

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2019.06.022

高压时效处理对熔渗态 Cu-W 合金组织及性能的影响

徐红¹, 赵军²

(1. 燕山大学电气工程学院, 河北秦皇岛 066004; 2. 北华航天工业学院材料工程系, 河北廊坊 065000)

摘要:对熔渗态 Cu-W 合金分别进行不同工艺的常压和高压时效处理, 利用金相显微镜、扫描电镜、透射电镜、硬度计及电阻率测试仪, 对比分析了两种时效工艺所获得合金的显微组织及力学和导电性能的差异, 探讨了高压时效处理对 Cu-W 合金组织及性能的影响。结果表明, 高压时效处理能增大 Cu-W 合金的致密度, 使组织中的析出相分布更加弥散细小, 改善了 Cu-W 合金的力学性能及导电性能。该合金经 950 °C×1 h 固溶后, 再在 3 GPa 压力下 500 °C 时效 1 h 处理可获得较高的硬度、压缩屈服强度及较低的电阻率, 分别为 164 HV、221 MPa 和 $4.415 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, 较相同工艺常压时效处理后合金的硬度和压缩屈服强度分别增加了 21.48% 和 31.55%, 而电阻率却降低了 8.89%。

关键词: Cu-W 合金; 高压时效处理; 组织; 性能

中图分类号: TG156; TG113

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2019)06-0601-05

Effect of High Pressure Aging Treatment on Microstructure and Properties of Infiltrated Cu-W Alloy

XU Hong¹, ZHAO Jun²

(1. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Department of Materials and Engineering, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China)

Abstract: The normal pressure and high pressure aging treatments of infiltrated Cu-W alloys by different processes were carried out. The microstructures, mechanical properties and electrical conductivity of the alloy obtained by two ageing processes were analyzed by means of metallographic microscopy, scanning electron microscope, transmission electron microscope, hardness tester and resistivity tester. The effect of high pressure aging treatment on the microstructure and properties of Cu-W alloy was discussed. The results show that high pressure aging treatment can increase the density of Cu-W alloy and the precipitate distribution in the tissue is more dispersed and finer, consequently, the mechanical properties and electrical conductivity of Cu-W alloy are improved. Higher hardness, compressive yield strength and lower resistivity of the alloy can be obtained by solid solution at 950 °C for 1 h and aging at 500 °C for 1 h at 3 GPa pressure, its values are 164 HV, 221 MPa and $4.415 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, respectively. The hardness and compressive yield strength of the alloy increased by 21.48% and 31.55%, but the resistivity decreased by 8.89% compared with that of the alloy treated by the same process under normal pressure.

Key words: Cu-W alloy; pressure aging treatment; microstructure; property

Cu-W 合金具有较高的耐压强度和良好的导电导热及抗熔焊性能等, 是制备新一代中压大功率真空开关触头和电阻焊电极的优良材料^[1]。目前, 制备 Cu-W 合金的方法主要是熔渗法及烧结法^[2,3], 但上述方法制备的 Cu-W 合金主要存在的问题是致密度较低^[4], 只有理论密度的 90%~95%, 且 W 相与 Cu 相之间的结合较差, 致使 Cu-W 合金的强韧性和导

热导电性降低。因此提高 Cu-W 合金致密性具有一定的实际意义。迄今为止, 国内外提高 Cu-W 合金致密性和 W 相与 Cu 相之间的结合强度的方法主要是活化烧结和烧结成形后热挤压加工^[5,6], 其中采用活化烧结方法可以提高 W 相与 Cu 相之间的结合强度, 但会使 Cu-W 合金的导电性降低^[7], 而采用烧结成形后热挤压加工方法可以提高 Cu-W 合金致密性^[8,9], 但该方法的制备工艺复杂且成本较高。据近期的文献报道^[10,11], 高温高压处理能改善铜合金组织及增大其致密性, 有效提高铜合金的性能。但关于铜合金在时效处理过程中施加高压力的研究尚未见报道。由于在高压作用下进行时效能增大材料的

收稿日期: 2019-02-25

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究重点项目(ZD2018239)

