

我国穿甲弹用钨合金研究的最新进展与展望

张存信, 秦丽柏, 米文宇, 白志国
(中国兵器科学院 宁波分院, 宁波 315103)

摘 要: 综合介绍了我国近年来对穿甲弹用高密度钨合金实施添加微量元素合金化强化和旋转锻造、扭转变形、静液挤压等变形强化的研究进展, 以及对于绝热剪切机理和数值模拟计算的研究现状, 并介绍了机械合金化制备纳米钨合金复合粉末、温压成形及预氧化活化烧结等特种制备技术方面的最新试验研究进展。通过全面分析目前我国穿甲弹用高密度钨合金试验研究中存在的一些主要问题, 提出我国穿甲弹用高密度钨合金今后研制的主攻方向, 以及促进高性能穿甲弹用钨合金研制应采取的策略与措施。

关键词: 穿甲弹; 钨合金; 研究现状; 发展展望

中图分类号: TF 125.241

文献标识码: A

文章编号: 1673-0224(2006)3-127-06

Recent research progress and prospect of armour-piercing projectile in China

ZHANG Cun-xin, QIN Li-bai, MI Wen-yu, BAI Zhi-guo

(Ningbo Branch of China Academy of Ordnance Science, Ningbo 315101, China)

Abstract: The research advances in high density tungsten alloy strengthening techniques of alloying, rotaryswage, torsional deformation and hydrostatic extrusion are reviewed. The research status of the adiabatic shear mechanism and numerical simulation is also introduced. The latest research progress in special manufacturing techniques, including mechanical alloying for nanometer tungsten alloy composite powder, warm compaction and preoxidized activation sintering, is introduced. Based on the analysis of some main problems existing in the development of high density tungsten alloy for armour-piercing projectile, the future research directions, tactics and measures are put forward.

Key words: armour-piercing projectile; high density tungsten alloy; research status, research direction

高密度钨合金是一类以钨为基(钨的质量分数通常为 80%~97%), 并添加有 Ni、Fe、Mn、Co、Cu、Mo、Cr 等元素的合金, 其密度高达 16.5~19.0 g/cm³。高密度钨合金不仅密度大, 而且还具有一系列优异的性能, 例如强度高、硬度高、延性好、机械加工性能好、热膨胀系数小、导热系数大、抗氧化和抗腐蚀性能好、可焊性好等。这些优异的性能使其在尖端科技领域、军事和民用工业中得到了广泛的应用, 例如用作杆式动能穿甲弹的弹芯材料、平衡配重元件、惯性元件、射线屏蔽材料等^[1]。随着主战坦克、舰船装甲及各种军用工事的日益强化, 对穿甲弹性能提出了越来越高的要求。高密度

钨合金杆式动能穿甲弹, 不仅具有良好的穿甲威力, 而且与贫铀合金穿甲弹相比具有无毒性、无放射性污染等优点, 是当今世界各国装备的主要穿甲弹用材料, 也是穿甲弹今后发展的主要方向。为此, 本文拟通过综述我国穿甲弹用高密度钨合金研制的最新进展情况, 分析目前存在的主要问题及其造成的原因, 进而探讨解决这些问题的具体措施和策略。

1 近年来的主要研究进展

随着科学技术日新月异的发展和装甲防护技术

水平的不断提高,对弹用高密度钨合金的要求越来越高,尤其是要求在保证高密度的前提下兼有高的强度和良好的韧性。因此,如何提高和改善高密度钨合金形变强化后的强度和塑性是当前的重要研究课题之一。近年来,为了进一步提高钨合金的强韧性,国内在合金化、变形强化、绝热剪切、数值模拟及制备工艺技术上进行了大量研究,取得了明显的进步和众多的科研成果。

