

机械合金化制备电触头材料的研究与进展*

刘 英¹, 杨敏鸽², 王俊勃¹, 王亚亮¹, 张 力¹

(1 西安工程大学机电工程学院, 西安 710048; 2 西安工程大学环境化学工程学院, 西安 710048)

摘要 介绍了机械合金化(MA)的反应机理、工艺过程和特点, 阐述了机械合金化制备电触头的研究进展以及存在的问题, 并展望了今后的研究发展趋势。

关键词 机械合金化 电触头材料 固溶体 弥散强化

中图分类号: TG 146.4 **文献标识码:** A

Research and Progress of Preparation of Electrical Contact Materials by Mechanical Alloying

LIU Ying¹, YANG Mingge², WANG Junbo¹, WANG Yaliang¹, ZHANG Li¹

(1 School of Machinery and Electronic Engineering, Xi'an Ploytechnic University, Xi'an 710048;

2 School of Environment and Chemistry Engineering, Xi'an Ploytechnic University, Xi'an 710048)

Abstract In this paper, the mechanism, processing and characteristics of mechanical alloying are reviewed. The research progress and the key problems of the electrical contact materials prepared by MA are described. The future research and development tendency are prospected.

Key words mechanical alloying, electrical contact materials, solid solution, dispersion strengthening

0 引言

机械合金化(MA)就是将欲合金化的元素粉末按一定配比机械混合, 在高能球磨机等设备中长时间运转将回转机械能传递给粉末, 同时粉末在球磨介质的反复冲撞下承受冲击、剪切、磨擦和压缩多种力的作用, 经历反复的挤压、冷焊合及粉碎过程在固态下实现合金化。该技术是 20 世纪 70 年代初由美国国际镍公司(INCO)开发的, 用于研制氧化物弥散强化的镍基超合金^[1,2]。自 20 世纪 80 年代初 Yermakov 发现该技术可用来制备非晶态材料后, 越来越受到了人们的关注, 20 世纪 90 年代则将其作为室温固态反应过程进行多方面的研究。近年的研究表明, 它已经能成功应用于制备弥散强化材料、非晶合金、准晶及纳米晶材料、金属间化合物、过饱和固溶体、难熔化合物以及纳米复合材料等。尤其是在制备非晶、纳米晶及亚稳材料方面, MA 是一种实用的极有价值的方法^[3,4]。随着 MA 技术应用领域的不断扩大, 这一技术在电触头材料制备中也取得了一定的研究成果。

电触头是开关电器中直接承担接通和分断电路的元件, 对开关电器的安全运行起决定性作用, 其性能好坏直接影响到开关容量、使用寿命及运行可靠性。尤其是在现代化大型电力系统、通信系统、自动控制系统中包含的电触头数目常在数十万以上, 如果其中一个或几个工作失效, 就会导致整个系统工作紊乱, 甚至全部瘫痪。引起电触头工作失效的主要原因之一是电

触头材料失效, 因此新的电触头材料的研究与开发是一项非常重要的课题^[5]。制备电触头的材料主要有银基、铜基两大类。制备触头材料方法主要有粉末冶金法和熔炼法, 目前所应用的各系列电触头材料均是复合材料, 其组元在基体中的溶解度十分有限(有时在液态下也不互溶)。因此, 在生产铜基、银基触头时常常采用粉末冶金方法。常用的粉末冶金法是首先将机械混合的粉末经粉末冶金技术后, 再制备触头块体材料。其中, 机械混合粉末常常由于混合不均匀、粉末团聚等因素, 严重影响烧结材料的机械物理性能和电性能。而 MA 作为一种制备合金粉末的新工艺, 可以在原子级、纳米级水平进行合金化。因此, 对于制备混合均匀、性能进一步提高的触头材料, 此工艺技术触头材料制备的应用中具有十分重要的前景。

1 MA 制备电触头材料的工艺过程及特点

MA 技术制备电触头材料是通过高能球磨使不同原料粉末均匀混合在一起, 在这一过程中粉末经过反复变形、焊合和断裂, 各组分原子相互扩散, 产生合金化并形成新相。简单来说, MA 技术要经过冷焊—粉碎—冷焊的反复进行, 最后得到组织成分均匀的原子级合金粉末。其工艺过程主要包括: (1) 获取构成材料的初始粉末, 初始粉末粒径一般在 100 μm 以下; (2) 根据构成材料的性质, 选择磨球材料如钢球、刚玉球或其他材质的球, 磨球尺寸大小也应按一定比例配置; (3) 将初始粉末和磨球按一定比例(球料比)放入球磨罐; (4) 根据需要选择保护性气

