镁合金装甲板防弹测试

廖启宇，乐启炽

（东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室，沈阳 110819）

摘要：目的 研究不同厚度的“镁合金-钢”复合、“钢-镁合金-钢”复合装甲靶材以及单一材料的镁合金和钢装甲靶材，对Φ7.62 mm和Φ12.7 mm这2种类型子弹的抗弹效果。**方法** 通过“半连续电磁铸造-均匀化退火-挤压变形-时效热处理”等一系列工艺，制备镁合金装甲靶材。通过研究子弹入射深度和子弹弹孔的宏观及微观图片，分析不同组合靶板的抗弹效果。**结果** “30 mm镁合金 C-4 mm钢板”对Φ7.62 mm子弹具有良好的抗弹性；“8 mm钢板-30 mm镁合金 B-8 mm钢板”对Φ12.7 mm子弹具有良好的抗弹性；越靠近弹孔，晶粒变形越明显，且孪晶越多，孪晶密集处出现裂纹，推断弹孔周围孪晶是导致裂纹产生的原因。**结论** 几种工业镁合金与钢板复合组成的装甲板可以有效达到防弹效果。

关键词：镁合金；装甲板；钢板；防弹测试

DOI：10.3969/j.issn.1674-6457.2017.05.021

中图分类号：TG146.22 **文献标识码：**A **文章编号：**1674-6457(2017)05-0144-04

Bullet Proof Test of Magnesium Alloy Armor Plate

LIAO Qi-yu, LE Qi-chi

(Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

ABSTRACT: The paper aims to study bulletproof effects of different combinations of several kinds of Mg alloy-steel composite armor target and Mg alloy armor target tested by means of anti ballistic test by two types of bullet caliber, Φ7.62 mm and Φ12.7 mm. The magnesium alloy armor target was prepared by a series of processes, such as semi continuous electromagnetic casting, homogenization annealing, extrusion deformation and aging heat treatment. The bulletproof effects of different target combinations were analyzed through studying on bullet penetration depth and bullets holes through macroscopic and microscopic images. 30 mm Mg alloy C-4 mm steel had good bulletproof effects on Φ7.62 mm bullet; 8 mm-30 mm Mg alloy B-8 mm steel had good bulletproof effects on Φ12.7 mm bullet. The more close to the bullet hole, the more apparent the grain deformation and the more twin crystals. Cracks appeared in dense twin crystals. It was concluded that twin crystal was the cause of cracks. Armor plate composed of several magnesium alloy and steel plates can achieve good bullet proof effect.

KEY WORDS: magnesium alloy; armor plate; steel plate; bullet proof test

武器装备的质量很大程度上决定了其在战场上的快速反应能力，因此，武器装备的质量指标在现代高科技战争中有着至关重要的作用，甚至能影响战争局面[1—4]。如在海湾战争中，伊拉克装备的坦克不仅射程不够，而且笨重、装甲防护能力较弱，在美军新型坦克面前几乎没有抵抗力，因此目前各国都投入了大量的人力物力用于研究轻质结构材料及与之配套的先进制造技术，以减轻武器装备质量，不断提高武

收稿日期：2017-05-12

基金项目：国家重点研发计划（2016YFB0301104）

作者简介：廖启宇（1992—），男，硕士研究生，主要研究方向为镁合金开发及镁合金变形。

通讯作者：乐启炽（1968—），男，博士，教授，主要研究方向为镁合金熔炼、铸造及其塑性变形。

器装备的机动性和灵活性，并且提高强度，提高武器装备及人员在战场上的生存能力和作战能力[5—9]。

目前，军用装甲车大多采用高强钢作为车体材料，也有采用陶瓷、玻璃以及复合材料。镁合金具有比强度、比刚度、疲劳强度高，阻尼减震，电磁屏蔽性能优良，以及易于回收利用等一系优点。镁合金作为装甲车身材料，是实现装备轻量化的理想金属材料[10—15]。文中从制备过程到打靶测试结果等方面，总结出了几种工业镁合金的防弹效果。

