

装甲用镁合金抗弹性能表征体系探讨

才鸿年^{1,2}, 谭成文^{1,2}, 王富耻², 陈志勇²

(1. 北京航空航天大学, 北京 100083; 2. 北京理工大学, 北京 100081)

[摘要] 介绍了高应变率载荷条件下镁合金的吸能特性及变形特征; 论述了对镁合金抗弹性能有重要影响的动态强度、高应变率能量吸收率、高应变率变形断裂特征和动态强度等科学问题; 就镁合金在装甲领域的应用研究做了初步探讨。

[关键词] 能量吸收率; 绝热剪切变形局部化; 动态强度; 动态硬度

[中图分类号] O385; TG146.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)02-0030-04

镁合金是目前最轻的金属结构材料, 具有低密度、高比强度、高比模量、良好阻尼减震特性以及优异的高应变率吸能特性、抗冲击性能等。尽管目前还存在低硬度、低耐蚀性、较差的室温成形性能等种种问题, 但通过大量研究人员的共同探索, 在能源极度紧张、武器系统减重的迫切需求的大背景下, 在不久的将来镁合金及其复合材料有望成为可代替铝合金等装甲材料的新型高性能装甲材料。笔者就镁合金在高应变率载荷条件下的特性予以论述, 在此基础上对装甲用镁合金的抗弹性能表征体系进行讨论, 旨在引导镁合金在装甲领域的科学探讨及应用研究。

1 高应变率载荷条件下镁合金的性能特点

镁合金在高应变率载荷条件下的性能特点决定镁合金及其复合材料有可能代替铝合金、钛合金等, 成为低成本、性能优异的轻质装甲材料, 但这一领域的研究很少, 认识相当肤浅。结合前人的一些研究成果和在相关研究领域的一些认识, 总结了与作为装甲材料相关的高应变率载荷条件下镁合金的性能特点。

1.1 高应变率吸能特性

作为装甲材料或结构, 其作用是在穿甲、破甲或碎甲武器等造成毁伤前消耗掉其动能, 因此作为装甲材料, 希望具有高的高应变率吸能特性。表征材料吸能特性的最直接参量为能量吸收率——单位质量材料由变形而吸收的能量。采用 MTS 和分离式 Hopkinson 杆 (SHB) 可以测试获得不同应变率载荷条件下的应力—应变关系, 通过对积分:

$$w = \int \sigma d\varepsilon \quad (1)$$

即可获得单位体积材料由于变形所吸收的能量, 除以密度可得到能量吸收率。

图 1 为日本冈山科技大学 (Okayama University of Science) 的研究结果^[1]: 3 种镁合金的拉伸强度都随载荷应变率的增大而升高, 这与大多数金属结构材料相同, 具有应变率硬化效应, 即随载荷应变率的加大, 其强度增大, 塑性降低。但有的镁合金材料 AZ31B-F 和 AZ61A-F 则随应变率的增大其塑性也有所升高, 表现为延伸率增大。因此, 最终表现为随应变率的升高, 材料的变形吸能的能力增强。这一特性对于作为装甲材料是有利的。

[收稿日期] 2005-09-01; **修回日期** 2005-11-29

[作者简介] 才鸿年 (1940-), 男, 北京市人, 中国工程院院士, 北京理工大学、北京航空航天大学教授, 博士生导师;
谭成文 (1977-), 男, 辽宁黑山县人, 北京航空航天大学博士后

