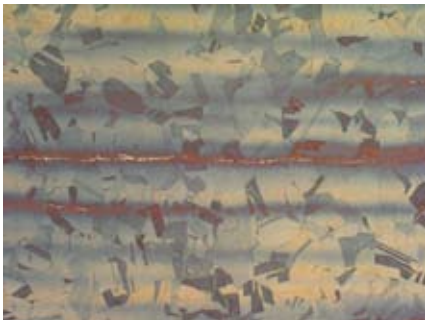


图七：冷却工作环境下的奥氏体不锈钢出现孪晶形态，使用V2A浸蚀剂浸蚀



图八：含有碳化物与钛、碳氮化物的奥氏体不锈钢

200x



图九：含有多条 $\delta$ 铁素体的奥氏体不锈钢，图示为显微偏析。蓝色区域：合金元素贫化

125x

**奥氏体不锈钢**不响应热处理，相反，快速冷却导致在最柔软的条件下形成产品。在该条件下，不锈钢没有磁性，且其性能受到冷却工作环境的影响。奥氏体不锈钢的显微组织结构含有奥氏体微粒，成孪晶形态出现（如图7所示）。将该不锈钢置于600-700° C温度环境下，将在奥氏体微粒内形成复杂的碳化物。从而导致奥氏体固体溶液中铬元素含量贫乏，于是，容易遭受晶间腐蚀或氧化作用。

通过将碳含量降至0.015%以下，并增加微量的钛与铌元素，可减小发生晶间腐蚀的风险，因为这些元素可在铬之前形成碳化物（如图8所示）。

马氏体临界热处理条件下或奥氏体冷却条件下可形成 $\delta$ 铁素体（如图9所示）。

**奥氏体-铁素体不锈钢**（双重类型）包括铁素体与奥氏体。40%腐蚀性苏打溶液中的电解浸蚀显示了不锈钢的组织结构，可估测每一相的正确百分比（参见图1、下面的图10）。该不锈钢具有双重结构，并在食品、造纸与石油工业中得以特定应用。



### 小结：

不锈钢是一种抗腐蚀性钢，含有较高的铬、镍元素成分。铁素体不锈钢较柔软、具有可延展性、在金相制样过程中容易产生机械变形与划痕。此外，不能自始至终保留碳化物。建议采取以下措施以确保机械抛光工艺良好

- 避免使用粗磨中的粗糙研磨剂。
- 用金刚石进行精磨与抛光时，应进行得彻底完全，确保消除粗磨中产生的全部变形。
- 用氧化硅或氧化铝进行最终的氧化抛光，以得到没有任何机械形变的表面。

在自动制样设备中完成的四步骤程序，其运行结果良好，具有重复性。对不锈钢进行化学腐蚀非常困难，建议使用非常强的腐蚀剂，并谨慎操作。

作为可选方案之一，建议使用电解抛光与腐蚀，这样，可以得到没有任何机械变形的金属表面，但不能保留碳化物。

图十：锻造的双重类型不锈钢，如图所示，为蓝色的铁素体、白色的奥氏体与细针状的 $\sigma$ 相图，用40%腐蚀性苏打溶液电解浸蚀

150x





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

## 应用注解

不锈钢金相制样

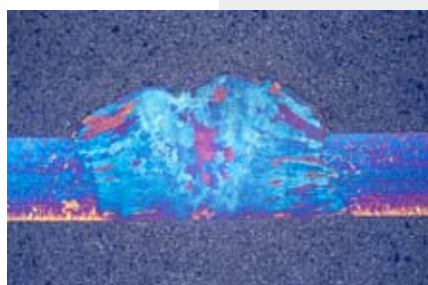
Elisabeth Weidmann, Struers A/S, Copenhagen  
Anne Guesnier, Struers A/S, Copenhagen  
Bill Taylor, Struers, Ltd., Glasgow, UK.

## 致谢

感谢奥地利Kapfenberg的Böhler Edelstahl GmbH为我们无私地提供帮助信息与样本材料，并允许我们翻印第1页中的照片，以及第2页中的加工流程图。特别感谢J. Hofstätter的合作，以及A. Dreindl提供的显微照片——图1、2、6、9与10。此外，感谢德国Willich, Struers GmbH的H. Schnarr博士提供的显微照片——图4与7。

## 参考书目

Schumann, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1968  
Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, W. Domke, Verlag W. Giradet, Essen, 1977  
Metals Handbook, Desk Edition, ASM, Metals Park, Ohio, 44073, 1985  
Color Metallography, E. Beraha, B. Shpigler, ASM, Metals Park, Ohio, 44073, 1977  
Handbuch der metallographischen Ätzverfahren, M. Beckert, H. Klemm, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1976  
Metallography, Principles and Practice, George F. VanderVoort, McGraw-Hill Book Company, 1984  
Merkblatt 821, Edelstahl Rostfrei-Eigenschaften Informationsstelle Edelstahl Rostfrei, Düsseldorf, BRD  
Metallographic instructions for color etching by immersion, E. Weck, E. Leistner, Deutscher Verlag für Schweisstechnik (DVS), Düsseldorf, 1983



Stainless steel weld  
etched according to  
Beraha II.

20x

## 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.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

## 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 – Bubeneč  
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**  
10 Eunus Road 8,  
#12-06 North Lobby  
Singapore Post Centre  
Singapore 408600  
Phone +65 6299 2268  
Fax +65 6299 2661  
struers.sg@struers.dk