

文章编号: 1000-4750(2012)11-0289-06

强度失配对铝合金板焊接接头 抗弹性能影响的有限元分析

刘文辉, 黄 浩

(湖南科技大学机电工程学院, 湖南, 湘潭 411201)

摘 要: 通过建立 7.62mm 穿甲弹侵彻铝合金板的模型, 采用 Johnson-Cook 材料模型模拟研究了焊接接头的强度失配对铝合金板抗弹性能的影响。研究表明: 当子弹侵彻铝合金焊接接头附近时, 由于材料的不均匀变形, 子弹会改变侵彻方向, 其方向角的变化大小与子弹速度、侵入位置、弹头形状、强度失配比、靶板厚度有关; 当子弹以低速侵彻铝合金板中间的软焊缝材料时, 由于变形局部化, 出现材料的抗弹性能低于纯焊缝材料的情况; 由于子弹侵彻方向的改变, 出现部分区域的抗弹性能高于铝合金基体材料的情况。研究结果为不均匀材料的抗弹性能研究提供参考。

关键词: 侵彻; 铝合金; 有限元; 强度失配; 抗弹性能

中图分类号: O343.6 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.03.0113

FEM SIMULATION OF THE EFFECTS OF STRENGTH MISMATCH ON THE BALLISTIC PERFORMANCE OF ALUMINUM WELD JOINT

LIU Wen-hui, HUANG Hao

(School of Electromechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

Abstract: To analyze the effect of strength mismatch on the ballistic performance of aluminum welded joint, a model of aluminum alloy plate penetrated by 7.62mm bullet was created, and the Johnson-Cook constitutive equation was adopted. Results show that the penetration direction will change due to the heterogeneous deformation as the projectile penetrates the aluminum weld joint, and the magnitude of angle change of penetration direction relates to the penetration position, impact velocity, projectile geometry, the rate of strength mismatch and target thickness. When the projectile only penetrates the region of weld seam at a small impact velocity, material's ballistic performance may be worse than that of pure weld seam material due to material deformation localization. There are some regions whose ballistic performances are better than that of aluminum base due to the change of penetration direction. It is useful for the ballistic performance analysis of heterogeneous materials.

Key words: penetrate; aluminum alloy; FEM; strength mismatch; ballistic performance

穿甲问题涉及高压、高温、高速和结构内部材料破坏, 包括冲塞、侵彻、崩落、层裂、溅飞等各种复杂形式, 属高速冲击动力学研究范畴。由于冲击载荷作用下的穿甲是复杂的非线性动态响应过程, 既有材料发生大变形时所表现出的材料非线性

性, 又有结构发生大位移时所产生的几何非线性, 还存在着复杂的运动非线性以及复杂的接触和摩擦问题等, 极其复杂而又难以处理。因此, 理论公式推导较难。目前的理论方法推导一般都是基于连续介质力学的基础推导的, 如在刚性弹侵彻力学研

收稿日期: 2011-03-09; 修改日期: 2011-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51105139); 湖南省自然科学湘潭联合基金重点项目(10JJ8002); 湖南省自然科学基金项目(10JJ3062)

通讯作者: 刘文辉(1978—), 男, 湖南攸县人, 副教授, 博士, 从事材料科学计算、力学及高强铝合金研究(E-mail: wealth9733221@sohu.com).

作者简介: 黄 浩(1985—), 男, 江西赣州人, 硕士生, 从事高强铝合金焊接工艺研究(E-mail: wealthuanghao@yahoo.cn).