作者简介: 徐红(1967-), 女, 浙江金华人, 学士, 高级实验师。

研究方向: 金属材料性能。电话: 13012181685,

E-mail: gpsansan@sohu.com

致密性,同时也能使金属晶格产生畸变,造成金属组织内位错密度增大,这为时效过程中析出更加细小弥散分布的强化相提供了有利条件,从而增强了时效强化效果及改善了导电性能。再者,Cr元素能微量的溶于Cu基体中,在时效过程中,Cr能以细小的弥散质点析出,起到了强化合金的作用。鉴于此,本文在高压作用下对含微量Cr的Cu-W合金进行时效处理,并与常压时效处理作比较,探讨了高压时效处理对Cu-W合金硬度、抗压强度及电阻率的影响。

1 实验材料与方法

实验材料为熔渗态Cu-W合金,其化学成分 $w(\%)$ 为:46.49 Cu、53.24 W、0.27 Cr。将熔渗态Cu-W合金在高温箱式电阻炉内进行950℃×1h的固溶处理,冷却方式为水冷,再将固溶处理后的合金材料加工成所需实验样品的尺寸,分别进行高压和常压时效热处理,高压时效处理在面顶压机上进行,施加压力为3GPa,分别在时效温度400、450、500、550、600℃时效1h,确定最佳时效温度后,在最佳时效温度分别时效0.5、1、2和3h,断电卸压冷却至室温,高压装配示意图见图1。

常压时效处理在高温箱式电阻炉内进行,时效温度和时效时间与高压时效处理的相同,冷却方式为空冷。Cu-W合金的电阻率在电阻率测试仪上测试,样品尺寸为 $\phi 3\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,并用电子万能试验

机和维氏硬度计分别测试样品的抗压强度和硬度值,样品尺寸为 $\phi 6\text{ mm}\times 8\text{ mm}$,用测试样品的硬度值,上述实验数据均取3次测试结果的平均值。将上述实验试样制备金相样品,浸蚀剂用3% FeCl₃+10% HCl溶液,借助金相显微镜、扫描电镜(SEM-BSE)和透射电镜(TEM)对试样的微观组织进行观察分析。

2 试验结果与分析

2.1 显微组织

图2为不同状态下Cu-W合金的显微组织。可以看出,铸态Cu-W合金由Cu基体和白色的不规则W颗粒组成;经500℃时效1h的高压和常压时效处理后,Cu-W合金的组织特征变化不大。从SEM观察(图3)可见,与常压时效处理的样品相比,高压时效处理的样品Cu基体中的显微孔洞数量明显减少,致密性增大;由TEM观察(图4)发现,Cu-W合金经高压和常压时效处理后基体均有大量的细小粒状析出相,且高压时效处理样品的析出相较常压时效处理的细小弥散,经测试常压时效处理试样的析出相尺寸约2.2nm,而高压时效处理的析出相尺寸约1.7nm。经电子衍射分析表明,在Cu的面心立方衍射斑点附近存在一些Cr相的衍射斑点,可断定析出相为Cr粒子。这是由于高压力能使Cu-W合金中微孔洞受压弥合,减少了微孔洞数量,提高了合金的致密度,同时高压力也能引起晶格畸变,造成位错数量增多,这为时效处理过程中Cr粒子的析出提供

