

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Rice, M. H., McQueen, R. G. et al, *Solid State Physics*, Vol. 6, (1958), 1—63.  
 [ 2 ] Murri, W. J., Curran, D. R. et al, *Advances in High Pressure Research*, Vol. 4, Academic Press, London and New York, (1974).  
 [ 3 ] Petersen, C. F., Rosenberg, J. T., *J. Geophys. Res.*, 74 (10) (1969), 2727.  
 [ 4 ] Asay, J. R., *J. Appl. Phys.*, 48 (1) (1975), 197.

## EXPERIMENTAL MEASUREMENTS OF RELEASE ADIABATS OF SANDSTONE

Yan Chaoxing Xin Litian

### Abstract

With the help of low-impedance solid materials as buffers, the release adiabats of sandstone were measured by the impedance-mismatch method, in which the specimen was shocked to four pressure points, 220, 200, 130 and 100 kbar, respectively. The experimental results and a brief discussion are given.

# 韧性金属受高速粒子碰撞的侵蚀破坏

史可顺 叶 玲 姜东华

(1983年11月21日收到)

铝和铜受单粒子高速 (5 公里/秒) 碰撞后的侵蚀破坏, 由光学和扫描电子显微镜进行了表征。并且, 初步探讨了材料性质对高速侵蚀破坏的影响。

韧性金属受粒子碰撞的侵蚀特性已由许多研究者作过研究。

Finnie<sup>[1]</sup> 及 Ruff<sup>[2]</sup> 的研究是很有意义的, 他们指出韧性和脆性材料的侵蚀特征是有明显差别的。对于韧性材料, 例如退火铝, 在碰撞角为20到30度时侵蚀最严重, 在这种情况下, 粒子对材料的切削作用是引起材料侵蚀损失的主要原因; 而对于脆性材料, 例如玻璃, 侵蚀最严重的情况则出现在90度碰撞角。

Bitter 基于 Finnie 提出的动能概念进一步分析了两种侵蚀行为, 并认为变形特征是必需考虑的, 在垂直碰撞情况下尤为重要<sup>[3]</sup>。

Paolo 提出侵蚀体积损失率 ( $V_r$ , 即单位质量的粒子所引起的侵蚀体积损失) 的近似表

达式<sup>1)</sup>

$$V_r \sim C \frac{1}{2} m v^2 f(\alpha) \quad (1)$$

式中C是常数,取决于材料性质; $m$ 和 $v$ 是碰撞粒子的质量和速度; $f(\alpha)$ 是碰撞角的函数。

他还指出,碰撞压力达到一定程度时,金属材料将因动能部分地转化为热能而熔化,这个压力称为热压力,以 $P_{T.M}$ 表示。

$$P_{T.M} = \frac{\alpha_t}{x} (T_m - T_s) \quad (2)$$

式中 $T_s$ 为初始温度, $T_m$ 为材料的熔化温度, $\alpha_t$ 为材料的热膨胀系数, $x$ 为热压缩当量。依据Finnie等的低速(140米/秒)20度碰撞数据,他指出材料侵蚀体积损失比与热压力成反比

$$V_r \propto \frac{1}{2} m v^2 / \frac{\alpha_t (T_m - T_s)}{x} \quad (3)$$

Goodwin和Tilly等研究了几种材料受125~150微米的石英粒子垂直碰撞所获得的质量损失比 $G$ (靶材质量损失与碰撞粒子质量的比)、在速度低于2公里/秒的情况下,速度对 $G$ 值影响的经验式为

$$G = A v^{2.3} \quad (4)$$

式中 $A$ 为常数, $v$ 为碰撞速度。并且指出经验式中速度的指数不受材料类型的影响<sup>(2)</sup>。

William等对140米/秒碰撞侵蚀后铜和铝样品进行了扫描电镜观察,指出侵蚀后的样品存在严重的压缩变形,受压缩的材料被挤出侵蚀坑。对于铜来说,因其可塑性较差而产生环向拉伸破坏,挤出的材料因切削作用而成碎片飞出<sup>(4)</sup>。

最近,倪建一和许晓林得出了铝和铜样品受高速单粒子碰撞侵蚀的试验结果<sup>(5)</sup>。

本文介绍高速碰撞后样品的光学和扫描电子显微镜的观察结果,分析讨论韧性金属受高速碰撞的损失原因,并依据Paolo的观点初步探讨高速碰撞时,韧性金属材料性质对其侵蚀破坏的影响。