氛,大多数情况下选择高真空,也可选用氩、氦等惰性气体;(5)球磨中球与球,球与球磨罐壁对初始粉末的碰撞使其经过冷焊—粉碎—冷焊的反复过程,经足够时间的研磨后形成组织成分均匀的原子级粉末。在球磨过程中,通过对颗粒尺寸、成分和结构的变化进行X射线衍射、电子显微镜等观察检测,从而确定最佳的球磨时间。

MA制备电触头材料具有以下的特点:(1)可制备过饱和固溶体,使非互溶体系合金化,通过成型工艺,可以提高材料的力学和电性能;(2)可以制备第二相(金属氧化物、难熔金属、硬质相)弥散分布的电触头材料,该材料显示了较好的性能;(3)可以制备性能优异的纳米、纳米晶电触头材料;(4)不仅工艺简单,方便易行,而且更经济^[6]。

2 MA在电触头材料中的应用

按照MA组元的性质,对于合金化粉末,按照粉末特性可将粉末组成分为3种体系:延性/延性体系、延性/脆性体系、脆性/脆性体系。研究较多的体系是延性/延性体系和延性/脆性体系。目前,用于生产的触头材料品种很多,二元或多元复合触头材料共计有数百种,广泛应用的触头材料只不过几十种。在二元或多元体系中,大部分触头材料形成的是“假合金”,而MA则可以使它们形成过饱和固溶体,并使它们之间合金化。

2.1 延性/延性体系的MA

在电触头材料中属于这一体系的主要有Cu/Cr、Cu/Ni、Cu/Mo、Ag/Ni等。延性/延性体系MA主要以合金化为主,组元颗粒细化,混合更加均匀,其强化机制主要为细晶强化和弥散强化。此外,形成的过饱和固溶体经进一步的处理,一些元素脱溶沉淀析出,起到了沉淀强化的作用,使触头材料的硬度等性能提高,进一步提高了材料抗机械磨损性能和电磨损性,延长了触头材料的使用寿命。

2.1.1 铜基电触头材料的MA

Cu/Cr系电接触材料不仅有大的工作电流和良好的开断能力,而且有良好的耐压和抗熔焊性能,但是Cu、Cr在低温下几乎不互溶。研究认为MA法制备的Cu-Cr合金性能提高有两方面的原因:一方面,在MA过程中形成了Cr在Cu中的超饱和固溶,其在随后的热挤压制备过程中产生沉淀强化;另一方面,MA过程使Cu、Cr颗粒细化和均匀化,未固溶的Cr细化后起到弥散强化的作用。所以MA制备的CuCr25、CuCr50材料是电真空接触材料领域(其它还有Cu/W、Cu/WTe等)最具代表性、应用最广的材料^[7]。但在大功率、高压、高可靠和长寿命方面,要求触头材料要有更好的物理力学性能和电性能,国内外在改进Cu-Cr电接触材料方面使用两种有效的途径:第一种是添加合金;第二种则是通过MA技术使合金组态均匀化和复合化。在这方面,昆明贵金属研究所采用添加稀土元素Re,提高了铬元素在铜基体中的固溶度,最终形成了过饱和固溶体,实现了Cu-Cr元素的非液态互溶性。为了获得高强度、高导电率的铜基复合材料,王知法等^[8]采用MA制备了以Mo为增强相的Cu/Mo复合材料,避免了常规方法以牺牲电导率和热导率来改善铜的力学性能。实验中采用在金属铜粉中加入一定比例的钨粉,在高速球磨机中球磨9h混合均匀后经过压制、烧结等制备复合材料,其抗拉强度、硬度都有提高,而且导电性能优良。

