

Q345-TA2 的动态流动应力特征和本构关系

江海涛, 徐惠惠

(北京科技大学, 北京 100083)

摘要: 钛钢复合板因其优异的高强度和耐腐蚀性能已越来越多的被应用于动态环境下。采用 Gleeble-3500 热模拟试验机和分离式霍普金森压杆 (SHPB) 装置, 对 Q345-TA2 钛钢复合板进行准静态和高应变速率压缩试验。结果表明: Q345-TA2 钛钢复合材料具有应变速率增强效应、增塑效应、绝热温升软化作用, 但在准静态和动态冲击各自分区范围内, 对应变速率变化不甚敏感。在考虑绝热温升的基础上, 对 $J-C$ 本构模型进行修正, 得到了可用于对冲击载荷作用下进行结构分析的材料本构模型, 结果较好。

关键词: 钛钢复合板; 高应变速率; 流动应力; $J-C$ 本构模型

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)12-3192-05

高应变速率加载下, 材料的应力-应变响应特征因材质或显微组织的不同, 差异很大。大多数金属与合金的流变应力随应变速率增加而提高, 表现出应变速率强化效应^[1]。对于材料动态特性的研究, 其重点就是建立能描述材料在高速变形条件下的动态塑性力学本构模型及其应变速率相关性。

钛钢复合板由于其低成本、高强度和优良的耐腐蚀性而取代纯钛成为主要的工业压力容器制造材料。以往对钛钢复合板的研究主要集中于制备工艺、界面特性等方面。近年来, 人们的眼光才开始触及到其力学行为。杨扬^[2]等人通过对钛钢复合板界面微观断裂过程的观察和分析, 揭示了其不同波形状态界面的微观断裂机制; 刘播^[3]等人建立了 5 种不同焊接接头形式的有限元模型, 计算并分析了不同接头形式在各工作载荷下的应力应变场分布。而这些距其动态力学性能研究领域还相差甚远, 包括动态应力-应变特征、本构关系、变形机制等。从而使研究人员在进行当复合板受到爆炸、撞击等冲击载荷作用下的结构响应分析时受到制约, 因而有必要研究高应变速率下的流动应力特征和动态本构关系。

本研究利用 SHPB 压杆装置对爆炸结合的钛钢复合板进行动态压缩试验, 分析 Q345-TA2 钛钢复合板在动态载荷下的应力-应变关系特征, 并采用 $J-C$ 本构模型建立其动态本构关系, 从而为其工程应用提供可靠的理论依据。

1 实验

实验材料选用宝钛集团公司生产的钛钢爆炸复合板: TA2/Q345 钛钢爆炸复合板。其中钛层厚度: 8 mm; 钢层厚度: 45 mm。TA2 和 Q345 的主要化学成分见表 1, 力学性能见表 2。

高应变速率冲击压缩试验在中科院分离式 Hopkinson 压杆 (SHPB 装置) 上进行。试件尺寸为 $\Phi 6$ mm \times (1+5) mm、应变速率控制在 500、1000、2000、3000 s⁻¹, 每种速率试验 3 次, 最后取平均值。为了便于比较和计算本构关系, 还进行了准静态压缩试验。

运用 Gleeble-3500 材料热模拟试验机对钛钢复合板圆柱试件进行常温准静态压缩试验, 试件尺寸为 $\Phi 6$ mm \times (1.5+7.5) mm, 变形速率控制为 10⁻⁴ 和 10⁻³ s⁻¹。

需要说明的是, 为了反映 TA2/Q345 钛钢复合板自身的性能, 试件厚度同比缩小、钛:钢按 1:5、及与原钛板和钢板厚度基本相同的比例来制定。

表 1 TA2 和 Q345 的化学成分

Table 1 Chemical composition of TA2 and Q345 ($\omega/\%$)										
Material	Fe	Ti	C	Mn	Si	P	S	N	H	O
Q345	0.031	Bal.	0.009	-	-	-	-	0.012	0.002	0.06
TA2	Bal.	-	0.16	0.50	0.15	0.011	0.010	-	-	-

表 2 TA2 和 Q345 的力学性能

Table 2 Mechanical properties of TA2 and Q345			
Material	σ_b /MPa	σ_s /MPa	$\delta/\%$
Q345	540	410	35
TA2	390	270	40

收稿日期: 2015-12-15

作者简介: 江海涛, 男, 1976 年生, 博士, 副教授, 北京科技大学工程技术研究院, 北京 100083, 电话: 010-62332598, E-mail: nwpujht@163.com