1　材料及方法

采用镁合金 A、镁合金 B 和镁合金 C 作为实验靶材，镁合金 D 和镁合金 E 作为对比靶材。首先，通过低频电磁半连续铸造，获得规格为*Φ*300 mm 左右的圆锭坯，再进行均匀化退火；之后，设计挤压模具，确定挤压工艺制度，进行板坯挤压，获得规格为 300 mm×30 mm 的镁合金板材；随后将挤压板材制备成 300 mm×300 mm×30 mm 靶材板，并配合 4 mm 和 8 mm 这 2 种钢板，组合成不同“镁合金-钢复合”板材。当子弹直径为*Φ*7.62 mm，射击角度为 90°时，将靶板材料为“4 mm 的钢板”记为 1#靶板，“30 mm 镁合金 C”和“30 mm 镁合金 A”分别记为 2#和 3#，将“4 mm 钢板-30 mm 镁合金 A”，“4 mm 钢板-30 mm 镁合金 C”分别记为 4#和 5#；将“30 mm 镁合金 A-4 mm 钢板”和“30 mm 镁合金 C-4 mm 钢板”分别记为 6#和 7#；当子弹直径为*Φ*12.7 mm，射击角度为 90°时，将靶板材料为“8 mm 钢板”和“8 mm 钢板-8 mm 钢板”分别记为 8#和 9#，“8 mm 钢板-30 mm 镁合金 A”和“8 mm 钢板-30 mm 镁合金 A-8 mm 钢板”分别记为 10#和 11#，将“8 mm-4 mm 钢板-30 mm 镁合金 A-8 mm 钢板”和“8 mm-4 mm 钢板-30 mm 镁合金 A-8 mm 钢板”分别记为 12#和 13#，将“8 mm 钢板-30 mm 镁合金 C-8 mm 钢板”和“8 mm 钢板-30 mm 镁合金 B-8 mm 钢板”分别记为 14#和 15#，将“6 mm 钢板-30 mm 镁合金 B-8 mm 钢板”记为 16#，将“8 mm 钢板-30 mm 镁合金 B-4 mm 钢板”和“8 mm 钢板-30 mm 镁合金 B-6 mm 钢板”分别记为 17#和 18#，将“4 mm 钢板-4 mm 钢板-2×20 mm 镁合金 D-8 mm 钢板”和“4 mm 钢板-4 mm 钢板-3×10 mm 镁合金 E-8 mm 钢板”分别记为 19#和 20#，将“30 mm 镁合金 B”，“20 mm 镁合金 D”，“10 mm 镁合金 E”分别记为 21#, 22#, 23#。其中“钢板-镁合金板-钢板”指采用 3 层复合，镁合金夹在 2 层钢板之间，前钢板被子弹首先冲击；“钢板-镁合金板”指钢板在镁合金板前面，钢板作为镁合金外挂件；“镁合金板-钢板”指镁合金板在钢板前面，镁合金板作为外挂件；“钢板”、“镁合金板”将钢板、镁合金板作为车身材料。对这几种镁合金装甲板靶材进行抗弹测试，分别使用*Φ*7.62 mm 和*Φ*12.7 mm 口径子弹，射击角度为 90°，打靶距离为 30 m，靶材样品见图 1。

