DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2021.03.003

电弧熔炼 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料的摩擦磨损性能

李　蕊
(新乡职业技术学院 机械制造系，河南 新乡 453006)

摘　要： 采用电弧熔炼方法制备了 Cuss/Ni_3Si 复合材料，并对其微观结构和抗磨损性能进行了研究。结果表明，Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料组织均匀致密，主要由韧性的 Cu_{ss} 和金属硅化物 Ni_3Si 及 $Ni_{31}Si_{12}$ 亚稳相组成，具有良好的强韧性配合。Ni_3Si 与 $Ni_{31}Si_{12}$ 具有高硬度和强共价键，Cu_{ss} 具有良好的塑韧性、低摩擦和自润滑特性，因此 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料表现出优异的耐磨性。与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢相比，Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料具有更低的摩擦系数和磨损率，随摩擦载荷增加，摩擦系数降低（从 0.38 到 0.22），磨损率升高（3.92×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$到 9.36×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$）；相同条件下，Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料磨损率较 1Cr18Ni9Ti 不锈钢低近一个数量级。

关键词： Cu_{ss}/Ni_3Si；复合材料；电弧熔炼；耐磨性

中图分类号： TB331　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000-8365(2021)03-0172-04

Friction and Wear Properties of Arc Melted Cu_{ss}/Ni_3Si Composite

LI Rui
(School of Mechanical Manufacturing, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453006, China)

Abstract: Cu_{ss}/Ni_3Si composites were prepared by arc melting, the microstructure and wear resistance were studied. The results show that the Cu_{ss}/Ni_3Si composite has a uniform and dense structure, which is mainly composed of the ductile Cuss and metal silicified Ni_3Si and $Ni_{31}Si_{12}$ metastable phase, and has a good combination of strength and toughness. Ni_3Si and $Ni_{31}Si_{12}$ have high hardness and strong covalent bond, Cuss has good plastic toughness, low friction and self-lubrication characteristics, so Cuss/Ni3Si composite material shows excellent wear resistance. Compared with 1Cr18Ni9Ti stainless steel, Cu_{ss}/Ni_3Si composite has lower friction coefficient and wear rate. With the increase of friction load, the friction coefficient decreases (from 0.38 to 0.22), and the wear rate increases (from 3.92×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$ to 9.36×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$). Under the same conditions, the wear rate of Cu_{ss}/Ni_3Si composite is nearly one order of magnitude lower than that of 1Cr18Ni9Ti stainless steel.

Key words: Cu_{ss}/Ni_3Si; composite; arc melting; wear resistance

提高抗摩擦磨损性能对机械运动部件具有重要意义。在交通运输、石油化工、航空及航海等工业领域，许多零部件因工作在重载、腐蚀及高速摩擦磨损等环境服役而导致失效，研制并采用优异的耐磨材料制造摩擦副零部件是减少磨损的最有效途径之一[1-3]。金属硅化物 Ni_3Si 因具有低的密度，高的熔点，优异的耐腐蚀和抗氧化性能，作为高温结构材料得到广泛关注[4-5]。其高硬度、高的弹性模量及金属键与共价键共存的强结合键特性赋予了其良好的抗磨粒磨损与黏着磨损性能[6]。然而，像其他金属硅化物一样，严重的中低温脆性限制了其作为耐磨结构材料的应用[7-8]。引入韧性第二相复合化是提高金属硅化物韧性的有效方法[9]。铜基固溶体（Cu_{ss}）具有良好的塑韧性、导热性以及低的摩擦系数等综合特性，且与多数金属硅化物保持良好的高温相稳定性，被认为是耐摩擦磨损金属硅化物合金理想的增韧相[10-11]。王华明等[12-13]采用激光熔覆法制备了 Cu_{ss} 增韧 Cr-Cu-Si 三元金属硅化物合金，强化相 Cr_5Si_3-CrSi 和塑性相 Cu_{ss} 共存的复相结构使合金具有良好的强韧性和抗摩擦磨损性能。此外，Ni_3Si 作为沉淀强化相，使 Cu-Ni-Si 系铜基合金的强度和耐磨性大幅提高[14]。然而，对 Cu_{ss} 增韧 Ni-Cu-Si 三元金属硅化物合金及其耐摩擦磨损性能的研究报道较少。