2 结果与分析

2.1 准静态和高应变速率下真应力-应变曲线分析

图 1 和图 2 分别为准静态和高应变速率条件下钛钢复合板经过压缩后的应力-应变曲线。从图 1 和图 2 可以看出, Q345-TA2 的应变硬化率($\partial\sigma/\partial\varepsilon$)在准静态条件下和高应变速率的初始阶段, 均随应变的增加而增大, 但增加幅度逐渐减小。由图 2 可见, 随着应变率的增大, 应变硬化率降低, 而且应变值较大时出现应变软化^[4]现象, 接近于理想弹塑性模型。

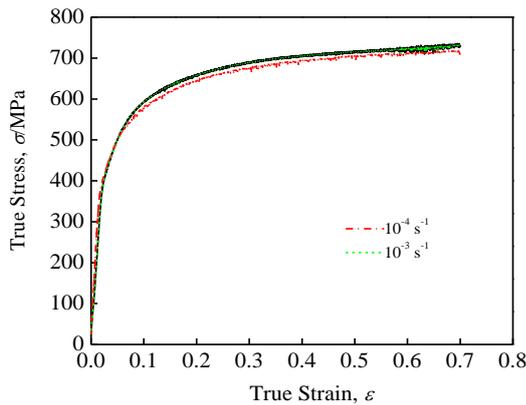


图 1 准静态条件下钛钢复合板的应力-应变关系

Fig.1 Stress-strain relation of titanium steel clad plate under the quasi static condition

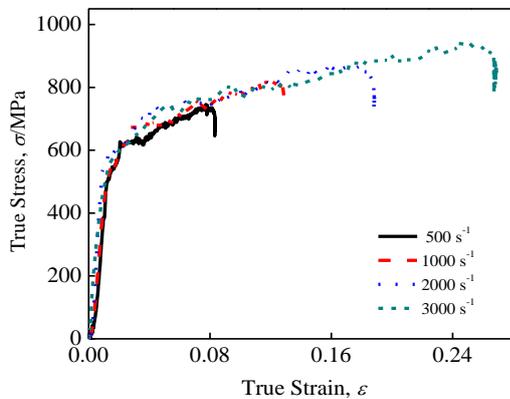


图 2 高应变速率下钛钢复合板的应力-应变关系

Fig.2 Stress-strain relation of titanium steel clad under the condition of high strain rate

与准静态条件相比, 高应变速率条件下的动态应力-应变曲线的初始段斜率增加, 并显著提前进入塑性变形阶段。

图 3 为 Q345-TA2 屈服应力随应变率的变化关系。由图可见, 随着应变率的增加, 屈服应力增加。

综上所述, Q345-TA2 钛钢复合板主要的动态力学性能有:

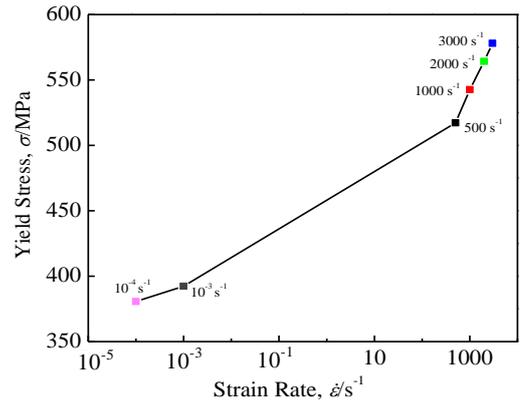


图 3 Q345-TA2 屈服应力和应变率的关系

Fig.3 Relation of the yield stress and the strain rate of Q345-TA2

(1) 应变率增强效应。比较图 2 和图 1 中的应力-应变曲线可以看出, 动态曲线明显高于准静态曲线, 说明该材料具有显著的应变率增强效应。但当应变率增加到一定值时, 应变率强化效应相对减弱, 表现为流动应力的增加值减小。

将不同应变速率 (1000、2000、3000 s⁻¹) 下、相同应变 (0.06、0.08、0.10、0.12) 时的应力提取出来, 做应力与应变率对数的关系图, 如图 4 所示。

由图可见, 在不同的压缩速率下, 随着应变的增加, 应力呈现增加趋势, 说明材料具有比较明显的应变硬化特性。同时应力与应变率的对数较好地服从线性关系, 说明该材料具有应变率相关特性。