2.1.2 银基电触头材料的MA

Ag-Ni系接点材料的接触电阻低且稳定,加工性良好,抗电损耗性好,抗熔焊性比Ag-金属氧化物系材料差。大量研究发现^[9-14],Ag-Ni触头抗熔焊性低的主要原因在于燃弧时Ag相间易于发生焊接,抗电损耗性及抗熔焊性受Ni含量影响,Ni含量太高,接触电阻增大,电性能下降,不能用作容量大的电触点^[15]。Ag-Ni触点最大优点在于其工艺性:它无需附加焊接用银层(覆层)。同样重要的是,它节银可达40%。因此,目前的一个重要发展方向是使Ni相均匀、弥散地分布于Ag基体中。文献^[16]通过MA分别将质量比为90:10和70:30的银粉和镍粉混合后进行机械合金化,然后在石墨模中于TDR-40A型真空单晶炉热压成型制备了Ag₉₀Ni₁₀和Ag₇₀Ni₃₀电接触材料。研究表明,MA制备的材料,粉末粒度大约为几微米,形状不规则,但比较均匀,并且银粉和镍粉再也不能被区分开。通过测试,得到的AgNi合金密度达到理论密度的90%以上,硬度与常规方法相比也有大幅度提高。其性能数值见表1。日本Nevesi.L等^[17]尝试了高速/高剪断球磨法,将Ni的细粉与Ag粉进行分散复合化制备银镍合金,在一定程度上改善了组织性能。赵泽良等^[18]使用高能球磨-热压法制得了Ag₅₀Ni₅₀(质量分数)纳米合金,证明了MA能得到晶粒细小、结构致密的电触头材料。在采用新方法和工艺方面,郑福前等^[19]利用急冷雾化制得Ag-Ni包覆粉,进而MA处理成型,得到Ni细小而弥散分布于Ag基体中的组织,使触头的电学及力学性能都有所提高。为进一步提高Ag-Ni系触头材料的抗熔焊性,日本采用MA技术已成功研制出断路器用具有高抗熔焊性的Ag-Ni-C触头材料,并申请了专利^[20]。由此可见,MA制备Ag-Ni材料可以明显提高其抗熔焊性。

表1 机械合金化与常规方法试样性能对比

Table 1 Comparison of physical properties of AgNi alloys with MA and the general processing

AgNi合金	密度/(g/cm ³)	硬度/HB	电阻率/(μΩ·cm)
Ag ₉₀ Ni ₁₀	10.1	49.8	3.6
(MA)	9.4	104	5.8
Ag ₇₀ Ni ₃₀	9.5	65.2	12.0
(MA)	9.2	127	12.7

2.2 延性/脆性体系的MA

在延性/脆性体系中,MA制备的触头材料中第二相(金属氧化物、难熔金属、硬质相)弥散分布在较细的延性基体上,使材料的硬度、致密性等性能提高,最终提高了材料的使用寿命。属于这一体系的触头材料比较多,如Ag/McO(如CdO、SnO₂、ZnO等)、Ag/W(WC)、Ag/C、AgSi、AgSiMo、AgSiGe、Cu/W(WC)、Cu/SnO₂、Cu/NiO等。

2.2.1 银基电触头材料的MA

MA在发展初主要用于制备氧化物弥散强化超合金,在这方面显出独特的优势,而后又用这种方法获得非晶合金。到目前为止,采用MA方法已制备出各种稳态和亚稳态材料,并成功应用于颗粒弥散强化银基、铜基电接触材料的工业生产中。银基电接触材料耐蚀性好、抗熔焊能力强、接触电阻低而稳定,如Ag/W(Ag/WC)和Ag-CdO、Ag-SnO₂、Ag-NiO、Ag-ZnO、Ag-CuO、Ag-SnO₂-In₂O₃,其中最典型的代表是Ag/CdO和Ag/

SnO₂ 触头材料。Ag/MeO 触头材料的物理和电性能主要由所采用的制粉工艺所决定,即与粉末混合的均匀程度以及氧化物相在银基上的分布有关,亦即制成材料中弥散相的粒度和粒子分布是决定材料性能的关键因素。MA 法产生的 Ag/MeO 的优势在于它可以通过高能球磨的能量传递,使 MeO 颗粒和银基体产生固态相变,最终形成部分或完全的固溶,从本质上提高 MeO 和银基体的结合强度。传统粉末冶金法制备出的 Ag/MeO 合金材料的氧化物颗粒分布很不均匀,从而严重影响了材料的强度和导电性,而用合金内氧化法则无法制备氧化物含量较高的 Ag/MeO 触头材料。因此,采用 MA 法可以制备具有较高强度和良好导电性的 Ag/MeO 触头材料。文献[21]利用高能球磨工艺制出亚微米级 Ag/SnO₂ 粉末,粉末尺寸在 100~400nm 之间,SnO₂ 晶粒细小,且弥散均匀地分布在 Ag 基体中,提高了电触头材料的加工性能,制得的 Ag/SnO₂ 复合材料比普通混粉工艺制出的材料具有高的导电率、密度、硬度(具体数值参见表 2)。使用 MA 可以制出纳米 Ag/SnO₂ 电接触材料,材料晶粒超细化,且蒸汽压、电导率、热导率、强度及硬度等许多性质发生明显变化,随之引起材料微观组织的进一步均匀化及电性能的改善。王俊勃等^[22]利用 MA 法结合其他工艺制备出的纳米 SnO₂ 粒子弥散均匀分布于 Ag 基体中的纳米复合 Ag/SnO₂ 电接触材料,利用纳米消除了传统方法不可避免的第二相聚集及在晶界处连续析出等缺陷,改善了电接触性能,表现出良好的综合性能。