究中,公认的最有效理论分析方法之一的空腔膨胀模型的求解就是从基本的质量和动量守恒方程出发,并根据连续介质力学的基本原理来推导的^[1-2]。因此,对于复合材料以及不均匀材料的穿甲问题的理论推导变得更加复杂。随着计算机技术和有限元分析方法的迅速发展,利用有限元方法对侵彻碰撞问题进行数值仿真已成为了一种方便有效的途径。目前许多学者采用有限元模拟的方法研究了钢装甲、铝装甲以及复合装甲的抗弹性能^[3-6],但研究大多是把靶板假设是均匀的材料。而在装甲材料中由于焊接接头的存在,其强度低于母材,如铝合金装甲板焊缝强度约为母材的60%~80%。因此,有必要考虑材料的不均匀性来研究装甲材料焊接接头附近的抗弹性能。目前,有关装甲材料焊接接头附近的抗弹性能研究较少,其主要原因有:1)焊接接头、热影响区、母材的材料性能不一样,理论推导较难;2)装甲板焊缝宽度较窄,使得抗弹性能试验难以进行,虽然周古昕等人^[7]采用安全损伤角试验方法对铝合金焊接接头的抗弹性能进行了初步研究,但是由于射击时着弹方向、位置的随机性和不确定性,难以分析焊缝附近的抗弹性能;3)由于焊接接头附近材料的不均匀性,难以用一本构关系来描述该区域材料的力学行为。因此,这一方面的数值模拟研究罕见。本文将通过简化的焊接接头的本构关系,建立7.62mm穿甲弹侵彻铝合金焊接接头的模型,来研究铝合金板焊接接头附近的抗弹性能。

1 有限元模型的建立

1.1 材料的本构关系

Johnson-Cook材料模型是在20世纪80年代研究冲击、弹道侵彻问题中发展起来的,该模型考虑了绝热升温引起的软化效应和应变率强化效应,适用于金属由准静态到大应变、高应变率和高温情况下的计算,其一般形式为^[8-10]:

$$\sigma = [A + B(\varepsilon^p)^n] \left[1 + C \left(\ln \frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] [1 - (\hat{T})^m] \quad (1)$$

$$\hat{T} = (T - T_0) / (T_{\text{melt}} - T_0) \quad (2)$$

其中: A 、 B 、 C 、 n 、 m 为材料常数; σ 为Mises等效应力; ε^p 为塑性应变; $\dot{\varepsilon}^p$ 为塑性应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; T_{melt} 为熔化温度; T_0 为室温。文献^[8-9]对部分铝合金材料的动态力学行为和

Johnson-Cook材料模型参数的获取进行了较详细的研究。本文中铝合金的材料参数为:比热为875J/(kg·K)、密度为2770kg/m³、弹性模量为73084MPa、泊松比为0.33、 $A=369$ MPa、 $B=684$ MPa、 $C=0.0083$ 、 $m=1.7$ 、 $n=0.73$ 、 $\dot{\varepsilon}_0=1$ 、 $T_{\text{melt}}=775$ K、 $T_0=294$ K^[4,10]。

Johnson-Cook失效模型定义每个单元的损伤参数为 D :

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon^p}{\varepsilon^f} \quad (3)$$

式中: $\Delta \varepsilon^p$ 、 ε^f 分别为等效塑性应变增量和失效应变,当 $D=1.0$ 时,单元失效。 ε^f 可以表示为:

$$\varepsilon^f = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \sigma^*)] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^p}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 + d_5 \hat{T}) \quad (4)$$

式中: $\sigma^* = \sigma_m / \sigma$, σ_m 为平均应力; d_1 、 d_2 、 d_3 、 d_4 、 d_5 分别为失效参数。本文中 $d_1=0.112$ 、 $d_2=0.123$ 、 $d_3=-1.5$ 、 $d_4=0.007$ 、 $d_5=0$ ^[10]。

由于焊接接头附近材料的不均匀性,其本构关系难以用简单的本构关系来描述,本文中不考虑热影响区的影响,在有限元模型中把焊接接头处理为焊缝和母材组成的材料模型。焊缝材料的本构关系也用Johnson-Cook材料模型,当式(1)中的 $\dot{\varepsilon}_0=1$ 时, A 值对应于 $\dot{\varepsilon}_0$ 下零塑性应变时的应力值,称为应变率 $\dot{\varepsilon}_0$ 下的初始屈服应力^[8]。由于本文目的并不是准确预测焊接接头的本构关系和抗弹性能,而是研究焊接接头强度失配对子弹侵彻铝合金板过程的影响。因此,取焊缝材料本构关系 A 值的大小为母材的60%,其余参数与母材均相同。

