

一种 W-Ni-Al-Fe 系易碎钨合金材料的研究

Fragile Tungsten Alloys Made of W-Ni-Al-Fe

袁慎坡¹, 李树奎², 宋修纲³, 程兴旺², 吴复尧²

(1 北京大学 口腔医学院 口腔医院, 北京 100081;

2 北京理工大学, 北京 100081; 3 北方工具有限公司, 黑龙江 牡丹江 157000)

YUAN Shen-po¹, LI Shu-kuai²,

SONG Xiu-gang³, CHENG Xing-wang², WU Fu-yao²

(1 Peking University School & Hospital of Stomatology,

Beijing 100081, China; 2 Beijing Institute of Technology, Beijing 100081,

China; 3 North Tool Corporation Limited, Mudanjiang 157000, Heilongjiang, China)

摘要: 研究了一种 W-Ni-Fe-Al 系易碎穿甲弹芯材料, 该材料采用冷等静压成型和液相烧结工艺制备。经金相检验和拉伸断口扫描电镜分析, 该材料在烧结过程中可形成 Al_2O_3 脆性壳体分布于黏结相中, 起到降低抗拉强度、提高弹芯破碎性的作用。性能测试表明, 该材料与相同钨含量的 93W-Ni-Fe 合金相比, 动态压缩强度相当, 而静拉伸强度下降了约 200MPa, 延伸率下降了约 20%。

关键词: 易碎钨合金; W-Ni-Al-Fe; 弹芯

中图分类号: TG14 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)09-0026-04

Abstract: A fragile penetrator material made of W-Ni-Al-Fe was studied. The material was made by CIP and sintering process. Al_2O_3 was found in the matrix of the materials through metallographic testing and SEM analysis, which reduced the tensile strength. All of this improved the fragmentation of penetrator. The dynamic compressive strength of the new type materials was the same as 93W-Ni-Fe alloys, but the tensile strength reduced about 200MPa and the extension rates reduced 20%.

Key words: fragile tungsten heavy alloy; W-Ni-Al-Fe; penetrator

易碎型穿甲弹要求弹芯材料在穿靶过程中依靠弹靶的相互作用和自身的性能特点, 自动破碎成大量有效破片, 穿甲后形成锥形膨胀的破片弹幕, 从而提高穿甲弹对武装直升机、导弹壳体和轻型装甲车辆的侵彻和二次毁伤效果。为保证弹芯材料的发射强度和足够的贯穿能力, 弹芯材料应具有足够高的动态抗压强度。同时为了保证弹芯材料的破碎性, 它又应具有较低的动态抗拉强度。

易碎型穿甲弹的提出和研制仅有十几年的历史, 但由于其独特的性能特点而倍受各国的重视。国外所研制的易碎型弹芯材料有易碎纯钨材料、铁碳或铁和三氧化二铝粉末冶金材料以及不锈钢、铁、石墨烧结材料。根据穿甲弹外弹道和终点弹道的要求, 纯钨是易碎穿甲弹材料研究的重点。国内近年来对易碎型弹芯材料进行了一系列研究, 重点开发了 W-Ni-Fe 和 W-Ni-Cu 合金。这两种材料都能达到较好的穿甲后效, 但也存在着脆性过高或密度较低的缺点。

本工作将具有高温韧脆转变、低应变硬化率的

Ni-Fe-Al 金属间化合物作为钨合金材料的黏结相, 制备出一种新型易碎型钨合金材料, 其黏结相是具有有序面心立方结构的 Ni-Fe-Al 金属间化合物, 利用该材料在一定温度范围内其强度和塑性具有随温度升高而降低的反常力学行为^[1-5]和烧结过程中形成 Al_2O_3 脆性相使得其在穿靶后表现出易碎效果。这种新型易碎型钨合金材料在具有易碎性的条件下保留了高的动态压缩强度和一定的塑性^[6], 对保证发射强度有利。

