

冷喷涂 Cu 粒子参量对其碰撞变形行为的影响 *

李文亚 李长久 王豫跃 杨冠军

(西安交通大学金属材料强度国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要 采用有限元数值计算方法研究了冷喷涂过程中 Cu 粒子与 Cu 基体的碰撞变形行为, 探讨了粒子速度、温度对其碰撞基体后的变形行为、界面温度变化与粒子和基体的接触面积的影响. 结果表明, 随粒子碰撞速度的增加, 粒子扁平率与碰撞界面温度增加、接触面积增大. 证实了存在使碰撞界面发生绝热剪切失稳变形的临界速度, 该速度与粒子沉积的临界速度一致. 当粒子速度大于产生绝热剪切失稳变形的临界速度时, 粒子的变形扁平率显著增加, 且界面温度与有效接触界面面积也显著增加; 随碰撞前粒子温度的增加, 碰撞界面的温度也显著增加. 高达粒子材料熔点的界面温度与有效接触面积的显著增加, 将有助于粒子与基体之间冶金结合的形成.

关键词 冷喷涂, 数值模拟, Cu 粒子, 高速碰撞, 绝热剪切失稳

中图分类号 TG174

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2005)03-0282-05

EFFECT OF PARAMETERS OF COLD SPRAYED Cu PARTICLES ON ITS IMPACTING BEHAVIOR

LI WENYA, LI CHANGJIU, WANG YUYUE, YANG GUANJUN

State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Correspondent: LI Changjiu, professor, Tel: (029)82660970, E-mail: licj@mail.xjtu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.50171052) and Doctoral Foundation of Xi'an Jiaotong University

Manuscript received 2004-04-06, in revised form 2004-08-26

ABSTRACT The impacting behavior of Cu particle upon Cu substrate in cold spraying was studied using the finite element analysis, involving the effects of particle velocity and temperature prior to impact on the deformation behavior, temperature increment and contact area at the particle-substrate interface. It was found that with increasing the particle impact velocity the flattening ratio, temperature increment and contact area at the interface increase. It was confirmed that the critical velocity for the onset of shear instability of particle was consistent with that for particle deposition. As the particle velocity is higher than the critical one, the flattening ratio, temperature increment and contact area at the interface increase more significantly, which will benefit the formation of the bond between particle and substrate. With the increase of particle temperature the temperature at the interface increases significantly. The relatively high temperature achieved the melting point of particle material at the localized contact zone may promote the formation of the metallurgical bonding in the coating.

KEY WORDS cold spraying, numerical simulation, copper particle, high velocity impact, adiabatic shear instability

冷喷涂过程中, 喷涂粒子被超音速气流加速到较高的速度 (300—1000 m/s), 在远低于喷涂材料熔点的温度下撞击基体, 发生剧烈的塑性变形而沉积形成涂层^[1,2]. 因此, 一些发生在热喷涂过程中的不利影响, 如氧化、相变及晶粒长大等, 可在冷喷涂过程中避免.

冷喷涂过程中粒子碰撞基体前的速度是非常重要的参数. 对于一定的喷涂材料, 存在一临界速度^[1-8], 只有超过临界速度的粒子才能沉积形成涂层, 否则将对基体产生冲蚀. 因材料种类不同, 粒子的临界速度通常为 500—700 m/s^[1-4]. 一般认为, 高速金属粒子碰撞基体后, 粒子与基体接触界面局部产生大的塑性变形, 破碎并挤出粒子与基体表面的氧化膜, 使粒子与基体间的新鲜金属达到紧密接触, 从而产生物理结合, 并认为这一结合过程与爆炸焊接的结合过程类似^[5]. 因此, 这种结合力的大小与接触面的面积有较大的关系, 只有粒子与基体间的接触面积

* 国家自然科学基金 50171052 及西安交通大学博士学位论文基金资助项目

收到初稿日期: 2004-04-06, 收到修改稿日期: 2004-08-26

作者简介: 李文亚, 男, 1976 年生, 博士生

足够大时才能提供可靠的结合. 但目前尚无关于碰撞界面接触面积变化的研究报道.

