

文章编号:1009-0622(2007)01-0025-05

钨基合金穿、破甲材料的研究进展

范景莲, 刘涛, 成会朝, 黄伯云

(中南大学粉末冶金国家重点实验室, 湖南长沙 410083)

摘要:科学技术的发展对钨基合金用作穿、破甲材料的要求日益提高,要求高强韧、自锐性强,好的射流等多功能化,以及材料的多品种化。钨基合金由于密度高、强度和延性好而用作穿、破甲材料越来越引起国内外的关注。作者阐述了国内外近10年来钨合金穿、破甲材料在材料体系、形变强化和动态力学性能等方面的研究进展。

关键词:钨基合金;穿甲;破甲;动态力学性能

中图分类号:TG146.4 **文献标识码:**A

0 前言

高密度钨合金由于其具有高密度、较好的强度与韧性配合而成为战斗部件的关键材料之一,尤其在动能穿甲弹及破甲材料上具有广泛的应用前景。与贫铀弹相比,钨合金穿甲弹的穿甲威力较差,这限制了钨合金在穿、破甲方面的应用。随着科学技术水平的不断发展和提高,对钨合金材料的穿甲、破甲行为和机理的研究也不断深入。目前国内外学者从钨合金材料的组成、显微组织以及动态力学性能方面做了大量的工作。笔者对近年来钨合金在合金组成、形变强化、动态力学性能研究及高性能细晶钨合金制备方面的研究进展进行了综述。

1 材料组元

钨合金中典型组织一般为球形的钨颗粒分布在粘结相中,这样既保证合金有足够的强度,而且还保证有足够的韧性。常规钨合金选择用镍、铁元素组成粘结相,形成W-Ni-Fe合金体系,该合金具有较好的强度和延性,但在动能穿透过程中容易形成蘑菇头而钝化,不能很好地产生穿甲自锐化效果。从降低钨合金的烧结温度和提高钨合金动能穿透器的穿甲能力这两个目的出发,开展了新型合金体系的研究,已研究的新型钨合金体系主要包括W-Ni-Mn, W-Hf等新型钨合金。

1.1 W-Ni-Fe 常规钨合金

常规W-Ni-Fe钨合金中钨含量直接影响合金

的性能,随着钨含量的增加,合金的拉伸强度略有增加而延伸率则下降;钨合金中粘结相一般是由镍和铁组成,其中Ni/Fe比例对合金性能影响很大,当比例不合适时,易产生金属间化合物,当比例为7:3时合金性能最好;为了降低钨合金烧结温度和细化晶粒,还会少量添加其他元素如钴、钼等。

1.2 W-Hf 和 W-Ni-Mn 新型钨合金

1.2.1 W-Hf 合金

Hf的热导率和比热与U的相近,有助于形成绝热剪切带。但由于Hf的高熔点降低了绝热剪切带形成的能力。当W与Hf的质量百分比W:Hf=74:26时,其密度与90W-7Ni-3Fe合金的密度相当。因此,74W-26Hf合金在不需钨颗粒发生严重破坏时,就能形成局部剪切带,理论上这种钨合金比传统W-Ni-Fe合金具有更好的穿透性。但Hf熔点高,与W形成的液相温度高(约2000℃),不利于绝热剪切带的形成,而且由于这种材料的烧结温度高而难以制备。

1.2.2 W-Ni-Mn 合金

与铁相比,锰的热导率很低,对绝热剪切带的形成非常有利。而锰的熔点低,当Mn:Ni=6:4时,形成粘结相的液相生成的熔度约为1014℃。因此Ni-Mn作为钨合金的粘结相其优势非常明显,主要体现在:其一可以大大降低烧结温度;其二具有低熔点和低热导性等特点,非常有利于形成绝热剪切带。但金属锰存在以下两个问题:(a)活性非常高,与氧结合的

收稿日期:2006-11-28

基金项目:国家自然科学基金(50674106),国家“863”项目基金(2006AA03A213)