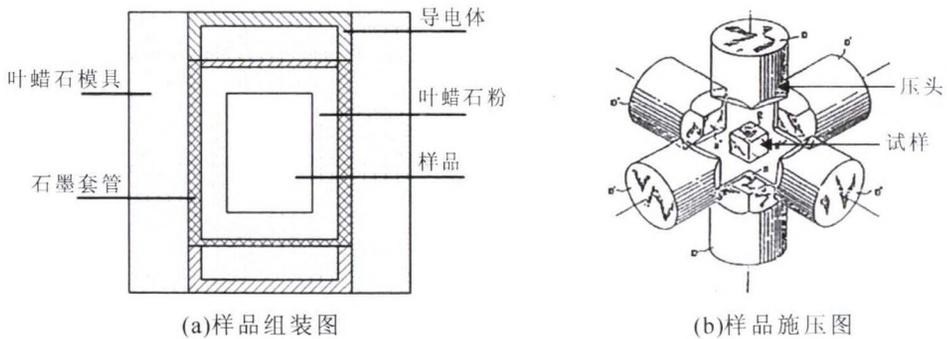


图1 高压装配示意图
Fig.1 Schematic diagram of high pressure assembly

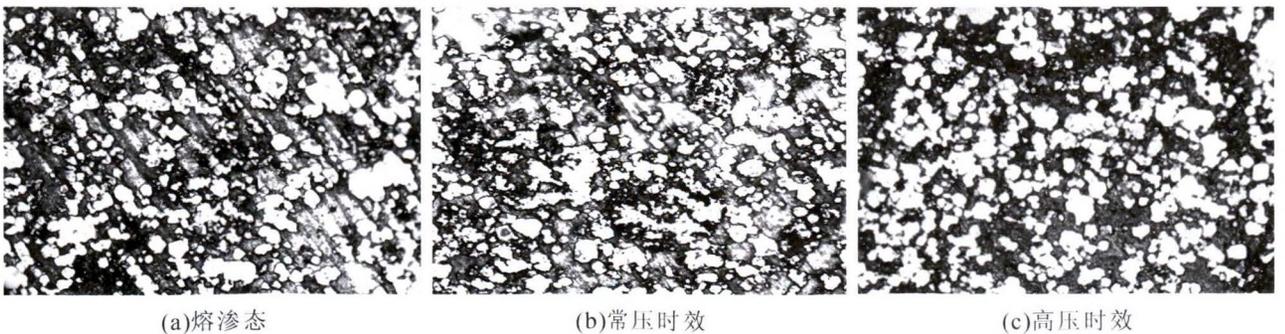
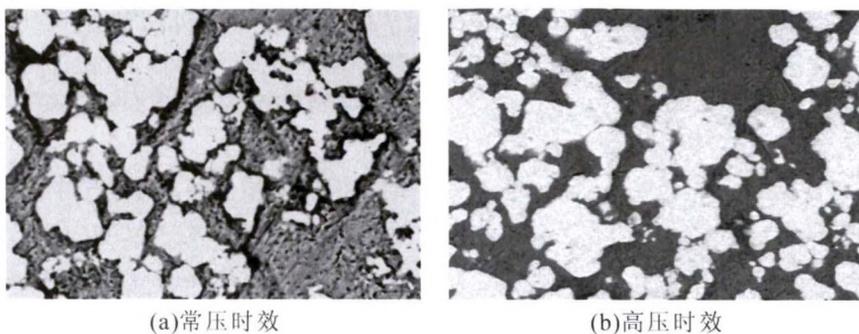
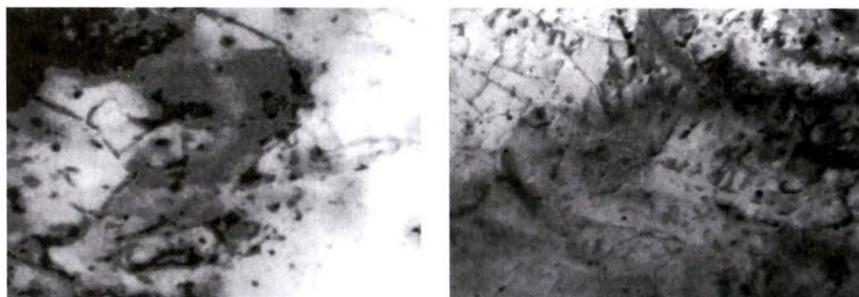


图2 Cu-W合金的金相组织
Fig.2 Microstructures of Cu-W alloy



(a)常压时效 (b)高压时效

图3 Cu-W 合金 SEM 背散射形貌图
Fig.3 SEM-BSE images of Cu-W alloy



(a)常压时效 (b)高压时效

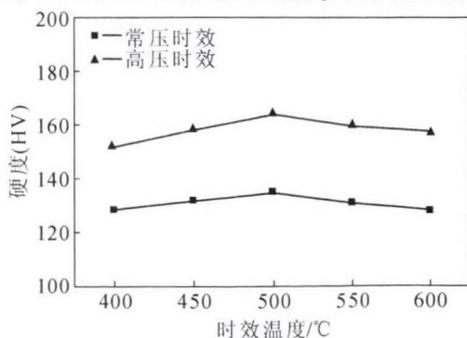
图4 Cu-W 合金的 TEM 照片
Fig.4 TEM images of Cu-W alloy