## 一、侵蚀破坏特征

纯铜和铝合金样品受到直径1毫米、长1毫米的聚碳酸酯粒子的垂直碰撞,碰撞速度为5公里/秒。高速粒子由二级轻气炮发射。进入试验段之前粒子和弹托分开,分离后的粒子以高速撞击靶材。

首先对侵蚀后的样品外观进行了光学和扫描电镜观察,随后制备金相试样,观察侵蚀坑的剖面。图1示出了碰撞侵蚀坑的顶视形态和纵剖面。图2示出了坑突缘和坑底部形态的较高倍照片。

铝和铜样品典型的侵蚀坑形态由一个近似半圆形坑和一个薄的层状突缘组成。

薄的层状突缘的根部和靶材成一体,呈现因挤压而从坑中向外缘延伸的形态。从坑中向外挤出的材料,在超过自由表面后失去约束力,便以大约45度角方向扩张。因材料的粘性和向外扩张所造成的张力不同,或引起拉伸破坏,形成裂纹,最后完全裂开而引起质量损失(如铜);或者向外挤时,以一定角度沿切向喷出飞边(如铝),引起质量损失。

铝样品侵蚀坑的高倍照片表明,坑底部有小而薄的起层和微裂纹,并存在软化或熔化的

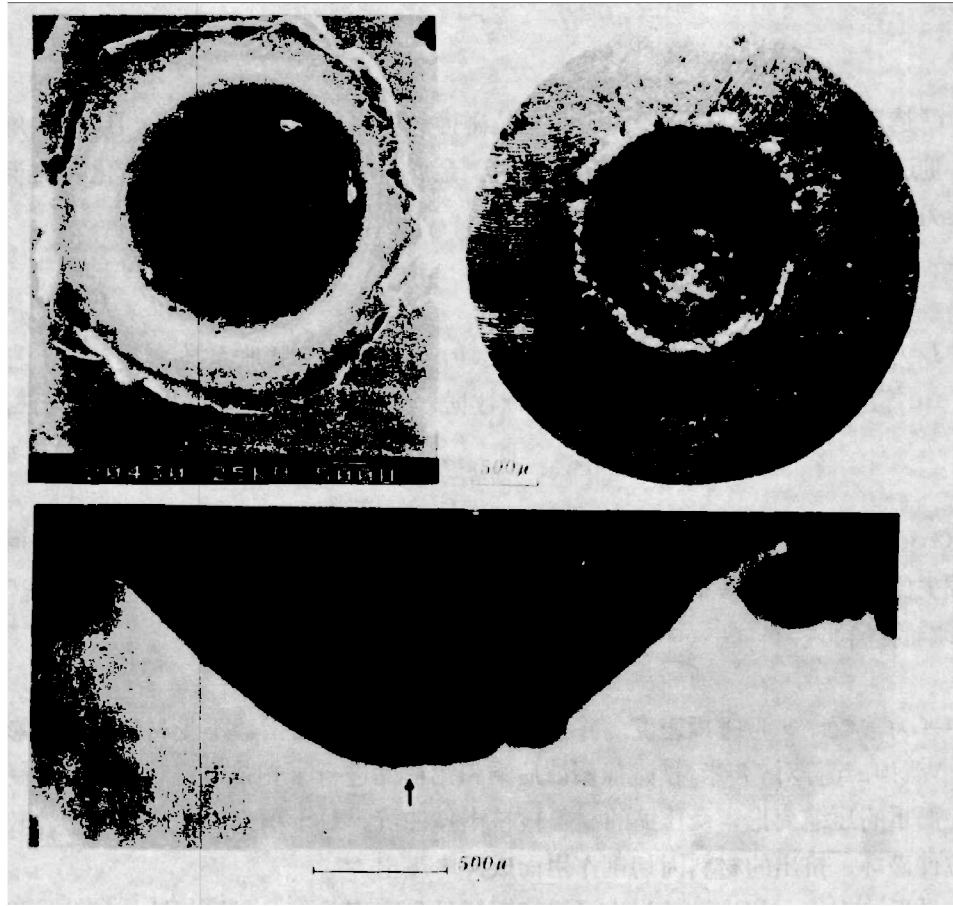


图1 金属样品侵蚀坑形貌

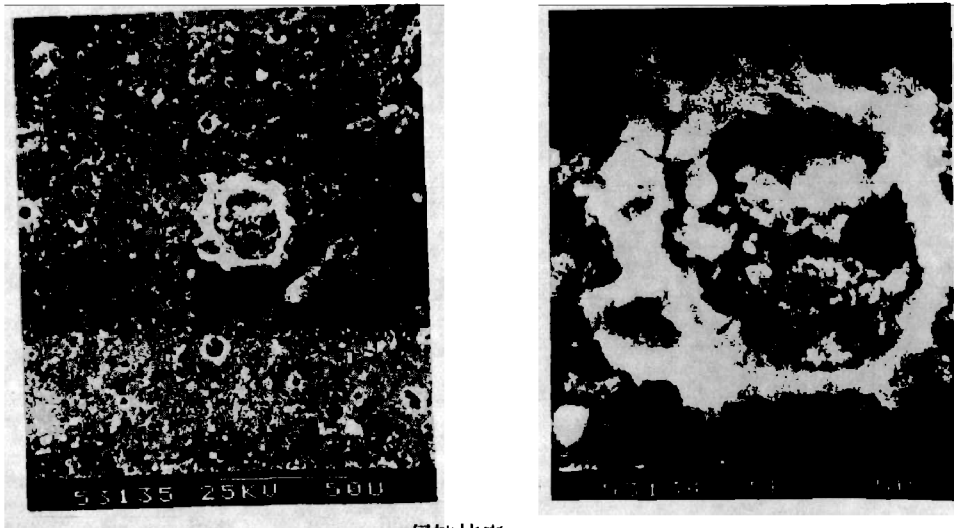
左上图为铝的扫描电镜照片；右上图为铜的立体显微照片；下图为铜侵蚀坑截面的金相照片，箭头指处为坑底。



侵蚀坑边缘（铝）



侵蚀坑底（铝）



侵蚀坑底

图2 铝侵蚀后的形貌 (扫描电镜照片)

迹象。坑的中心部位受到的压力最大，因而加热所造成的现象最明显。

