第3卷 第4期
1983年10月

爆 炸 与 冲 击
EXPLOSION AND SHOCK WAVES

Vol. 3, No. 4
Oct., 1983

讲 座

爆 炸 加 工 基 本 知 识

杨振声

（1983年5月17日收到）

爆炸加工通常是以炸药为能源，有时也用火药，可燃气体等，加工可塑性金属使之成形为人们所需要的零件，或者将两种以上的不同金属毛料使之焊接（或称复合）在一起[1]。爆炸加工常用的炸药为梯恩梯，硝铵炸药，导爆索和塑料（或橡胶）炸药。由于炸药爆炸是瞬态高速的过程，所以爆炸加工与常规加工的方法（例如液压、冲压等）相比，有着显著不同的特点，其最根本的特点是压力大，变形速度大，加工时间短，因而功率亦大，所以说爆炸加工是一种高能率加工的方法。以毛料直径一米、厚度约为$10\sim15mm$的封头为例，用水压机生产时，作用于毛料的平均压力为几十个大气压，成形时间为十几秒，而采用爆炸成形时，作用于毛料的平均压力为数千个大气压，成形时间约为$1/100$秒。由于毛料变形所需能量基本相等，那么爆炸成形的平均有效功率就比常规方法大10^3倍。

爆炸加工应用范围较广，而且不断出现了一些新的应用，现在主要应用有以下几个方面。

一、板金零件的爆炸成形

常规工艺中的拉深、胀形、卷边、翻口、冲孔、压梗和校形等，都可以用爆炸成形来完成。爆炸成形是爆炸加工中当前应用较成熟的一个方面。图1～图3所示是用爆炸成形方法制造的拉深件（例如封头）、胀形件（例如喷气发动机的喷管）和平板件（例如波纹板）的示意图。

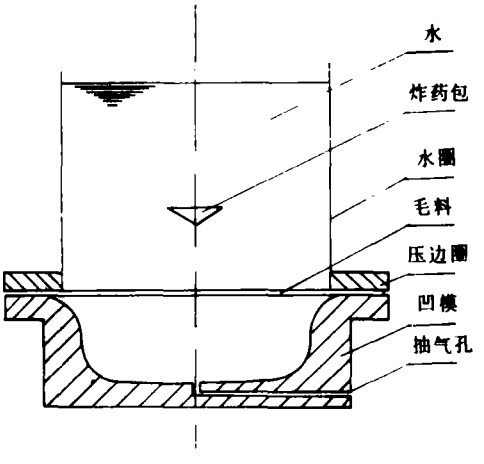

图1 爆炸拉深

结合图1说明爆炸成形的装置，其它的情况都是类似的。毛料A放在凹模B上，然后用压边圈C压紧。D是装水的水圈，在水圈中注水至一定高度，然后将炸药E放在距毛料适当距离的位置上。在多数情况下，应当将凹模里的空气通过抽气孔F抽走，以避免在毛料向凹模高速运动时，模腔里的空气迅速升压，使毛料不能满意地贴模，甚至引起破损。

在板金零件的爆炸成形里，通常不使炸药和毛料直接接触，因为炸药爆炸压力过大，容易损坏零件和模具。为了将炸药爆炸压力传送到毛料上去，必需在两者之间有一个传送压力的介质。最常用的介质是水，因为水的可压缩性较小，传送压力的效率较高。一般不用空气作传压介质，它传压效率低以球形黄色炸药（TNT）为例，如果在水中爆炸，紧邻药包的水里，压力可达十万大气压，在距离药