作者简介:范景莲(1967-),女,湖南澧县人,中南大学教授,博士生导师,从事钨钼难熔金属的研究。

亲和性很大,易于形成氧化物夹杂,烧结致密非常困难,合金中存在较大的残留孔隙。(b)在烧结冷却过程中,Ni-Mn二元体系的相变过程非常复杂,与Ni-Fe相比,其相变过程要复杂得多,难以控制得到适当的组织结构。

A Bose 等人在应变率为 $5\ 000\text{s}^{-1}$ 的条件下采用 Hopkinson 杆对 W-Ni-Mn 合金进行动态压缩实验,研究结果证明了当压缩 45% 时 W-Ni-Mn 合金易于形成 45° 绝热剪切带。图 1 为 W-Ni-Mn 合金在动态压缩条件下绝热剪切带形成照片^[4]。



图 1 W-Ni-Mn 合金绝热剪切带裂纹的形成

1.3 W-Ta 合金

W-Ta 合金是一种高密度、高强度的重金属材料,尤其在高应变率下具有很高的延展性,这些性能使得该合金在穿、破甲方面有着很好的应用前景。图 2 是 Ta-10W 合金的显微分析照片,从这些图上可以看出,Ta-10W 合金具有良好的动态力学性能,在高应变率下能形成绝热剪切带^[5]。



图 2 应变率为 3000s^{-1} 时的 Ta-10W 合金中绝热剪切带的组织照片(室温下)

1.4 W-Cu 合金

铜具有密度较大、熔点适中、声速较高、塑性好、有一定的强度等特点,易于形成延展性好、不易断裂、不气化的金属射流,而且价格便宜,而钨因具有高密度、适中的声速和其他一些优异的性能,因此在破甲材料方面有着广泛的应用前景。利用各自的特点将两者复合后组成复合型药型罩材料来发挥综合优势,与传统的单金属药型罩相比,其能量转换与吸收机制更合理,化学能的利用率更充分,破甲性能更优越,造价也更低廉,越来越受到美国、法国等国家的重视^[6]。

钨铜复合材料药型罩的聚能效果明显高于纯铜罩,关键是钨铜复合粉的制备。通常方法是采用机械

合金化法制备 W-Cu 复合粉末,后来出现了利用共还原法制备钨铜复合粉。在此基础上,范景莲等人采用溶胶喷雾-氢气还原的办法制备出超细/纳米级的 W-Cu 复合粉末,利用该粉末制备出 W-Cu 材料,取得了不错的破甲效果。

2 形变强化

形变强化是利用金属(或合金)加工硬化原理,在变形压力作用下使材料变形,以改变和改善钨合金中的组织结构,从而提高材料强度的一种强化技术。形变强化不仅可以大幅度提高合金的强度,而且也能提高钨合金的穿甲性能。钨合金形变强化后的合金组织由于具有纤维状的组织形态,更容易形成绝热剪切带,提高其穿甲性能。

目前对钨合金进行形变强化的方式包括锻造、静液挤压、热挤压、热轧或热挤压(轧)与锻造复合变形工艺^[6]。

(1)锻造。在锻造过程中,变形量对合金性能有很大影响。研究表明,采用一次变形处理,其变形量为 16.9% 时,材料的拉伸断裂强度为 1 200 MPa,延伸率为 10%。经过 3 次循环锻造,合金的变形量由 16.9% 增加到 38.9%~48.1%,强度也大大提高,如图 3 所示。

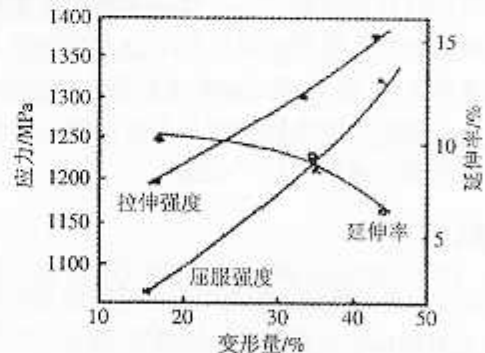


图 3 锻造变形量与合金性能的关系

多次循环锻造变形可以使变形量增加。从表 1 可以看出,随着强度的大幅度增加,延性大大下降,这是锻造变形强化工艺一个最大的缺点。由于设备和工艺因素的差别,国内在形变强化方面的研究与国外还存在一定的差距。

