

炼钢

16-2136 采用连续锻压技术改善铸坯中心偏析

小岛信司 今井卓雄 澁田久和 等

沈华振

TF 777.2

〔提要〕 为了改善或消除连铸坯的中心偏析，已尝试过许多方法，但时至今日才获得令人满意的效果。为了彻底解决这一问题，作者们根据一个全新的凝固机理，提出了连续段压技术。用这一方法，通过施加机械压力使固-液共存两相区的浓化钢水被逆向挤出，枝状晶被压碎并将其挤压到液相区，结果使最后凝固段的铸坯厚度大大减薄，这种方法已被应用到水岛厂1号和3号大方坯连铸机上，以便观察其应用效果，包括高碳钢和低合金钢在内的各类钢种。

关键词：连续铸造 方坯 中心偏析 连续锻压

1 绪 言

近年来对钢铁产品的质量要求越来越高，由连铸与模铸生产的铸坯和钢锭，大部分是通过外表面冷却而凝固的，随着凝固的进行，在固-液相界面处的溶质从液相中析出，形成了中心偏析^{〔1〕}。铸坯越厚则中心偏析越严重。在连铸凝固过程中，随着铸造速度的加快使液相穴深度加长，促成了中心偏析^{〔2〕}。由于中心偏析部位P、S等溶质浓度偏高，使中心部的加工性能变差，脆性增加，因而降低了材质的机械性能。

过去，为了减轻连铸坯的中心偏析，采用了各种方法。例如有使连铸坯最后的凝固组织由柱状晶变为等轴晶的电磁搅拌法^{〔3〕}、低温铸造法^{〔4〕}、添加金属丝法^{〔5〕}、施以超声波法等^{〔6〕}。特别是电磁搅拌法应用较广，但只能改变其凝固组织，防止中心偏析的效果不十分显著。另外，为防止在最后凝固部位的浓化钢水因凝固收缩而被吸入所采用的轻压下法^{〔7,8〕}，也有较多的报道。

本文论述了在连铸过程中新开发的连续锻压技术^{〔9〕}，即在铸坯的最后凝固部位用锻压原理连续地施加以机械能，其目的是使浓缩的钢水排出与枝晶的破裂同时进行，从而得到使中心部致密、无偏析的再凝固组织，即所谓强制破碎凝固而形成新的凝固组织。

本文根据在实际连铸机上进行的连续锻压工业试验，确定了其原理，分析了采用连续锻压后中心偏析的行为及注速与锻压条件的关系，明确了进一步提高产品质量和效果的内在关系。

2 连续锻压法的原理

2.1 改善中心偏析机理

2.1.1 连铸产生中心偏析的原因

钢中除含有铁以外，还有C、Si、Mn、P、S等元素及非金属成分，其含量的多少对钢的性能有很大影响。因此，在固-液共存区的浓化钢水慢慢凝固，由于固相内元素的扩散速度小，凝固后作为中心偏析仍然存在。

在连铸过程中，随着浇注速度的加快，液相穴深度也加长，其端部的形状就更容易形成锐角，使中心偏析加大。这样就使铸坯在两个支承辊间产生铸坯鼓肚现象，中心部位C的偏析度一般为1.1~1.4。

2.1.2 改善中心偏析的机理

连续锻压是在铸坯的最后凝固部位施加以机械能，从而使该部位的浓化钢水排除并破坏柱状晶的一种技术。其目的是将破碎的枝状晶作为等轴晶的结晶核心，从而使铸坯的中心组织致密且无偏析。其模式图由图1所示。

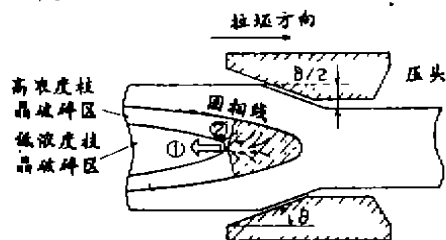


图1 连续锻压工艺原理

此时所必需的压下量 δ 由式1表示：

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \quad (1)$$

式中 δ_1 ——为了将固-液共存两相区内的浓化钢水进行挤出的必需压下量；

δ_2 ——使固-液共存的两相区内的固相破裂，并使其被挤压到上端液相区所必需的压下量；

δ_1 ——使完全凝固的金属产生塑性变形所必需的压下量。

锻压位置处铸坯的凝固状态,是在无锻压的情况下根据传热分析^[10]来定义凝固断面的。把在锻压位置处的上、下固相率均为 1.0 之间所夹的表观未凝固的厚度称为未凝固厚度 d , 把铸坯中心部表观固相率称作固相率 f_s 。