1.2 侵彻模型

模型中弹丸为7.62mm APM2穿甲燃烧弹,其结构由弹壳、燃烧剂、钢弹芯等部件组成。实际穿甲过程中,起主要作用的是直径为6.1mm的钢弹芯,其密度为7810kg/m³、弹性模量为201GPa、泊松比为0.3,屈服强度为1400MPa^[11]。试验表明,当弹头材料的硬度和强度约为靶板材料硬度和强度的2倍以上时,弹头变形很小,可视为刚性弹^[12]。本文中弹丸材料屈服强度大于靶板材料强度的2倍,因此,建模时可不考虑弹丸的损伤演化情况。靶板四周固定,由于弹芯尺寸与靶板尺寸相比较小,靶板远端受到弹丸的作用很小。从节省计算时间角度考虑,建模时靶板的长和宽均等于90mm,

厚度为 20mm，焊缝区的宽度为 10mm。考虑到子弹和靶板的对称情况，取模型的 1/2 进行分析。由于模型中需要综合考虑温度和应力的相互影响，属于热-结构耦合动力学范畴，因此采用温度-位移耦合单元划分网格。同时，为了方便结果的比较，铝合金的网格密度保持一致，图 1 为子弹垂直侵彻 20mm 厚铝合金板的模型和网格划分图。图 1 中 A 点为焊缝中心线上的一点，D 和 D' 为焊缝区与母材的分界线，AD=5mm。为了便于同铝基体材料和焊缝材料的抗弹性能进行比较，研究图 1 模型中的材料为均匀材料的情况，分别用 G 和 H 代表图 1 模型中材料全为铝基体材料和焊缝材料的情况。一般地，常规枪炮所发射的弹体的瞬时速度为 500m/s~1300m/s，本文将研究子弹以 600m/s、700m/s、800m/s、900m/s 的初速度侵彻铝合金焊接接头的情况。采用 ABAQUS 软件来模拟研究铝合金板焊接接头附近材料的抗弹性能。

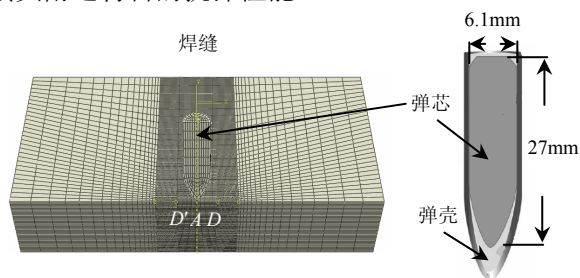


图 1 有限元模型与网格划分

Fig.1 The finite element model and meshing

为了模拟子弹侵彻焊接接头的过程，分析焊接接头附近的抗弹性能，本文中分析子弹从 A 点、B 点、C 点、D 点、E 点、F 点垂直侵彻铝合金板的过程，其中 B 点、C 点、D 点、E 点、F 点为距离焊缝中心 A 点为 1mm、3mm、5mm、6mm、8.1mm 的点，并采用 A、B、C、D、E、F 代表子弹从相应位置的侵彻情况。图 2 为子弹侵彻位置的示意图。

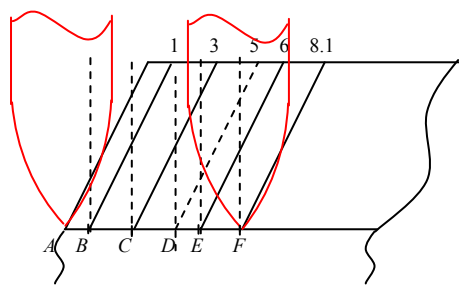


图 2 侵彻位置示意图

Fig.2 Schematic plan of penetration position

2 结果分析

2.1 与实验结果的比较

为了验证所建立的有限元模型以及所采用材料本构关系的有效性，与 Buyuk 的实验数据进行了比较^[10]。图 3 为直径 12.7mm 的钢球以不同初速度侵彻 6.35mm 厚铝合金板剩余速度的情况，从图 3 中可看出，本文的计算结果与实验结果符合较好。