1.1 微合金化研究

钨合金的强化机制主要有固溶强化、弥散强化、沉淀强化和界面强化等。固溶强化的元素主要有 Re, Mo, Nb, Ta, Ir 等。钨合金中的 Mo, Ta, Re, Nb, Hf, V 和 Cr 等元素具有与 W 相同的体心立方晶格;它们可以固溶于 W,也可以在一定程度上固溶于粘结相中,从而达到对钨基重合金的固溶强化,其中 Hf 的强化作用最大,其次为 Ta、Nb 和 Re^[2]。

弥散强化包括直接强化和间接强化,直接强化主要来源于位错与弥散颗粒的相互作用,而间接强化主要是由于高密度位错网组成的亚晶粒相互作用提高合金的强度。界面强化主要是优化晶界(提高晶界强度或减少杂质在晶界的偏聚),而且若在界面上形成固溶体,可增强界面结合力和提高材料强度。另外,由于具有良好的界面,粘结相可通过界面将应力传递给钨颗粒,可有效地减轻粘结相的承载力,使粘结相和基体协调变形,减少沿晶裂纹的发生,从而提高材料的强度^[3]。沉淀强化方法有抑制沉淀相析出强化,第二相析出强化和钨弥散强化 3 种。抑制沉淀相析出是改善和提高钨合金性能的有效方法,一般采用固溶+淬火的热处理工艺来避免沉淀相析出,同时抑制杂质元素在界面上偏聚,以获得较洁净的钨/基体界面^[4]。在 W-Ni-Fe 高密度合金中添加少量 Co 可增强基体相对钨颗粒的润湿性,使钨颗粒表面更加圆滑,更加有利于塑性变形,更能提高合金的钨颗粒与基体相之间的界面结合强度,从而提高合金的强度和延伸率。同时,加入的 Co,在液相烧结的初期,优先与铁和镍形成熔点低、流动性好的共晶,很好地促进组分原子在液相中扩散,从而加速液相烧结的进程、细化合金的显微组织^[5]。刘志国等成功地制备了新型 W-Ni-Fe-TiB₂ 合金,并发现 TiB₂ 均匀分布于粘结相中,添加 2% 的 TiB₂ 的合金较未添加 TiB₂ 的合金相对密度和硬度都较高,可对材料的粘结相起强化作用^[6]。冯庆芬等则对 La、Ce 对 93WNiFe 合金的动

态拉伸性能进行了研究,发现这 2 种元素可提高钨合金的动态性能,并有固溶强化和界面净化作用^[7]。

钨合金中的杂质元素包括 H, O, C, N, P, S 和 Si 等。由于这些元素的原子半径较小,在钨合金中有很强的扩散能力,因而比较容易在晶界、相界等能量较高的位置发生偏聚,甚至生成脆性相,从而降低钨合金的性能。在这些杂质元素中危害较大的是 H,它主要分布在粘结相和钨/粘结相界面上导致氢脆,消除氢脆的主要方法是在保护气氛(N₂, Ar)下退火,其中尤以真空热处理效果最好。P 是对钨合金危害较大的另一种元素,因为 P 很容易偏析到钨/粘结相界面上使合金脆化,当 P 含量超过其在 W 相或粘结相的极限溶解度时将发生 P 的偏析和产生 NiP₂ 沉淀。与 P 伴生的另一种杂质是 S,它也能偏析在 W/粘结相的界面上,在 93W-4.9Ni-2.1Fe 合金中,当 S 含量达到 0.01% 时合金的冲击韧性明显下降。另外, S 还可以同 K 和 O 形成化合物,聚集在气孔的内表面上。Si 和 Na 是原料钨粉中的另外 2 种常见杂质元素,它们通常以 SiO₂ 和 NaSiO₃ 形式存在。Si 和 Na 的掺杂使合金的密度、抗拉强度、延伸率、颈缩率等均明显下降,其在钨合金中可允许的极限含量为: Si, 210×10^{-6} ; Na, 150×10^{-6} ; 大于此极限含量就会对合金性能产生很大的影响^[8]。