另一方面, 由于高速粒子碰撞变形的瞬时特点, 不能对粒子变形过程进行直接观察, 只能观察到变形后的粒子形貌. 而数值计算方法为研究粒子的变形过程提供了一种可行的方法 [3,5-7]. 对 Cu 粒子碰撞不锈钢基体的研究表明 [5], 粒子扁平率及基体坑深的计算结果与实验结果一致. 另外, 金属粒子高速碰撞时会产生金属射流 [3,5,6]. Assadi 等人 [3] 的研究结果表明, 当粒子速度超过某一值时, 碰撞时的剧烈变形区将产生剪切失稳流动, 并指出这一速度对应于粒子的临界速度. Cu 和 Al 粒子临界速度的计算值与实验值较吻合 [3]. Papyrin 等人 [6] 的研究结果表明, 高速 Al 粒子碰撞时可能发生熔化. 然而, 本文作者最近的研究结果表明, 粒子碰撞沉积时的温度也是影响粒子沉积效率的重要因素. 因此, 粒子沉积时的温度也将对粒子碰撞变形产生较大的影响.

本研究采用数值方法探讨了冷喷涂粒子碰撞基体前的速度对粒子变形以及粒子与基体接触界面面积的影响, 研究了粒子碰撞基体前的温度对碰撞界面温度的影响, 为理解冷喷涂粒子的结合机理提供了依据.

1 计算模型

1.1 数值计算方法

采用显式有限元分析软件 LS-DYNA 进行模拟. 基于质量、动量与能量守恒 3 个基本方程, 采用 Lagrange 法进行离散求解. 高速碰撞过程主要受惯性力的控制, 所以忽略重力等其它体积力. 采用自动二维单面接触求解接触过程. 将热过程作为绝热过程, 根据绝热剪切条件下 90% 的塑性功转化成热的热分配条件 [9], 采用热-结构耦合算法来计及热效应.

粒子以直径 20 μm 的球体为主, 基体则取圆柱体, 为了保证变形区计算精度, 基体半径和高度取值应该足够大, 本研究中两尺寸均为 10 倍粒子直径. 由于正碰撞过程的轴对称特点, 采用图 1a 所示的二维对称几何模型进行计算. 采用单点积分的 4 节点二维四面体单元划分网格, 大部分单元尺寸约为 0.7 μm . 如图 1b 所示, 基体的局部变形区也通过细分网格来保证计算精度. 根据初期的研究, 粒子最大变形主要发生在图 1b 中所标识的用来输出结果的单元与节点.

计算中, 图 1a 中所示的边界 A—B—C 为对称边界, 边界 C—D 为固壁, 而其它的边界则作为自由边界来处理.

1.2 材料模型

Cu 粒子与 Cu 基体材料均作为发生应变强化及应变速率强化的弹塑性材料考虑, 当采用 von Mises 塑性屈服准则, 认为材料的屈服应力与压力无关, 屈服应力 σ_y 可用下式表示 [10]

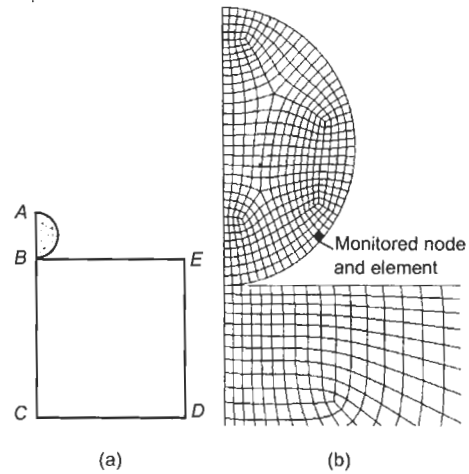


图 1 计算几何模型与网格划分

Fig.1 Model of simulation (a) and meshing of particle and local contact zone in substrate (b) (particle diameter: A—B=20 μm , cylinder diameter: B—E= 200 μm , cylinder height: B—C= 200 μm)

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/P} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_{\text{eff}}^p) \quad (1)$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, C 和 P 为应变速率强化系数, σ_0 为初始屈服应力, β 为应变强化系数, ϵ_{eff}^p 为有效塑性应变, E_p 为塑性强化模量. E_p 可用下式表示

$$E_p = \frac{E E_t}{E - E_t} \quad (2)$$

式中, E 为 Young's 模量, E_t 为切向模量.

