

## 碰撞焊件金相组织分析

张登霞 李国豪 周之洪 邵丙璜

(1982年8月23日收到)

本文介绍了用透射电子显微镜、扫描电子显微镜、光学显微镜观察焊接界面的部分结果。焊接界面附近存在着一条细化带，低碰撞速度时，细化带中心金相组织为恢复再结晶，温度超过了 $700^{\circ}\text{C}$ 。碰撞速度增高后，细化带中心金相组织为相变组织，温度超过了 $900^{\circ}\text{C}$ 。根据力学分析，我们认为细化带属于热—塑剪切带。

两块金属板高速倾斜碰撞后焊接在一起即谓之碰撞焊接。图1是这种焊接过程的示意图，“S”点为碰撞点，“A”为未焊接的金属板，“B”为焊件，“C”为再入射流。由于碰撞速度和碰撞角的不同，焊接界面呈现出直线或波纹的形貌(图2)。

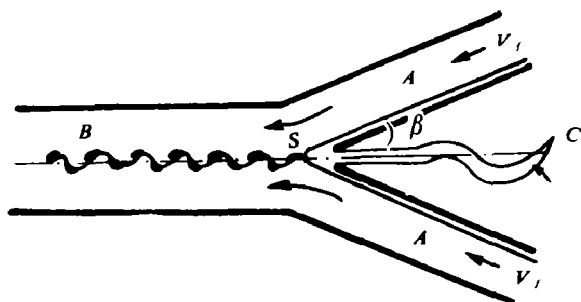


图1 焊接过程示意图

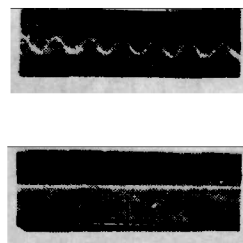


图2 焊接界面的形貌

近二十年来，许多人对焊接界面波的形成机理产生了极大的兴趣，并从各种角度进行了研究。本文拟根据焊接前后金相组织的变化规律来研究界面波的形成机理。

从金相的角度研究焊接界面波虽已发表过一些文章<sup>(1)</sup>，也给出了若干观察结果，但没有考虑焊接过程中的动态参数（碰撞速度、碰撞角）对焊件金相组织的影响。为此，我们进一步观察了低碳钢板焊件中的金相组织，特别是研究了焊件金相组织随动态参数的变化规律，为分析焊接界面波形成机理提供了部分依据。

### 一、试验条件及观察金相组织的方法

我们选用低碳钢板焊件作为金相观察用的试样，低碳钢板含碳量为 $0.147\%$ ，含硫量为

0.026%。为了观察扰动在焊接界面波形成过程中的作用,采用相同的爆炸焊接工艺参数,分别进行了两组试验:一组试验是在被焊金属板的内表面沿宽度方向刻一条宽为1mm的槽,刻槽的位置距起爆端的距离约为20mm;另一组试验则在被焊金属板的内表面不刻槽。被观察焊件的全部焊接工艺参数列入表1。

表1 焊接工艺参数

编号	板厚 (mm)	碰撞速度 $V_f$ (M/s)	碰撞角 $\beta$ (°)	备注
1	2.5	1200	26	
2	2.5	1500	26	
3	2.5	1700	26	焊前金属板内表面无刻槽
4	2.5	1700	26	焊前金属板内表面有刻槽
5	2.5	3040	26	