1.2 变形强化研究

目前,用粉末冶金方法制备的高密度钨合金(烧结合态)的抗拉强度一般达 900~1000 MPa,伸长率在 20%~30% 之间;而经过塑性形变强化以后,其强度可较大幅度地提高,塑性则有所下降。经过塑性变形加工后,钨合金强度可超过 1400 MPa,伸长率也可保持在 10% 左右^[9]。

轧制、旋转锻造、扭转变形、静液挤压等形变强化是提高钨合金材料强度并保证一定韧性的有效方法,而且还还可有效地细化晶粒^[10]。锻造变形是提高钨合金强度的常用工艺,常规的变形量为 15% 左右。钨合金材料的强度随变形量增大而提高,变形量愈大钨颗粒变形程度愈大,且变形程度增加将导致断裂向钨颗粒转移^[11]。轧制还可获得较大的变形量并能保证变形的均匀性,且能使大的晶粒破碎成小晶粒,并得到均匀分布的微观组织;轧制可提高钨棒的密度和减少空隙度,提高生产效率和降低制造成本。但由于轧制一次变形量小且开坯温度和终轧温度都较高,材料表面氧化及污染相对严重,

能耗也较高,因此在实际生产中受到一定的局限。旋转锻造可提高钨合金的强度和穿甲效果,在经过多道次旋锻后,钨合金的强度和硬度等力学性能较旋锻前会有较大幅度的提高,但伸长率会降低。大变形使得球状钨颗粒被拉长变成纤维状组织,能较大幅度地提高材料的力学性能。静液挤压技术是一种难变形材料塑性加工工艺,主要分冷静液挤压和热静液挤压,它是钨合金目前最为有效的形变强化方法之一,它具有一次变形即可获得较大变形量和可大幅度提高材料强度的特点。在静液挤压 3 向压应力作用下,不仅能有效防止材料在变形时钨颗粒的拉断和开裂,有利于材料内部原有微观孔隙的愈合,同时能够细化显微组织,有利于近净成形、提高利用率、降低成本和提高生产效率^[12]。钨合金采用静液挤压形变强化并进行退火处理后,在材料中形成位错密度很高的胞状结构,其形变后的钨颗粒呈方向性排列,且材料的破断方式以钨颗粒解理断裂为主。静液挤压工艺形变强化的各向受力均匀,变形过程中材料不易出现变形缺陷,不需加热,一次变形量大,93W 的一次最大形变量可达 50% 左右^[13]。

1.3 绝热剪切研究

绝热剪切带是材料或构件内剪应变高度集中的狭窄区域,是高应变率加载条件下材料变形、断裂的特殊机制。绝热剪切变形局部化广泛存在于各种金属、岩土和高分子材料等在遭受爆炸、侵彻、高速碰撞、高速切削和高速磨损等高应变率载荷下的高速变形过程中,提高钨合金材料的绝热剪切性能以增强钨合金杆弹的侵彻性能是目前的研究热点之一。我国五二研究所、中科院力学所、中国科技大学和北京理工大学等单位对此进行了一些研究。

半个世纪以来,对绝热剪切变形的研究,主要集中在 3 个方面:第一,从材料的本构关系出发,建立绝热剪切变形局部化的失稳模型,探寻材料绝热剪切失稳判据及绝热剪切带的扩展规律;第二,从微观组织、结构出发探寻不同成分、组织的材料内的绝热剪切带的微观组织结构特征以及其形核、长大的微观影响因素;第三,采用计算机数值模拟技术对绝热剪切带的演化规律及其内应力场、应变场和温度场进行研究^[14]。

魏志刚等用分离式 Hopkinson 压杆装置对预扭转后的斜圆柱试件进行冲击试验,不仅观察到绝热剪切带,同时观察到如果最大剪切应力方向和钨颗粒的取向一致,则失效是钨颗粒脆性断裂、粘结