1 材料制备与研究方法

实验所选用的材料成分及配比如表 1 所示。其中所选用的还原钨粉纯度在 99.9% (质量分数) 以上, 粒径为 3~5 μm ; 金属间化合物 NiAlFe 粉的粒径小于 50 μm 。将粉末按比例混合后经冷等静压成型, 1480℃ 左右、 H_2 气氛条件烧结, 保温 40min 后经 3h, 1100℃ 真空热处理。同时制备常规的钨合金 93W-4.9Ni-2.1Fe 作为实验对比材料。

表 1 钨合金材料的成分及配比

Table 1 Mass fraction of tungsten alloy

No	Mass fraction of the material / %	Abbreviation of tungsten alloy
1	93W-7(NiAlFe)	93W-NiAlFe
2	93W-4. 9Ni-2. 1Fe	93W

利用排水法测量钨合金的密度; 利用洛氏硬度计测试所制得钨合金的硬度值; 在扫描电镜下观察钨合金的微观结构, 并利用能谱对钨合金黏结相的组织进行分析; 分别利用万能力学试验机和 Hopkinson 压杆装置对制得的钨合金进行静态拉伸实验和动态压缩实验, 对实验结果进行分析。

2 实验结果与分析

2.1 密度及硬度测试结果与分析

表 2 是钨合金密度及硬度测量结果。从表 2 可以看出, 不同黏结相成分及配比的钨合金, 经氢气烧结及真空退火处理后, 试样的相对密度均达到 99% 以上, 表明制备的钨合金试样已近于全致密状态, 显示出很好的致密性。从钨合金硬度测试结果来看, 以 NiAlFe

为黏结相的钨合金的硬度比传统钨合金材料的硬度值高, 较好地满足了穿甲弹弹芯用钨合金材料的基本静态性能要求。

表 2 钨合金密度及硬度测量结果

Table 2 The density and hardness of tungsten alloy

No	Abbreviation of tungsten alloy	Actual density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Relative density/%	Hardness (HRC)
1	93W-NiAlFe	17.03	99.15	27.5
2	93W	17.62	99.30	25.6

2.2 钨合金微观组织分析

图 1 为钨合金的微观组织照片。从图 1 可以看出, 93W-7(NiAlFe) 合金在烧结过程中黏结相逐渐熔化并扩散至钨颗粒周围, 钨-黏结相接触度显著增加, 约占 85% 以上, 钨晶粒的晶粒度增大至 35~ 40 μm , 显示出较好的液相烧结效果。

对比 93W-7(NiAlFe) 和 93W-4. 9Ni-2. 1Fe 的微观组织可以明显看出, 93W-7(NiAlFe) 的黏结相中存在一些特殊形态的结构, 即厚度约为 2~ 4 μm 的球壳。对该位置的元素组成进行能谱分析, 分析结果(图 2 中 Spectrum1) 清楚地表明其成分为 Al_2O_3 。

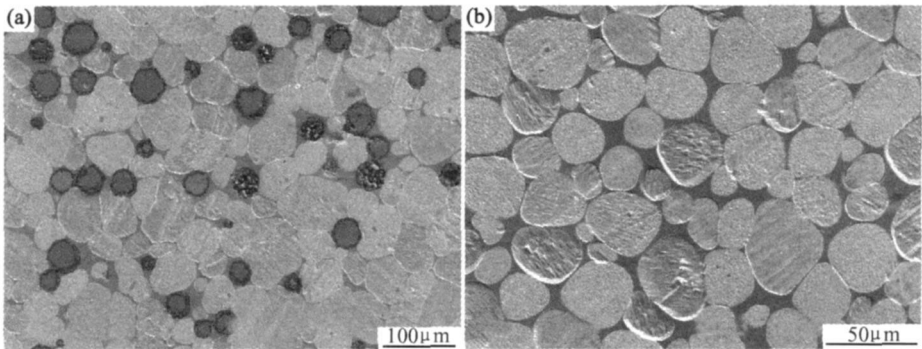


图 1 钨合金微观组织照片 (a) 93W-7(NiAlFe); (b) 93W-4. 9Ni-2. 1Fe

Fig 1 The microstructure of tungsten alloy (a) 93W-7(NiAlFe); (b) 93W-4. 9Ni-2. 1Fe