本试验采用真空电弧熔炼法制备了 Cu_{ss} 增韧的 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料，并对其干滑动摩擦磨损性能及磨损机理进行了探讨，以期为相关研究提供依据。

1　试验方法

实验原料采用 Ni 粉、Cu 粉和 Si 粉，其纯度

收稿日期：2021-01-11

作者简介：李　蕊(1987—)，女，河南新乡人，学士，讲师. 研究方向：金属基复合材料的摩擦磨损性能研究.
Email：Lirui32@126.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

≥99.9%，粒度为 200 目，按照 Ni_3Si-10%Cu 的配比称取原材料，每个试样 20 g。将原料粉体放入真空不锈钢罐，采用行星式球磨机机械混合 4 h，球磨转速为 250 r/min，球料比为 10:1。将混合后粉体冷压成块，放入水冷铜坩埚中，利用真空电弧熔炼法制备 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料。对每个试样重复熔炼 5 次，以保证成分均匀性。

采用电火花线切割加工成 10 mm×10 mm×5 mm 的金相试样和摩擦磨损试样，经打磨抛光后利用体积比 $HCl:FeCl_3:H_2O$=2:1:1 的腐蚀液腐蚀金相试样。用 Olypus BX51M 型光学显微镜和 JEOL JSM-6700F 型场发射扫描电镜观察复合材料组织；利用 Rigaku D/Dmax-2400 型 X 射线衍射仪（选用 Cu Kα 靶材，扫描速度 5°/min，加速电压 35 kV，步长 0.02°）并结合能谱仪（EDS）进行物相鉴定和成分分析。利用 HVS-1000 型显微硬度计测试 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料的显微硬度，载荷 4.9 N，加载时间 10 s。

室温干滑动磨损实验采用 MFT-4000 型球−盘式高速往复摩擦磨损试验机，对磨材料为直径 6 mm 的 GCr15 轴承钢球。磨损实验载荷分别为 2、5、7 和 10 N，摩擦振幅 5 mm，摩擦频率 3 Hz，磨损时间 30 min。为了对比，选用 1Cr18Ni9Ti 不锈钢作为参比材料，在相同条件下测试其摩擦磨损性能。采用 Micro-XAM 型轮廓仪测试材料的磨损体积（V=AS，V 是磨损体积，A 为磨痕截面面积，S 为磨痕长度），并计算材料的磨损率（W=V/(LN)，L 为滑动距离，N 为摩擦载荷）。采用 JSM-6700F 型扫描电子显微镜结合能谱仪（EDS）观察磨痕表面形貌和微区成分。

2　结果与讨论

2.1　电弧熔炼组织

图 1 为电弧熔炼 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料的 X 射线衍射图谱，主要组成为金属硅化物 Ni_3Si、铜基固溶体（Cu_{ss}）和少量的 $Ni_{31}Si_{12}$。其中，$Ni_{31}Si_{12}$ 是一种复杂六方晶体结构的亚稳相，可通过高温退火转变为稳定的 Ni_3Si 相[15]。