表 1 WHA 大变形锻造钨合金的力学性能

合金	材料产地	锻造次数	变形量/%	屈服强度/MPa	拉伸强度/MPa	延伸率/%
93W	法国	4	60	1560	1600	5
93W	中国	4	65.9	1300	1380	8
93W	中国	5	75	1390	1430	10

(2)静液挤压技术。静液挤压形变强化技术是一

种先进的变形加工工艺,能一次获得 60%~80%的大变形量,进一步变形可以获得 90%以上的变形。形变强化后合金的强度得到了大大的提高,但延性降低(见表 2)。在相同变形量条件下,形变强化效果明显好于普通的旋锻工艺。

表 2 静液挤压与旋锻 93W 合金的力学性能

形变方式	变形量 %	静态拉伸强度 MPa	延伸率 %	动态拉伸强度 MPa	动态抗压强度 MPa
旋锻	20	1 135	13	1 385	1 523
静液挤压	22.5	1 209	20.6	1 461	1 660
静液挤压	59	1 592	8.2	2 066	2 203
静液挤压	85	1 736	5.6	2 218	2 359

由于静液挤压变形量较大,材料中存在较大的残余内应力,因此钨合金材料在静液挤压变形后须通过后续的去应力退火来改善材料的内应力状态,从而提高材料的综合性能。

(3)热机械加工技术。为了使高钨含量具有很高的变形能力,而同时又不对材料造成破坏,发展了一种新的热机械加工技术。热机械加工技术的特点是一次变形量很大,比静液挤压变形量还要大得多,最高可达到 95%以上而且合金的延性很好。

3 钨合金的动态力学性能

3.1 高应变率下的应力-应变率相互响应关系

图 4 分别为锻造态多晶纯钨在不同应变率条件下用 Hopkinson 装置测试的应力-应变关系。随剪切应变增加,剪切应力(合金强度)增加,出现应变硬化效应。

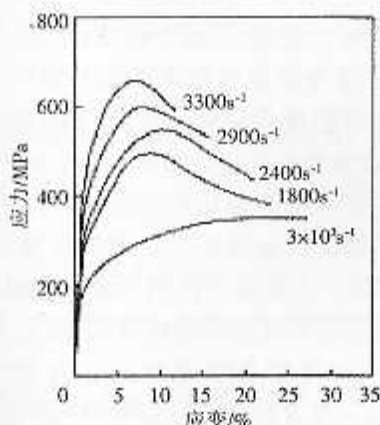


图 4 锻造态多晶纯钨在不同应变率时的应力-应变曲线

图 5 为钨合金材料在准静态和高应变率下的应力-应变相互响应关系。图中结果表明,准静态下和动态下的力学性能有很大的不同。在高应变率加载下,迅速产生屈服,屈服强度大大增加,当达到最大

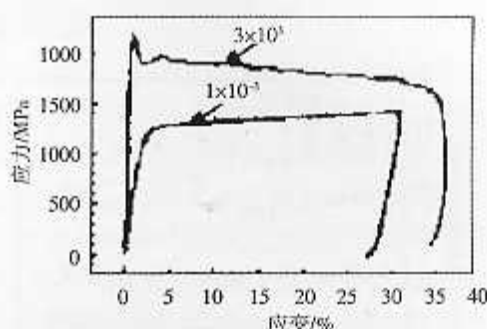


图 5 W-Ni-Fe 合金在 $3 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ 和 $1 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ 下的应力-应变关系

应力后,随应变增加应力下降,产生热软化。这说明钨合金与纯钨在很大程度上类似,屈服强度和热软化对应变率的依赖性较强。但在钨合金的应力-应变曲线中,应力随应变增强而下降呈锯齿状和渐进性,不象纯钨材料应力-应变曲线中呈光滑性骤然下降,这说明纯钨比钨合金对应变率更敏感。图 6 为 W-Hf 材料在动态加载时的应力-应变曲线关系,W-Hf 合金的流动强度与 W-Ni-Fe 合金的相近,而且在 W-Hf 合金中,合金随应变增加而未出现“应变硬化”效应,而直接出现随应变增加应力下降的“热软化”现象,该材料在静态应变失效时,组织中出现的局部绝热剪切带甚至比 W 合金在动态下出现局部绝热剪切带的数量还要多,究其原因是因为 Hf 的熔点低和热扩散低,从而导致热软化。