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

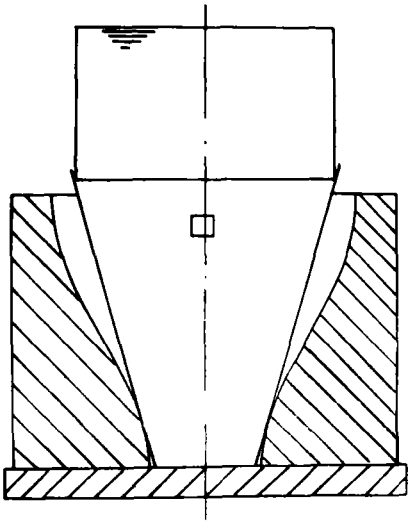

图2 爆炸胀形

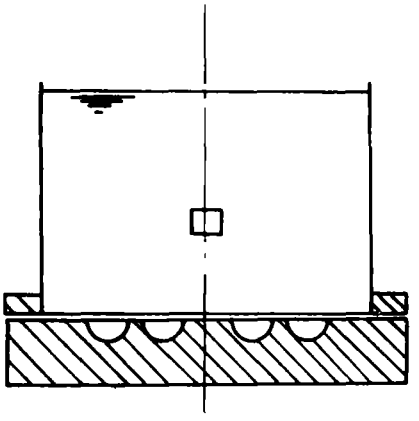

图3 平板件爆炸成形

包中心十倍药包半径的地方，压力约为一千个大气压。在空气中爆炸时，在相应的位置上压力分别只有几百和几十个大气压。这样如果模具设计合理，工艺参数(包括药形、药量、药位、水深、压边力等）选择恰当，只要引爆炸药，就能在很短时间(直径一米封头约一毫秒)内成形一个与模壁贴合得很好的零件。

1.1. **爆炸成形的原理**

首先介绍一个ϕ 100 LY—12材料的园板在爆炸拉深条件下，园板中心点位移与时间的关系试验结果[2,3]，见图4。

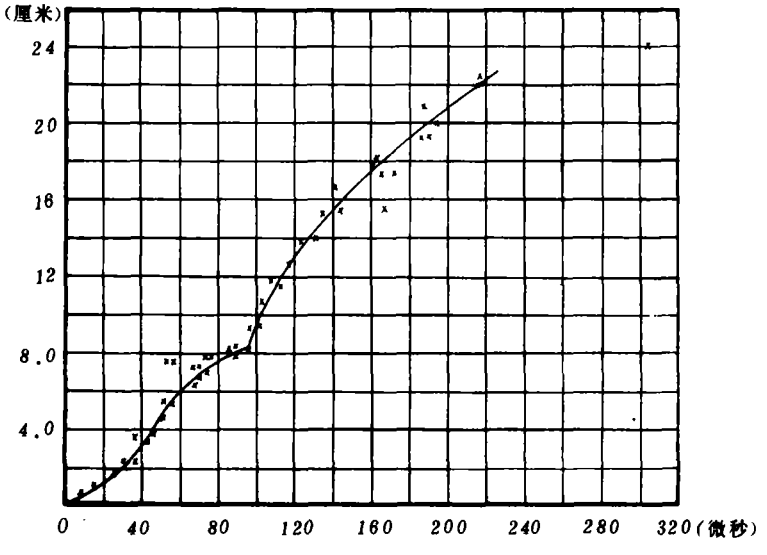

图4 园板中心点位移与时间的曲线

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

从图 4 可以分析爆炸成形的一些特点。首先，总的变形过程很短，只历时了308微秒。其次变形可分两个加速减速阶段。先开始加速，然后减速，当达98微秒时，又突然加速再缓慢减速直至变形终止。这就是爆炸成形的典型二次加速现象，我们通常称之为"二次加载"。还从实验中可以看到，成形历时虽然只有308微秒，但中心挠度却达24毫米，这就是高能成形和高速成形的含义。

〔4〕、〔5〕的工作解释了"二次加载"的现象，从而说明了爆炸成形的原理。当炸药引爆以后，在药包中心迅速形成稳定的爆震波，它以一定的爆速向外传播，同时引爆它扫过的炸药。当爆震波到达药包表面时，炸药的爆震过程就基本结束。这时原来由炸药所占据的空间都充满了高压、高温气团。爆震波传到药、水界面时，就在水中形成一强烈的冲击波，同时往高压气团传播一稀疏波。气团不断膨胀对水作功，水因此而获得了动能。从实验来看，炸药用于形成冲击波的能量约占全部炸药能量的50%，保留在爆炸气团内的能量也约占炸药能量的50%。