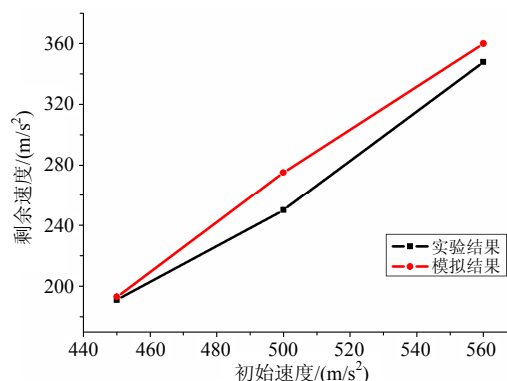


图 3 计算结果与实验结果的对比

Fig.3 Comparison of calculated and experimental results

2.2 铝合金焊接板的抗弹性能分析

图 4 为 $t=85\mu\text{s}$ 时，子弹以 $v_0=700\text{m/s}$ 的速度从不同位置侵彻 20mm 铝合金板的塑性应变分布图。由于子弹较远的铝合金板变形较小，图 4 中只截取了子弹周围部分区域。图 4(a)~图 4(f) 分别为子弹从 A 点、B 点、C 点、D 点、E 点、F 点垂直侵入铝合金板的塑性应变分布图，图 4(g)、图 4(h) 分别是子弹垂直侵彻铝合金基体与纯焊缝区材料的塑性应变分布图。

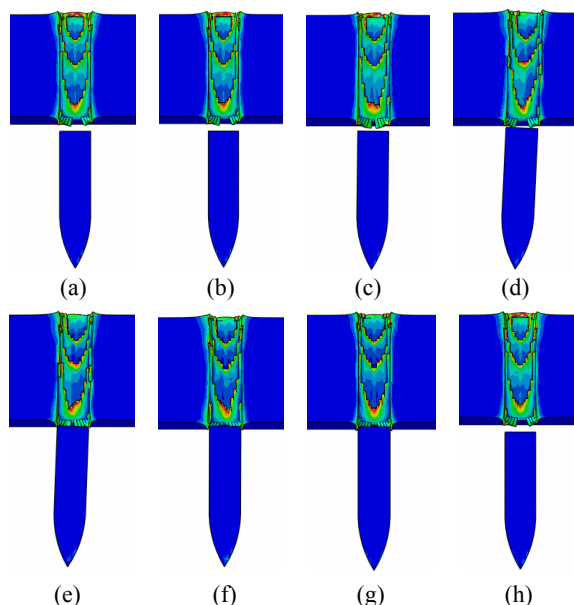


图 4 $v_0=700\text{m/s}$ 时铝合金板塑性应变分布图

Fig.4 The plastic deformation of aluminum plate at $v_0=700\text{m/s}$

在刚性尖头弹侵彻下韧性金属靶的失效模式一般为延性扩孔或花瓣穿孔^[13]。对于 7.62mm 穿甲弹侵彻 20mm 的铝合金板,其材料的失效模式为延性扩孔。从图 4 中可看出,塑性变形主要集中在弹坑附近,离弹坑远的地方变形很小。由于焊缝区材料的强度低于基体材料,因此子弹穿透焊缝 H 后的位移大于子弹穿透铝基体 G 后的位移;子弹穿透焊缝附近 A 、 B 、 C 的位移大于子弹穿透基体附近 D 、 E 、 F 的位移。