更多位置,从而增加了析出的 Cr 粒子数量,再者,原子的扩散系数在较高的压力作用下降低^[12],使得析出的 Cr 粒子不易长大,从而造成高压时效时析出的 Cr 粒子细小且分布更加弥散。

2.2 性能

2.2.1 硬度

图5为时效温度及时效时间与 Cu-W 合金硬度的关系曲线。可以看出,高压时效处理 Cu-W 合金的硬度值高于常压时效处理的硬度值,时效温度在 400~600 °C 范围内,两者的硬度值均随时效温度的升高先增大后减小,当时效温度为 500 °C 时,硬度达最大值。由图 5(b)可见,时效时间在 0.5~3 h 范围内,时效时间为 1 h 时,高压和常压时效处理 Cu-W 合金的硬度均呈现高值,但随时效时间的延长,两者的硬度值均随之降低,但高压时效处理合金硬度的下降较常压时效处理合金的缓慢。由实验数据



(a)时效温度与硬度关系(时效1h)

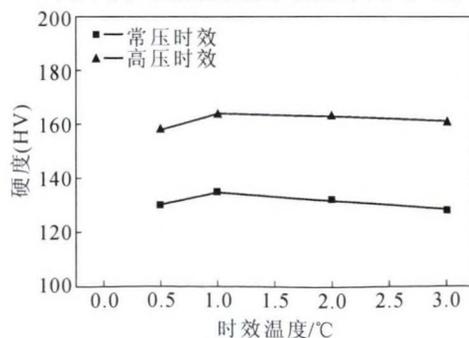
可知,经 500 °C 时效 1 h 的高压时效处理后,Cu-W 合金的硬度为 164 HV,较固溶处理后的(127 HV)和相同工艺常压时效处理合金(135 HV)分别提高了 29.13%和 21.48%。

2.2.2 抗压强度

图6为不同时效状态下 Cu-W 合金的应力-应变曲线,高压和常压时效工艺为 500 °C 时效 1 h。可见看出,高压时效样品的抗压能力高于常压时效样品的抗压能力。时效温度在 400~600 °C 范围内,随时效温度的升高,两者的屈服强度先增大后减小,当时效温度为 500 °C 时,硬度达高值。由测试结果可见,经 500 °C 时效 1 h 的高压时效处理 Cu-W 合金的压缩屈服强度为 221 MPa,较相同工艺常压时效处理合金的(168 MPa)提高了 31.55%。

2.2.3 电阻率

图7为时效温度及时效时间与 Cu-W 合金电阻



(b)时效时间与硬度关系(500 °C 时效)

图5 时效温度及时效时间与 Cu-W 合金硬度与的关系

Fig.5 Relationship between aging temperature and aging time and hardness of Cu-W alloy

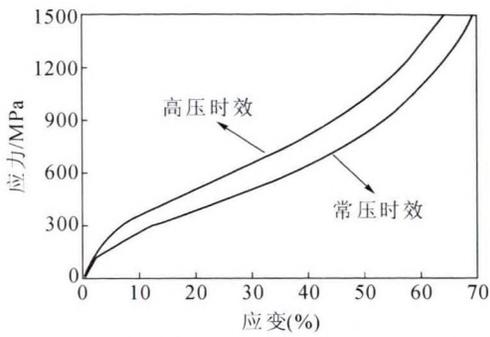
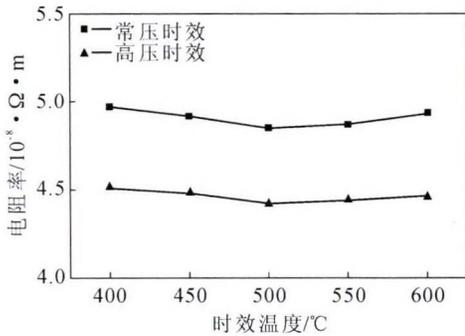
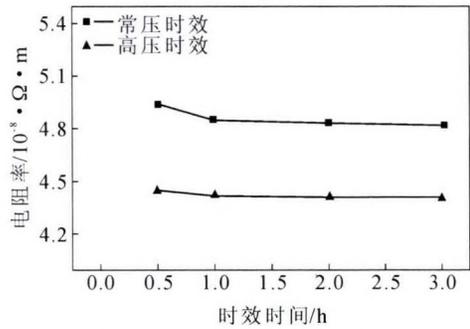