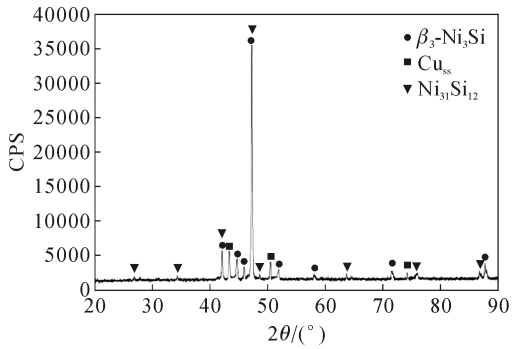


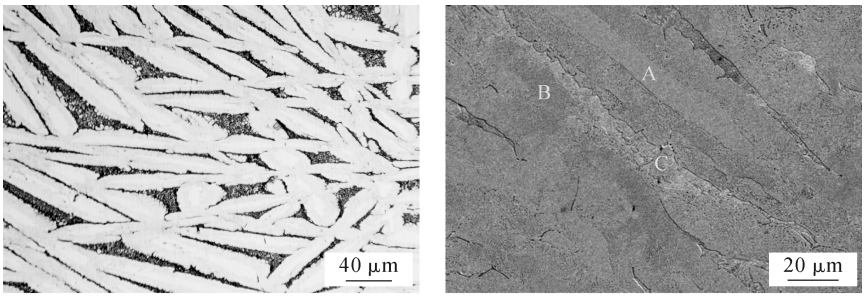
图 1　电弧熔炼 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料的 XRD 图谱

Fig.1　XRD patterns of Cu_{ss}/Ni_3Si composite prepared by arc melting

电弧熔炼 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料的组织如图 2 所示。可以看出，组织均匀致密，无明显的气孔、夹杂、微裂纹等缺陷，主要由白色树枝晶基体相和黑色枝晶间析出相组成。对图 2 中不同组成相进行成分分析，结果如图 3 所示。结合 EDS 和 XRD 的分析结果可以确定，白色基体相为 Ni_3Si 和 $Ni_{31}Si_{12}$ 亚稳相（枝晶心部），枝晶间析出相为铜基固溶体（Cu_{ss}）。根据 Ni-Si 二元合金相图，随温度降低，从液相中首先析出 $Ni_{31}Si_{12}$ 亚稳相，随后液相与 $Ni_{31}Si_{12}$ 在 1 170 ℃发生包晶反应形成 β_3-Ni_3Si 相。随温度降低，枝晶间残余液相中 Cu 元素逐渐富集，形成铜基固溶体（Cu_{ss}）。但由于凝固速度较快，包晶反应进行不充分，有少量 $Ni_{31}Si_{12}$ 残留。同时，非平衡快速凝固也导致所生成的铜基固溶体中 Ni 和 Si 元素的过饱和度较高，如图 3(c)所示。由金相分析法确定基体相（Ni_3Si 和 $Ni_{31}Si_{12}$）和铜基固溶体（Cu_{ss}）的体积分数分别为 87%和 13%。由于具有较高硬度的 Ni_3Si 和 $Ni_{31}Si_{12}$ 金属硅化物在复合材料中所占比例较大，且分布均匀，因而 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料具有较高的硬度（630 HV）。而在少量 Cu_{ss} 塑性相的增韧作用下，又使复合材料保持了一定的韧性。