由于金属样品能经受很大的变形，受小粒子碰撞后，截面照片表明：材料内部没有明显的损伤，坑底下面材料中没有发现明显的裂纹。这表明，韧性金属材料受高速粒子垂直碰撞时，其破坏过程大致为：粒子的动能被材料的严重变形所吸收，受碰撞的材料沿粒子和靶材的界面向外挤压，挤压出的材料呈薄层状，并因向外扩张而产生拉伸裂纹或飞边，造成材料损失。这是垂直碰撞时，韧性金属材料损失的主要原因。

材料的变形速度，向外挤出的速度以及质量损失的形态与材料动能转化为热能的温升密切相关。因此，随着粒子-靶材界面的温度上升，单位体积材料变形及损失所需的能量将降低。如果界面温度上升到材料的熔化温度，靶材将以液态向外喷射，造成质量损失。

在多粒子碰撞时，坑的突缘和坑底的小裂纹也会引起附加的质量损失。

### 二、侵蚀破坏和材料性质的关系

聚碳酸酯粒子以速度5公里/秒碰撞铝和铜时，质量损失比分别为3.13和1.4<sup>(5)</sup>，依据表1所列的热压力( $P_r$ )数据<sup>(3)</sup>，其关系为-1.03次方。据此拟合合成下列近似式

$$G = 33.42P_r^{-1}$$

(碰撞速度为5公里/秒) (5)

由(5)式计算的G值列于表1，示于图3中，其符号为实心三角形，铝和

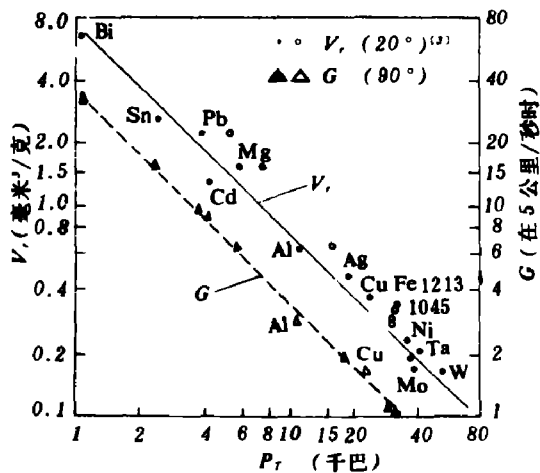


图3 金属材料的侵蚀

表1 金属材料的热压力<sup>(3)</sup>和质量损失比(计算值)