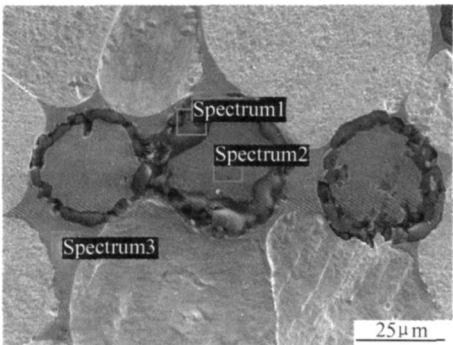
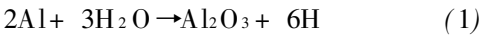


图 2 93W-7(NiAlFe) 合金微观组织能谱分析位置示例

Fig 2 The location of energy spectroscopy of 93W-7(NiAlFe)

这是由于在钨合金的制备过程中不可避免地会产生氧化的问题, 虽然 H_2 还原气氛下烧结可以将氧还原成蒸气 H_2O , 但在高温烧结温度下, 晶界上的 Al 仍会与蒸气 H_2O 反应, 反应方程式如下所示:



反应副产品是位于晶界的原子 H 和 Al_2O_3 。原子 H 可通过后续真空退火热处理工序加以去除。而非金属 Al_2O_3 熔点高(2050 $^{\circ}\text{C}$), 在 1500 $^{\circ}\text{C}$ 液相烧结温度下 Al_2O_3 仍以颗粒状存在, 伴随液态黏结相的扩散流动, 弥散分布在黏结相中的 Al_2O_3 颗粒相互聚集在一起, 尤其在钨颗粒的三向接触点, Al_2O_3 颗粒的团聚

更容易产生,形成较大的近似实心圆球的 Al_2O_3 团聚体或团聚球壳,粒径接近 $45\mu\text{m}$ 。图 2 中 Spectrum 2, Spectrum 3 的检测结果表明,未被球壳包围的黏结相成分基本一致,表明在液相烧结过程中钨在黏结相中的扩散较均匀。黏结相中 Al 在液相烧结过程中的氧化产物 Al_2O_3 将有助于降低黏结相的塑性,增加钨合金整体的脆性。

表 3 93W-7(NiAlFe) 合金微观组织能谱分析数据

Table 3 The result of energy spectroscopy of 93W-7(NiAlFe)

Mass fraction of elements / %	Spectrum 1	Spectrum 2	Spectrum 3
W	0	31.69	32.52
Ni	0	60.45	59.24
Fe	0	7.87	8.24
Al	51.46	0	0
O	48.54	0	0

2 3 钨合金力学性能测试结果与分析

2 3 1 静态拉伸结果与断口组织观察分析

不同成分配比及烧结工艺制得的钨合金,室温抗拉强度及延伸率如表 4 所示。对于传统穿甲弹弹芯用材料 93W 合金,抗拉强度在 965MPa 附近,延伸率为 30% 左右,93W-7(NiAlFe) 的抗拉强度和延伸率均较传统 93W 低。显然,以 NiAlFe 为黏结相的新型钨合金的脆性增加了,但同时还能保持有一定延伸率。

表 4 钨合金室温抗拉强度及延伸率

Table 4 The tensile strength and elongation of tungsten alloy

No	Abbreviation of tungsten alloy	Tensile strength/MPa	Elongation / %
1	93W-NiAlFe	775	9.5
2	93W	965	30.0

观察 93W-7(NiAlFe) 合金试样的静态拉伸断口(图 3),可以看出断口上存在明显的 Al_2O_3 颗粒团聚体, Al_2O_3 颗粒团聚体的存在在一定程度上降低了钨颗粒与基体相间的结合强度,从而容易导致微裂纹萌生和扩展。同时也观察到试样的断裂方式仍以钨颗粒的解理断裂为主,并伴随 W-W 界面分离、黏结相的韧性断裂,其中钨颗粒解理断裂所占比例超过 80%,这是新型钨合金材料保留一定抗拉强度和塑性值的原因。细小的单颗 Al_2O_3 粒子在合金基体相中存在可起到弥散强化作用,但当小尺寸的 Al_2O_3 颗粒聚集成尺寸较大的 Al_2O_3 团聚体时, Al_2O_3 颗粒间及 Al_2O_3 颗粒与基体相间弱的界面结合,成为裂纹萌生和扩展的最有利通道,从而显著降低合金的结合强度,使其抗拉强度和延伸率比传统的 93W-4 9N+2 1Fe 合金分别降低了约 200MPa 和 20%。