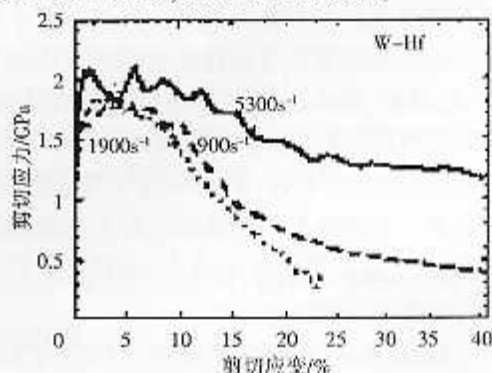


图 6 W-Hf 的剪切应力-剪切应变曲线

3.2 各种因素对动态力学性能的影响

钨合金动态加载下的力学性能对应变率敏感,同时还对温度敏感。此外,钨含量、烧结后处理状态、钨颗粒连接度、组织结构对动态力学性能也有较大的影响。

(1)在不同温度下的动态应力-应变行为。Kumar 等人研究了 92.5W-5Ni-2.5Fe 合金在应变率为 0.1%、10%和最大拉伸应力下的强度和延伸率随温度的变化。用 $SRS = \Delta \sigma / D \ln \dot{\epsilon}$ 代表应变率敏感性因子 (Strain-Rate Sensitivity, SRS),图 7 为不同温度

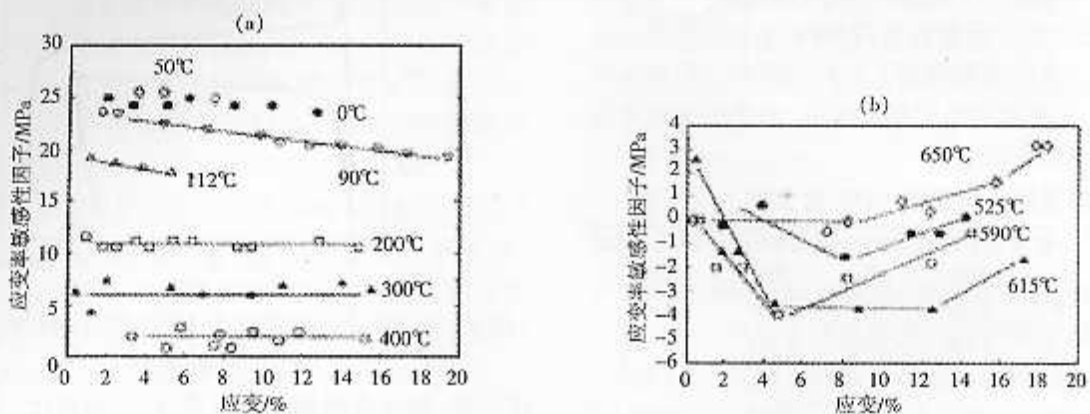


图 7 低温和中温下应变率敏感性因子与应变的关系

(a) $\leq 400^{\circ}\text{C}$; (b) $525\text{--}650^{\circ}\text{C}$

下 SRS 与应变的关系,可以看出温度对 SRS 有较大的影响。

(2) 钨含量。钨合金是一种对应变率敏感性的材料。随钨相含量增加,应变率敏感性增加,因此,钨合金对应变率的敏感性主要是钨晶粒对应变率的敏感性。

(3) 烧结后处理对动态力学性能的影响。对烧结态的钨合金进行热处理、锻造、挤压和时效等后处理对钨合金的动态力学行为有较大的影响。随应变增加,迅速产生应变硬化效应,应力大大增加,而应变降低。锻造态和时效态钨合金对应变率的敏感性比烧结态和热处理态钨合金的要高,而且在较小的应变下获得最大的剪切应力。钨合金的最大应力按烧结态、热处理态、锻造态和时效态顺序依次增加,准静态扭转的剪切应变最大。对于锻造态和时效态钨合金,当达到最大应力时,载荷迅速下降,迅速产生失稳和断裂,比烧结态和热处理态钨合金断裂发生得更突然,从失稳到断裂点距离大大缩短,这说明形成绝热剪切带的可能性更大^[9]。