图 1　靶材样品
Fig.1 Target samples

2　结果及分析

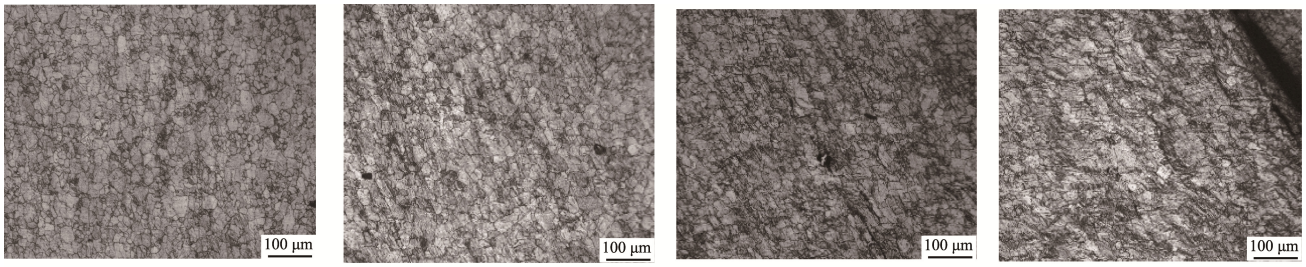
2.1　靶板子弹射击部位组织分析

对子弹射击部位的迎弹面和背弹面进行观察，发现未被打透的情况大致可以分为 2 种。第 1 种见图 2a 和 2b，子弹头嵌入迎弹面钢板中，周围出现少许凹陷，影响区域不大；背弹面镁板子弹射击部位出现极为轻微的鼓包，黑色斑点由于子弹高速冲击，导致短时高温引起局部氧化；第 2 种见图 2c 和 2d，子弹头嵌入迎弹面钢板中，并且嵌入深度多于图 2a 中的深度，周围同样出现更为密集的白色区域，影响区域小于图 2a 弹孔；背弹面出现稍大鼓包，且出现 4 条裂纹，裂纹由鼓包中心向四周扩展，未发现黑色斑点。

a 4#靶板迎弹面弹孔　b 4#靶板背弹面弹孔　c 5#靶板迎弹面弹孔　d 5#靶板背弹面弹孔

图 2　靶板子弹射击部位宏观实物
Fig.2 Target plate bullet shot macro physical map

离弹孔 50, 2, 1, 0.5 mm 处的金相组织见图 3。离弹孔 50 mm 处基本为未受子弹影响区域，发现经过时效热处理后，变形带消失，部分再结晶晶粒很细小，部分再结晶晶粒有所长大；离弹孔 2 mm 处，晶粒出现变形，出现少量孪晶；离弹孔 1 mm 处晶粒变形扩大，孪晶有所增加；离弹孔 0.5 mm 处出现裂纹，且裂纹附近发现大量孪晶组织。由此可以看出，越靠近弹孔，晶粒变形越明显，且孪晶越来越多，孪晶密集处出现裂纹，可以推断孪晶是导致裂纹产生的原因。