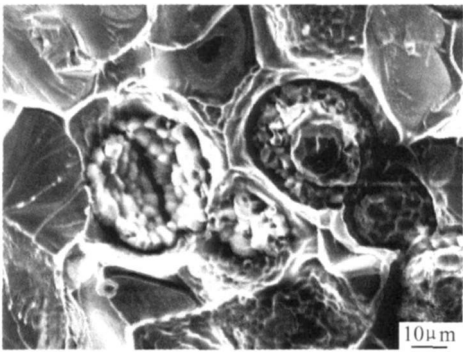


图 3 钨合金室温静态拉伸断口 SEM 照片

Fig 3 The SEM picture of the static tension fracture of tungsten alloy

2 3 2 动态压缩性能测试结果及分析

利用 Hopkinson 压杆装置对钨合金的动态压缩性能进行测试,结果如表 5 所示。从表 5 可以发现新型钨合金材料动态压缩强度超过了 2600MPa ,与相同钨含量的传统钨合金材料的动态压缩强度基本相当。

表 5 钨合金动态压缩性能的测试结果

Table 5 The result of dynamic compression of tungsten alloy

Abbreviation of tungsten alloy	No	Atmospheric pressure / MPa	Strain rate/ s^{-1}	Max stress / MPa	Max strain	Failure format
93W- NiAlFe	1-1	0.9	3028	2602.97	0.25	Plastic deformation
	1-2	1.0	3233	2750.71	0.23	Plastic deformation
	1-3	1.1	3752	2739.52	0.30	Plastic deformation
	1-4	1.2	4886	2739.59	0.21	Superficial desquamation
93W	2-1	0.9	3519	2517.88	0.28	Plastic deformation
	2-2	1.0	3599	2652.58	0.295	Plastic deformation
	2-3	1.1	3894	2743.16	0.31	Plastic deformation
	2-4	1.2	3951	2777.58	0.33	Superficial desquamation

在动态压缩实验过程中还观察到,随着冲击压力的不断增大,试样的厚度逐渐减小。在最大冲击压力为 1.2 MPa 时,试样表面只有少许脱落现象的发生,试样保持完整且表面也未出现可见的裂纹,表明这两种钨合金材料均具有良好的强韧性,能够满足穿甲弹弹芯材料发射时的安全性要求。

3 结论

(1) 采用氢气气氛相烧结制备的新型钨合金材料的致密化程度较高,达到了理论密度的 99% 以上,钨颗粒基本呈球形,均匀地分布在黏结相中,大部分钨颗粒间充满黏结相,只有少部分的钨颗粒发生局部的接触。

(2) 对于以 NiAlFe 为黏结相的新型钨合金,由于烧结过程中,液态下游离的铝原子与粉末中吸附的氧发生氧化反应,在部分黏结相的周围形成了厚度约为 2~4 μm 的 Al₂O₃ 球壳。

(3) 与相同钨含量的常规钨合金相比,以 NiAlFe 金属间化合物为黏结相的钨合金材料的抗拉强度和延伸率偏低,其主要原因是局部区域的黏结相-氧化铝界面分离所致。