(4) 钨颗粒连接度。W-W 颗粒连接度的变化对动态力学性能有影响。随 W-W 连接度降低,在应变加载下应变导致的失效危险性增加,而且失效力降低。在高应变率加载下两种不同连接度合金的屈服应力无明显变化。当 W-W 连接度高时,断裂表面表现为钨晶粒解理、W-W 脆性断裂和光滑的局部剪切失效。当 W-W 连接度低时,除了以上断裂特征以外,还出现延性烧结相呈韧窝状断裂。

(5) 显微组织。局部绝热剪切带的形成受钨合金的显微组织结构的影响,在高应变率动态加载下,当材料在微观结构上存在一些缺陷,呈偏析或富集态分布时,随应变率增加,出现非均匀塑性变形,钨合

金属材料会出现极好的局部绝热剪切带。此外,钨晶粒尺寸对动态力学行为也有较大影响。钨晶粒度大时,形成局部绝热剪切带的痕迹减少,这说明,钨晶粒尺寸大时,不利于绝热剪切带扩展,因此,钨晶粒度小有利于局部绝热剪切带的形成和扩展,从这个意义上延伸,钨晶粒的细晶化和纳米化是提高钨合金穿甲威力的发展方向^[6]。

4 细晶钨合金的研究

目前国内外研究者采用细化晶粒的方法来提高钨合金的综合力学性能和穿、破甲能力。采用纳米技术制备钨合金材料是研究发展新型高强韧钨合金的发展方向。美国、日本、韩国等正在着手研究具有超细晶粒结构的高密度钨合金破甲药型罩和纳米钨合金穿甲弹弹芯,以进一步提高穿、破甲威力。国内外学者采用机械合金化、冷凝干燥法、溶胶-凝胶法等对纳米高密度合金复合粉末的制备进行了研究^[7]。范景莲等人对机械合金化、溶胶-凝胶和喷雾干燥法制备超细/纳米钨基复合粉末进行了深入研究,并发展了先进的机械合金化和溶胶-喷雾干燥粉末制备技术以及细晶合金制备技术,取得了很大的进展。

(1) 机械合金化法。机械合金化是利用金属球对粉末体的碰撞而使粉末晶块细化。汪登龙、范景莲等人采用该方法制备出晶块尺寸为 $20\text{--}40\text{nm}$ 的 $90\text{W-}7\text{Ni-}3\text{Fe}$ 复合粉末,通过两步烧结法得到了最大拉伸强度大于 $1\ 000\text{MPa}$,延伸率为 $25\%\text{--}30\%$ 、钨晶粒尺寸 $8\text{--}15\mu\text{m}$ 的细晶高性能烧结态钨合金材料。图 8 为烧结态下 $90\text{W-}7\text{Ni-}3\text{Fe}$ 钨合金拉伸断口形貌。

(2) 溶胶-喷雾干燥法。溶胶-喷雾干燥法是将含有钨、镍、铁等元素的溶胶通过物理手段进行雾化

获得超微粒子的一种化学与物理相结合的方法。马运柱、范景莲等人采用该方法制备出 F_{SSS} 粒度小于 $0.61\mu\text{m}$, BET 粒度小于 100nm 的纳米级 $90\text{W}-7\text{Ni}-3\text{Fe}$ 复合粉末(见图 9),通过两步烧结法制备了晶粒为 $12-15\mu\text{m}$ 、拉伸强度为 $1\ 078\text{MPa}$ 、延伸率为 15.3% 的细晶 $90\text{W}-7\text{Ni}-3\text{Fe}$ 合金。范景莲等人还用该方法制备出组织均匀的超细/纳米级 $\text{W}-\text{Cu}$ 系列粉末,并用于破甲材料。