在水中传播的冲击波，当达到板壳内壁时进行反射，板壳在冲击波作用下迅速向外膨胀变形，同时入射冲击波又按$P=P_m e^{-t/\theta_m}$剧烈地衰减，其中P_m为离药包中心为R处的冲击波压力峰值，t是从冲击波到达该点算起的时间，θ_m是特征时间常数，e是自然对数的底，P为时间t的压力。对毛料而言，当入射冲击波到达毛料背面，将反射拉伸波，与入射冲击波叠加，使毛料运动速度高于水的质点速度，这时由于水不能承受拉力，将出现空泡，称之为空化现象。由于反射波继续向里传播，则空化区也就不断向里扩张。而被拉断的水利用自己获得的动能继续向外飞行，赶上前方由于受变形阻力影响而减速的板壳，并不断给板壳补充动量使其继续运动。在某一时刻，空化区由于受爆炸气团的高压作用，将终止发展。与此同时，由爆炸气体所形成的高压气团则带动未空化的水向外作加速膨胀运动，追上一部份正在飞行的空化水。终于在某时刻，形成了两个速度不同的内外水体进行碰撞。通过碰撞，外水体和板壳获得了动量，速度发生了跳跃，这就是"二次加载"产生的原因。至此以后，板壳在变形阻力的影响下，速度逐渐至为零，运动从而结束。从整个变形运动过程而言，碰撞以后的成形量和成形时间都比碰撞前的大。

1.2. 爆炸成形模型律

爆炸成形的工艺参数，常常采用模型试验来确定。理论和实验证明，爆炸成形是满足几何相似律[6]。经过分析，归纳炸药、传压介质、毛料在有关模型律的独立物理量见表 1。

表1　爆炸成形独立物理量

炸　药	密度ρ_B	爆速D	药量$(W/\rho_B)^{1/3}$	状态方程参数γ
传压介质	密度ρ_0	声速a	空化水压力P_c	状态方程参数n
毛　料	密度$\rho_s\delta$	强度$\sigma\delta$	尺寸L	

注意到表 1 中，我们在爆炸成形中所采用的毛料，通常是薄板薄壳。如果其中毛料厚度为δ，此时可采用平均密度为$\rho_s\delta$，强度为$\sigma\delta$。

应用π定理，通过分析，爆炸成形相似参数应为

$$\frac{1}{L}\left(\frac{W}{\rho_B}\right)^{1/3},\ \frac{\rho_s\delta}{\rho_0 L},\ \frac{\sigma\delta}{\rho_B D^2 L},\ \frac{\sigma\delta}{P_c L},\ \frac{a}{D},\ \frac{\rho_0}{\rho_B},\ \gamma,\ n$$

以上的相似参数都具有一定的物理意义：$(1/L)(W/\rho_B)^{1/3}$代表药包尺寸与毛料尺寸之比，也就是药包的相对尺寸；$\rho_s\delta/\rho_0 L$代表毛料质量与传压介质质量之比；$\sigma\delta/P_c L$代表毛料变形阻力与空化压力之比；$\sigma\delta/\rho_B D^2 L$与其它参数组合后，代表毛料变形阻力与冲击波压力之比；a/D，ρ_0/ρ_B，γ，n反映爆炸产物与传压介质间的相互作用。