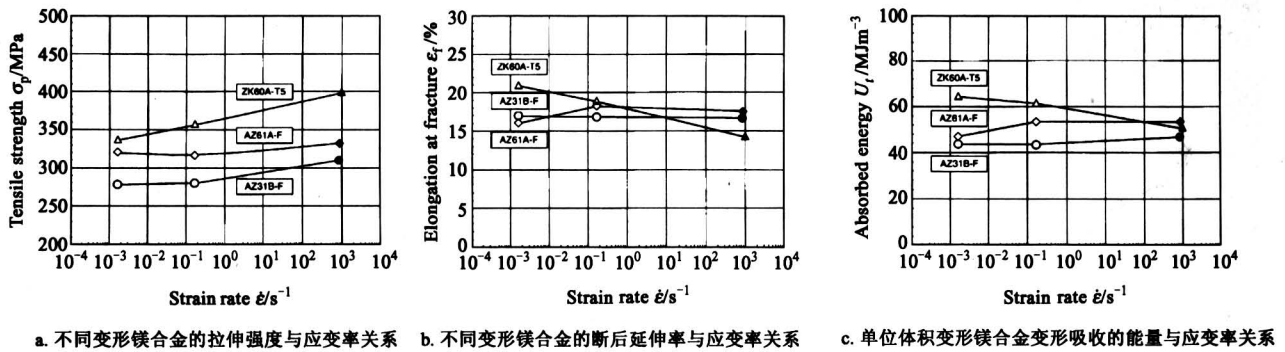


图 1 三种镁合金的应变率效应

Fig.1 Effect of strain rate for three different magnesium alloys

T. Mukai 则对比了几种装甲铝合金与 3 种不同的处理工艺的 WE43 镁合金的及金属镁的吸能特性

的差异^[2]，如表 1 所示，挤压态 WE43 镁合金具有较高的应变率能量吸收率。

表 1 铝合金与镁合金的高应变率特性对比

Table 1 Properties of aluminum alloys and magnesium alloys

材料	密度 /g·cm ⁻³	应变率 /s ⁻¹	拉伸强度 /MPa	延伸率 /%	比强度 /kN·m·kg ⁻¹	吸收能 /J	吸能率 /J·kg ⁻¹
铝合金							
5056-O	2.64	1.7 × 10 ³	267	53	101	2.71	42.8
7075-T6	2.80	1.0 × 10 ³	628	11	224	1.59	23.1
IN905XL	2.58	1.0 × 10 ³	534	9.6	207	1.14	17.6
镁合金							
Mg	1.74	1.1 × 10 ³	293	5.5	168	0.39	9.4
WE43-AN	1.84	1.1 × 10 ³	265	19	144	1.1	24.5
WE43-AG	1.84	1.1 × 10 ³	368	7.5	200	0.7	15.9
WE43-EX	1.84	1.1 × 10 ³	336	27	183	2.04	47.3

1.2 高应变率变形特性

装甲材料在穿甲、破甲或碎甲武器的作用下发生变形，不同材料的变形特性直接影响其装甲防护性能。高应变率载荷条件下，材料的变形规律与准静态条件下有很大的差别。最突出的特点是很多材料在高应变率载荷作用下，会发生一种被称为绝热剪切的特殊变形。这种变形表现为塑性变形极度不均匀，大量的塑性变形集中于宽 1~100 μm 的窄带中；有的则由于塑性变形的高度集中，造成强烈的绝热温升，窄带内发生动态再结晶，表现为不同于基体材料的细晶组织。图 2 是在铁合金、铜合金、钨合金和钛合金中在高应变率载荷作用下的绝热剪切变形^[3]。

德国 RWTH Aachen 材料科学系 El-Magd 等研究了 AZ80 镁合金准静态载荷作用下和高应变率载荷作用下的变形差异，并对比了与钛合金及铝合金的变

形差异^[4,5]，强调在高应变率载荷作用下，在钛合金与铝合金中都观察到绝热剪切带，而在镁合金中则仅仅观察到绝热剪切变形局域化。实验结果说明，镁合金发生绝热剪切变形的倾向较小，绝热剪切敏感性较差，图 3 是 El-Magd 提供的变形特性照片。

材料发生绝热剪切变形倾向的强弱与装甲防护能力的关系十分复杂，目前还没有特别清晰的认识。一般来讲，发生绝热剪切变形是材料性能劣化的开始，发生绝热剪切变形的位是材料破坏的通道，因此材料容易发生绝热剪切变形，其装甲防护能力应该较差；但是另一个角度看，材料发生绝热剪切变形会吸收大量的能量，也并不等于发生绝热剪切变形就造成真正的破坏。因此，要深入地认识这一问题还有很多复杂的工作要做。对于镁合金更要在认识其绝热剪切敏感性的基础上研究其与装甲防护能力的关系。

