

文章编号:1001-4888(2020)02-349-06

炮钢材料等离子淬火后动态力学性能研究^{*}

罗天放, 陈荣刚, 吴斌

(陆军炮兵防空兵学院 机械工程系, 合肥 230031)

摘要:为提高炮钢材料在较高冲击作用下的动态力学性能,采用等离子淬火技术对炮钢材料进行表面处理,并使用分离式霍普金森压杆(SHPB)系统对原始炮钢材料与等离子淬火后的炮钢材料进行对比分析,方法为对两种试样在试验前后的长度压缩量以及二者在不同应变率下的动态应力—应变曲线进行比较。结果表明,随着应变率的增加两种试样的应力—应变关系、屈服强度都有不同程度的强化效应,都表现出一定的应变率敏感性;在相同气压下两种试样在长度方向上都产生了一定的塑性变形,但淬火试样的压缩量明显小于原始试样。并且气压相同时试样经过等离子淬火后其抗冲击性能有显著提升,具体表现为应变与应变率降低,屈服强度与极限强度升高。

关键词: 炮钢; 等离子淬火; 分离式霍普金森压杆; 冲击

中图分类号: TG156.33 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-176

0 引言

炮钢的服役条件非常苛刻。在火炮发射过程中,身管内膛部位的炮钢材料不仅会受到高温高压的火药燃气对其产生的烧蚀,而且在弹丸挤进时内膛还会受到弹带对内壁的摩擦磨损^[1],坡膛受到弹丸的撞击^[2]。因此要求身管用钢必须具有高屈服强度和良好的冲击韧性。目前对炮钢材料进行抗烧蚀、抗磨损的强化方法有很多,但暂无对炮钢进行抗冲击强化并且分析其动态力学性能的报道。

本文通过对炮钢材料表面进行等离子淬火处理,从而达到强化材料抗冲击性能的目的。该技术原理为通过将等离子束以较高能量密度扫描炮钢材料表面,使表面迅速奥氏体化,然后依靠材料自身的热传导迅速冷却,在内表面形成细密的马氏体硬化层^[3]。文中使用霍普金森压杆对原始炮钢材料与经过等离子表面淬火后的炮钢材料,在 $10^2 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 应变率下的动态力学性能进行研究。

1 SHPB 试验原理

分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bars, SHPB)试验技术是研究材料在中高应变率($10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$)下力学性能的试验方法,其装置具有结构简单、操作方便、测量方法精巧以及加载波容易控制等优点^[4,5]。

SHPB 试验原理建立在两个假设之上:(1)一维应力波假定:杆中的波传播必须保持平面一维;(2)均匀性假定:试件中的应力与应变都处于均匀状态。根据二波法^[6,7]可求出试样两端面平均应力 $\sigma(t)$ 、平均应变 $\epsilon(t)$ 、平均应变率 $\dot{\epsilon}(t)$ 为:

$$\sigma(t) = \frac{EA}{A_0} \epsilon_i(t) \quad (1)$$

^{*} 收稿日期:2018-07-29;修回日期:2018-12-09

基金项目:国家自然科学基金(51475471)

通讯作者:吴斌(1971—),男,教授,博士。Email:mewubin@tom.com

$$\epsilon(t) = -\frac{2C}{L_0} \int_0^t \epsilon_r(t) dt \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}(t) = -\frac{2C}{L_0} \epsilon_r(t) \quad (3)$$

式中, A 和 A_0 分别为压杆和试件的横截面积; C 和 L_0 分别为压杆的纵波波速和试样的长度, 其中 $C = \sqrt{E/\rho}$, E 、 ρ 分别为压杆的杨氏模量和密度。

SHPB 系统简图如图 1 所示, 其试验原理为当入射杆中的应力脉冲(入射波)到达与试样的接触面时, 由于波阻抗的不匹配, 一部分脉冲被反射形成反射波, 另一部分通过试样进入透射杆中形成透射波。杆上的应变片对入射杆中的入射波、反射波以及透射杆中的透射脉冲进行测量, 最后根据一维应力波理论导出试样的应力—应变关系^[7-10]。