相破坏、钨-钨界面分离和钨-粘结相界面分离等几种破坏机制共同作用的结果^[15]。许沐华等对预扭转和未扭转钨合金杆弹弹道实验后的残余弹体和碎片进行了细观组织分析,发现钨合金预扭转后钨晶粒变形方向与最大剪应力方向接近,因此在弹靶冲击过程中有利于绝热剪切变形和剪切破坏的发生。从残余弹头上观察到的绝热剪切带说明,预扭转弹在侵彻过程中要比未扭转弹更易于自锐,这是预扭转杆弹侵彻能力得到提高的根本原因^[16]。谭成文等为了定量评价不同材料对绝热剪切变形的敏感程度,采用绝热剪切扩展能-绝热剪切敏感因子表征这一差异,并建立了相应的实验测试系统,定量地解决了绝热剪切敏感性的评价和测试问题^[17]。

1.4 数值模拟计算研究

长期以来,对动能弹体冲击装甲靶板的过程分析主要依靠大量的试验结果,随着对穿甲现象研究的日益深入,其它一些方法也用于弹靶作用的分析,如经验法、理论分析法和数值模拟法等。其中,数值模拟法能较全面地反应穿甲过程中间参数和物理量的变化,利用计算机绘图技术设计的数值模拟方法还可以直观地图示整个穿甲过程中各种参量(形状、应力、应变等)的变化;此外,利用计算机程序可以选择不同的物理参数和几何参数进行计算,得到各种不同参数对弹、靶相互作用的影响程度,从而能给出更全面的试验分析结果。

黄伟等对钨合金内部应力场的数值模拟结果表明,钨合金并非只在粘结相中发生应力集中,而是首先出现在高强度的钨颗粒中^[18]。房文斌等用数值分析方法研究高密度钨合金热静液挤压过程,表明在高温下进行的热静液挤压,可大幅度降低挤压力和获得更大的挤压比^[19]。荣吉利等研究了钨合金易碎动能穿甲弹的侵彻和破碎性能,在建立钨合金易碎动能穿甲弹有限元分析模型的基础上,模拟了具有不同拉-压强度比的钨合金穿甲弹在穿透靶板时的侵彻和破碎过程^[20]。程兴旺等通过钨合金壳体垂直侵彻混凝土靶板的实验,获得钨合金壳体危险截面处的应变-时间历程曲线,为壳体设计提供侵彻模型和数值估算的验证标准^[21]。任春雨等综述了复合材料层合冲击模型的研究进展,为复合材料防护结构的设计和优化提出了新的思路^[22]。

1.5 制备技术研究

细化钨晶粒成为高密度钨合金研究的一个新的热点,采用机械合金化法(MA)、冷凝干燥法、化

学气相沉积法、喷雾干燥法、溶胶-凝胶法等方法制备的预合金粉,并采用适当的工艺可制得非常细的粉末。另外,采用喷雾反应工艺可一步合成细晶粒、多成份、预合金化的钨基合金粉,这种粉可在远低于粘结相熔点的温度下烧结达到全密度^[23]。

范景莲等用 MA 工艺制备了纳米晶钨合金复合粉末在常压氢气气氛中的烧结致密化和在烧结过程中的钨晶粒长大行为,表明 MA 纳米晶粉末可促进致密化,使致密化温度降低约 100~200 °C,在一般固相烧结温度时可以得到晶粒尺寸为 3~5 μm 的细晶高强度合金^[24]。他们还研究了纳米钨合金注射成形进行了研究,表明在 1350~1450 °C 时固相烧结即达到了全致密,最终合金的晶粒约为 3 μm,抗拉强度大于 1200 MPa^[25]。罗述东等研究了钨合金粉末在不同温度下的温压成形行为,表明温压能明显提高高压坯密度,温压坯件的径向收缩小于常温坯件的径向收缩,而且温压可以改善钨合金的显微组织^[26]。李信等将冷等静压成形的试样埋在 Al₂O₃ 粉中,置于空气烧结炉中加热并保温 30 min 预氧化后,再经不同温度烧结;结果表明,钨合金采用预氧化活化烧结,可以降低烧结温度,减少合金变形,并得到致密的钨合金,同时可提高钨合金的抗拉强度和延伸率^[27]。