(2) 增塑效应。如图 2 所示, 随着应变率的增加, 曲线的塑性流动趋势增强, 塑性流动段显著变长, 表现出应变率增塑效应。本材料是由 Q345 和 TA2 复合而成, 整体的变形机制自然与单材料 Q345 和 TA2 的

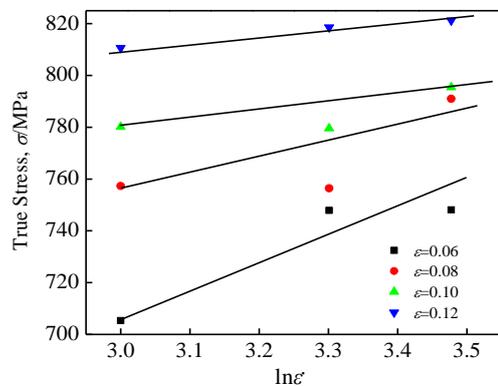


图 4 钛钢复合板高应变速率压缩下应力-应变率对数关系图

Fig.4 Logarithmic diagram of the stress-strain rate of titanium steel clad plate under the high strain rate compression

变形有关。而纯钛在高应变率下的绝热升温和孪生变形机制的发生 (图 5), 均使滑移更易于进行, 此乃应变率增塑的主要原因^[5]。此效应使材料破坏时所吸收的塑性功增加, 这表明材料具有良好的冲击塑性, 在高应变率下具有很好的吸能效应, 完全可以用于爆炸成形。

2.2 钛钢复合板材料的应变率敏感性

用 σ_D 和 σ_s 来表示高应变速率和准静态条件下 (10^{-3} s^{-1}) 材料的流动应力, 用给定应变下的应力的差值 ($\Delta\sigma=\sigma_D-\sigma_s$)、相对变化率 $\Delta\sigma/\sigma_s$ 以及应变率敏感系数 $\lambda = \partial\sigma / \partial \lg \dot{\epsilon}$ 来表征材料的应变率敏感性。所得应变率敏感参数如表 3 所示。由表 3 数据可以看出, $\Delta\sigma$ 仅在 200 MPa 左右、流动应力的相对变化率 <1 且 λ 为 30 左右, 说明 Q345-TA2 复合板对应变率变化不甚敏感。

如前所述, 整体上动态曲线高于准静态曲线, 说明材料具有应变率强化效应, 但单独比较图 2 中的 4

条动态压缩曲线可以看出, 虽应变率覆盖 $500\sim 3000 \text{ s}^{-1}$, 跨度较大, 但在相同应变条件下, 应力水平相差不大。说明在此应变率范围内, 材料对应变率变化不敏感。

需要指出, 在准静态条件下, 材料具有良好的韧性和延展性, 压缩真应变在接近 0.7 时, 材料仍保持完好; 而在高应变速率下, 则破坏应变明显提前。

2.3 钛钢复合板高应变速率下的绝热温升软化作用

由图 2 可见, Q345-TA2 在高应变率下的塑性变形过程中, 强化作用和软化作用同时进行且软化作用随应变率的增加有所增强。一方面, 材料的流动应力随应变的增加而增大; 另一方面, 材料在高速变形时处于绝热状态, 与外界没有热交换, 瞬态温升完全是由于材料在高速变形时自身产生的。在绝热过程中, 塑性变形功仅有 10% 以材料缺陷储存在材料内部, 而其余 90% 将转化为热能^[6]。由于塑性变形持续的时间很短 (约几十微秒), 因此热损失很少, 那么塑性变形功可引起材料内绝热温升, 温升随应变而变化, 是应