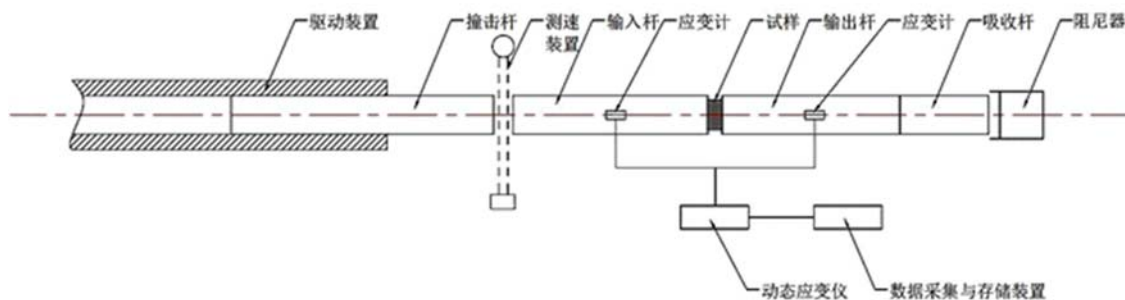


图 1 SHPB 系统简图

Fig. 1 SHPB system diagram

2 试样选择与试验过程

在考虑以上影响因素后, 选择入射杆与透射杆的尺寸为 $\Phi 14.5\text{mm} \times 100\text{mm}$, 撞击杆(子弹)的尺寸为 $\Phi 14.5\text{mm} \times 30\text{mm}$, 材料都为弹簧钢。试样材料为 PCrNi3Mo, 尺寸为 $\Phi 8\text{mm} \times 4.6\text{mm}$, 其化学成分为(mass, %): C 0.35, Mn 0.36, Si 0.33, P 0.009, S 0.007, Mo 0.29, Ni 3.20, Cr 1.20, Ti 0.01, Cu 0.08。为得到淬火后的试样, 先在厚 4.8mm、直径 250mm 的炮钢圆板上进行多道双面等离子淬火处理, 对齐圆板两面的淬火带。再用磨床将两个面各打磨 0.1mm 从而去除淬火后表面杂质, 最后沿淬火带中心线切割成型。

使用安徽呈合科技有限公司研发的 CHK-1 型数控等离子束多功能表面处理机, 对本次研究样品进行等离子表面硬化处理, 工艺参数为: 空载电压 90V、工作电流 130A、喷嘴直径 6mm、氩气压力 0.5bar、氩气流量 $1.0\text{m}^3\text{h}^{-1}$ 、喷嘴至工件距离 5mm。最终得到硬化层厚度约 1.5mm。本文 SHPB 试验的试样分为原始炮钢试样和双面淬火试样, 试验温度为常温。通过调节发射系统储气室的气压来控制管状子弹的撞击速度, 继而控制入射波形的应力幅值, 以达到不同的加载条件, 分析试样在不同冲击强度下的动态力学性能。

3 试验结果与分析

3.1 压缩量比较

在固定同一气压的情况下测量试样在试验前后的长度, 每种气压做 4 组后取平均值, 结果如表 1 所示。由表可见, 原始试样与淬火试样在试验后都发生了一定程度的塑性变形, 试样长度都有所减少, 并且随着气压的增大, 压缩量都呈增加的趋势, 但是二者减少的数值不同。在相同气压下, 淬火试样的压缩量都要明显小于原始试样, 淬火后材料的塑性变形小, 抗压强度得到提高。

3.2 应力—应变曲线

图 2 为试验测得两种试样在不同应变率下各自的动态应力—应变曲线, 其中压力范围为 0.17~0.70MPa, 应变率范围为 $100 \sim 1400\text{s}^{-1}$ 。由图可知二者的屈服强度与极限强度都随应变率的增加有明