我们分别在光学显微镜、扫描电子显微镜、透射电子显微镜下观察了焊件的金相组织。

## 二、观察结果

图3是保持碰撞角 $\beta$ 不变而仅改变碰撞速度 $V_f$ 的焊接界面的形貌。由图可见,对于较低

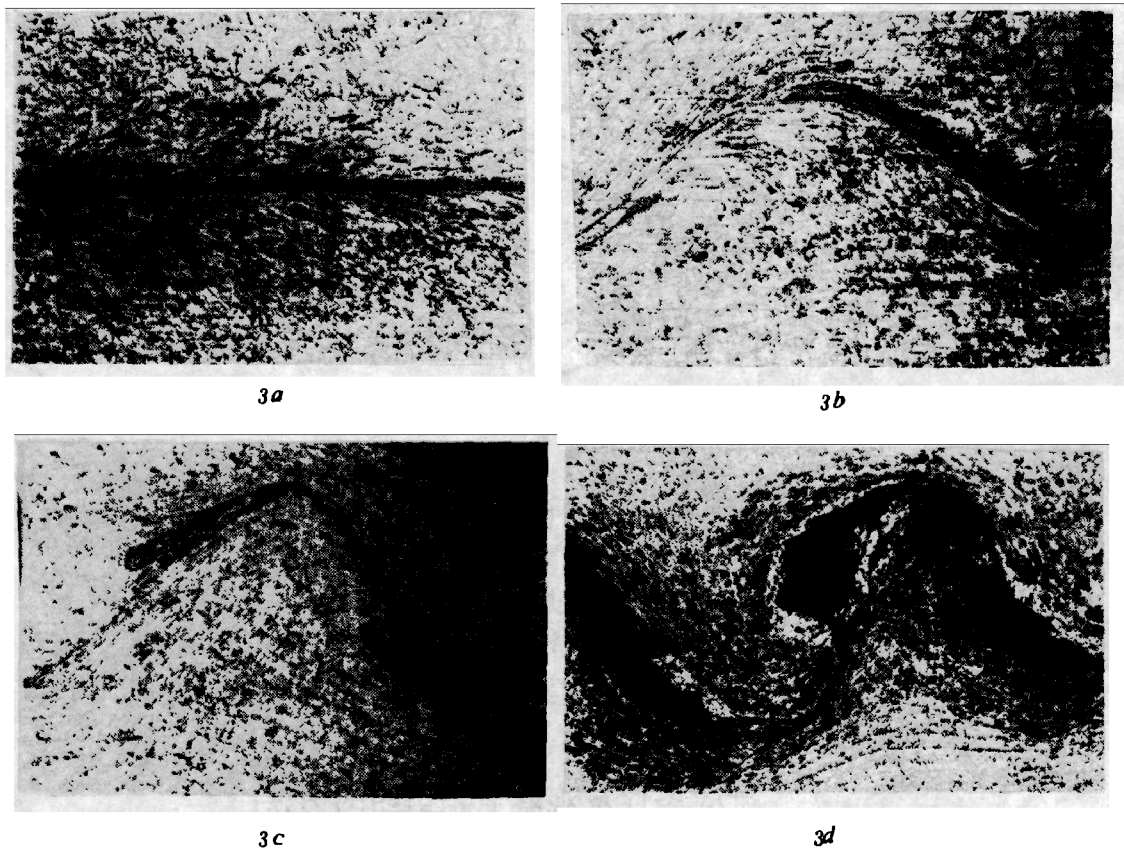


图3 界面波随 $V_f$ 的变化

的碰撞速度 $V_f$ ,焊接界面为直线,增加碰撞速度 $V_f$ ,焊接界面由直线变为正弦波,进一步增加碰撞速度 $V_f$ ,焊接界面发展为带有前、后旋涡的波。图4是波长( $\lambda/h$ )、波幅( $a/h$ )随