(4) 新型钨合金材料动态压缩强度超过

2600 MPa,与相同钨含量的传统钨合金材料的动态压缩强度基本相当,较好地满足了穿甲弹用钨合金材料的动态压缩性能要求。

参考文献

- [1] GU HA S, KYRIACOU C, WITHERS J C, et al. Processing and properties of tungsten heavy alloys with Ni₄₈Al₁₂Fe₄₀ intermetallic matrix [J]. Materials and Manufacturing Processes, 1994, 9(6): 1163–1187.
- [2] GU HA S. The microstructures of multiphase Ni-20Al-30Fe and its constituent phase [J]. Materials Characterization, 1995, 34: 181–188.
- [3] 彭超群, 黄伯云, 贺跃辉. Ni-Al 系、Fe-Al 系和 Ti₃Al 金属间化合物研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2001, (6): 27–29.
- [4] 邢占平, 韩雅芳. 金属间化合物熔铸工艺的发展及应用 [J]. 材料导报, 2000, 14(3): 26–28.
- [5] GRIFFO A. Processing and physical metallurgy of tungsten-nickel aluminide composites [D]. State College: The Pennsylvania State University, 1996. 171.
- [6] 曾燕屏, 董建新, 张麦仓, 等. 拉伸载荷下镍基粉末高温合金中夹杂物行为 [J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(2): 202–204.

收稿日期: 2006-09-14; 修订日期: 2007-06-28

作者简介: 袁慎坡(1977–), 男, 硕士, 主要从事新材料开发及评价的研究. 联系地址: 北京市海淀区中关村南大街 22 号, 北京大学口腔医学院口腔材料研究室(100081)。

(上接第 17 页)

27–32.

- [6] KIM K B, WARREN P J, CANTOR B. Glass-forming ability of novel multicomponent (Ti₃₃Zr₃₃Hf₃₃)-(Ni₅₀Cu₅₀)-Al alloys developed by equiatomic substitution[J]. Materials Science and Engineering, 2004, A375–377: 317–321.
- [7] DAVIES H A. The formation of metallic glasses[J]. Physics and Chemistry of Glasses, 1976, 17: 159–173.
- [8] TURNBULL D. Under what conditions can a glass formed[J]. Contemporary Physics, 1969, 10(5): 473–488.
- [9] INOUE A, ZHANG T, MASUMOTO T. Glass-forming ability of alloys[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1993, 156–158: 473–480.
- [10] LU Z P, LIU C T. A new glass-forming ability criterion for bulk metallic glasses[J]. Acta Materialia, 2002, 50: 3501–3512.
- [11] LUBORSKY F E. Amorphous Metallic Alloys[M]. London: Butterworth, 1983.
- [12] DONALD I W, DAVIES H A. Prediction of glass-forming ability for metallic systems[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 1978, 30: 77–85.
- [13] CASTANET R, CHASTEL R, BERGMAN C. Etude thermodynamique du système Al-Si[J]. Materials Science and Engineering, 1978, 32: 93–97.
- [14] MASUMOTO M, SUZUKI K. Rapidly Quenched Metals[M]. Sendai: Japan Inst Met, 1982.
- [15] LU Z P, TAN H, LI Y, et al. The correlation between reduced glass transition temperature and glass forming ability of bulk

metallic glasses[J]. Scripta Materialia, 2000, 42: 667–673.

- [16] ZHANG Y, ZHAO D Q, WANG R J, et al. Glass forming ability and properties of Zr/Nb-based bulk metallic glasses[J]. Materials Transactions, JIM, 2000, 41: 1423–1426.
- [17] GREER A L. Confusion by design[J]. Nature, 1993, 366: 303–304.
- [18] CHEN H S. Thermodynamic considerations on the formation and stability of metallic glasses[J]. Acta Metallurgica, 1974, 22: 1505–1511.
- [19] VORONEL A, RABINOVICH S, KISLIUK A, et al. Universality of physical properties of disordered alloys[J]. Physical Review Letters, 1988, 60: 2402–2405.
- [20] INOUE A, TAKEUCHI A. Recent progress in bulk glassy, nanoquasicrystalline and nanocrystalline alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 375–377: 16–30.
- [21] SCHAFFER, SAXENA, ANTOLOVICH, et al. The Science and Design of Engineering Materials[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [22] TAKEUCHI A, INOUE A. Calculations of mixing enthalpy and mismatch entropy for ternary amorphous alloys[J]. Materials Transactions, JIM, 2000, 41: 1372–1378.

收稿日期: 2007-02-05; 修订日期: 2007-07-15

作者简介: 贺自强(1966–), 男, 高工, 博士后, 研究领域: 非晶态合金, 合金钢, 联系地址: 北京 81 号信箱 72 分箱(100095)。