a 50 mm　b 2 mm　c 1 mm　d 0.5 mm

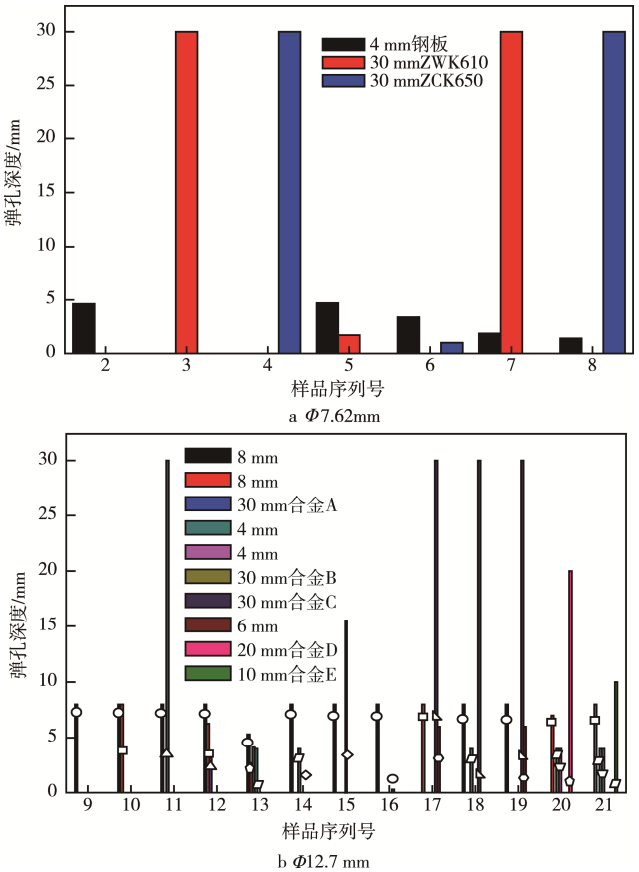
图 3　靶板子弹射击部位金相组织

Fig.3 The metallographic structure of the target bullet

2.2　子弹入射深度分析

弹型为Φ7.62 mm 普通弹射击时，不同组合的弹孔深度见图 4a。用Φ7.62 mm 普通弹单独射击 4 mm 钢板时未穿透，平均穿透深度为 4.632 mm；采用 4# 靶板组合射击时，钢板平均穿透深度为 4.707 mm，镁合金 A 穿透深度为 1.713 mm；采用 5#靶板组合射击时，钢板平均穿透深度为 3.39 mm，镁合金 C 穿透深度为 1.0 mm，因此 5#靶板组合“4 mm 钢板-30 mm 镁合金 C”的组合抗穿透性较好。对于 6#靶板组合，钢板穿透深度为 1.88 mm，7#靶板组合的钢板穿透深度为 1.42 mm，因此在 30 mm 镁板均穿透的情况下，7#靶板组合“30 mm 镁合金 C-4 mm 钢板”中，钢板穿透深度低，抗穿透性较好。

弹型为Φ12.7 mm 穿甲弹射击时，不同组合的弹孔深度见图 4b。用Φ12.7 mm 穿甲弹进行射击实验时，单独“8 mm 钢板”、“8 mm 钢板-8 mm 钢板”和“8 mm 钢板-30 mm 镁合金 A”组合均穿透，而将“8 mm 钢板-30 mm 镁合金 A”组合后再放置 8 mm 钢板时，即 11# 靶板组合，30 mm 镁合金 A 和后置 8 mm 钢板均未穿透，平均穿透深度为 3.17 mm 和 6.27 mm，抗穿透性较好。12#与 11#相比，在前置 8 mm 钢板均穿透的情况下，12#靶板的后置 8 mm 钢板穿透深度为 2.7 mm，且 30 mm 镁合金 A 穿透深度为 4.14 mm，穿透深度均大大降低，此组合抗穿透性较好。而 13#靶板与 12# 靶板相比，前置 8 mm 钢板穿透，30 mm 镁合金 C 穿透深度为 3.24 mm，较 30 mm 镁合金 A 钢板穿透深度 4.14 mm 略微降低，但后置 8 mm 钢板无明显印痕，因此整体来看，13#较 12#抗穿透性好。14#和 15#相比，前置 8 mm 钢板均穿透，后置 8 mm 钢板无明显印痕情况下，30 mm 镁合金 C 平均穿透深度为 12.67 mm，30 mm 镁合金 B 平均穿透深度为 0.3 mm，因此 15#\



a Φ7.62mm

b Φ12.7 mm

图 4　2 种弹型打靶实验不同样品弹孔深度

Fig.4 The bullet depth of two shooting experiment of different samples

靶板抗穿透性优于 14#靶板。而将 15#靶板中前置 8 mm 钢板换成 6 mm 钢板时，即 16#，3 个板材均穿透，抗穿透性大大降低。17#靶板和 18#靶板相比，2 种组合中 3 种板材均穿透，抗穿透性降低。19#和 20#相比，前 3 种板材均完全穿透，19#靶板中后置 8 mm 钢板平均穿透深度为 7 mm，20#靶板中后置 8 mm 钢板完全穿透。

综合来看，“30 mm 镁合金 C-4 mm 钢板”对Φ7.62 mm 子弹具有良好的抗弹性，“8 mm 钢板-30 mm 镁合金 B-8 mm 钢板”对Φ12.7 mm 子弹具有良好的抗弹性。

3　结论

1) “30 mm 镁合金 C-4 mm 钢板”对Φ7.62 mm 子弹具有良好的抗弹性，其钢板穿透深度为 1.42 mm；后置钢板有效防止镁板被穿透后发生粉碎性断裂。

2) 综合子弹射入深度和最大体积，“8 mm 钢板-30 mm 镁合金 B-8 mm 钢板”对Φ12.7 mm 子弹具有良好的抗弹性，30 mm 镁合金 B 平均穿透深度为 0.3 mm，后置钢板未穿透。