由于焊缝材料与铝合金基体的强度不一样,在侵彻过程中两种材料对子弹的阻力大小不一样,因而子弹侵彻方向发生了变化。图 5(a)为侵彻速度对子弹偏转角度的变化曲线,从图 5(a)中可以看出 D 点的偏转角度较大,这与 D 点两侧材料的性能相差较大有关;而且随着速度的增加,偏转角度有减小的趋势。图 5(b)为 $v_0=700\text{m/s}$ 时,焊缝与母材之间的强度失配对子弹偏转角度的影响图。从图 5(b)中可以看出,对于焊缝强度仅为母材强度的 60%($A_w=0.6A$)时的情况,由于焊缝与母材的强度相差较大,子弹在侵彻过程中受到焊缝与母材的阻力也相差较大,因此子弹偏转角度也大。

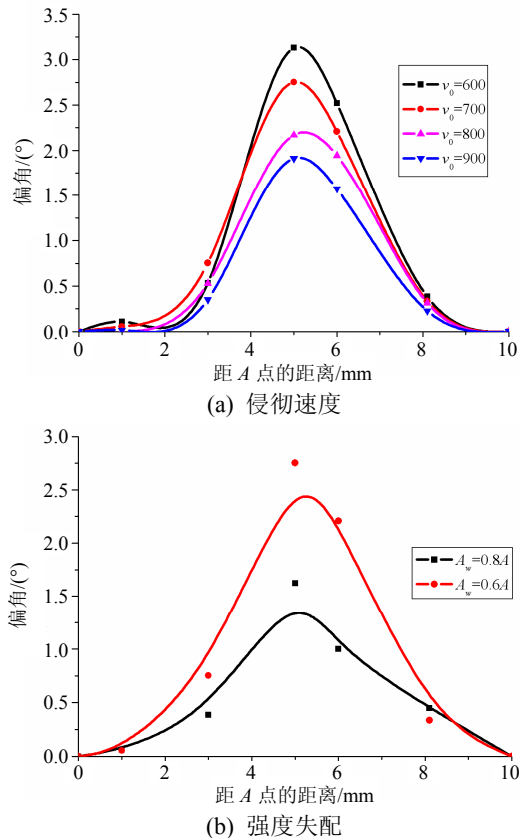


图 5 侵彻速度和强度失配对偏转角度的影响

Fig.5 The effect of impact velocity and strength mismatch on deflection angle

图 6 为 $v_0=700\text{m/s}$ 时,子弹形状、靶板厚度变化对子弹偏转角度影响的情况。图 6(a)为 $v_0=700\text{m/s}$ 时,弹头形状对子弹偏转角度变化的影响图。相对于 APM2 而言,球形弹的弹头为钝弹头(图 2 中的弹头为半球形),因此弹头在侵彻过程中遇到的阻力相对较大,而且穿透铝合金板的时间更长,因此球形弹的偏转角度相对较大。图 6(b)为靶板厚度对子弹偏转方向角的影响,从图 6(b)中可以看出,相对于 5mm 的靶板而言,子弹穿透 20mm 铝合金板的偏转角度更大。同时,从图 5 和图 6 可以看出,偏转角度的大小与侵入点的位置有关,子弹从材料界面 D 点侵入时,偏转方向最大,随着离材料界面 D 的距离增加,偏转方向逐渐减小。