本计算中假设材料热物理性能各向同性, Cu 的性能参数如下: 密度为 8900 kg/m^3 , 屈服强度为 100 MPa, Poisson 比为 0.35, Young's 模量 E 为 117 GPa, 切向模量 E_t 为 400 MPa, 应变强化系数 β 为 0.5, 应变速率强化系数 C 和 P 均为 100, 比热容为 386 $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$, 热传导率为 398 $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$.

1.3 冷喷涂工艺

冷喷涂实验装置为西安交通大学开发的 CS-2000 型冷喷涂系统, 详见文献 [8]. 喷涂用球形 Cu 粉的平均粒径约为 24 μm . 基体为表面抛光的 Cu 板. 工作气体为 N_2 , 入口压力与温度分别为 2.0 MPa 与 260 $^\circ\text{C}$. 送粉气也为 N_2 . 喷涂距离为 20 mm.

采用扫描电镜对变形 Cu 粒子的形貌进行观察, 通过粒子的截面形貌估算粒子的扁平率 (扁平后粒子最大直径与粒子原始直径的比值).

2 计算结果与讨论

2.1 粒子碰撞速度对变形的影响

图 2 示出粒子碰撞速度对粒子变形的影响. 可以看出, 随着碰撞速度的增加, 粒子变形程度增加. 扁平粒子的高度减小, 基体中坑深增加. 当粒子碰撞速度超过 600 m/s 时, 在粒子与基体界面形成明显的射流状挤出物.

从图 3 所示的典型粒子塑性应变 ϵ_p (左侧) 与温度 t (右侧) 的分布可以看出, 粒子与基体的变形主要集中在接触界面附近, 而且最大应变值出现在接触区的边缘, 而不在于碰撞中心点附近. 因为温度升高是由于粒子与基体的绝热变形造成的, 所以温度的分布与塑性应变的分布一致, 最大温升也出现在碰撞接触区域的外围. 另一方面, 从图 4 中有效塑性应变随时间的变化可以看出, 当粒子碰撞速度从 600 m/s 增至 610 m/s 及以上时, 有效塑性应变在碰撞后的某一时刻出现陡变, 表明粒子变形中发生了绝热剪切失稳. 同时发现当粒子速度为 580, 590 和 600 m/s 时, 有效塑性应变的变化几乎相同. 这说明碰撞过程中绝热剪切失稳变形是当粒子速度大于某一临界速度时发生的. Gilmore 等人 [4] 的实验估算的临界速度为 640 m/s, 而 Assadi 等人 [3] 根据实验推测的临界速度为 550—570 m/s. 这些结果表明 Cu 粒子的临界速度约为 600 m/s. 比较本计算得到的发生剪切失稳变形的临界速度与文献报道的粒子沉积临界速度, 两者相同. 由于失稳变形的发生, 将使界面处的含有氧化膜等的材料向外挤出, 更有利于粒子与基体材料的直接接触, 以产生有效的结合, 因此认为产生失稳变形的临界速度即对应于粒子沉积所需的临界速度, 这一结果与 Assadi 等人的结果 [3] 一致. 另一方面, 由于粒子温度的升高, 将引起屈服强度、硬化指数等参数的变化, 从而引起临界速度的变化, 因此

可以认为, 粒子温度的变化是引起文献 [3, 4] 中所报道的临界速度变化的主要原因.

图 5 示出粒子碰撞速度对粒子扁平率计算结果的影响. 为了进行比较, 本工作的粒子扁平率的实验结果及 Dykhuizen 等人 [5] 报道的 Cu 粒子在不锈钢基体上的扁平率的实验结果也在图 5 中给出. 可以看出, 粒子的扁平率随着粒子碰撞速度的增加而增加. 当粒子碰撞速度超过 600 m/s (即超过临界速度) 时, 扁平率增加速率变大. 因此当碰撞速度超过临界值时, 由于剪切失稳变形的发生, 扁平率将大幅度增加. 考虑到实验的统计误差以及粒子的速度分布, 认为从粒子截面形貌得到的粒子扁平率在统计意义上与计算结果吻合. 而本文扁平率的实验结果比文献 [5] 中的低, 本文作者认为文献 [5] 中采用强度较高的不锈钢基体, 致使粒子的变形更大. 图 6 示出实验中观察到的一个典型变形粒子的形貌, 与计算结果 (图 3) 类似.