3) 镁合金 B 和“镁合金 C-后置钢板”表现出较好的抗弹性能，该镁合金密度小，成本低，是值得深入研发的抗弹镁镁合金材。

4) 越靠近弹孔，晶粒变形越明显，且孪晶越来越多，孪晶密集处出现裂纹，可以推断孪晶是导致裂纹产生的原因。

参考文献：

[1] 邹东利. 固溶态 AM60B 镁合金高速撞击变形及损伤行为[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
ZOU Dong-li. Deformation and Damage Behaviors of Solution Treated AM60B Magnesium Alloy Under High Velocity Impact[J]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

[2] 李保成, 张星, 马丹. 镁合金冲击性能研究[J]. 新材料开发与研究, 2005, 14(7): 54—55.
LI Bao-cheng, ZHANG Xing, MA Dan. Investigation on Impact Performance of Magnesium Alloy[J]. Development and Research of New Materials, 2005, 14(7): 54—55.

[3] 周培基, 霍普肯斯. 材料对强冲击载荷的动态响应[M]. 北京: 科学出版社, 1986.
ZHOU Pei-ji, HOPE Keith. Dynamic Response of Materials to Strong Impact Loading[M]. Beijing: Science Press, 1986.

[4] HUANG Wen, WANG Yang, YUAN Ming-xia. Effect of Strain Rate on the Tesile Properties of AZ91C[J]. Mater Science Letters, 2002, 21(14): 1113—1115.

[5] 王礼立, 余同希, 李永池. 冲击动力学进展[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1992.
WANG Li-li, YU Tong-xi, LI Yong-chi. Advances in Impact Dynamics[M]. Beijing: University of Science and Technology of China Press, 1992.

[6] 段占强, 程国强, 李守新. 高速冲击下钢板的微观组织及绝热剪切带[J]. 金属学报, 2003, 39(5): 486—491.
DUAN Zhan-qiang, CHENG Guo-qiang, LI Shou-xin. Microstructure and Adiabatic Shear Band of Steel Sheet Under High Speed Impact[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2003, 39(5): 486—491.

[7] EI-MAGD E, ABOURIDOUANE M. Influence of Strain Rate Temperature on the Compressive Ductility of Al, Mg and Ti Alloys[J]. Journal De Physique IV, 2003, 110(1): 15—20.

[8] XUE Q, CERRETA E K, GRAY G T. Microstructural Characteristics of Post-Shear Localization in Cold-Rolled 316L Stainless Steel[J]. Acta Mater, 2007, 55: 691—704.

[9] LI G A, ZHEN L, LIN C, et al. Deformation Localization and Recrystallization in TC4 Alloy under Impact Condition[J]. Materials Science & Engineering A, 2005, 395(1): 98—101.

[10] 孙葆森. EB-H24 镁合金和 5083-H131 铝合金抗弹性能的比较[J]. 兵器材料科学与工程, 2010(5): 74—74.
SUN Bao-sen. Comparison of the Ballistic Properties of Alloy EB-H24 Magnesium Alloy and 5083-H131 Aluminum Alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2010(5): 74—74.

[11] 王祝堂. 世界镁产量与镁的用途[J]. 轻金属, 1999(6): 43—45.
WANG Zhu-tang. World Magnesium Production and Use of Magnesium[J]. Light Metal, 1996(6): 43—45.

[12] 刘正, 张奎, 曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用[M]. 北京: 机械工业出版, 2002.
LIU Zheng, ZHANG Kui, ZENG Xiao-qin. Theoretical Basis and Application of Magnesium Based Light Alloy[M]. Beijing: Publishing of Machinery Industry, 2002.

[13] 刘正, 王越, 王中光, 等. 镁基轻质材料的研究与应用[J]. 材料研究学报, 2000, 14(6): 36—39.
LIU Zheng, WANG Yue, WANG Zhong-guang, et al. Research and Application of Magnesium Based Lightweight Materials[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2000, 14(6): 36—39.

[14] SIETHOFF H, AHLBORN K. Steady-state Deformation of The HCP Metals at High and Intermediate Temperatures[J]. ZMetallkd, 1985, 76(9): 627—634.

[15] 余永宁, 毛卫民. 材料的结构[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
YU Yong-ning, MAO Wei-min. Materials Structure[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.