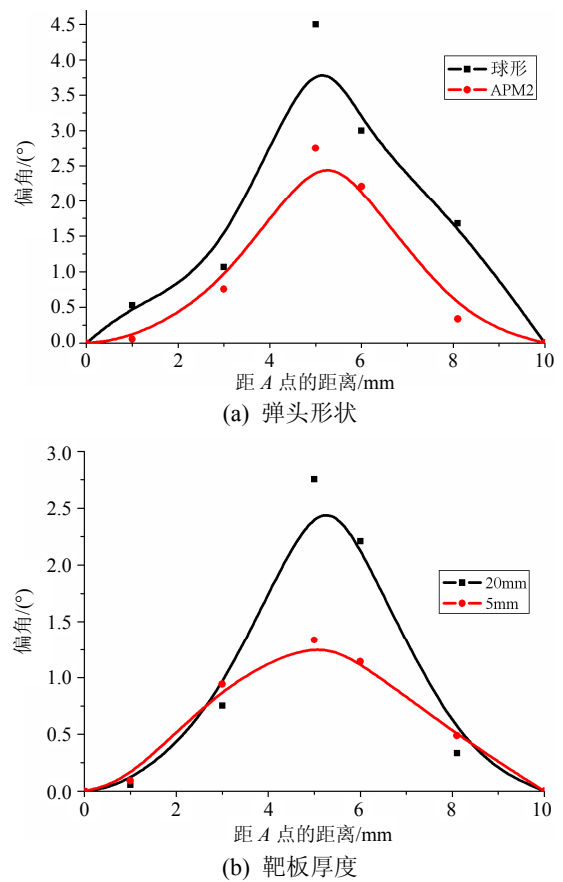
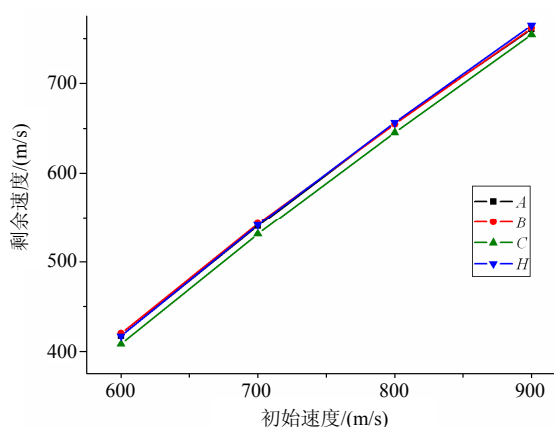


图 6 弹头形状和板厚对偏转角度的影响

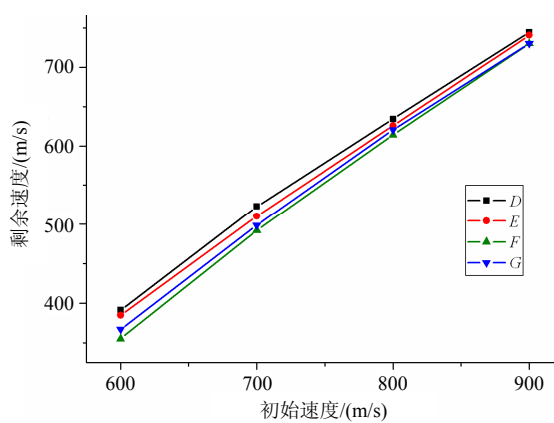
Fig.6 The effect of projectile shape and target thickness on deflection angle

图 7 是子弹以不同初速度侵彻 20mm 铝合金后的剩余速度的情况。从图 7 中可以看出,当子弹的初速度小于 700m/s ,子弹从 A 点、 B 点垂直侵彻铝合金板以后的速度大于穿透纯焊缝材料的速度,表明此时焊缝两边的高强度铝基体材料不但没有提高其抗弹性能,反而使焊接接头的抗弹性能低于纯

焊缝材料的抗弹性能。这主要是由于两边高强度铝基体的存在,使变形集中在焊缝材料中,而铝基体变形非常小,因而靶板的整体耗能下降,出现子弹从 A 、 B 垂直侵彻铝合金板以后的残余速度大于穿透纯焊缝材料速度的情况。随着子弹初速度的增加,子弹从 A 、 B 垂直侵彻铝合金板以后的残余速度小于穿透纯焊缝材料速度。当子弹从 F 点垂直侵彻铝合金板时,由于子弹左侧的焊缝材料较软,使子弹侵彻方向发生了明显的偏转,子弹侵彻距离和阻力增加,因此子弹剩余速度减小,出现子弹从 F 点侵入后的剩余速度小于子弹侵彻基体的剩余速度,表明此时 F 点的抗弹性能优于铝基体材料。