表 2 高能球磨材料和普通材料的性能对比

Table 2 Properties of AgSnO₂ with high energy ball milling and the general processing

工艺	硬度/MPa	密度/(g/cm ³)	导电率/%
普通 AgSnO ₂	710	9.60	64.0
高能球磨 AgSnO ₂	985	9.81	74.8

Ag/C 和 Ag/W 电接触材料是由难熔金属和硬质相组成。银石墨(Ag/C)电接触材料具有良好的抗熔焊性和导电性、低而稳定的接触电阻以及优异的低温升特性。因为基体银提供了良好的电导率而又不形成稳定的氧化物从而不会导致在使用过程中接触电阻的急剧升高,而碳又具有良好的抗熔焊性、耐电磨损性和耐酸性。雷学鸣等^[23]采用 MA 技术球磨 10h,经压制、烧结、复压制备了 AgC5 触头材料,与常规的机械混粉法制备的材料相比,该材料的密度提高,硬度上升至 636MPa(常规方法得到的触头硬度为 459MPa)。对比电性能试验表明,采用 MA 制得的 AgC5 的电弧腐蚀性能提高了 40% 之上。原因是经过高能球磨后的石墨具有极大的表面能和表面活性,能提高 Ag 和 C 之间的润湿性。Aslanoglu Z^[24]采用 MA 技术球磨 15h,经压制、烧结并复压制备了 W-35Ag 触头材料,与常规的机械混粉制备的材料相比,该材料获得了较长的密度和硬度值。对比的电性能试验表明,随着球磨时间的延长,触头材料的抗电弧烧蚀性能明显提高。其中,球磨 5h 制备的触头经 10000 次通断操作后,触头重量损失仅为 74.5mg/m²(机械混粉法制备的触头为 140.7mg/m²)。MA 制备的触头材料具有较高的使用寿命,其原因在于较细小的钨颗粒均匀分布在银基体上。

2.2.2 铜基电接触头材料的 MA

Cu-W、Cu-WC、Cu-C-Ti 属于固相不溶体系,这些混合体系

具有正的混合焓,通过常规的熔炼方法得不到合金,而 MA 的一个突出的优点就是能方便地制备这类合金,并能实现非互溶体系的合金化。有关 MA 制备 Cu-W、Cu-WC、Cu-C-Ti 的一些研究^[25,26]证明,常规熔炼工艺所不能制备的非互溶体系通过 MA 技术可以实现其合金化。

陈文革等^[27]通过 MA 工艺制备了纳米晶 W-Cu 电接触材料,密度达到理论密度的 99.5% 以上,并且硬度、耐电弧烧蚀性能和耐电压稳定性比传统的 Cu-W 合金都有显著的提高。研究发现,W 粉和 Cu 粉在 MA 过程中产生的内应变和热效应使其粉末超细化和高度的均匀化,液相的 Cu 均匀分布在 W 颗粒的周围,避免了大空洞的出现,同时杂质元素 Fe 的存在也起到了活化烧结作用。Mordike^[28]通过 MA 工艺制备了 W 体积分数为 1%、2%、4%、6%、8% 和 10% 的 Cu-W 复合粉末,经压制、烧结和冷挤压后,制备了 Cu-W 复合材料。研究发现,强化相颗粒 W 均匀分布在基体上,W 颗粒和基体 Cu 之间粘结较好,使材料的硬度、抗机械磨损和电磨损性能提高。铜-钼触头材料具有好的导电性,低接触电阻,且特别稳定、良好的抗熔焊性以及优异的低温升特性。阻碍 Cu 基合金材料应用很重要的一点是其力学性能较差。齐宝森等^[29]通过 MA 方法制备了强化的 Cu-C-Ti 复合材料,并研究了 MA 工艺的作用机理。第一阶段是 Cu、C、Ti 复合粉末粗化,出现加工冷焊;第二阶段是破碎、碎化作用占据主导地位,这一阶段复合粉末颗粒变得非常细小、均匀度逐渐增加;第三阶段是稳定阶段,这时部分 Ti、C 溶质已经脱溶析出,并形成了 Cu 基过饱和固溶体,促进第二相析出。在实验中观察发现,利用 MA 所获得过饱和固溶体的固溶度要比平衡条件下提高几十甚至上百倍,而且由过饱和固溶体析出第二相获得的弥散强化合金不同于两相机械混合物,其第二相由基体相中析出时的界面结合强度高、弥散分布效果好,能够提高合金的力学性能。