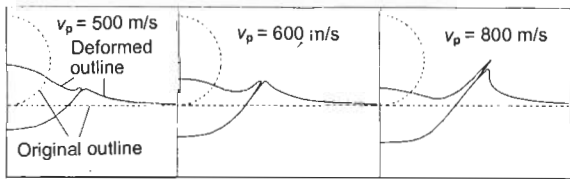


图 2 粒子碰撞速度对粒子变形形貌的影响

Fig.2 Effect of particle impact velocity (v_p) on the deformed shape of particle

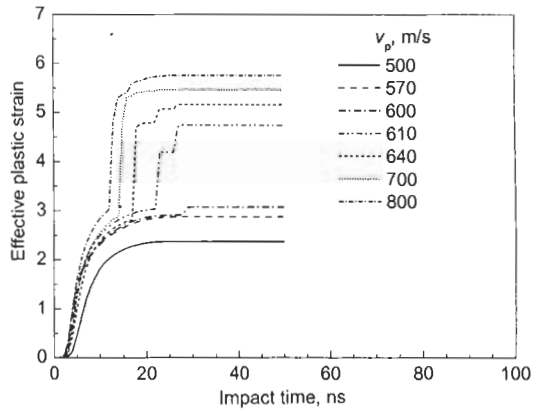


图 4 不同粒子碰撞速度下粒子有效塑性应变随碰撞时间的变化

Fig.4 Simulated temporal development of effective plastic strain of the monitored element under different impact velocities (v_p)

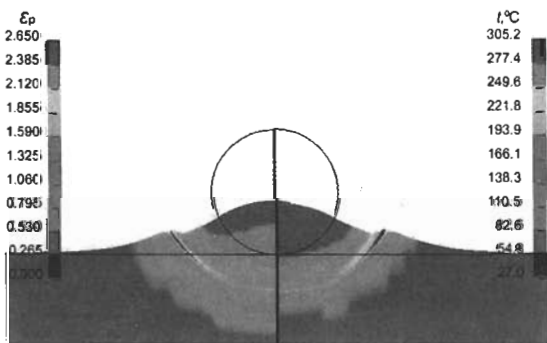


图 3 初始速度与温度分别为 500 m/s 与 27 °C 粒子碰撞 30 ns 时塑性应变及温度分布

Fig.3 Contours of plastic strain (ϵ_p) and temperature (t) of Cu particle at 30 ns after impacting upon Cu substrate with a normal velocity of 500 m/s and temperature of 27 °C

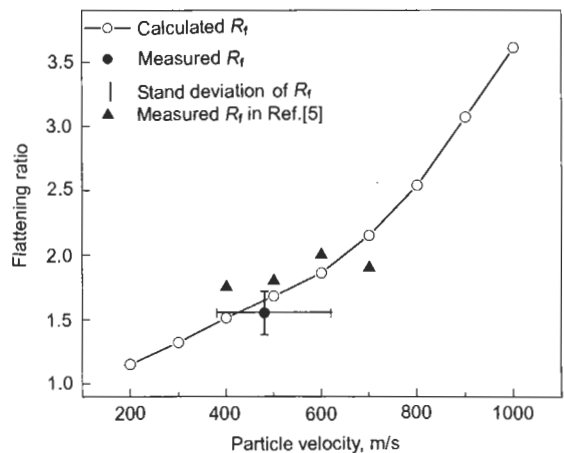


图 5 粒子碰撞速度对粒子扁平率的影响

Fig.5 Effect of particle impact velocity on flattening ratio (R_f) of particle

2.2 粒子初始温度对界面温度的影响

图 7 示出在不同粒子碰撞速度下，粒子初始温度 t_p 对粒子局部最高温度的影响。从图 7 可见，粒子的局部最高温度随粒子碰撞速度的增加而增加，当粒子碰撞速度大于 600 m/s 时，温升更加显著。另一方面，随着粒子初始温度的增加，粒子的局部最高温度也增加。当粒子碰撞速度足够高时，界面局部温度可以超过 Cu 的熔点 t_m 。当粒子初始温度为 27 °C 且粒子碰撞速度高于 900 m/s 时，粒子的局部最高温度可超过 Cu 的熔点 ($t_m=1083$ °C)；而当粒子初始温度为 300 °C 时，局部最高温度达到 Cu 的熔点时的粒子碰撞速度约为 800 m/s。尽管本实验中未观察到 Cu 粒子发生熔化，但对于熔点较低的材料 (如 Zn)，已明显观察到熔化现象 [7]。因此，通过控制粒子参数，可以实现碰撞粒子界面的局部熔化。