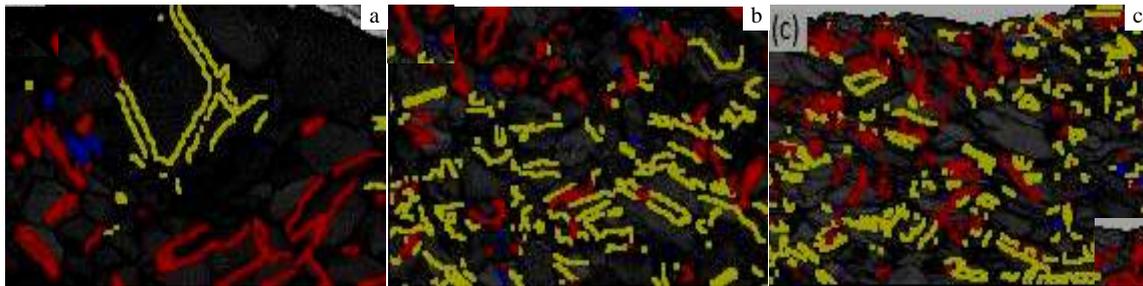


图 5 钛钢复合板钛侧在不同高应变速率下孪生带

Fig.5 Twin belt of titanium side under high strain rate in the 500 s^{-1} (a), 1000 s^{-1} (b), and 2000 s^{-1} (c) (blue: $\{11\bar{2}1\} \langle 1\bar{1}00 \rangle$; yellow: $\{11\bar{2}2\} \langle 1\bar{1}00 \rangle$; red: $\{10\bar{1}2\} \langle 11\bar{2}0 \rangle$)

表 3 Q345-TA2 应变率敏感参数

Table 3 Strain rate sensitive parameters of Q345-TA2

$\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$	ϵ	σ_s/MPa	σ_D/MPa	$\Delta\sigma/\text{MPa}$	$\Delta\sigma/\sigma_s$	λ
1000	0.06	528.19	705.36	177.17	0.34	29.53
	0.08	567.51	757.31	189.80	0.33	31.63
	0.10	592.21	780.12	187.91	0.32	31.32
	0.12	612.57	810.68	198.11	0.32	33.02
2000	0.06	528.19	747.89	219.70	0.42	34.87
	0.08	567.51	756.41	188.90	0.33	29.98
	0.10	592.21	779.60	187.39	0.32	29.74
	0.12	612.57	818.61	206.04	0.34	32.70
3000	0.06	528.19	748.07	219.88	0.42	33.83
	0.08	567.51	791.01	223.50	0.39	34.38
	0.10	592.21	795.43	203.22	0.34	31.26
	0.12	612.57	808.59	196.02	0.32	30.16

变的函数, 这一绝热温升可由下式估算^[7-11]:

$$\Delta T = \frac{\eta}{\rho c_p} \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon_p \quad (1)$$

式中: η 为塑性功转化成热的因子; ρ 为材料密度; c_p 为材料比定压热容。

查阅相关资料, 可得参数见表 4^[12]。

若将材料全部视为钛, 则

$$\Delta T = \frac{0.9}{2.4 \times 10^6} \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon_p$$

若全部视为钢, 则

$$\Delta T = \frac{0.9}{3.5 \times 10^6} \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon_p$$

而根据图中的应力应变数据, 若按 3000 s⁻¹ 速率来计算的话, 可得 $\int_0^\epsilon \sigma d\epsilon_p = 250 \text{ MPa}$ 。

因此, 对于钛, 可算出 $\Delta T = 77 \text{ K}$, 对于钢, 可得 $\Delta T = 53 \text{ K}$ 。则对于钛钢复合材料来讲, ΔT 应大致介于二者之间, 为 53~77 K。

由以上分析可知, 在高应变速率下, Q345-TA2 复合板存在绝热温升软化作用且其绝热温升为 53~77 K。

2.4 钛钢复合板动态本构参数计算

在高应变速率下, Johnson-Cook 等人提出了以下反映材料动态塑性力学性能的本构关系式, 其表达式为^[13]:

$$\sigma = [A + B\epsilon^n] [1 + C \ln \dot{\epsilon}^*] [1 - T^{*m}] \quad (2)$$

式中, σ 为等效应力; ϵ 为等效塑性应变; A, B, C 为材料强度相关系数; $\dot{\epsilon}^*$ 为无量纲化应变率变量; $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率 (文中 $\dot{\epsilon}_0$ 取准静态压缩速率 10⁻³ s⁻¹); T^* 为无量纲化温度变量 (据 T^* 的表达式可得, 无量纲温度 T^* 在室温条件下为 0); T_{room} 为室内温度; T 为试件内部温度; T_{melt} 为材料熔点; m 为温度软化指数; n 应变硬化指数。

式(2)中, $\dot{\epsilon}^* = \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}$; $T^* = \frac{T - T_{\text{melt}}}{T - T_{\text{room}}}$ 。 ($A + B\epsilon^n$)、

($1 + C \ln \dot{\epsilon}^*$)、($1 - T^{*m}$) 这三项分别描述了材料的加工硬化效应、应变率效应和温度软化效应。其中 A, B, C, m, n 为 5 个待定系数, 需要根据不同应变速率和