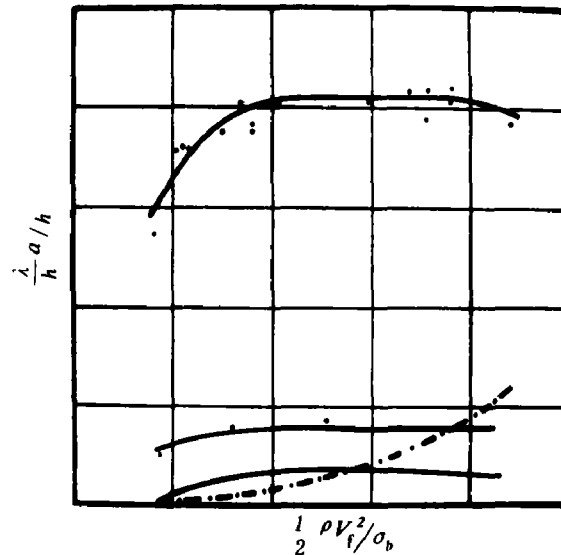


图4  $(\lambda/h)(a/h) \sim (1/2)\rho V_f^2/\sigma_s$ 关系

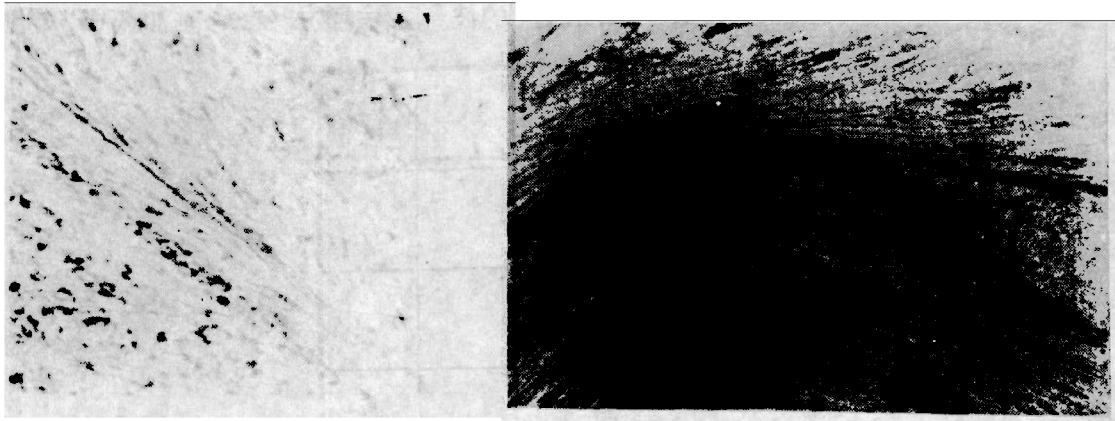
碰撞速度的变化曲线<sup>(2)</sup>。在高倍光学显微镜下,观察到焊接界面附近有一条细化带(或称超细颗粒带),该带的两侧为严重形变带,严重形变带的两侧为机械孪晶带。下面详细描述各带的观察结果。

### 1. 细化带(超细颗粒带)

图5是几种动态参数条件下细化带的形貌,其中“a”图对应 $V_f = 1200\text{ m/s}$ ,  $\beta = 26^\circ$ 且焊接前金属板内表面有刻槽的条件,此时细化带为一条具有明显界线的直带;“b”图对应 $V_f = 1700\text{ m/s}$ ,  $\beta = 26^\circ$ 且焊接前金属板内表面有刻槽的条件,此时细化带为一条带有旋涡的波状带;“c”图对应 $V_f = 3040\text{ m/s}$ ,  $\beta = 26^\circ$ 的条件,此时细化带为一条波状宽带,界面波被包含在细化带内;“D”图对应 $V_f = 1700\text{ m/s}$ ,  $\beta = 26^\circ$ 且焊接前金属板内表面无刻槽的条件,此时细化带为一条不太直的具有明显界线的直带。图示结果表明:(1)当碰撞角一定,对于较低的碰撞速度,细化带为直线(“a”图),增加碰撞速度后,细化带变为波纹状(“b”、“c”图),细化带的宽度也增加了。图4中的点划线是细化带的宽度随碰撞速度的变化曲线。该曲线表明,当细化带增加到某一特定值时,细化带的宽度大于界面波的波幅,即界面波被包含在细化带内。(2)在 $V_f = 1700\text{ m/s}$ ,  $\beta = 26^\circ$ 的条件下,焊接前金属板内表面无刻槽的条件所对应的细化带为直带,金属板内表面有刻槽的条件所对应的细化带为带有旋涡的波状带。测量了这两种条件下细化带的宽度,发现二者的宽度基本相同。表II是测量的结果。

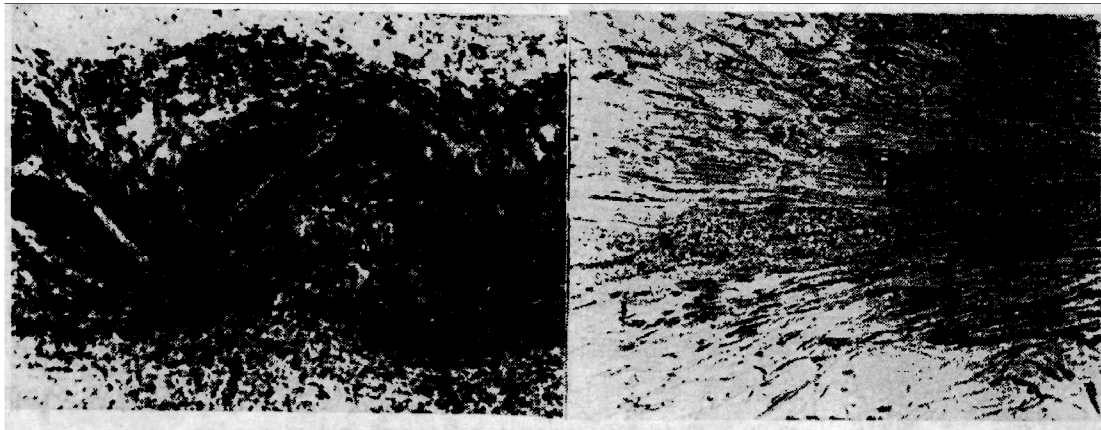
为了分析细化带的形成机理,进一步用透射电子显微镜和高倍光学显微镜分别观察了 $V_f = 1700\text{ m/s}$ ,  $\beta = 26^\circ$ 且焊接前金属板内表面无刻槽的条件下及 $V_f = 3040\text{ m/s}$ ,  $\beta = 26^\circ$ 的条件下焊件的金相组织。