显提升,如当应变率由 280s^{-1} 提高到 1400s^{-1} ,原始试样的屈服强度也从 466.4MPa 提高到 871.8MPa ,而淬火试样当其应变率由 100s^{-1} 提高到 1000s^{-1} 后,屈服强度也从 511.4MPa 提高到 1028.8MPa ,因此可知该炮钢材料是一种应变率敏感材料,表现出一定的应变率敏感性。具体分析可将试验过程分为弹性阶段、强化阶段与卸载阶段。试验开始时试样处于弹性阶段,此时应力随着应变的增加呈线性增长;随后进入强化阶段,应力随应变的增加而增加,但是斜率变低;最后进入卸载阶段,应力随之下降。

表 1 不同气压下的试验结果

Tab. 1 Test results at different pressures

试验气压		试样尺寸 /mm		
		试验前	试验后	压缩量
0.17MPa	原始	4.62	4.56	0.06
	淬火	4.62	4.60	0.02
0.35MPa	原始	4.59	4.32	0.27
	淬火	4.62	4.52	0.10
0.50MPa	原始	4.61	4.17	0.44
	淬火	4.62	4.40	0.22
0.60MPa	原始	4.60	4.01	0.59
	淬火	4.62	4.28	0.34
0.70MPa	原始	4.61	3.87	0.74
	淬火	4.61	4.14	0.47

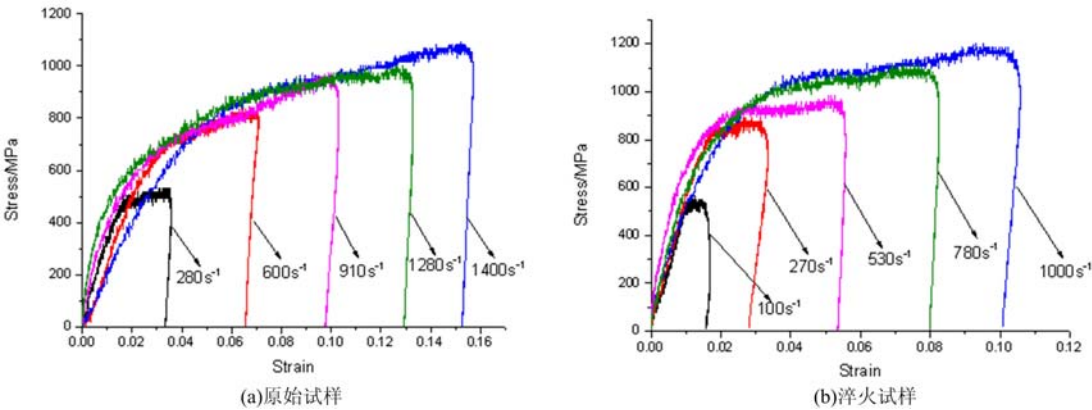


图 2 应力—应变关系

Fig. 2 Stress-strain relation

图 3 为两种试样在相同气压下的应力—应变关系。由图可知,在 0.17MPa 气压下淬火试样的应变率比原始试样降低了 64.3% ;在 0.35MPa 气压下淬火试样的应变率比原始试样降低了 55% ;在 0.17MPa 气压下淬火试样的应变率比原始试样降低了 28.6% 。并且淬火试样的应变值明显小于原始试样,这也符合表 1 中试验后淬火试样的压缩量小于原始试样的结果。由图还可发现,在相同气压下淬火试样的屈服强度与极限强度都要高于未淬火试样,具体数值见表 1。由以上现象可得出结论:在相同气压下,试样经过等离子淬火后其抗冲击性能有显著提升,具体表现为应变与应变率降低,屈服强度与极限强度升高。

图 4 为在同一应变率下两种试样的应力—应变曲线。由图 4 可发现,当应变率相同时,虽然二者的应变值相同,但淬火试样的屈服强度和极限强度都要明显大于原始试样。在 200s^{-1} 应变率下原始试样的屈服强度为 551.6MPa ,淬火试样的屈服强度为 842.9MPa ,比同应变率下的原始试样提高了 52.8% ;在 900s^{-1} 应变率下原始试样的屈服强度为 723.1MPa ,淬火试样的屈服强度为 1028.0MPa ,比原始试样提高了 42.2% 。