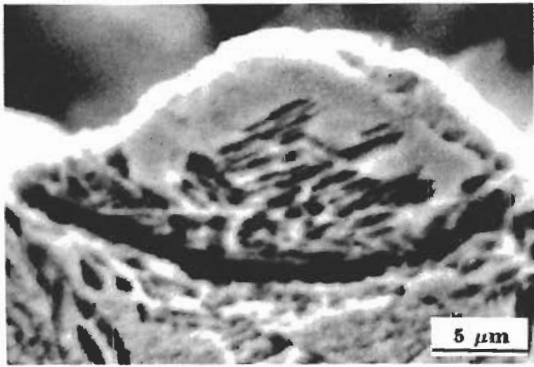


图 6 抛光 Cu 基体上沉积的单个 Cu 粒子断面形貌 (腐蚀)
Fig.6 Typical cross-sectional morphology of a deposited Cu particle (etched)

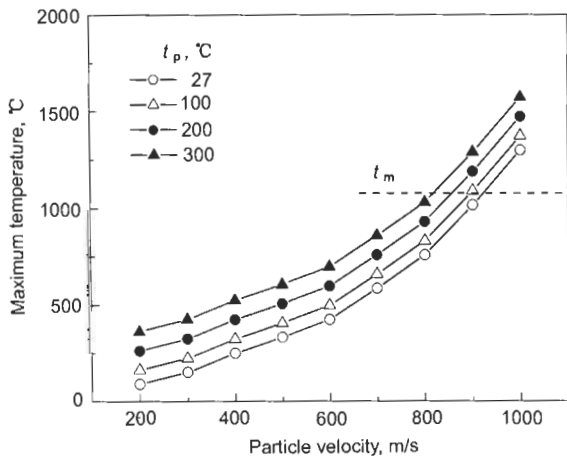


图 7 不同粒子碰撞速度下粒子初始温度对界面温升的影响
Fig.7 Effect of particle initial temperature (t_p) on the maximum temperature of the monitored node with different impact velocities (t_m —melting point)

2.3 粒子速度对界面接触面积的影响

一般认为，粒子的塑性变形可破碎粒子表面的薄膜 (如氧化膜)，使接触界面在高的碰撞压力下紧密接触而产生结合，并认为这一粒子的结合过程与爆炸焊类似 [5]。但是爆炸焊接时，在高能炸药的作用下，被焊工件接触界面一般出现局部熔化与原子扩散，从而形成牢固的结合 [11,12]。如果从氧化膜破碎与挤出的角度看，冷喷涂粒子的结合过程更类似于冷压焊或热压焊。在冷压焊或热压焊过程中，为了形成可靠的结合，存在最小的压缩变形量 [11]。这与冷喷涂时存在临界速度类似。

粒子结合的形成与新鲜金属的接触面积有关。当绝热剪切失稳发生时会产生明显的金属射流，从而使粒子与基体的接触面积迅速增大。图 8 示出碰撞粒子温度为 27 °C 时总接触面积与因失稳造成的接触面积随粒子速度的变化。随着粒子碰撞速度增加，总接触面积线性增加。在临界速度附近，总接触面积增加速率变大。当粒子碰撞速度超过临界速度后，因绝热剪切失稳而造成的接触面积也开始随着粒子碰撞速度增加而增加。这一部分接触面积将有助于结合的形成，此处定义其为有效接触面积。随着有效接触面积的增加，粒子与基体的结合力将会增加。

另一方面，如热压焊过程一样，局部接触界面的高温将有助于增强原子扩散，从而增加粒子与基体的结合力。图 9 示出不同粒子碰撞速度下粒子与基体接触面积与温度的关系。图中曲线在高温端的终点对应于界面达到的最高温度，而曲线上某一点代表高于这一温度的界面面积。从图 9 可见，不仅接触面积随粒子速度增加而增加，处在高温区的面积也随粒子速度增加而增加，从而更有利于冶金结合的产生。