焊接参数为 $V_f = 1700\text{ m/s}$ ,  $\beta = 26^\circ$ 以及焊接前金属板内表面无刻槽的焊件,细化带大



5a

5b



5c

5d

图5 细化带形貌随 $V_f$ 的变化

表2 细化带宽度

碰撞速度 $V_f (m/s)$	碰撞角 $\beta$	细化带宽度与 厚度之比( $b/h$ )*	备注
1790	25° 30'	0.017	无刻槽
1710	25° 30'	0.014	刻槽

\* 表中 $b$ 是细化带的宽度,  $h$ 是被焊金属板的厚度

致可分为两个区: 即焊缝区, 明显恢复区。焊缝区是一条不太直的具有明显界线的直带, 其宽度约为  $20\mu$ 。电镜复型形貌显示出这个区是由近似等轴的超细晶粒组成, 晶粒尺寸约为  $0.5\sim 1\mu$ (图6), 从金属薄膜透射衍衬象可看出这个区晶界细而清楚(图7), 说明这个区已有明显再结晶, 亚晶内位错密度约为  $10^6/cm^2$ 。



图6 焊缝区复型形貌



图7 焊缝区金属薄膜透射衍衬象

明显恢复区: 接着等轴微晶区的两侧是形变恢复区, 约  $20\mu$ 。该区内大部分晶粒仍保持

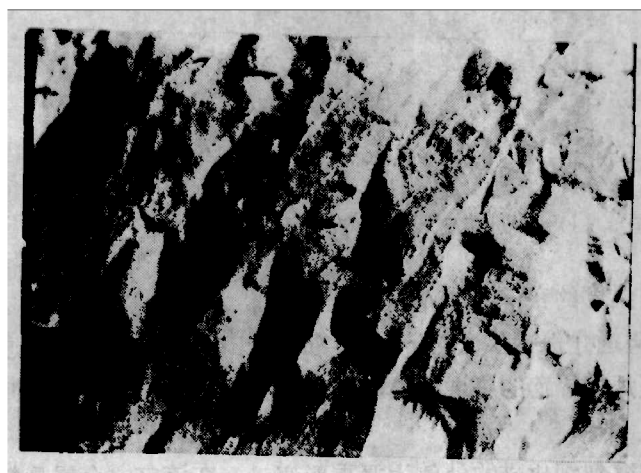


图8 恢复区复型形貌

变形方向(图8),局部微晶区位错壁变薄。此表明严重变形后的组织已有明显恢复现象。局部地区还可见到再结晶晶粒。

由金属学可知,将形变后的金属加热,随着温度的升高,金属的形变晶粒将首先发生恢复和多边形化,继续加热使其达到一定高温,则形变金属进行再结晶直至晶粒长大。在常压条件下,形变金属再结晶需要的温度约为 $700^{\circ}\text{C}$ 。这说明焊接界面附近的细化带是形变金属受热后的产物,细化带中心再结晶的温度超过了 $700^{\circ}\text{C}$ ,两侧的恢复区温度略低于 $700^{\circ}\text{C}$ 。碰撞焊接发生在高压和高速条件下,相界将显著不同于常压条件下的平衡状态,虽然这里采用平衡态下的再结晶温度确定焊件细化带的温度不合适,但估计用它来定性讨论碰撞焊接机理还是可以的。