2 弹用钨合金研制存在的主要问题

近十几年来,我国材料科技工作者对穿甲弹用高密度钨合金进行了多方面的试验研究和机理探讨,特别是对添加合金元素和形变强化等方面进行了大量卓有成效的研究,这对促进我国钨合金穿甲弹的穿甲威力和赶超世界先进水平产生了巨大的推动作用。然而,由于多方面的原因,也存在各种各样的问题。首先,随着弹用钨合金技术的公开,一些院校和科研机构也开展了有关研究,这大大地促进了钨合金材料性能的提高,但随着研究范围的扩大,低水平重复研究的现象也日趋严重。例如,一些单位大量重复专业研究所已完成或已应用的研究内容,如钨合金的组织与性能、机械合金化、超细粉或纳米粉烧结研究等,有的院校甚至将此类研究作为研究生的毕业论文选题。其次,多口列题现象也很普遍,某些省份或院校也以基金项目列题开展穿甲弹用钨合金研究,这不仅浪费了宝贵的科研经费,也浪费了年轻学者的青春年华。尤为严重的是,一些研究课题并未充分论证,也不考虑实际应用的可能性,如注射成形由于脱脂困难等原因,较

难用于大口径钨合金穿甲弹制备,而且所谓的近净成形对需要变形并机械加工的穿甲弹弹体也没有实际意义,而国内却进行了大量的试验和研究。

这些现象的存在是多方面原因造成的,它反映出我国军用材料研制管理上的错位与不足,也反映出在科研选题上存在着一定程度的盲目性和狭隘性,特别是反映出对于重点研究课题缺乏必要的协调和与用户的信息沟通,因而没有考虑到研究成果的实用价值和经济效益。

3 未来的研究重点方向

目前,我国在钨合金穿甲弹材料技术研制上已经取得了长足的进步,但距国际先进水平还有一定的差距,在某些方面还明显落后于西方发达国家。为此,在今后的穿甲弹用钨合金研制中,应着重进行以下几方面的研究:

1) 穿甲性能是弹用钨合金最重要的性能指标,但这方面的研究相对较少,特别是弹-板作用机理方面的研究尚不够深入,同时还应加强绝热敏感性钨合金材料的研究^[28];

2) 为提高防空导弹和穿甲弹的毁伤能力,应开展钨合金易碎弹体材料和穿燃复合功能弹体材料的系统研究^[20];

3) 高强钨丝复合穿甲弹是未来超高速动能穿甲弹的一个重要发展方向^[29],应进一步加强超高速动能穿甲弹用钨丝束复合穿甲弹体材料的研究;

4) 我国虽然是一个富钨国家,但储量有限,应大力加强弹用钨合金和废钨屑的回收利用以及低原料消耗工艺技术的研究与开发。

5) 我国的海岸线很长,为保卫沿海地域,预防盐雾、海水和潮湿环境对穿甲弹用钨合金的腐蚀问题已经提到日程上来,为此应有针对性地开展弹用钨合金的腐蚀防护技术的研究。

4 结束语

高质量穿甲弹用钨合金是一个国家材料技术发展的重要标志,也是高性能动能穿甲弹的重要材料,其研制水平将关系到提高我国武器装备水平和能否打赢一场局部战争的需要。为此,应针对目前存在的一些问题和实际需要,一方面大力加强军用材料研制项目的管理与协调,另一方面也要进一步提高研究院所和高等院校的科研管理水平,从而形成一种具有高度系统性和互补性的研究体制,并造就一支高水平的专业科研队伍,以促进我国弹用钨