2.2　Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料的磨损性能

在室温条件下，1Cr18Ni9Ti 不锈钢和

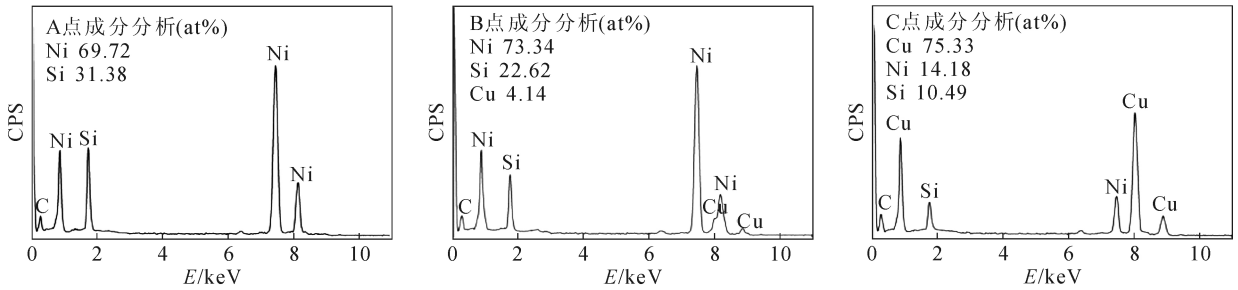


(a)光镜组织　　(b)SEM 组织

图 2　Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料的组织

Fig.2　Microstructure of arc melted Cu_{ss}/Ni_3Si composite

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



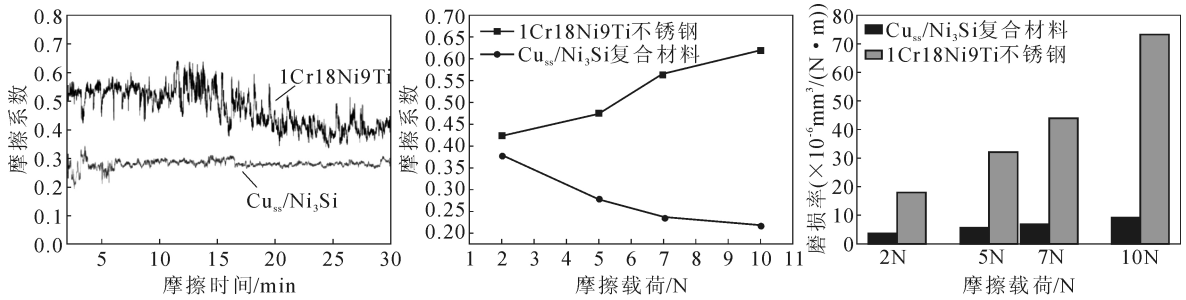
(a)A点EDS结果　(b)B点EDS结果　(c)C点EDS结果

图 3 电弧熔炼 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料的 EDS 成分分析结果(图 2 中的点)

Fig.3 EDS results of arc melted Cu_{ss}/Ni_3Si composite (point of Fig.2)

Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料与 GCr15 轴承钢球配副时的摩擦系数和磨损率随摩擦载荷的变化曲线,如图 4 所示。可以看出,在所有载荷下,Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料具有比 1Cr18Ni9Ti 不锈钢更低的摩擦系数和磨损率。随摩擦载荷增加,复合材料摩擦系数降低(从 0.38 到 0.22),磨损率逐渐升高(3.92×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$到 9.36×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$);相同条件下,1Cr18Ni9Ti 不锈钢的摩擦系数和磨损率随载荷增大快速增加,磨损率比 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料高出近一个数量级。同时,在相同载荷下(5 N),1Cr18Ni9Ti不锈钢 /GCr15 轴承钢摩擦副的摩擦系数较高, 且波动较大,在 0.35～0.65;而电弧熔炼 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料 /GCr15 轴承钢摩擦副的摩擦系数相对稳定,在 0.2～0.3,如图 4(a)所示。摩擦系数的变化通常与磨损表面特性密切相关[16]。图 5 为 1Cr18Ni9Ti 不锈钢和 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料在 5 N 载荷下磨损表面形貌。可见,1Cr18Ni9Ti 不锈钢磨损表面较粗糙,分布着明显的粘着层和犁沟状形貌, 这也导致其摩擦系数较高且波动较大; 相反,Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料磨损表面较光滑,无明显的犁沟、切削及粘着磨损特征,仅有轻微的擦伤。对 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料磨损表面进行 EDS 成分分析(图 5(c)),磨损表面主要由 Ni、Si、Cu、Fe 和 O 组成。Fe 元素的存在说明部分对磨材料 GCr15 轴承钢磨损转移到了复合材料表面上,而 O 元素的存在则说明在磨损过程中,由于摩擦热效应作用,磨损表面形成了部分氧化物,氧化物具有润滑作用,从而降低摩擦系数和磨损率。