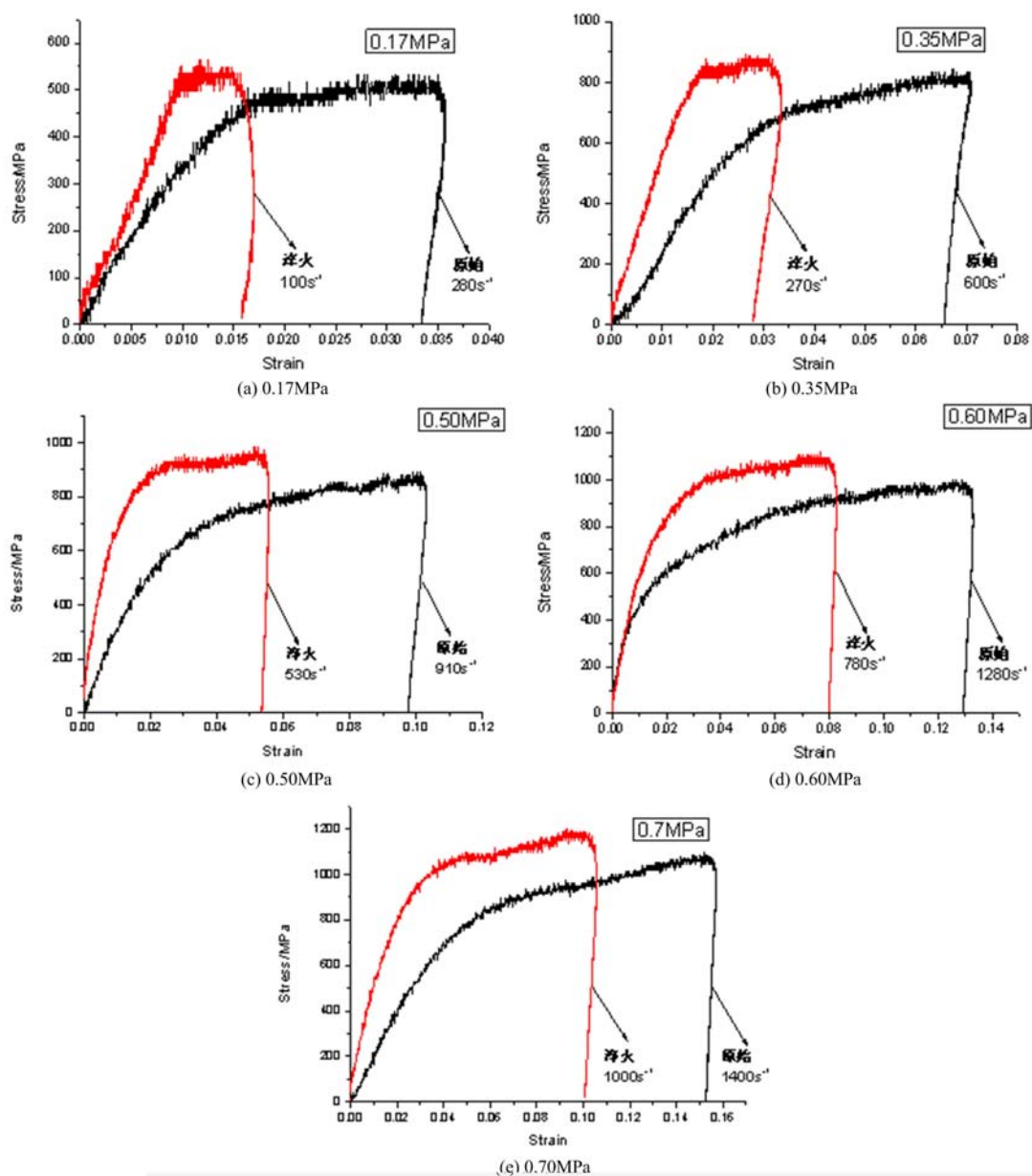


图 3 相同气压下的应力—应变关系

Fig. 3 Stress-strain relation at the same pressure

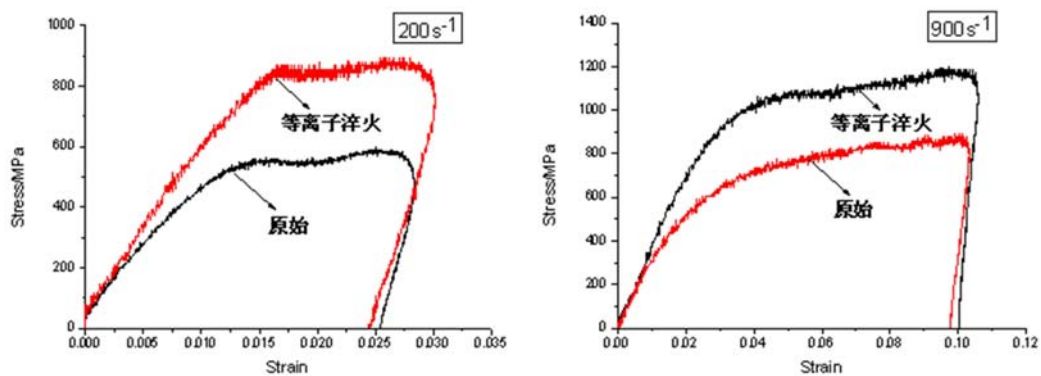


图 4 相同应变率下的应力—应变关系

Fig. 4 Stress-strain relation at the same strain rate

图5为根据试验结果得到的两种试样的屈服强度与应变率的关系。由图5可以看出原始试样随着应变率由 280s^{-1} 到 1400s^{-1} ,屈服强度也由 460MPa 左右提高至 870MPa ,比低应变率时提高了约89%;淬火试样随着应变率由 100s^{-1} 到 1000s^{-1} ,屈服强度也由 511MPa 左右提高至 1028MPa ,比低应变率时提高了约101%,因此两种试样在高应变率下材料的强化效果会更加显著。并且淬火试样在不同应变率下其屈服强度都要显著高于原始试样,这与图4中得出的结论相同。

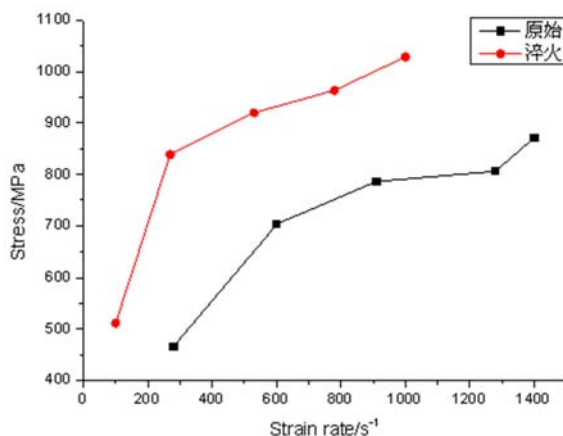


图5 屈服强度与应变率的关系