在高倍光学显微镜下,观察了焊接参数 $V_f = 3040\text{ m/s}$ ,  $\beta = 26^{\circ}$ 焊件的细化带。观察结果表明,细化带中心为相变组织,相变组织的两侧是再结晶区和恢复区(图9)。在常压条件下15#钢的相变温度为 $900^{\circ}\text{C}$ 。这说明在该条件下,细化带中心温度超过了 $900^{\circ}\text{C}$ ,两侧



图9  $V_f = 3040\text{ m/s}$ ,  $\beta = 26^{\circ}$  所对应的细化带 1000×

的再结晶区和恢复区的温度约在 $700^{\circ}\text{C}$ 左右。

以上结果表明,在碰撞角保持不变的条件下,细化带中心的温度随碰撞速度增加而增加,细化带内的温度在垂直焊接界面的方向上发生变化,它随着离开焊接界面的距离增加而降低。

## 2、严重形变带

在光学显微镜下观察到细化带的外侧为严重形变带,在该区内金属晶粒受剪而被拉长。电子显微镜观察到严重形变的晶粒显示出更高的位错密度,其值约为 $10^{11}/\text{cm}^2$ 。此区宽窄变

化较大, 宽度大约为  $100\mu$ 。

### 3. 机械孪晶带

该带内的特征是金属基本保持正常等轴晶粒, 但也有一些铁素体晶粒变为机械孪晶, 这条带无明显的界线, 有时波及很远。

## 三、观察结果的分析

### 1. 细化带的性质

热力学第一定律指出, 物质内能的增加等于外力对它所作的变形功加上它从外界所吸收的热量, 在本问题中可写成

$$\rho \frac{dE_\theta}{dt} = P \frac{d\theta}{dt} + S_{ij} \frac{d\epsilon_{ij}^p}{dt} + K \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (1)$$

式中  $E_\theta(T, \theta)$  为单位质量物质的体积变形能。它和体积变化有关, 也和温度变化有关。在本问题中由于体积变化引起内能的变化与由于温度变化引起内能的变化相比较, 前者可以忽略不计, 于是

$$E_\theta(T, \theta) = E_\theta(T) = C_v T$$

$P$  是平均压力;  $S_{ij}$  是应力偏量;  $\theta$  是体应变;  $\epsilon_{ij}^p$  是塑性应变偏量;  $T$  是温度;  $\rho$  是密度;  $t$  是时间;  $y$  是沿板厚方向的坐标;  $y$  轴的正方向指向上,  $C_v$  是定容比热。

为了比较方程(1)中各量的大小, 把方程(1)改写为无量纲形式。取在某种碰撞速度的条件下金属板内的最高温度( $T_0$ ), 最大应变率 $\left(\frac{d\gamma}{dt}\right)_0$  以及焊接前金属板的厚度  $\delta$  为三个基本量, 构成三个无量纲参数

$$\bar{T} = \frac{T}{T_0}, \quad \bar{t} = t \left(\frac{d\gamma}{dt}\right)_0, \quad \bar{y} = \frac{y}{\delta}$$

代入方程(1)后得到

$$\frac{d\bar{T}}{d\bar{t}} = \frac{P}{\rho C_v T_0} \frac{d\theta}{d\bar{t}} + \frac{S_{ij}}{\rho C_v T_0} \frac{d\gamma}{d\bar{t}} + \frac{K}{\rho C_v \delta^2 \left(\frac{d\gamma}{dt}\right)_0} \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{y}^2} \quad (2)$$

为了估计热传导项的大小, 考虑热传导项和变形功项的系数比

$$\frac{K / (\rho C_v \delta^2 \dot{\gamma}_0)}{S_{ij} / (\rho C_v T_0)} = \frac{K T_0}{S_{ij} \delta^2 \dot{\gamma}_0} \quad \left[ \dot{\gamma}_0 = \left(\frac{d\gamma}{dt}\right)_0 \right]$$

对于低碳钢  $K = 0.5 \times 10^{-2} \text{ J/m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 7.8 \text{ g/cm}^3$ ,  $C_v = 4.387 \times 10^6 \text{ erg/g} \cdot ^\circ\text{C}$ , 取材料抗拉强度  $\sigma_B = 3900 \text{ kg/cm}^2$  代替  $S_{ij}$ ,  $\delta$  取  $1 \text{ mm}$ ,  $\dot{\gamma}_0$  取  $10^5 \sim 10^6 \text{ 1/s}$ 。经过计算得到

$$\frac{K T_0}{S_{ij} \delta^2 \dot{\gamma}_0} \approx 10^{-7}$$

这表明热传导和变形功相比较是一个小量, 于是可以认为碰撞焊接是绝热的过程, 其能量方程可改写成

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P}{\rho C_v} \frac{d\theta}{dt} + \frac{S_{ij}}{\rho C_v} \frac{d\gamma}{dt} = \left(\frac{dT}{dt}\right)_* + \left(\frac{dT}{dt}\right)_m$$