3 利用 MA 反应球磨技术制备电触头材料

反应球磨技术是制备电触头材料的新方法,制备工艺一般为:配料→球磨→压制→拉拔成丝材。它是利用金属或合金粉末在球磨过程中与其它单质或化合物之间的化学反应而制备所需材料的技术,是 MA 技术一个新的发展方向。Ma Xueming^[30]采用反应球磨技术将 W、Co、C 粉进行高能球磨,借助于机械化学作用制备了纳米 WC-Co 硬质合金。同样 Wang S H 等^[31]采用反应球磨技术将 Mg、Ti、C 粉进行高能球磨,制备了纳米 Mg-TiC 复合材料,其晶粒尺寸在 25~60nm, TiC 颗粒尺寸为 3~7nm。该材料与直接将 Mg、TiC 机械合金化制备的纳米 Mg-TiC 复合材料相比,显示了更好的延展性。Zoz H^[32]将 MA 的反应球磨技术应用到电触头材料的制备中,通过将 Ag₃Sn 和 Ag₂O 高能球磨,借助于 Ag₃Sn + Ag₂O → 7Ag + SnO₂ 反应,制备了纳米尺度的 SnO₂ 高度弥散分布在银基上的 Ag/SnO₂ 触头材料。从这些材料的制备中得到启发,关于 Ag/WC、Cu/WC、Ag-WC-C 等触头材料均可以采用 MA 反应球磨技术制得,不仅可以制备纳米颗粒呈弥散均匀分布的材料,还有望使其具有良好的机械物理性能和电性能,目前还没有人在这方面开展研究^[33]。

4 结语

MA 技术是新兴的材料制备方法,用 MA 可以获得常规条

件下很难合成的具有独特性能的新型合金材料,并且成本低、产量大、工艺简单及周期短等,符合现代高新技术的基础研究和产业化发展的思路。近年来关于 MA 机制及应用的研究虽取得了很大进展,但由于 MA 过程的复杂性,有关 MA 机制的理论尚未成熟。对 MA 过程中的相转变方式和机理与材料体系及球磨工艺条件的关系及其规律还缺乏深入研究。总之,就 MA 制备电触头材料目前所取得的成就,足以表明该技术具有较为广阔的工业应用前景。加强 MA 技术在实际工业生产应用上的研究必然为国民经济的发展带来巨大的经济效益。