(a) 焊材及附近区域



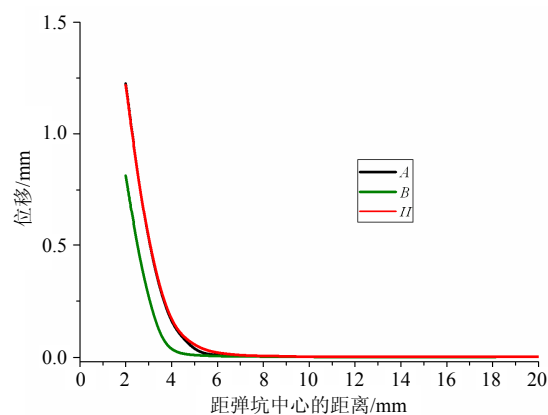
(b) 母材及附近区域

图7 子弹剩余速度变化曲线

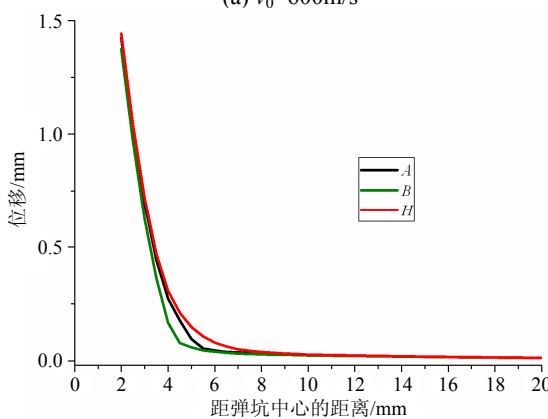
Fig.7 The residual velocity of projectile

众所周知:当弹体为刚性弹时,弹体损失的动能将主要转化为靶板的塑性变形耗能。靶板的塑性变形耗能又可分为整体和局部两部分:整体耗能主要是靶板的整体弯曲和拉伸变形耗能等,局部耗能主要是靶板材料的局部塑性流动耗能、鼓包耗能、花瓣弯曲耗能等。图8为靶板底面沿 AF 方向上各节点的法向位移,图8(a)和图8(b)分别为 $v_0=600\text{m/s}$

和 $v_0=900\text{m/s}$ 时 A 、 B 、 H 的法向位移情况。从图8(a)中可以看出,当 $v_0=600\text{m/s}$ 时,靶板的整体变形较小,而子弹从 A 、 B 点侵入时法向位移小于 H 的法向位移。因此,当子弹以 $v_0=600\text{m/s}$ 的速度从 A 、 B 侵彻铝合金板时,焊缝两边的高强度铝基体材料不但没有提高其抗弹性能,反而出现焊接接头的抗弹性能低于纯焊缝材料的抗弹性能的情况。相对于图8(a)来说,图8(b)中的整体变形有所增加,表明随着子弹侵入速度的增加,焊缝周围的铝合金基体逐渐发生变形,此时焊缝中间的抗弹性能得到改善。因此,当子弹以 $v_0=900\text{m/s}$ 的速度从 A 、 B 侵彻铝合金板时,焊接接头的抗弹性能优于纯焊缝材料的抗弹性能的情况。



(a) $v_0=600\text{m/s}$



(b) $v_0=900\text{m/s}$

图8 不同速度下靶板法向位移

Fig.8 The normal displacement of target at different velocity

从图7~图8可以看出,焊缝附近区域不同点的抗弹性能随着子弹侵彻速度和侵入点位置的变化而变化。当子弹以小于 700m/s 的速度侵彻铝合金板中间的软焊缝材料时,两侧的高强度基体材料并不能提高接头的抗弹性能,相反地,材料的变形局部化会进一步削弱软焊缝材料的抗弹性能。随着子弹侵彻速度的增加,两侧的高强度铝基体材料发生