金属材料	$a, \times 10^6$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$x \times 10^7$ (厘米 <sup>2</sup> /公斤)	$\Delta T$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) = $T_s - T_a$ <sup>1</sup>	$a, \Delta T / x =$ $P_r$ (千巴)	计算G值 (5公里/秒时)
Bi	13.41	31.16	244	1.05	31.8
Sn	21.2	18.10	205	2.4	13.9
Pb	29	22.82	300	3.8	8.79
Cd	30.6	20.98	294	4.27	7.82
Mg	25.7	27.68	623	5.78	5.78
Al	23.1	13.59	633	10.8	3.09
Ag	79.2	9.74	936	18.4	1.82
Cu	16.7	7.49	1056	23.6	1.41
Fe	11.7	5.826	1508	30.7	1.09
Mo	4.98	3.598	2588	36	0.93
Ta	6.55	4.89	2971	39.8	0.84
W	4.59	3.034	3353	45.07	0.74
Ni	12.7	5.26	1426	34.4	0.97
1045钢	11.2	~5.826	~1508	29.6	1.13
1213钢	11.7	~5.826	~1508	30.7	1.09
01钢	11.0	5.826	1508	28.9	1.16

铜试样的实验值以空心三角形表示,也示于图3中。由此可见:在高速垂直碰撞情况下,金属材料的质量损失比 $G$ 与热压力 $P_r$ 成反比;这一点有待于更多的实验结果证实。尽管如此,这一初步结论对研究金属材料受高速粒子碰撞的质量损失特性是很有意义的。

为了比较,图3中同时列出Finnie的20度低速碰撞的体积损失率 $V_r$ 数据<sup>(3)</sup>,用园形符号表示。 $V_r$ 与 $P_r$ 存在反比关系,高速碰撞实验结果与该结果是一致的。

如果在式(5)中引入速度变量,取式(4)的关系指数2.3,那么,可得到下列经验式

$$G = 0.825 v^{2.3} P_r^{-1} \quad (6)$$

式(6)可用于研究和初步预示金属材料在室温条件下以各种速度垂直碰撞时的质量损失比。根据式(6)计算的钢和铝在室温低速碰撞时的质量损失比见表2,表中同时列出Goodwin和Tilly的实验数据<sup>(2)</sup>。计算时,钢的 $P_r$ 值采用1213号钢的室温值。计算值和实验数值量级相当接近,这对式(6)起到了一定的验证作用。同样,式(6)对高温下金属材料受粒子碰撞侵蚀的分析也是有一定意义的。

①  $T_a$ 是室温,  $P_r$ 是实验温度  $T_s$ 为室温时的热压力。

表2 垂直碰撞质量损失比(G)

粒子速度(公里/秒)	0.47		0.1		5	
	计算值	实验值	计算值	实验值	计算值	实验值
铝	0.0134	0.010	0.00038	0.0003	3.09	3.13
钢	0.0047	0.0027	0.00013	0.00008	/	/

### 三、结 论

对铝和铜样品受高速粒子碰撞侵蚀破坏的观察和分析表明:碰撞期间,样品不仅经受了严重变形、冲击挤压作用,而且界面加热会产生软化甚至熔化;加热温升的状况会影响到质量损失的过程和形态。实验观察结果对Paolo提出的热压力概念是一个佐证。依据有限的实验数据拟合了相关式,相关式与文献上一些实验值的量级基本一致。这表明相关式对初步预示金属材料的侵蚀性能有一定的实用价值。

本检验所用样品和有关数据是由倪建一同志提供的。在成文过程中得到李清源同志的帮助和指教,在此一并表示谢意!

### 参 考 文 献

- [1] Finnie, I., *Wear*, 8 (1) (1966), 87.
- [2] Ruff, A. W., Wiederhorn, S. M., *AD-1086525* (1979).
- [3] Ascarelli, P., Relation between the Erosion by Solid Particles and the Physical properties of Metals, *AMMRC TR 71-47*, (1971).
- [4] Brainard, W. A., Salik, J., *NASA TP 1609*, (1980)
- [5] 倪建一、许晓林、私人通信, (1982年6月)。

## EROSION DAMAGE IN DUCTILE METALS UNDER HIGH VELOCITY PARTICLE IMPACT

Shi Keshun Ye Ling Jiang Donghua

### Abstract

Optical and scanning electron microscopes were used to characterize the erosion damage of aluminum and copper produced by a single particle high velocity (5km/sec) impact. The effects of material properties on the erosion damage are preliminary discussed in this paper.