这样经过上述的分析，标志爆炸成形效果的物理量，例如成形量y，贴模速度v，药量W，成形时

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

间τ等都可表示成为上述相似参数的函数，例如

$$\frac{y}{L}=f_1\left[\frac{1}{L}\left(\frac{W}{\rho_B}\right)^{1/3},\ \frac{\rho_s\delta}{\rho_o L},\ \frac{\sigma\delta}{\rho_B D^2 L},\ \frac{\sigma\delta}{P_r L},\ \frac{a}{D},\ \frac{\rho_o}{\rho_B},\ \gamma,\ n\right]$$

$$\frac{v}{a}=f_2\left[\frac{1}{L}\left(\frac{W}{\rho_B}\right)^{1/3},\ \frac{\rho_s\delta}{\rho_o L},\ \frac{\sigma\delta}{\rho_B D^2 L},\ \frac{\sigma\delta}{P_r L},\ \frac{a}{D},\ \frac{\rho_o}{\rho_B},\ \gamma,\ n\right]$$

$$W=\rho_B L^3 f_3\left[\frac{y}{L},\ \frac{\rho_s\delta}{\rho_o L},\ \frac{\sigma\delta}{\rho_B D^2 L},\ \frac{\sigma\delta}{P_r L},\ \frac{a}{D},\ \frac{\rho_o}{\rho_B},\ \gamma,\ n\right]$$

$$\frac{\tau a}{L}=f_4\left[\frac{1}{L}\left(\frac{W}{\rho_B}\right)^{1/3},\ \frac{\rho_s\delta}{\rho_o L},\ \frac{\sigma\delta}{\rho_B D^2 L},\ \frac{\sigma\delta}{P_r L},\ \frac{a}{D},\ \frac{\rho_o}{\rho_B},\ \gamma,\ n\right]$$

一般情况下，若不改变炸药品种和毛料，那么只有两个可变的相似参数$(1/L)(W/\rho_B)^{1/3}$和δ/L)。

爆炸成形满足几何相似律说明，成形量、变薄量等几何量是和毛料的几何尺寸成正比。大小零件上的应变和应力相同。大小零件贴模速度与零件尺寸无关。毛料的应变率和成形所需的时间与零件成反比。大小零件的缺陷如起皱也是模似的。

在薄板、薄壳情况下，可以满足能量准则，其关系 式更为简单：

$$\frac{y}{L}=f\left(\frac{W}{\sigma\delta L^2}\right)$$

而在有模成形情况下，y/L = 常数，那么上述关系式变为

$$W/\sigma\delta L^2 = 常数$$

通过几何相似律的分析，若事先知道了各种材料的屈服强度σ，则只要对一种材料，一种模具尺寸，一种毛料厚度作了工艺性试验，就可以对其它材料，其它尺寸，其它厚度定出工艺参数。在同种材料的情况下，爆炸成形界将能量准 则简称为二、四、八准则。即如果零件尺寸不变，厚度需要放大一倍的话，就需要二倍的药量；如果零件厚度不变，尺寸需要放大一倍的话，则需要放大四倍的药量；如果零件尺寸和厚度都需要放大一倍，那么此时则需八倍的药量。

1.3. 爆炸成形的光洁度、精度与模具强度

在爆炸成形时，零件以很高的速度贴模，在零件和模具之间产生较大的碰撞压力，因此只要模具内表面光洁度高，零件贴模面光洁度亦较高。同时大的碰撞力还会使模具变形增大，另外像辗压一下，经过碰撞，惯性力使毛料展开面积有所增加，这样就减少了回弹，增大了精度。

爆炸成形贴模是一个多次撞击的过程[7]，由于撞击，模具较易损坏。经过分析，其屈服强度一般取动载系数为3[8]。这样爆炸成形模具的强度要求，要比常规模具（例如冲击、液压）要大得很多。一般的设计人员只好加大模具的厚度来满足强度的要求。但是，这样爆炸成形模具就比常规模具重得很多。对于小零件而言，尚不成问题，但对于大型零件(例如ϕ2500以上)，无论在铸造加工，运输都带来很大的不便，甚至于有时不可行。〔9〕注意到爆炸成形是一个瞬态碰撞的过程，利用碰撞的力学原理，将爆炸成形模具采用分块的惯性模，只要每块模具有足够的重量，并尽量减小贴模速度，使碰撞压力不致太高，就可以满足工艺的要求，从而解决了爆炸成形模具强度的问题。

二、爆炸焊接(爆炸复合)