合金材料技术研制向低投入、高产出、高水平和高实用性的方向发展。而且应力争在短时期内在一些关键技术上有所突破,以期能大幅度提高我国穿甲弹用钨合金材料的综合性能。

REFERENCES

- [1] 庞前列. 高密度 W-Ni-Fe 合金的研究及发展[J]. 中国钨业, 2000, 15(4): 34 - 36.
PANG Qian-lie. The study and development of high density W-Ni-Fe alloys [J]. China Tungsten Industry, 2000, 15(4): 34 - 36.
- [2] 王玉金, 宋桂明, 赵宇. 合金元素及第二相对钨合金性能的影响[J]. 宇航材料工艺, 1998, 28(5): 11 - 18.
WANG Yu-jin, SONG Gui-ming, ZHOU Yu, et al. Influence of alloying elements and secondary phase on tungsten alloy property [J]. Aerospace Materials & Technology, 1998, 28(5): 11 - 18.
- [3] 张太全, 王玉金, 宋桂明, 等. 钨及钨合金的变形、断裂及强化机制研究综述[J]. 有色金属, 2004, 56(1): 7 - 12.
ZHANG Tai-quan, WANG Yu-jin, SONG Gui-ming, et al. Review of deformation/strengthening/mechanism of tungsten alloys [J]. Nonferrous Metals, 2004, 56(1): 7 - 12.
- [4] 王辅忠, 李荣华. 高比重钨合金沉淀强化的研究[J]. 材料报导, 2003, 17(1): 16 - 17.
WANG Fu-zhong, LI Rong-hua. A study of precipitation strengthening in tungsten heavy alloys [J]. Material Review, 2003, 17(1): 16 - 17.
- [5] 唐新文, 罗述东, 易健宏. 添加钴对 W-Ni-Fe 高密度合金性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2003, 8(3): 196 - 200.
TANG Xin-wen, LUO Shu-dong, YI Jian-hong. The effect of Co addition on the properties of W-Ni-Fe high density tungsten heavy alloys [J]. Powder Metallurgy Materials Science and Engineering, 2003, 8(3): 196 - 200.
- [6] 刘志国, 张宝生, 庄育智. 新型 W-Ni-Fe-TiB₂ 合金[J]. 中国有色金属学报, 1995, 5(4): 107 - 111.
LIU Zhi-guo, ZHANG Bao-sheng, ZHANG Yu-zhi. New W-Ni-Fe-TiB₂ alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1995, 5(4): 107 - 111.
- [7] 冯庆芬, 丁东华, 方民宪, 等. La, Ce 对 93W-Ni-Fe 合金动态拉伸性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(3): 7 - 10.
FENG Qing-fen, DING Hua-dong, FANG Min-xian, et al. Influence of La and Ce on dynamic tensile property of 93W-Ni-Fe alloy [J]. Ordnance Mat Sci and Eng, 2003, 26(3): 7 - 10.
- [8] 周国安, 刘勇, 邓欣, 等. Si、Na 掺杂的 W-Ni-Fe 高比重合金界面结构的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 1999, 22(3): 3 - 7.
ZHOU Guo-an, LIU Yong, DENG Xin, et al. Influence of impurities of Si and Na on interface structure of W-Ni-Fe heavy alloy [J]. Ordnance Mat. Sci. and Eng., 1999, 22(3): 3 - 7.
- [9] 张宝生, 康志君. 高密度钨合金的穿甲特性及其应用[J]. 中国钨业, 1999, 14(5-6): 178 - 185.
ZHANG Bao-sheng, KANG Zhi-jun. The penetration properties and applications of high density tungsten heavy alloys [J]. China Tungsten Industry, 1999, 14(5-6): 178 - 185.
- [10] 王尔德, 于洋, 胡连喜, 等. W-Ni-Fe 系高密度钨合金形变强化工艺研究进展[J]. 粉末冶金技术, 2004, 22(5): 303 - 307.
WANG Er-de, YU Yang, HU Lian-xi, et al. Research progress in W-Ni-Fe tungsten heavy alloys deformation strengthening processing [J]. Powder Metallurgy Technology, 2004, 22(5): 303 - 307.
- [11] 史洪刚, 齐志望, 许杰, 等. 锻造变形量对钨合金材料性能的影响[J]. 兵器材料科学与工程, 1998, 21(4): 3 - 6.
SHI Hong-gang, QI Zhi-wang, XU Jie, et al. Influences of swaged deformation levels on properties about tungsten Alloys [J]. Ordnance Mat. Sci. and Eng., 1998, 21(4): 3 - 6.
- [12] 王换玉, 才鸿年, 钱学梅. 钨合金液力挤压强化技术研究[J]. 先进材料与制造技术, 1998, (5): 1 - 5, 25.
WANG Huan-yu, CAI Hong-nian, QIAN Xue-mei. The study for strengthen technics of hydrostatic extrusion tungsten alloys [J]. Applied Technology of Advanced Manufacturing and Materials 1998(5): 1 - 5, 25.
- [13] 刘志强, 杨国毅, 赵红梅, 等. 高密度钨合金静液挤压组织缺陷分析[J]. 兵器材料科学与工程, 2004, 27(4): 40 - 43.
LIU Zhi-qiang, YANG Guo-yi, ZHAO Hong-Mei, et al. Analysis for microstructure and defect of hydrostatic extrusion tungsten alloys [J]. Ordnance Mat. Sci. and Eng., 2004, 27(4): 40 - 43.
- [14] 谭成文, 王富耻, 李树奎. 绝热剪切变形局部化研究进展与发展趋势[J]. 兵器材料科学与工程, 2003, 26(5): 62 - 67.
TAN Cheng-wen, WANG Fu-chi, LI Shu-kui. Progresses and trends in researches on adiabatic shear deformation [J]. Ordnance Mat. Sci. and Eng., 2003, 26(5): 62 - 67.
- [15] 魏志刚, 胡时胜, 李永池. 粉末烧结钨合金材料的绝热剪切变形局部化实验研究[J]. 金属学报, 1999, 35(8): 829 - 833.