以下我们分别估计冲击绝热压缩和高速塑性变形引起的温升。首先估计冲击绝热压缩引起的温升。两块金属板高速倾斜碰撞后,在碰撞点产生很高的压力,此压力以激波的形式在金属板内传播,波后金属板内温度升高。做为初步估计,这里根据正碰撞估算碰撞点的温升,以碰撞速度  $V_f = 1700 \text{ m/s}$ ,  $\beta = 26^\circ$  的碰撞焊接为例,其正碰撞速度为  $400 \text{ m/s}$ ,由文献〔3〕查得,此时温度大约可以上升到  $100^\circ\text{C}$ ,由此可见,冲击绝热引起的温升比用金相分析的方法估计的细化带内的温度 ( $V_f = 1700 \text{ m/s}$ ,  $\beta = 26^\circ$  时,温度高于  $700^\circ\text{C}$ ) 低得多,因此可以认为冲击绝热压缩不是引起焊件细化带内温升的主要因素。下面估计高速塑性变形引起的温升

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_m = \frac{S_{ij}}{\rho C} \frac{d\gamma}{dt}$$

作为初步估计,式中  $S_{ij}$  取为材料的抗拉强度  $\sigma_s$ ,  $\frac{d\gamma}{dt}$  取为碰撞点附近的最大应变率。根据理想、不可压缩流体模型估计该值大于  $10^5 \text{ 1/s}$ ,把  $\sigma_s$ ,  $((d\gamma)/(dt))_m$ ,  $\rho$  及  $C$  代入上式计算后得到

$$\left(\frac{dT}{dt}\right)_m = 10^9 \sim 10^{10} \text{ }^\circ\text{C/s}$$

虽然这个估计非常粗糙,但它可以定性地告诉我们,两块金属板高速倾斜碰撞后,由于剪切变形而引起碰撞点附近的温升率相当高,以致在微秒的数量级内,碰撞点附近的温度可以上升到数百度以上,这和金相分析得到的结果基本吻合,因此可以认为焊件细化带内的温升主要是高速剪切变形的结果。文献〔4〕给出,当温度超过  $300^\circ\text{C}$ ,钢板强度随温度升高而降低,(这个数据是在常压、静载条件下得到的,显然,在高速高压条件下,钢板热软化的始点将不同于常压静载条件下得到的值。本文借用它和常压平衡态的相界来定性讨论碰撞焊接机理对问题不会有本质的影响)。这说明细化带内的金属显示出热软化的性质。许多研究表明,金属在变形过程中,如果材料的热软化性质起控制作用时,材料显示出热——塑剪切不稳定性,因此我们估计碰撞焊接产生的细化带属于热——塑剪切带。

## 2. 焊接界面波形成机理的初步看法

金相观察结果表明,细化带宽度随碰撞速度增加而增加,低速时,焊接界面是一条直线状或波纹状的细化带;高速时,波状焊接界面被包含在波纹状细化带内,前已述及,细化带属于热——塑剪切带。可以认为焊接界面波是热——塑剪切带失稳的结果。为了进一步说明这种失稳的机理,我们采用经典的流体力学方法估算碰撞焊件中沿垂直焊缝方向上的速度分布<sup>(5)</sup>。图10是计算的速度分布曲线,根据流体动力学稳定性可知,具有这种速度分布的平行流是不稳定的。Deem 对这种流动进行了数字计算<sup>(6)</sup>,并给出了计算的数字结果(图11)。他所计算的不稳定界面形状(图11)和我们观察到的焊接界面形状(图3)很类似,不过 Deem 给出的是不同时刻不稳定界面形貌,它表示了平行流失稳的发展过程,而图3是焊接界面失稳的终态,它表示不稳定界面达到稳定时的界面形貌。焊接界面形貌随比强度的变化表示在不同强度的条件下,允许扰动增长的时间是不同的。另外,Deem 给出的波长是一个恒值,然而在爆炸焊接中,界面波