随着工业的发展，许多工业部门需要使用优质的不锈钢或各种稀有金属加工成各种耐腐蚀，耐高温，耐磨的板材、棒材或管材。但是在产品中往往只有与腐蚀接触面上需用一些耐腐蚀的材料外，其它部份则无需这样的要求。因此，如果能用普通钢为基础，在其上覆盖一层较薄的特殊材料，制成粘结质量高的双金属材料，那将是最为理想的材料。这是因为一方面节约了大量昂贵稀有的材料，

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

降低了产品的成本，另一方面在一些高压容器中，如果使用高强度钢为基础材料，在其上复合一层耐腐蚀、而强度又较低的材料，这样既满足了耐腐蚀的需要，又满足了强度的要求。

常规加工双金属的材料，通常来用热轧法。但是，对于熔点相差悬殊，或热膨胀系数以及硬度相差很大的金属之间的焊接，常规加工是很难实现的。对于爆炸焊接则可得较好质量的产品。

从最近国内外发展来看，爆炸复合已经成为当前爆炸加工领域内，最有前途的一种工艺方法。

2.1. **爆炸焊接装置**

爆炸焊接装置示意图见图5和图6。

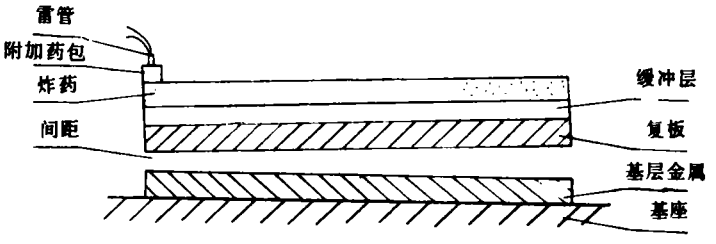

图5　爆炸板焊示意图

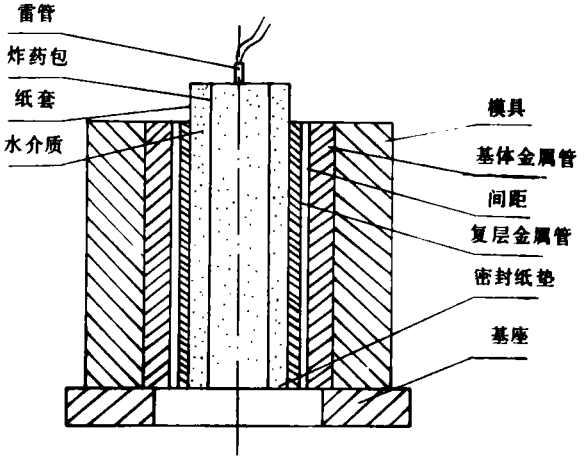

图6　爆炸管焊示意图

现就图5来说明爆炸焊接的装置。其装置是由基板，复板，起爆装置，主炸药，缓冲层，以及基础几部份组成。起爆装置一般有中心点起爆、桃形复板边缘点起爆、"T"型起爆和线状波起爆四种装置。线状起爆适用于板面宽矩形板的爆炸焊接，其它起爆装置都用于其它一些特殊形状板材的爆炸焊接。

爆炸焊接是将炸药直接敷在复板金属表面进行爆炸，一般为了避免由于爆炸而引起的烧伤或细裂纹的出现，在炸药与金属间置以软橡皮、硬纸板、油毡等缓冲层。

爆炸焊接所用的基础，一般避免用刚性基础。这是因为在刚性基础上进行爆炸焊接，常常会出现弹跳的现象，致使爆炸后零件损伤。因此通常采用砂或软泥作基础。

爆炸焊接的基板和复板之间必需保留有一定的间隙。其间隙的主要作用是保证在复合过程中，

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

复板经过加速而获得足够大的飞行速度，以及在基复板之间能够产生金属的喷射流。

2.2. 爆炸焊接过程与机理

当敷在复板上的炸药爆轰后，对复板作用一高压脉冲载荷，复板开始加速运动，在几个微秒时间内复板就可达到几百米/秒以上的速度，它从起始端开始，依次与基板碰撞，其焊接过程见图7。