- WEI Zhi-gang, HU Shi-sheng, LI Yong-chi, et al. Adiabatic shearing localization of tungsten heavy alloy [J]. *Acta Metallurgical Sinica*, 1999, 35(8): 829 - 833.
- [16] 许沐华, 张刚明, 王肖军, 等. 预扭转钨合金杆弹侵彻能力的细观研究[J]. *爆炸与冲击*, 2000, 20(2): 143.
- XU Shu-hua, ZHANG Gang-ming, WANG Xiao-jun, et al. Microscopic investigation on the improvement of penetration ability of pre-torqued tungsten alloy [J]. *Explosion & Shock Waves*, 2000, 20(2): 143 - 149.
- [17] 谭成文, 王富耻, 刘远宏, 等. 材料绝热剪切敏感性表征及测试方法研究[J]. *北京理工大学学报*, 2004, 24(5): 377 - 379.
- TAN Cheng-wen, WANG FU-chi, LIU Yuan-hong, et al. Characterization of adiabatic shear-band susceptibility and relevant testing [J]. *Transactions of Institute of Science and Technology Beijing*, 2004, 24(5): 377 - 379, 391.
- [18] 黄伟, 刘筱玲, 赵宝荣, 等. 钨合金内部应力场的数值模拟[J]. *兵器材料科学与工程*, 2005, 28(2): 51 - 54.
- HUANG Wei, LIU Xiao-ling, ZHAO Bao-rong, et al. Numerical simulation of the WHA material's innerstress field [J]. *Ordnance Mat Sci and Eng*, 2005, 28(2): 51 - 54.
- [19] 房文斌, 王尔德, 胡连喜, 等. 高密度钨合金黏静液挤压流动粘度的数值计算[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(1): 33 - 36.
- FANG Wen-bin, WANG Er-de, HU Lian-Xi, et al. Numerical calculation of fluid viscosity in hot hydrostatic extrusion of high density tungsten alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, 34(1): 33 - 36.
- [20] 荣吉利, 于心健, 刘宾, 等. 钨合金易碎动能穿甲弹穿甲有限元模拟与分析[J]. *北京理工大学学报*, 2004, 24(3): 193 - 196.
- RONG Ji-li, YU Xin-jian, LIU Bin, et al. FEM simulation and analysis of tungsten heavy alloy fragile projectile under impact dynamics [J]. *Transactions of Institute of Science and Technology Beijing*, 2004, 24(3): 193 - 196.
- [21] 程兴旺, 王富耻, 王鲁, 等. 钨合金壳体侵彻混凝土靶板过程壳体应变的实验测试[J]. *兵工学报*, 2004, 25(1): 102 - 105.
- CHENG Xing-wang, WANG Fu-chi, WANG Lu, et al. Experimental study on the strain history of critical section during a normal penetration of tungsten alloy shell into a concrete target [J]. 2004, 25(1): 102 - 105.
- [22] 任春雨, 朱锡, 梅志远. 复合材料层合板冲击模型研究现状[J]. *兵器材料科学与工程*, 2005, 28(4): 59 - 67.