图6 不同时效状态下 Cu-W 合金的应力-应变曲线
Fig.6 Stress-strain curves of Cu-W alloy at different aging states



(a) 时效温度与电阻率关系(时效1 h)



(b) 时效时间与电阻率关系(500 °C 时效)

图7 时效温度及时效时间与 Cu-W 合金电阻率的关系

Fig.7 Relationship between aging temperature and aging time and resistivity of Cu-W alloy

大小及分布有关。根据公式^[13]:

$$\tau = 2Gb/\lambda \quad (1)$$

式中, τ 为切应力, G 为剪切模量, b 为柏格斯矢量, λ 为晶内粒子间距。

由上式可见, 粒子间距越小, 切应力就越大。高压时效处理 Cu-W 合金析出的 Cr 相分布更加弥散细小, 起到了较强的弥散强化作用, 同时 Cr 粒子间距较小, 造成位错绕过第二相质点所需的切应力增大, 产生更强的析出强化效果。再者, 高压时效处理 Cu-W 合金的致密度较高, 有效地提高了合金的抗压变形能力, 增大其硬度和抗压强度。因此, 高压时效处理 Cu-W 合金的硬度和抗压强度较高, 其值高于常压时效处理合金。由于温度越高 Cr 原子在 Cu 基体的固溶度越大, 当时效温度高于 500 °C 时, 部分析出的 Cr 粒子重溶, 而时效时间超过 1 h 时, 析出的 Cr 粒子将长大, 破坏 Cr 粒子与基体的共格关系, 导致强化效果减弱, 合金的硬度降低。至于时效时间超过 1 h 时, 高压时效处理合金的硬度随时效时间的延长的降低较常压时效处理合金的降低缓慢, 这可能是析出的 Cr 粒子在较高压力作用下较常压下不易长大的缘故。对于合金的电阻率来说, 由于影响合金电阻率变化的主要因素是固溶于基体中的溶质原子^[14], 固溶的溶质原子越多, 对电子的散射作用越强, 合金的电阻率越大。固溶处理后 Cr

率与的关系曲线。可以看出, 高压时效处理合金的电阻率低于常压时效处理合金的电阻率。时效温度在 400~600 °C 范围内, 当时效温度为 500 °C 时, 两者的电阻率达最小值。两合金在 500 °C 时效的电阻率随时效时间的增加而减小, 当时效时间超过 1 h 时, 电阻率降低幅度不大。经 500 °C 时效 1 h 后, 高压时效处理合金的电阻率为 $4.415 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, 较固溶处理后 ($4.991 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) 和常压时效处理的 ($4.846 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) 分别降低了 11.54% 和 8.89%。

金属材料的时效强化效果主要与析出强化相的

原子在 Cu 基体固溶数量较多, 所以固溶处理 Cu-W 合金的电阻率较大。时效处理后, 由于 Cr 粒子的析出, Cu 基体中固溶的 Cr 原子含量减少, 减弱了对电子的散射作用, 造成电阻率减小, 且随着时效时间的延长, 固溶的 Cr 原子含量不断减少, 使得 Cr 粒子析出速度变慢, 致使电阻率下降较平缓。但当时效温度超过 500 °C, 部分析出的 Cr 粒子又重新固溶于基体中, 造成合金的电阻率增大。再者, 高压时效处理提高了 Cu-W 合金的致密度, 减少合金内微孔洞数量, 因而减弱了因微孔洞对电子的散射作用, 这也是导致高压时效处理 Cu-W 合金的电阻率低于相同工艺常压时效处理合金的一个原因。

3 结论

(1) 高压时效处理能增大 Cu-W 合金的致密性, 使组织中的析出相更加弥散细小, 有效地提高了合金的力学性能及导电性能。

(2) Cu-W 合金经 950 °C × 1 h 固溶后, 再在 3 GPa 压力下 500 °C 时效 1 h 处理可获得较高的硬度、压缩屈服强度、热扩散系数及较低的电阻率, 分别为 164 HV、221 MPa、 $0.5425 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $4.415 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, 较相同工艺常压时效处理后合金的硬度和压缩屈服强度分别增加了 21.48% 和