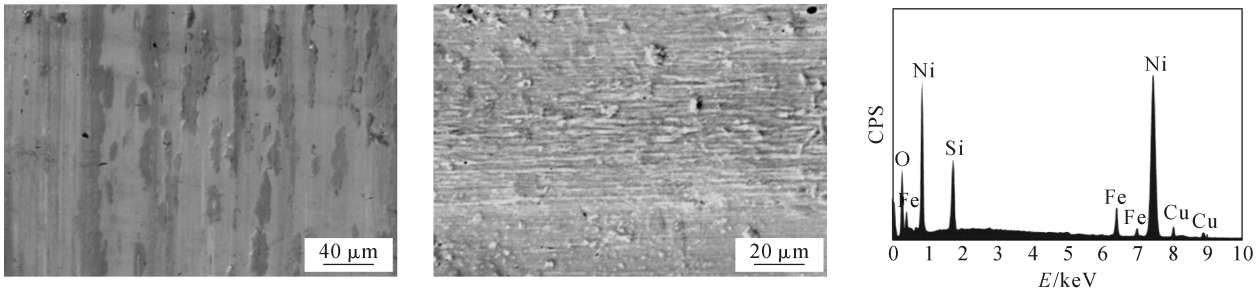
有研究表明, 材料的抗摩擦磨损性能与材料的硬度和断裂韧度成正比关系($W\propto K_{IC}^{-3/4}\cdot H^{-1/2}$,$W$ 为材料的磨损率,H 为材料的硬度,K_{IC} 为材料的断裂韧性)[17]。Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料表现出优异的抗摩擦磨损性能,主要是由于:①金属硅化物 Ni_3Si 和 $Ni_{31}Si_{12}$ 既



(a)摩擦系数随时间变化　(b)摩擦系数随载荷变化　(c)磨损率随载荷变化

图 4 1Cr18Ni9Ti 不锈钢和 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料摩擦磨损性能

Fig.4 Friction and wear properties of 1Cr18Ni9Ti stainless steel and Cu_{ss}/Ni_3Si composite



(a)1Cr18Ni9Ti　(b)Cu_{ss}/Ni_3Si　(c)Cu_{ss}/Ni_3Si表面 EDS分析结果

图 5 摩擦磨损表面形貌及磨损表面 EDS 分析

Fig.5 Friction and wear surface morphology and wear surface EDS analysis

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

有金属键又有强的共价键组成，与对磨材料 GCr15 轴承钢球键合特性相差较大，且具有较高的硬度，可有效减少摩损过程中的塑性变形、粘着磨损以及 GCr15 轴承钢球对复合材料表面的切削作用，使复合材料磨损表面较光滑，仅产生轻微擦伤；②少量韧性 Cu_{ss} 的存在，使复合材料具有良好的强韧性配合，使其在磨损过程中不易产生疲劳开裂和局部剥落现象；③Cu_{ss} 具有良好的润滑性，且与对磨材料 GCr15 轴承钢相容性差，磨损过程中粘着阻力小，可有效降低摩擦系数。④随摩擦载荷增加，摩擦热效应加大，表面形成的润滑性氧化物增多，降低摩擦系数和磨损率。因而，Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料具有低的摩擦系数和磨损率，表现出优异的抗摩擦磨损性能。

3　结论

（1）以 Ni-Cu-Si 粉为原料，采用电弧熔炼方法制备了以 Cu_{ss} 为增韧相，以 Ni_3Si 和 $Ni_{31}Si_{12}$ 为基体相的 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料。复合材料组织均匀致密，具有良好的强韧性配合。

（2）与 1Cr18Ni9Ti 不锈钢相比，Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料具有更低的摩擦系数和磨损率。随摩擦载荷增加，复合材料摩擦系数降低（从 0.38 到 0.22），磨损率逐渐升高（3.92×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$ 到 9.36×10^{-6} $mm^3/(N\cdot m)$）；而 1Cr18Ni9Ti 不锈钢材料的摩擦系数和磨损率随载荷增大快速增加，其磨损率比相同条件下 Cu_{ss}/Ni_3Si 复合材料高出近一个数量级。

参考文献：

[1] DONG L X, WANG H M. Microstructure and corrosion properties of laser-melted deposited Ti_2Ni_3Si/NiTi intermetallic alloy [J], Journal of Alloys and Compounds, 2008, 465:83-89.