当两金属板以一定的角度相撞时产生很大的应力，驻点压力约有几十万大气压。这样大的压力将大大超过金属的动态屈服极限，产生强烈的塑性变形，同时伴随着剧烈的热效应。由于碰撞面附近的金属受很大的压力，金属板的物理状态似流体，这样在金属板（包括复板和基板）内表面将形成两股运动方向相反的金属喷射流。一股是在碰撞点前的自由射流或称再入射流，它向未结合的空间高速喷出，剥离金属内表面的表面膜，使金属露出了有活性的清洁表面，为两块金属板的复合提供了条件。另一股是在碰撞点之后的凸角射流，也称凝固射流，它被“凝固”在两块金属板之间，形成了两种金属的冶金结合。

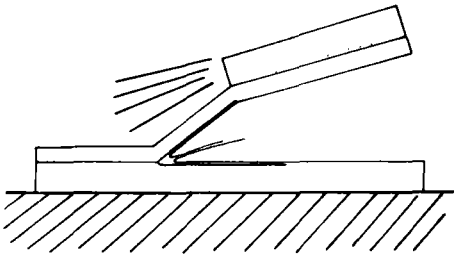

图7 爆炸焊接过程

爆炸焊接的结合区可分为三种类型：(1)金属与金属的直接结合；(2)形成均匀连续的熔化层(3)波状结合，其中以波状结合最为常见。

大量试验证明，两板之间出现射流是成功焊接的必要条件。因此选择炸药、药量、间隙和初始基复板夹角等参数时，必需使碰撞压力大于基复板的动态屈服强度，还要求碰撞点速度一般要小于材料的声速。若大于声速，则要求碰撞角必需大于某一临界角。因此在爆炸焊接过程中，通常采用低爆速炸药。有关最佳的工艺参数的选定，一般采用小角度法，台阶法来确定。至于不同材料之间的可焊性范围，一般用爆炸焊接窗口来确定。

目前国际上，不少科研工作者对复板运动和基复板粘接面波纹的形成理论作了研究，尤其对波纹形成的理论尚未有一致公认的看法。其中多数人赞同形成波纹的原因是由于复板和基板速度在界面有间断而造成Helmholz不稳定性所引起的。有人认为其间断的位置是在碰撞点前，也有人认为是在碰撞点后。还有些人从金相里看到粘接面附近有涡列，他们认为这是通过射流堆积物的绕流而产生的Kármán涡列。也还有人提出刻入机理，应力波机理等。

最近几年，我国的一些科研工作者[10]认为爆炸焊接几何相似律也是成立的。同时从模型律分析相似参数发现比强度$\bar{\sigma}_Y=\sigma_Y/(1/2)\rho v_f^2$（$\sigma_Y$是材料强度，$\rho$是材料密度，$v_f$是来流速度）起了重要的作用。当低速碰撞时，即$\bar{\sigma}$较大时，界面的波纹波长是随板材强度而变化，而在高碰撞速度时，界面波纹的波长是一个与板材强度无关的量。这些实验分析，说明爆炸焊接界面波形成机理应该用流体弹塑性模型是正确的。从金相实验来看[11]，图片中的条纹是绝热剪切的结果，见图8。以上的实验和分析为我国独立研究焊接机理作出了贡献。

三、爆 炸 硬 化

爆炸硬化工艺目前主要用于高猛钢的铸件，例如铁道上的辙叉，挖掘机的斗齿以及颚式破碎机的牙板等等，用来增加零件工作表面的硬度，提高了耐磨性。

高猛钢材料，经过水刃处理后，具有很高的韧性，强度高，耐弯折。但是使用初期表面较软，耐磨性差，因此初期磨耗较大。由于高猛钢具有突出的冷加工硬化特性，在使用过程中经受冲击载荷，

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表面逐渐变硬，磨耗逐渐减少，最后趋于稳定，达到稳定磨耗阶段。此时才能充分发挥高锰钢表面硬而耐磨，内部保持高韧性的特点。