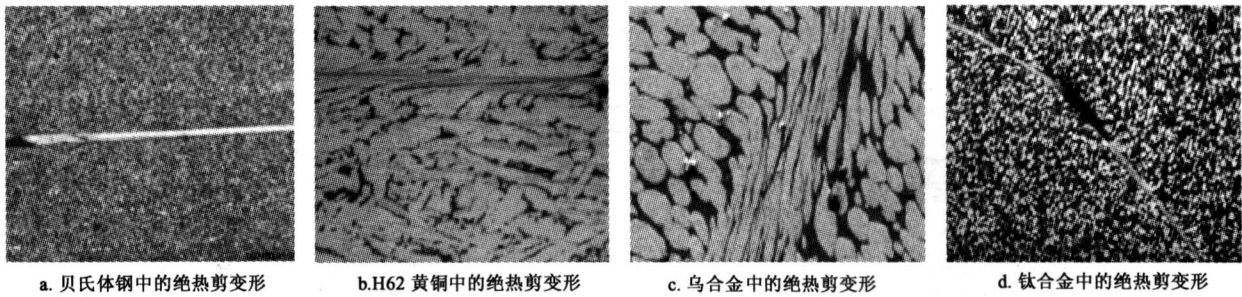
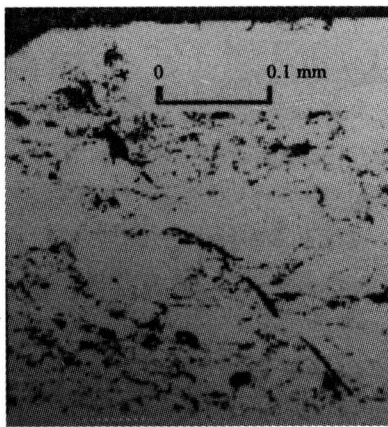


图2 4种合金中的绝热剪切变形

Fig.2 Adiabatic shear banding in four alloys

图3 AZ80 高应变率条件下的变形断裂特征^[4]Fig.3 Damage and fracture modes within specimens of magnesium alloy AZ80 deformed at room temperature under dynamic conditions^[4]

2 镁合金的抗弹性能表征体系

科学完备的镁合金抗弹性能表征体系的建立是装甲用镁合金材料研究的基础,表征体系的建立和完备过程是对问题认识逐步深化的长期和复杂过程。但是作为起步,首先对这一问题进行探讨是十分必要的,只有对此问题有一定认识才能使相关研究有的放矢。

作为装甲材料的镁合金首先要满足一些基本要求,只有满足这些基本要求,探讨其抗弹性能才有意义。总的来讲包括如下几个方面:

1) 安全性要求。众所周知,镁是一种极易氧化的可燃金属,作为装甲材料的镁合金应具有相当的阻燃性能才可能满足要求,否则各种反装甲武器特别是一些具有穿燃性能的弹种必将对其造成严重的毁伤后效,其燃烧破坏性是不言而喻的。

2) 成型性要求。绝大多数镁合金是密排六方金属,因较少的独立滑移系致使其室温成型性能较差,装甲用镁合金应具有相对良好的成型性能,能够采用相对简单的工艺实现装甲薄板的加工。

3) 焊接性要求。良好的可焊性是装甲防护系统装配时的重要工艺性能,因此镁合金必须与装甲钢、装甲铝合金、钛合金一样满足焊接性要求,焊后强度、塑性和抗冲击性能保持良好,保证装甲结构的抗弹性能,否则是很难用作装甲材料的。

随着近些年对镁合金研究的深入,以上三方面问题已经得到一定程度的解决。如比较系统地研究了合金元素(Ca, Be, Ce, Bi等)对镁合金可燃性的影响^[6];在理论上探讨了镁合金的变形机理,在工艺上开发了新的轧制技术;开展了镁合金的钨极氩弧焊、熔化极惰性气体保护焊、真空电子束焊、激光焊及超声波焊、搅拌摩擦焊等多种焊接工艺的研究工作^[7]。以上研究工作为镁合金在装甲领域的应用奠定了一定的基础。

影响镁合金材料抗弹性能的因素十分复杂,简单地讲,材料高应变率载荷条件下的特性直接控制材料的抗弹性能。具体包括如下几个方面。

2.1 镁合金的动态强度

强度对于材料的抗弹性能的重要性是显然的,对于大多数材料来讲材料的拉伸强度都低于压缩强度,因此人们提到强度,往往重视拉伸强度,但是对于变形镁合金来讲,却恰恰相反,压缩强度比拉伸强度要低。对于装甲材料来讲首先要承受的是压缩载荷的作用,因此对于变形镁合金不仅要重视拉伸强度,还要特殊重视压缩强度。