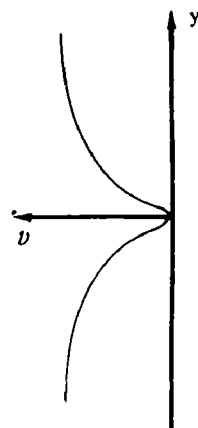


图10 碰撞焊接中的速度分布



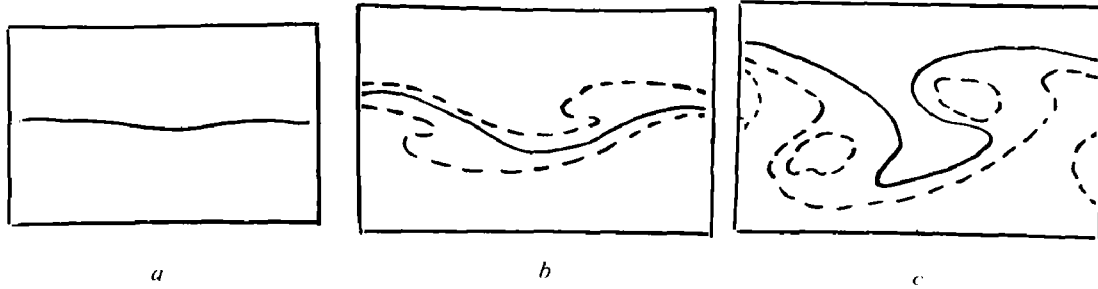


图11 Deem 的计算结果

的波长随强度变化而变化。所以我们估计, 爆炸焊接界面波的形成过程可能是两块金属板高速倾斜碰撞后在碰撞点附近形成热——塑剪切带, 在该带内金属质点具有与结合面平行的流动速度, 且在垂直被焊金属板的方向上, 其速度呈高斯曲线分布, 和流体动力学中平行流稳定性相类似, 具有这种速度分布的平行热——塑剪切层流也是不稳定的, 它受侧向扰动后即失稳, 失稳后的界面形状随时间而变化, 通过热——塑剪切带后, 该不稳定界面被冻结, 即成为爆炸焊接界面波, 由于热——塑剪切带的长度随材料比强度而增加, 扰动增长的时间亦随材料比强度而增加, 所以金相观察到的焊接界面波的形貌亦随强度而变化。这种看法是否正确还需要进一步由试验和理论分析给予证明。

#### 四、结束语

根据本文给出的低碳钢焊件的金相观察结果和初步的力学分析, 可以认为, 两块金属板高速倾斜碰撞后, 在碰撞点附近形成热——塑剪切带。该带中心的温度随碰撞速度增加而增加, 宽度随碰撞速度增加而增加。

本工作是在郑哲敏教授指导下进行的, 作者对郑哲敏教授的具体指导表示衷心感谢。另外, 在金相分析方面北京钢铁研究总院六室王海龄、马燕文、二机部二院姚利贞、李敏慧做了大量工作。在爆炸焊接试验中, 二室七组全体同志做了大量工作, 作者对他们表示衷心感谢。

#### 参 考 文 献

- (1) Lucas W. et al. *Proc. Second International conf. of Center for H. E. F.*, (1969), 8. 1. 1.
- (2) 张登霞、李国豪、邵丙璜、周之洪, 试验研究爆炸焊接界面波, 第二届全国爆炸力学学术公议论文集, 第一册 (1981)。
- (3) Kinslow R., *High Velocity Impact Phenomena*. Academic Press, New York and London: (1970).
- (4) 郑哲敏、谈庆明, 破甲机理的力学分析及简化模型, 私人通信, (1977)。
- (5) Уткин А. В., *ФГВ*, 4 (1980), 126.
- (6) Deem G. S., *J. F. M.*, 47 (1971), 353.

## SOME METALLURGICAL INVESTIGATIONS ON COLLISION WELDING

Zhang Dengxia Li Guohao Zhou Zhihong Shao Binghuang

### Abstract

The microstructure of collision welded interface was examined with a transmission electron microscope and scanning electron microscope as well as optical one. An ultrafine-grained zone and a highly deformed area on each side were observed.

It has been confirmed that the ultrafine-grained zone is a recovery-recrystallisation or phase transition zone, which depends upon collision velocity.

A simplified mechanical analysis indicates that this ultrafine-grained zone might be a thermo-plastic shear band.