表 4 钛和钢的相关参数

Table 4 Related parameters of titanium and steel^[12]

Material	Density, $\rho/\text{kg m}^{-3}$	Specific heat capacity, $c_p/\text{J (kg K)}^{-1}$	$\rho c_p / \times 10^6 \text{ J (m}^3 \text{ K)}^{-1}$	$0.4 T_m/\text{K}$
TA2	4510	527	2.4	776
Q345	7850	450	3.5	724

不同温度条件下的应力-应变曲线来拟合。考虑绝热温升的情形下, $T = T_0 + \Delta T$, 其中, ΔT 为绝热温升, T_0 为实验初始温度。联立 (1)、(2) 式, 可得:

$$\int_{T_0}^{T^*} \frac{dT^*}{1 - T^{*m}} = \frac{0.9(1 + C \ln \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)}{\rho C_p} \int_0^\epsilon (A + B\epsilon^n) d\epsilon_p \quad (3)$$

由此, 可将绝热温升用塑性变形的函数关系表征。

其中, 假设应变率 $\dot{\epsilon}$ 为常数, T^* 为相应的温度值。令 $m=1$, 就能得到简单解^[14]:

$$T^* = 1 - \exp\left[-\frac{0.9(1 + C \ln \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)}{\rho C_p (T_m - T_r)} (A\epsilon + \frac{B\epsilon^{n+1}}{n+1})\right] \quad (4)$$

将 (4) 式代入 (2) 式, 则:

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \exp\left[-\frac{0.9(1 + C \ln \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)}{\rho C_p (T_m - T_r)} (A\epsilon + \frac{B\epsilon^{n+1}}{n+1})\right] \quad (5)$$

对于本实验的钛钢复合板材料, 得到:

$$\sigma = (380.54 + 487.7485\epsilon^{0.45614})(1 + 0.057 \ln \dot{\epsilon}^*) \cdot \exp\left[-\frac{0.9(1 + 0.057 \ln \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)}{\rho C_p (T_m - T_r)} (380.54\epsilon + 334.9599\epsilon^{1.45614})\right]$$

为验证此方程对本材料在高应变速率下的适应性, 特在 500~3000 s⁻¹ 速率之间取 1500 和 2500 s⁻¹ 时的工况进行模拟试验, 如图 6 所示。

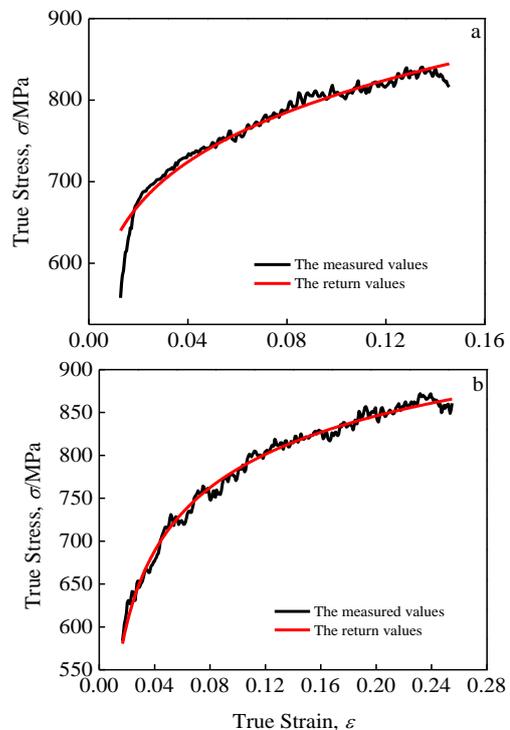


图 6 不同应变速率下实验值和回归值的比较

Fig.6 Comparison of experimental values and regression values under different strain rates: (a) $\dot{\epsilon} = 1500 \text{ s}^{-1}$ and (b) $\dot{\epsilon} = 2500 \text{ s}^{-1}$

可以看到, 当 $\varepsilon > 0.02$ 时, 模型计算结果和实验结果吻合较好。特别是应变较大时, 曲线几乎重合, 说明此模型可有效预测 Q345-TA2 钛钢复合板在大应变、高应变速率下的变形。

3 结 论

1) Q345-TA2 钛钢复合板具有应变率增强效应。从试验来看, 材料性能明显分为准静态和动态冲击 2 个区域。相同应变条件下, 动态曲线明显高于准静态曲线, 应变率强化效应明显。随应变率的增加, 材料的动态屈服点也不断升高; 同时具有明显的增塑效应。随着应变率的增加, 曲线的塑性流动趋势增强, 塑性流动段显著变长。