- REN Chun-yu, ZHU Xi, MEI Zhi-yuan. The developments of impact models for laminated composites [J]. *Ordnance Mat Sci and Eng*, 2005, 28(4): 59 - 67.
- [23] 叶途明, 易健宏, 李丽娅, 等. 高密度钨合金研究的新进展[J]. *粉末冶金材料科学与工程*. 2003, 8(2): 134 - 140.
- YE Tu-ming, YI Jian-hong, LI Li-ya, et al. New advances in study of tungsten heavy alloy [J]. *Powder Metallurgy Materials Science and Engineering*, 2003, 8(2): 134 - 140.
- [24] 范景莲, 黄白云, 曲选辉, 等. 纳米晶钨合金粉末常压烧结的致密化和晶粒长大[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2001, 6(2): 83 - 88.
- FAN Jing-lian, Huang Bai-yun, Qu Xuan-hui, et al. Densification and grain growth of nano-structure tungsten alloy powder during pressureless sintering [J]. *Powder Metallurgy Materials Science and Engineering*, 2001, 6(2): 83 - 88.
- [25] 黄白云, 范景莲, 曲选辉, 等. 纳米钨合金材料的研究与应用[J]. *中国钨业*. 2001, 2001, 16(5 - 6): 38 - 43.
- Huang Bai-yun, FAN Jing-lian, Qu Xuan-hui, et al. Research and application of nano-materials of tungsten alloys [J]. *China Tungsten Industry*, 2001, 16(5 - 6): 38 - 88.
- [26] 罗述东, 唐新文, 曹正华. 钨基高密度合金粉末的温压成形行为[J]. *粉末冶金材料科学与工程*. 2003, 8(1): 23 - 27.
- LUO Shu-dong, TANG Xin-wen, CAO Zheng-hua, et al. The warm compacting behavior of tungsten heavy alloy powders [J]. *Powder Metallurgy Materials Science and Engineering*, 2003, 8(1): 23 - 27.
- [27] 李信, 武胜. 预氧化烧结高密度钨合金[J]. *稀有金属材料与工程*, 2002, 31(4): 319.
- LI Xin, WU Sheng. Tungsten heavy alloy by pre-oxidation sintering [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2002, 31(4): 319.
- [28] 田开文, 尚福军, 祝理君. 具备绝热敏感性的钨合金穿甲弹材料研究现状[J]. *兵器材料科学与工程*, 2005, 28(4): 53 - 56.
- TIAN Kai-wen, SHANG Fu-jun, ZHU Li-jun. Research status of WHA with adiabatic shear susceptibility [J]. *Ordnance Mat Sci and Eng*, 2005, 28(4): 53 - 56.
- [29] 张存信, 范爱国, 田华. 钨丝束穿甲弹的研究进展[J]. *兵器材料科学与工程*, 2003, 26(6): 63 - 65.
- ZHANG Cun-xin, FAN Ai-guo, TIAN Hua. Development of penetrators made of bunched W wires [J]. *Ordnance Mat Sci and Eng*, 2003, 26(6): 63 - 65.