变形,使得 A 、 B 两点的抗弹性能优于纯焊缝材料。

3 结论

本文通过动态非线性有限元仿真方法,建立了子弹侵彻两种材料边界附近的变形情况,研究了子弹从不同点侵彻铝合金板时子弹侵彻速度、塑性变形以及偏转角度的变化,分析了两种材料的强度失配对铝合金板抗弹性能的影响。研究表明:当子弹侵彻铝合金焊接接头时,子弹会改变侵入方向,子弹方向角的改变大小与两种的材料性能、侵入的位置、靶板厚度、子弹形状和初始速度有关;当子弹以低速侵彻硬铝合金板中间的软焊缝材料时,由于变形局部化,可能出现材料的抗弹性能低于纯焊缝材料的情况;由于子弹侵彻方向的改变,部分区域的抗弹性能高于铝合金基体材料的情况。模拟结果对研究不均匀变形和变形局部化对材料抗弹性能的影响以及提高装甲材料的抗弹性能具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Luk V K, J F M, E A D. Dynamic spherical cavity expansion of strain-hardening materials [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1991, 58: 1—6.
- [2] Forrestal M J, Tzou D Y, Askari E, et al. Penetration into ductile metal targets with rigid spherical-nose rods [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1995, 16: 699—710.
- [3] Fawaz Z, Zheng W, Behdinin K. Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armours [J]. *Composite Structures*, 2004, 63: 387—395.
- [4] Kay G. Failure modeling of titanium 6Al-4V and aluminum 2024-T3 with the Johnson-Cook material model [R]. US Department of Transportation, Federal Aviation Administration, 2003.
- [5] 陈斌, 罗夕容, 曾首义. 穿甲子弹侵彻陶瓷/钢靶板的数值模拟研究[J]. *弹道学报*, 2009, 21(1): 14—18.
Chen Bin, Luo Xirong, Zeng Shouyi. Simulation study on ceramic/mild steel targets penetrated by APP [J]. *Journal of Ballistics*, 2009, 21(1): 14—18. (in Chinese)
- [6] Warren T L, P K L. Penetration of 6061-T6511 aluminum targets by ogive-nosed VAR 4340 steel projectiles at oblique angles: Experiments and simulations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25: 993—1022.
- [7] 周古昕, 王有祁, 刘玲霞, 等. 2519-T87 装甲板焊缝抗弹规律及抗应力腐蚀性能初探[J]. *兵器材料科学与工程*, 2006, 29(6): 19—23.
Zhou Guxin, Wang Youqi, Liu Lingxia, et al. Initial study on ballistic performance and stress corrosion resistance property of weld seam of 2519-T87 armor plate [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2006, 29(6): 19—23. (in Chinese)
- [8] 卢剑锋. 冲击载荷作用下材料和结构力学行为有限元模拟[D]. 北京: 清华大学, 2003.
Lu Jianfeng. Finite element simulation on mechanical behavior of materials and structures subjected to impact loading [D]. Beijing: Tsinghua University, 2003. (in Chinese)
- [9] Zhang X M, Li H J, Li H Z, et al. Dynamic property evaluation of aluminum alloy 2519A by split Hopkinson pressure bar [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, 18: 1—5.
- [10] Buyuk M, Kan S, Loikkanen M J. Explicit finite-element analysis of 2024-T3/T351 aluminum material under impact loading for airplane engine containment and fragment shielding [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2009, 22: 287—295.
- [11] 朱建方, 王伟力, 曾亮. 某型铝合金抗弹效应数值仿真研究[J]. *兵工学报*, 2007, 28(4): 467—470.
Zhu Jianfang, Wang Weili, Zeng Liang. Research on numerical simulation of anticartridge effect for certain aluminum alloy armor plate [J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(4): 467—470. (in Chinese)
- [12] Dikshit S N, Sundararajan G. The penetration of thick steel plates by ogive shaped projectiles-experiment and analysis [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1992, 12: 373—408.
- [13] Wierzbicki T. Petalling of plates under explosive and impact loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 22: 935—954.