2) 在准静态和动态冲击各自的分区内, 不同应变率下, 发生相同变形时应力水平相差不大, 流动应力的相对变化率 < 1 且 λ 为 30 左右, 故材料在特定区域内, 对应变率变化不甚敏感。从 $500 \sim 3000 \text{ s}^{-1}$, 随应变速率的提高, 绝热温升软化作用呈逐渐增加趋势, 且 ΔT 大致介于 $53 \sim 77 \text{ K}$ 之间。

3) 采用 $J-C$ 本构模型对本材料进行本构关系描述, 模拟计算结果和实验结果吻合较好, 说明此模型可有效预测 Q345-TA2 钛钢复合板在大应变、高应变速率下的变形。

参考文献 References

- [1] Sha Guiying(沙桂英), Xu Yongbo(徐永波), Yu Tao(于涛). *Transactions of Materials and Heat Treatment* (材料热处理学报)[J], 2006, 27(4): 77
- [2] Yang Yang(杨扬). *Materials Review*(材料导报)[J], 1994(5): 24
- [3] Liu Bo(刘播). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Harbin:

Harbin Institute of Technology, 2011

- [4] Li Shuqin(李淑琴), Fu Huameng(付华萌), Zhang Haifeng(张海峰). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(7): 1681
- [5] Chang Yazhe(常亚喆). *Thesis for Master*(硕士论文)[D]. Changsha: Central South University, 2008
- [6] Yu Wenjing(于文静), Shi Jianyong(史健勇), Zhao Jincheng(赵金城). *Journal of Building Structures*(建筑结构)[J], 2011, 41(3): 28
- [7] Azkune M, Punate I, Insausti A. *Eng Stuct*[J], 2007, 29(6): 933
- [8] Lu Zhean(卢哲安), Yu Qingliang(于清亮), Wang Juanjuan(汪娟娟). *Chinese Journal of Wuhan University of Technology*(武汉理工大学学报)[J], 2006, 28(3): 84
- [9] Zhang Ailin(张爱林), Song Qunying(宋群英), Ma Yali(马亚丽). *Journal of Engineering Mechanics* (机械工程学报)[J], 2006, 23(10): 156
- [10] Tian Mingge(田明革), Yi Weijian(易伟建). *Journal of Railway Science and Engineering*(铁道科学与工程学报)[J], 2008, 5(5): 27
- [11] Fang Dongping(方东平), Zhang Chuanmin(张传敏), Zhao Tingsheng(赵挺生). *Journal of Tsinghua University, Science and Technology*(清华大学学报, 自然科学版)[J], 2003, 43(10): 1374
- [12] Yong Qilong(雍岐龙), Tian Jianguo(田建国), Yang Wenyong(杨文勇). *Journal of Yunnan Polytechnic University*(云南工业大学学报)[J], 1999, 15(2): 7
- [13] Johnson J R, Cook W H. *Eng Frac Mec*[J], 1985, 21(1): 31
- [14] Bao Weiping(包卫平), Ren Xueping(任学平), Zhang Yi(张毅). *Journal of Yunnan Polytechnic University*(塑性工程学报)[J], 2009, 16(5): 125

Dynamic Flow Stress Characteristics and Constitutive Relation of Q345-TA2

Jiang Haitao, Xu Huihui

(University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Q345-TA2 titanium-steel clad plates have been more and more used in dynamic environment because of their high strength and excellent corrosion resistance. In this paper, quasi-static and high-strain-rate compression of Q345-TA2 titanium-steel clad plate was carried out by Gleeble-3500 thermal simulation testing machine and split hopkinson pressure bar (SHPB) device. The results show that the Q345-TA2 titanium-steel composite material has enhanced effect of strain rate, plasticizing effect and softening action of adiabatic temperature rise, but it is not very sensitive to strain rate change within the scope of each partition of quasi-static and dynamic. In consideration of the adiabatic temperature rise, the jaynes-cummings constitutive model is modified, and a material constitutive model is obtained which can analyze the structure under the impact load; the fitted results are in good agreement with the experiment.

Key words: titanium-steel composite panels; high-strain-rate compression; flow stress; jaynes-cummings constitutive model

Corresponding author: Jiang Haitao, Ph. D., Associate Professor, Institute of Engineering Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-62332598, E-mail: nwpujht@163.com