一些初步的研究结果已经表明,镁合金是一种应变率敏感材料,随应变率提高其强度会升高,即所谓应变率强化效应。作为装甲的镁合金使用环境

是明显的高应变率环境, 因此考查的强度应是动态强度, 包括动态拉伸强度和动态压缩强度。

2.2 高应变率条件下镁合金材料的能量吸收率

如前所述, 能量吸收率对于装甲材料是很重要的, 装甲材料通过变形及其他方式吸收掉反装甲武器的动能来达到装甲防护的目的。因此高应变率条件下的能量吸收率的高低将直接影响镁合金的抗弹性能。其他条件相同时, 具有高的能量吸收率的镁合金应具有更好的抗弹性能。

2.3 高应变率条件下镁合金材料的变形断裂特性

在高应变率载荷条件下, 镁合金选择何种断裂模式, 不同断裂模式所占的比例等都将影响其抗弹性能。特别是镁合金的绝热剪切性能, 将对其抗弹性能有重要影响。一方面, 材料发生绝热剪切变形将吸收如式(2)所示的大量能量(所谓绝热剪切

$$G_{abc} = k \left(\frac{\rho c}{\alpha} \right) \left(\frac{\rho^3 c^2 \lambda^3}{\tau^3 \alpha^2 \gamma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

扩展能)^[3], 这是有利于装甲的方面; 另一方面, 绝热剪切变形将造成材料局部狭窄区域性能劣化, 这些区域将是材料最先被破坏的位置, 这是不利于装甲的方面。因此, 镁合金发生绝热剪切变形的难易程度及其与抗弹性能的关系将是装甲镁合金研究的重要基础性科学问题。

2.4 镁合金的动态硬度

提高硬度是现代装甲材料提高抗弹性能的一条有效途径。但材料在高应变率条件下的硬度似乎还未得到研究人员的关注, 相关的研究报道也很少。镁合金材料在准静态条件与高应变率条件下的硬度是否相同, 如不相同, 准静态硬度与动态硬度的有

何种关系, 这对于镁合金抗弹性能的深入认识是有明显意义的。

3 结语

镁合金是具有很大潜力的新型轻质结构/功能一体化装甲材料, 但相关的研究还很不足(既有基础理论上的也有工程技术上的)。本文仅仅是一些初步设想, 很多设想可能不尽正确, 希望能够在装甲镁合金研究之初为同行提供一点有益的参考。

参考文献

- [1] Yokoyama T. Impact tensile stress-strain characteristics of wrought magnesium alloys [J]. *Strain*, 2003, 39 (4):167 ~ 175
- [2] Mukai T, Yamanoi M, Higashi K. Ductility enhancement in magnesium alloys under dynamic loading [J]. *Materials Science Forum*, 2000, 350 ~ 351:97 ~ 102
- [3] 谭成文. 破片特征参数预测中的若干参数研究[D]. 北京理工大学博士学位论文, 2004
- [4] Kainer K U. *Magnesium* [M]. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. 2005. 402 ~ 408
- [5] El-Magd E, Abouridouane M. Influence of strain rate and temperature on the compressive ductility of Al, Mg and Ti alloys [J]. *Journal De Physique. IV : JP*, 2003, 110 (1):15 ~ 20
- [6] 彭建国, 王渠东, 曾小勤, 等. 镁合金抗氧化及合金化阻燃研究进展[J]. *轻合金加工技术*, 2005, 33(4): 16 ~ 20
- [7] 冯吉才, 王亚荣, 张忠典. 镁合金焊接技术的研究现状及应用 [J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(2): 165 ~ 178

The Characterization System of the Ballistic Performance of Armor Magnesium Alloys

Cai Hongnian^{1,2}, Tan Chengwen^{1,2}, Wang Fuchi², Chen Zhiyong²

(1. *Beihang University, Beijing 100083, China*; 2. *Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China*)

[Abstract] The absorbed energy property and deformation characteristic of magnesium alloy under high strain rate loading are described. Then the basic science problem connected with materials' ballistic performance closely such as dynamic strength, absorbed energy rate, adiabatic shear deformation localization and dynamic hardness are discussed primarily. The purpose of the paper is that promoting the basic and application research of armor magnesium alloys.

[Key words] absorbed energy rate; adiabatic shear deformation localization; dynamic strength; dynamic hardness