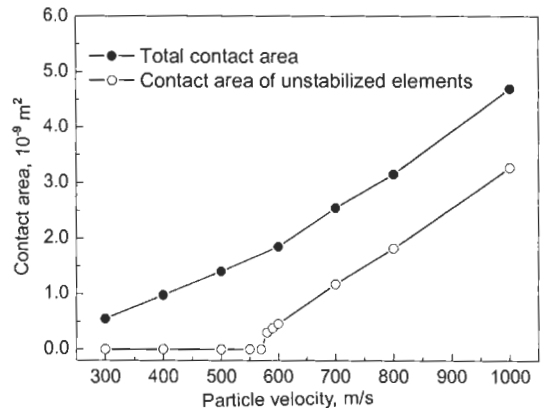


图 8 粒子碰撞速度对粒子与基体接触面积以及有效接触面积的影响
Fig.8 Changes of total contact areas and the area where the shear instability occurs with particle impact velocity ($t_p=27$ °C)

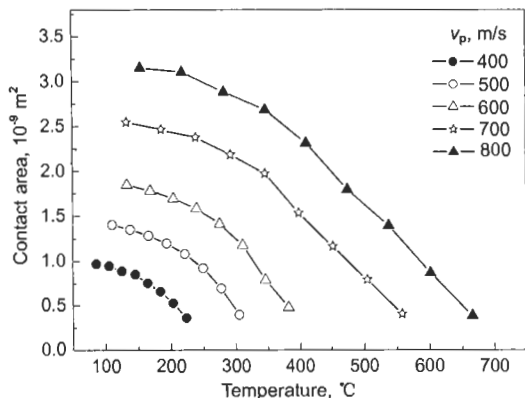


图9 不同粒子碰撞速度下粒子与基体接触面积与温度的关系

Fig.9 Changes of the contact areas between the particle and the substrate with temperature under different particle impact velocities. The contact area at a given temperature stands for the total contact area where the temperature is higher than the given temperature

3 结论

(1) 在冷喷涂过程中, 随着粒子碰撞速度的增加, 粒子扁平率、碰撞界面温升及接触面积增大。计算结果进一步确认, 当粒子碰撞速度大于某一临界值(如 Cu 粒子的碰撞速度大于 600 m/s) 时, 碰撞界面将发生绝热剪切失稳变形。

(2) 当粒子碰撞速度大于临界值时, 粒子的扁平率显著增加, 且界面温度与有效接触界面面积也显著增加, 这有助于粒子与基体牢固结合的形成。

(3) 随碰撞前粒子温度的增加, 碰撞界面的温度也显

著增加。控制粒子碰撞条件, 界面局部最高温度有可能超过其熔点, 这表明在局部可能产生冶金结合。

参考文献

- [1] Alkimov A P, Kosarev V F. *Dokl Akad Nauk SSSR*, 1990; 315: 1062
- [2] Papyrin A. *Adv Mater Process*, 2001; 159: 49
- [3] Assadi H, Gärtner F, Stoltenhoff T, Kreye H. *Acta Mater*, 2003; 51: 4379
- [4] Gilmore D L, Dykhuizen R C, Neiser R A, Roemer T J, Smith M F. *J Therm Spray Technol*, 1999; 8: 576
- [5] Dykhuizen R C, Smith M F, Gilmore D L, Neiser R A, Jiang X, Sampath S. *J Therm Spray Technol*, 1999; 8: 559
- [6] Papyrin A N, Kosarev V F, Klinkov S V, Alkimov A P. In: Lugscheider E, ed., *Tagungsband Conference Proceedings*, Essen: German Welding Society, 2002: 419
- [7] Li C J, Li W Y, Fukunuma H. In: von Hofe D, ed., *Thermal Spray Solutions Advances in Technology and Applications*, Düsseldorf: German Welding Society, 2004: 335
- [8] Li C J, Li W Y. *Surf Coat Technol*, 2003; 167: 278
- [9] Borvik T, Hopperstad O S, Berstad T, Langseth M. *Int J Impact Eng*, 2002; 27: 37
- [10] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore, Calif, USA, 1998
- [11] Wu L. *Welding Handbook (Vol.1: Welding Processes and Equipment)*. Beijing: China Machine Press, 2001: 723
吴林. 焊接手册(第1卷: 焊接方法及设备). 北京: 机械工业出版社, 2001: 723)
- [12] Zheng Y M. *Explosive Welding and Metallic Composite and Their Engineering Application*. Changsha: Central South University Press, 2002: 14
(郑远谋. 爆炸焊接和金属复合材料及其工程应用. 长沙: 中南大学出版社, 2002: 14)