[2] 韩嫔，张绪平，林波. 25CrMnSi 和 22SiMn2 低合金钢摩擦磨损性能研究[J]. 铸造技术，2020，41(1):18-21.

[3] 曾群锋，许雅婷，林乃明. 304 不锈钢在人工海水环境中的腐蚀磨损行为研究[J]. 表面技术，2020，49(1): 194-202.

[4] MUSA G, CELAL K, KEREM O G, et al. Microstructural and mechanical properties of binary Ni-Si eutectic alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 643:219-225.

[5] 贾磊，谢辉，吕振林. Ni_3Si 金属间化合物及其合金的研究现状与进展[J]. 铸造技术，2008，29(4):542-545.

[6] 袁亚，韩明刚，陈辉. Ni_{ss}/Ni Si 共晶复合材料制备及摩擦性能研究[J]. 粉末冶金工业，2019(4):59-62.

[7] NIU M Y, ZHANG X H, CHEN J J, et al. Friction and wear properties of Ni_3Si alloy under different vacuum conditions [J]. Vacuum, 2019,161:443-449.

[8] WEN Z Q, HOU H, ZHAO Y H, et al. First-principle study of interfacial properties of Ni-Ni_3Si composite [J]. Computational Materials Science, 2013,79:424-428.

[9] LIU J, ZHANG J, DENG L J, et al. Microstructure and corrosion behaviour of laser-cladded γ-Ni/Mo_2Ni_3Si alloy coating[J]. Surface Engineering, 2019, 35:59-65.

[10] 袁亚，张娟荣，陈辉. Cu 含量对 Mo_5Si_3-Cu 复合材料显微组织和力学性能的影响[J]. 有色金属工程，2018，8(5):7-10.

[11] CHEN H, SHAO X, WANG C Z, et al. Effect of Al_2O_3 and Cu on the microstructure and oxidation properties of Mo_5Si_3 composite [J]. Corrosion Science, 2015, 94:129-134.

[12] 尹延西，李安，张凌云，等. Cr-Cu-Si 金属硅化物合金组织与耐磨性[J]. 稀有金属材料与工程，2006，35(3):391-394.

[13] YIN Y X, WANG H M. Microstructure and wear properties of laser clad Cu_{ss}/Cr_5Si_3 metal silicide composite coatings [J]. Applied Surface Science, 2006，253:1584-1589.

[14] 谢辉，陶世平，许丽君. Cu-Ni-Si 合金显微组织与摩擦磨损行为[J]. 铸造技术，2015，36(9):2201-2203.

[15] 崔春娟，张军，吴昆，等. Ni-Si 共晶合金的定向生长特性[J]. 稀有金属材料与工程，2012，41(S2):650-652.

[16] 张厚安，陈平，颜建辉. La_2O_3 和 WSi_2 增强 $MoSi_2$ 基复合材料的摩擦磨损性能研究[J]. 摩擦学学报，2005，25(3):230-233.

[17] JIANG X, LI Z Y, XIE Z H, et al. Novel high damage-tolerant, wear resistant $MoSi_2$-based nanocomposite coatings [J]. Applied Surface Science, 2013，270:418-427.

技术资料邮购

《铸造抗磨产品实用生产技术集》

《铸造抗磨产品实用生产技术集》本书由李德臣教授级高工编著。共8章：1 关于锰钢生产技术；2 球墨铸铁与蠕墨铸铁生产技术；3 抗磨产品生产技术；4 锤头生产技术；5 消失模、V法生产技术；6 典型铸件的生产技术；7 还原罐生产技术；8 关于企业管理。全书22万字。特快专递邮购价：98元。

邮购咨询：李巧凤　　电话/传真：029-83222071

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net