31.55%,而电阻率却降低了 8.89%。

(3)该研究对提高 Cu-W 合金的力学及导电性能提供了新的途径,同时也丰富高压在铜合金领域的应用研究。

参考文献:

- [1] 陈世俊,段沛林. CuW 触头材料的制备 [J]. 电工材料, 2011(1): 27-30.
- [2] Wang Y L, Liang S H, Xiao P, et al. FEM simulations of tensile deformation and fracture analysis for CuW alloys at mesoscopic level [J]. Computational Materials Science, 2011, 50 (12): 3450-3454.
- [3] 张伟,邹军涛,白艳霞. Cu-W 合金熔渗过程的微观模拟与分析 [J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(10): 1746-1750.
- [4] 王珩,李素华,刘立强,等. CuW 电触头材料研究综述[J]. 电工材料, 2014(5): 11-17.
- [5] Liang S H, Wang X H, Wang L L, et al. Fabrication of CuW pseudo alloy by W-CuO nanopowders [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2012(516): 161-166.
- [6] Cao W C, Liang S H, Gao Z F, et al. Effect of Fe on vacuum breakdown properties of CuW alloys [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2011, 29 (6): 656-661.
- [7] 刘高峰,杨晓红,邹军涛,等. 活化元素对 CuW 材料热变形性能及组织的影响[J]. 电工材料, 2010(4): 15-19.
- [8] 黄友庭,陈文哲,汤德平. CuW70 合金动态和静态变形中组织与性能的研究[J]. 金属热处理, 2007(32): 258-262.
- [9] 许晓丰,刘天丰. 热静液挤压工艺对 WCu40 电极材料组织性能的影响[J]. 沈阳航空工业学院学报, 1998, 15(3): 14-19.
- [10] Chen Y, Li Y L, Liu J H, et al. Effect of 2GPa pressure treatment on the microstructure evolution of Cu-Zn alloy [J]. Materials Transactions, 2013, 54(2): 184-187.
- [11] 王海燕,李雅莉,谌岩,等. 高压处理对铝青铜组织与抗压强度的影响[J]. 高压物理学报, 2013, 27(4): 500-504.
- [12] 马玉泉,刘荣昌,张丽红. 高温高压处理对铸态 Cu-38.13Zn-0.21Al 合金热扩散系数及电阻率的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35 (s2): 24-28.
- [13] Singh S, Goel D B. Influence of thermomechanical aging on tensile properties of 2014 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Science, 1990(25): 3894-3900.
- [14] 王博,梁淑华,邹军涛,等. Fe 含量对铜合金组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(9): 1622-1625.



西安普胜机电设备有限公司

XIAN PUSHENG MECHANICAL & ELECTRICAL EQUIPMENT CO., LTD.,

西安普胜机电设备有限公司是专业从事仪器仪表、耗材、生产、销售、维护的科技公司。公司拥有高水平、高素质的科研生产团队和一流的销售、售后服务团队。

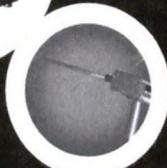
普胜公司秉承“诚信、务实、开拓、创新”的经营理念以满足客户的需要。以先进的技术和优质的服务,多年现场应用经验,为用户提供成熟的检测方案并为用户解决现场疑难问题。我们的坚持用户第一,信誉至上。

●主要产品 智能、高效、精确、快捷的型砂试验仪器

——实现您建造现代化型砂试验室的梦想!



炉前分析仪



测温仪

高精度炉前分析仪
便携式智能测温仪
LXH-1冷芯盒制样机
SSZ震摆式筛砂机
SYS-B砂型表面硬度计
ZSL智能热湿拉测试仪

STZ直读式透气性测定仪
ZTY智能透气性测定仪
SHY树脂砂混砂机
SWY液压强度试验机
GET-11型智能发气性测定仪

●其他产品: 高精度样杯 高精度快速热电偶 在线式系列非接触红外测温仪

●维修服务: 测温仪、炉前分析仪及各种电路板维修

地址: 710054西安市雁塔路南段99号

联系人: 王志兵 15009251740 电话/传真: 029-83255097

顾问: 西安理工大学教授 魏兵 13609155628

邮箱: zhuzao@163.com

仪器维修: 13309279348