高锰钢的予硬化，国内一般采用风枪锤击硬化的方法。这种方法表层也可以达到较高的硬度，但是硬化层极薄，硬度在HB 300以上的厚度一般不超过1毫米，使用时不能有效地减少磨耗和压陷。

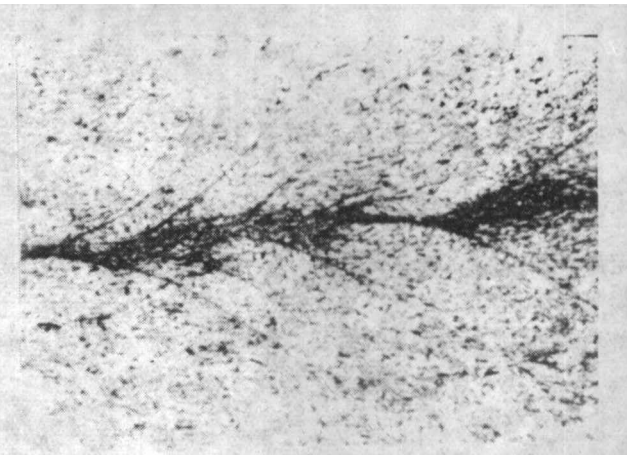

图8　爆炸焊接金相图

爆炸硬化是将炸药贴敷在金属表面，利用爆炸后在金属内产生的冲击波的压力加工硬化而成。此压力和爆震波波速有关，其峰值压力可以高达20万大气压左右。一般采用板状炸药[12,13]，每次药量为0.3—0.5克/厘米^2，分两次到三次爆炸。这样分次爆炸的效果比起单次大药量爆炸效果显著。加大药量单次爆炸，虽然也可以加大硬化层深度，但却不能使表面硬度有很大的提高。采用二次爆炸后，高锰钢的硬度在HB 350以上者为3.5—4毫米，在HB 300以上者约16毫米，效果是非常明显的。

爆炸加工应用范围较广，例如爆炸切割，爆炸冲孔，爆炸压实等，有的在国内还开展得较少，不再一一介绍。

参　考　文　献

〔1〕郑哲敏，杨振声等编著，《爆炸加工》，国防工业出版社（1981）.

〔2〕范良藻，孟珊，"爆炸成形的成形过程试验研究"，中国科学院力学研究所研究报告（1961）.

〔3〕孙同坤，刘小苹，孙国芳，刘良吉，"水下爆炸时平板变形过程和爆炸冲量的测量"，中国科学院力学研究所研究报告（1964）.

〔4〕郑哲敏，"水击波入射于平板时空化的形成"，中国科学院力学研究所研究报告（1962）.

〔5〕杨振声，谈明庆，刘小苹，刘良吉，"球壳爆炸成形机制的初步探讨"，中国科学院力学研究所研究报告（1963）.

〔6〕郑哲敏，"爆炸成形模型律"，中国科学院力学研究所研究报告（1962）.

〔7〕段祝平，"爆炸成形中贴模过程的弹塑性分析"，中国科学院力学研究所研究报告（1965）.

〔8〕杨振声，刘小苹，孙庚辰："爆炸成形园柱模具的强度计算"，中国科学院力学研究所研究报告（1964）.

〔9〕杨振声，"爆炸成形惯性模的力学模型"，中国科学院力学研究所研究报告（1982）.

〔10〕李国豪，张登霞，周之洪，邵丙璜，"对称碰撞焊接模型律试验研究"，中国科学院力学研究所研究报告（1982）.

〔11〕张登霞，李国豪，"爆炸焊接金相分析"，中国科学院力学研究所研究报告（1982）.

〔12〕赵士达，陈维波，爆炸与冲击，No.1（1982），11.

〔13〕陈维波，周一以，张国荣，"工业板状炸药的研究"，中国科学院力学研究所研究报告（1978）.

ELEMENTARY KNOWLEDGE OF EXPLOSIVE WORKING

Yang Zhensheng

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net