Fig. 5 Relation between strain rate and yield strength

4 结论

通过对炮钢材料进行表面等离子淬火处理,并将原始炮钢试样与淬火后试样进行高应变率动态压缩试验,对试验结果进行分析后得出如下结论:

(1) SHPB 试验得到原始试样与淬火试样的应力—应变曲线,两种试样的试验过程都可分为弹性阶段、强化阶段与卸载阶段。在 100s^{-1} 到 1400s^{-1} 应变率范围以内,二者的屈服强度与极限强度都随应变率的增加有明显提升,都表现出一定的应变率敏感性;

(2) 在相同气压下两种试样在长度方向上都产生了一定的塑性变形,但淬火试样的压缩量明显小于原始试样,淬火后炮钢材料的抗压强度得到提高;并且气压相同时试样经过等离子淬火后其抗冲击性能有显著提升,具体表现为应变与应变率降低,屈服强度与极限强度升高;

(3) 原始试样在应变率为 1440s^{-1} 下的屈服强度比 280s^{-1} 下提高约89%,淬火试样在应变率为 100s^{-1} 下的屈服强度比 1000s^{-1} 下提高约101%,两种试样都有不同程度的强化效应,并且淬火试样在不同应变率下其屈服强度都要显著高于原始试样。

参考文献:

- [1] Wu B, Zheng J, Tian Q T, et al. Friction and wear between rotating band and gun barrel during engraving process [J]. Wear, 2014, 318(1-2):106—113.
- [2] 陆野,周克栋,赫雷,等. 坡膛结构参数对枪械内弹道挤进时期的影响研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(7):1363—1369 (LU Ye, ZHOU Kedong, HE Lei, et al. Influence of structure parameters of forcing cone on small arms interior ballistics during engraving[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(7):1363—1369 (in Chinese))
- [3] Samal S. Thermal plasma technology: The prospective future in material processing[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142:3131—3150.
- [4] 卢芳云,陈荣,林玉亮,等. 霍普金森杆实验技术[M]. 北京:科学出版社, 2013:11—15 (LU Fangyun, CHEN Rong, LIN Yuliang, et al. Hopkinson bar techniques[M]. Beijing: Science Press, 2013:11—15 (in Chinese))
- [5] 贾宇,刘彦,梁晓璐,等. 高强度合金钢 30CrMnMoRE/30CrMnSi 的动态力学性能[J]. 高压物理学报, 2018, 32(4):044102-1—044102-7 (JIA Yu, LIU Yan, LIANG Xiaolu, et al. Dynamic compression properties of 30CrMnMoRE and 30CrMnSi[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(4):044102-1—044102-7)

- (in Chinese))
- [6] 宋力, 胡时胜. SHPB 数据处理中的二波法与三波法[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(4):368—373 (SONG Li, HU Shisheng. Two-wave and three-wave method in SHPB data processing[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(4):368—373 (in Chinese))
- [7] 龚育宁, 冯思艳. SHPB 装置在工程结构或构件动态力学性能测试与分析中的应用[J]. 实验力学, 1990, 5(2):216—220 (GONG Yuning, FENG Siyan. The application of SHPB to the measurement and analysis for dynamic behavior of engineering structures[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1990, 5(2):216—220 (in Chinese))
- [8] 王永刚, 施绍裘, 王礼立. 采用改进的 SHPB 方法对泡沫铝动态力学性能的研究[J]. 实验力学, 2003, 18(2):257—264 (WANG Yonggang, SHI Shaoqiu, WANG Lili. An improved SHPB method and its application in the study of dynamic mechanical behavior of aluminum foams[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2003, 18(2):257—264 (in Chinese))
- [9] 张磊, 胡时胜, 吴家俊. α -钛合金 TA6 的动态力学性能和剪切现象分析[J]. 实验力学, 2005, 20(4):567—572 (ZHANG Lei, HU Shisheng, WU Jiajun. Analysis of adiabatic shearing phenomenon and dynamic mechanical performance on TA-6 of α -Titanium alloy[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(4):567—572 (in Chinese))
- [10] 马菊荣, 刘海峰, 杨维武. 沙漠砂混凝土动态力学性能实验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(4):491—498 (MA Jurong, LIU Haifeng, YANG Weiwu. Experimental study of dynamic mechanical properties of desert sand concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(4):491—498 (in Chinese))

Experimental study on dynamic mechanical properties of gun steel materials after plasma quenching

LUO Tian-fang, CHEN Rong-gang, WU Bin

(Department of Mechanical Engineering, Army Artillery Air Defense Academy, Hefei 230031, China)

Abstract: In order to improve the dynamic mechanical properties of gun steel materials under high impact, plasma quenching technology is used for surface treatment. The comparison of the original gun steel materials with the plasma quenched materials is carried out by the split Hopkinson pressure bar (SHPB) system. The length compression of two samples before and after the tests and the dynamic stress-strain curves of the two samples under different strain rates are compared. The results show that the stress-strain relationship and yield strength of two samples have different degrees of strengthening effect with the increase of strain rate, implying a certain strain rate sensitivity. Both samples have certain plastic deformations in the longitudinal direction under the same air pressure, but the compression amount of the quenched sample is significantly smaller than that of the original sample. When the pressure is the same, the impact resistance of the sample after plasma quenching is significantly improved, which can be characterized by the decrease of strain and strain rate, and the increase of yield strength and ultimate strength.

Keywords: gun steel; plasma quenching; Split hopkinson pressure bar (SHPB); impact