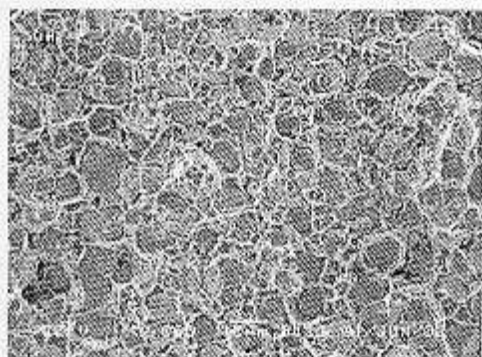


图 8 烧结态下 $90\text{W}-7\text{Ni}-3\text{Fe}$ 钨合金拉伸断口形貌

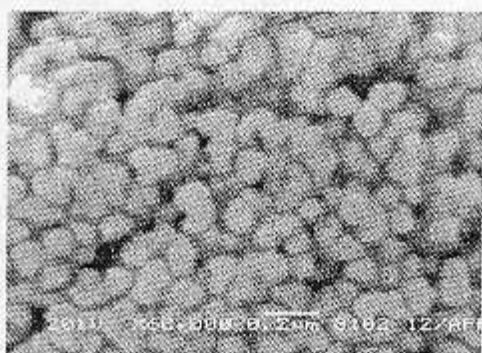


图 9 喷雾干燥-热还原粉末的 SEM 图

5 结束语

钨合金是一种对应变率敏感和对绝热剪切不敏感的材料,钨合金对应变率和对绝热剪切的敏感性主要取决于钨晶粒对应变率的敏感和在高应变率下钨晶粒的变形。当钨合金在高应变率下发生大量塑性变形导致的热软化程度大大高于变形导致的应变硬化时,有利于形成局部绝热剪切带,提高钨合金的热软化特性可以降低钨合金对应变率的敏感性和提高钨合金对绝热剪切的敏感性。因此,对钨合金材料进行组元、成分、显微组织和工艺的设计将是钨合金用作动能穿透器的发展方向。

参考文献:

- [1] Bose A, Yang S C, German R M. Development of a new W-Ni-Mn heavy alloy [J]. *Advances in Powder Metallurgy*, 1991, 4:425-437.
- [2] Perez-Prado M T, Hines J A, Vecchio K S. Microstructural evolution in adiabatic shear bands in Ta and Ta-W alloys[J]. *Acta materialia*, 2001,49:2905-2917.
- [3] 韩欢庆,姜伟,张鹏,等.金属粉末在药型罩中的应用[J]. *粉末冶金工业*, 2004,14(3):1-4.
- [4] 范景莲.钨合金及其制备新技术[M].北京:冶金工业出版社,2006.
- [5] 刘涛,范景莲. W-Ni-Fe 系钨合金的形变强化与动态力学性能研究进展[J]. *中国钨业*, 2005, 20(4):18-23.
- [6] 范景莲,刘涛,成会朝,等.钨合金在高速加载条件下的动态力学性能和失效机理 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2006, 35(6):841-844.
- [7] 范景莲,刘涛,成会朝.难熔钨合金与硬质合金的研究新动向[J]. *中国钨业*, 2005, 20(3):17-20.

Technology Advancement of Tungsten-based Alloy in Armor-piercing and Armor-exploding

FAN Jing-lian, LIU Tao, CHENG Hui-chao, HUANG Bai-yun

(State Key Laboratory for Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: With the rapid development of science and technology, there have been growing improvements on tungsten-based alloy in armor-piercing and armor-exploding. High strength and toughness, high self-sharpening, good jet and multiple material products are some of the most important requirements in tungsten-based alloy. For its high density, high strength and good ductility, the tungsten-based alloy used in armor-piercing and armor-exploding has attracted wide attention. This paper elaborates the recent technology advances in material system, strain strengthening and dynamic mechanics of tungsten-based alloy.

Key words: tungsten-based alloy; armor-piercing; armor-exploding; dynamic mechanics performances

(编辑:尹晓星)