参考文献

- 1 Fecht H J, et al. Nanocrystalline metals prepared by high-energy ball milling[J]. Metall Trans, 1990, 21A: 2333
- 2 Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling[J]. Progress in Mater Sci, 2001, 46: 184
- 3 董远达, 马学鸣. 高能球磨法制备纳米材料[J]. 材料科学与工程, 1993, 11(1): 50
- 4 张修庆, 朱心昆, 等. 反应球磨技术制备纳米材料[J]. 材料科学与工程, 2001, 19(2): 95
- 5 马学鸣, 赵龄, 等. 机械合金化制备 WC-Co 纳米硬质合金[J]. 上海大学学报, 1998, 4(2): 156
- 6 张代东, 秦亮. 电触头材料的应用与制备研究[J]. 科技情报开发与经济, 2004, 14(10): 188
- 7 谢明, 陈力, 等. 机械合金化 CuRECr 合金的显微组织结构及性能分析[J]. 云南冶金, 2003, 32(3): 77
- 8 张瑾瑾, 王志法, 等. 机械合金化制备 Mo 颗粒增强铜基复合材料[J]. 矿冶工程, 2005, 25(4): 77
- 9 Nevesi L, et al. Behavior of the Ni component of AgNi contacts in switching[C]. Proc of 13th ICEC. IEEE. Piscataway, 1986, 221
- 10 Behrens V, Michal R, et al. Erosion mechanism of different types of Ag/Ni 90/10 materials[C]. Proc of 14th ICEC. IEEE. Piscataway, 1998, 417
- 11 Liang B J, Zhang W S, et al. Influence of different microstructure of Ag/Ni material on their switching behavior [C]. Proc of 1st ICEC AAA. IEEE. Xi'an, 1989: 197
- 12 Munetake Satoh, et al. Effect of operating conditions in powder metal compounding process on particle size change[J]. J Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 1999, 40(3): 299
- 13 Munetake Satoh, et al. Characteristic curves of shearing for a powder bed measured with a rotary-intrusion type-rheometer [J]. J Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 1997, 44(3): 618
- 14 Zhao Z L, Zhao Y, Niu Y, et al. Synthesis and characteristics of consolidated nanocrystalline two-phase Ag₅₀Ni₅₀ alloy by hot pressing[J]. J Alloys Comp, 2000, 30(7): 254
- 15 龚家聪. 国外银基粉冶金电触点材料的研究近况[J]. 贵金属, 1988, 9(4): 58
- 16 罗群芳, 刘丽琴, 等. 机械合金化方法制备银镍触头合金的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2003, 32(4): 298
- 17 赵泽良, 赵越, 等. 纳米晶二元双相 Ag₅₀Ni₅₀ 合金的制备及其显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(3): 361
- 18 郑福前, 谢明, 等. Ag-10Ni 合金的机械合金化[J]. 贵金属, 1998, 19(4): 15
- 19 Nevesi L, Behrens V, et al. Switching behavior of silver/graphite contact material in different atmospheres with regard to contact erosion[C]. Proc of 44th ICEC. IEEE. Piscataway, 1998, 292
- 20 断路器用机械合金化 AgNiC 电触头[P]. JP Pat, 62. 267436. 1985
- 21 简德湘, 郑翼, 等. 高能球磨 AgSnO₂ 触头材料的研究[J]. 电工材料, 2004, (3): 33
- 22 王俊勃, 李英民, 等. 纳米复合银基电接触材料的研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(11): 1214
- 23 余海锋, 雷景轩, 等. 新型 AgC₅ 电触头材料的性能及显微组织[J]. 稀有金属材料与工程, 2004, 33(1): 98
- 24 Aslanglu Z, Karakas Y, Ovecoglu M, A comparison of the sintering characteristics of ball-milled and attritor-milled W-Ag alloy[J]. Int J Powder Metall, 2000, 36(8): 35
- 25 张其芳, 潘一凡. 钨-铜系纳米材料研究[J]. 南京林业大学学报, 1998, 22(4): 63
- 26 Ma Xueming, Zhao Ling, Ji Gang, et al. Preparation and structure of bulk nanostructured WC-Co alloy by high energy ball-milling[J]. J Mater Sci Lett, 1997, 16(12): 968
- 27 陈文革, 丁秉钧, 等. 机械合金化制备的纳米晶 W-Cu 电触头材料[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(6): 1224
- 28 Mordiké B L, Kaezmar J, Kielbinski M, et al. Microstructure and tribological properties of Ni-based claddings on Cu substrates [J]. Powder Metall Int, 1991, 23(2): 91
- 29 齐宝森, 王成国, 等. 机械合金化 Cu₂C₂Ti 复合粉末的组织特征[J]. 稀有金属, 2002, 26(6): 433
- 30 Ma Xueming, Ji Gang. Investigation of nanostructured WC-Co alloy prepared by mechanical alloying [J]. J Alloys and Compounds, 1996, 245: 130
- 31 Wang S H, Nishimura C. Tune shifts and spreads due to short and long range beam-beam interaction[J]. Scr Mater, 2001, 44: 2457
- 32 Zoz Hand, Ren H. Processing of ceramic powder using high energy milling [J]. Mater Sci Forum, 1999, 53(8): 423
- 33 雷景轩, 马学鸣, 等. 机械合金化制备电触头材料进展[J]. 材料科学与工程, 2003, 20(3): 457