(1) δ_1 的推断

如图 1 所示,如果能确定压下位置的表观固相率 f_s 及钢种所特有的固-液共存层的厚度,则图中斜线部分即固-液两相区浓化钢水量是可计算的。如 C 的含量为 0.8% 的固相线钢, δ_1 的计算结果由图 2 所示。在表观固相率 f_s 为 0.5~1.0 的情况下,使浓化钢水排除所必需的压下量 δ_1 计算为 30~0mm。铸坯越厚则 δ_1 越大,即使是钢中碳含量高,这种倾向也是同样的。

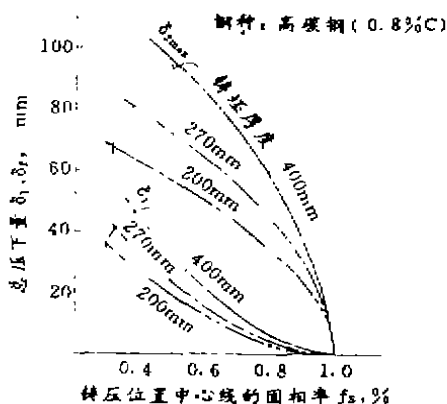


图 2 连续锻压改善中心偏析所必须达到的压下量

如果压下量小于 δ_1 , 则上下的压应力在中心部不能抵消, 由于凝固壳吸收能量而弯曲, 形成内部裂纹。

(2) δ_2 的推断

δ_2 是将枝晶压碎, 使其在残留钢水内形成等轴晶的固-液共存层的压下量, 其计算结果如图 2 所示。 δ_2 是表示表观未凝固层厚度 d 内的固相全部挤压出去的最大压下量。

由此图可看出 f_s 的范围在 0.5 以上时, 则 δ_2 的最大值为 50~100mm。

(3) 必需的总压下量 δ

总压下量 δ 比 δ_1 小时, 只能引起浓化钢水的流动, 使铸坯中心部形成负偏析。因此, 必需的压下量 δ 对于排出的浓化钢水需要加上 δ_1 , 以及补偿在完全凝固部分压下时所排放出的量 δ_2 作为压下量。例如, 400mm 厚的高碳钢铸坯, 锻压位置的表观固相率为 0.5, 若采

用两倍 δ_1 的压下量, 则所需压下量为 60mm。

综上所述, 对未完全凝固的铸坯实施锻压时, 对可能发生的现象进行预测, 其结果如图 3 所示。横轴表示锻压位置, E 点表示无锻压的凝固结束点, 越向左边则越显示为向上流动, 纵轴表示压下量。

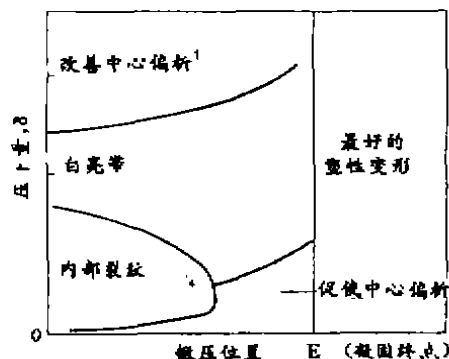


图 3 压下量 δ 与铸坯内部质量的关系

当压下量较小时, 由于未凝固量多及凝固界面未压实, 则会产生内部裂纹, 而当未凝固量少时则浓化钢水向中心部集中, 促使形成中心偏析。在增加压下量的区域内, 向中心部位的压下量比 δ_1 小的场合下, 产生负偏析, 当向中心部的压下量比 δ_1 大时, 由图可看出中心偏析区域已获得改善。

2.2 压下方法

对于 δ_1 大的情况下, 例如 $\delta_1 = 80\text{mm}$, 压下方法有辊动压下法和连续锻压法。

采用辊动压下法^[11-12]时, 认为在时间过程方面, 由于凝固界面经常保持同样状态, 枝晶破碎效果比连续锻压法差。并且对于压下量在 80mm 时, 就要求一对辊子的直径和辊子的驱动转矩必须很大, 这就要有庞大的设备。

如果采用连续锻压法, 在锻压机的压头下铸坯的固-液两相区, 经一次锻压枝晶就可破碎, 浓化钢水及破碎的枝晶被挤向上流方向, 可有效地进行锻压, 同时即使是大压下量也可防止内部裂纹。采用锻压法不存在向辊子输送大转矩的问题, 因而压下量很少受限制。

2.3 锻压时铸坯的应力及应变

锻压时要使铸坯不产生裂纹, 需要确定连续锻压中所使用的锻模形状。压头锻压面的锥角 θ 应以下述三方面来确定:

- (1) 压头与铸坯之间不滑移, $\theta < \text{摩擦角} (\tan^{-1} \mu)$;
- (2) 铸坯内部产生应力, 其温度必须在允许值以下;
- (3) θ 角越大, 则破碎的枝晶被挤压的情况就越好。在热状态下, 压头与铸坯间的摩擦系数一般为

0.35, 压头的 θ 角为: $\theta \leq \tan^{-1} 0.35 = 20^\circ$ 。

锻压时铸坯内产生的应力是用二次元刚塑性有限元法解析的。图 4 示出了铸坯固相被锻压时的锻压应力, 在铸坯内部充分传递时的结果。锻压条件是: 铸坯厚度为 270mm, 表观未凝固层厚度 20mm、压头的 $\theta = 17^\circ$ 、压下量为 40mm。

解析条件: 方法——变位增分法, 元素数 50。

界面条件: 厚度——平面扭曲;

左右——保持平面移动。

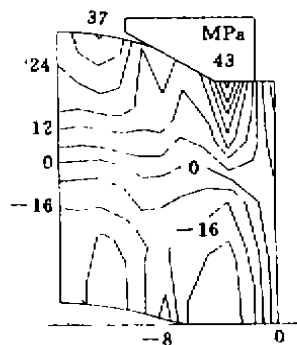


图 4 锻压铸坯应力解析示例

由本图可看出, 凝固界面呈压缩应力状态, 可认为内部不产生裂纹。另外, 铸坯表层产生了拉应力, 一般情况下, 铸坯表面允许应力为 50MPa 以下, 故可认为不会产生裂纹。因而压头的锥角 θ 据前所述 (1) 与 (2) 所允许的范围内可取上限。

3 实验方法

3.1 实验设备

在水岛厂的第 1⁽¹⁾、3⁽¹⁾号连铸机上配备了连续锻压设施, 进行连续锻压原理及提高铸坯质量的工业试验。表 1 示出了连铸机与锻压机主要规格和操作条件。第 1、3 号连铸机分别在弯液面下 16m 和 26.4m 处设置了连续锻压机。

3.2 实验条件

实验条件的概要示于表 2。线材用钢、轴承钢、机械结构用钢、无缝钢管用钢等, 其锻压条件是表观的未凝固层厚度 d 与锻压量 δ 的比值, 即 δ/d 在 0.3~8 之间变化。 d 是根据二次元前差分法进行凝固计算⁽¹⁾推断出的。有关计算可靠性, 可把打钉法测定的凝固层厚度与铸坯表面温度测定值进行对比, 结果认定是十分精确的。

3.3 实验内容

首先就不同钢种, 改变其锻压条件对铸坯中心偏

表 1 连续锻压的技术条件

		水岛厂 1 号连铸机	水岛厂 3 号连铸机
		6	4
连铸机	设备类型	弧形连铸机 (12.5m)	
	流数及铸坯尺寸	270×340mm	400×560mm
	钢水罐	180t	
连续锻压设备	压下方式	油压机	电动机械
	压下量	20~100mm	40~150mm
	压下位置 (弯液面下)	16m	26.4m
铸坯状况	注速	0.65~0.75m/min	0.4~0.6m/min
	冷却水量	0.75~0.9L/kg	0.3~0.5L/kg
	温差	12~36℃	15~40℃

表 2 连续锻压实验条件

	水岛厂 1 号连铸机	水岛厂 3 号连铸机
钢的品种	普碳钢 低合金钢 (0.05~1.0%C)	普碳钢 低合金钢 (0.10~1.0%C)
未凝固层厚度 (d)	0~120mm	0~70mm
压下量 (δ)	20~100mm	40~140mm
压缩比 (δ/d)	0.3~7.0	0.8~8
锻压试验坯长度	10~180m	20~100mm
铸坯表面温度	870~930℃	880~950℃

析⁽¹⁾的影响进行调查⁽¹⁾⁽¹⁰⁾。采用较长时间的连续锻压和浇注过程中暂时停止拉坯然后再拉坯的方法, 对连续锻压所得到的产品稳定性进行研究。

铸坯和小方坯的宏观偏析, 用 5mm 钻头取样 10 点, 对其平均值进行分析, 对半宏观偏析用射束直径 100 μ m 电子射线测绘仪进行观察⁽¹⁾。对产品的质量, 针对不同钢种的不同用途及要求, 对其机械性能进行研究。

4 连续锻压后铸坯质量改善的效果与分析

4.1 中心偏析及其影响因素

锻压对中心偏析影响的主要因素, 与锻压位置的部位固相率、铸坯尺寸和成分及锻压量有关。即由什么样的铸坯 (指铸坯的尺寸与成分)、哪个锻压位置 (指锻压位置中心部的固相率)、如何压下 (主要是压下量) 来决定。锻压效果是根据锻压位置的固相率与锻压量间的关系而各异。过低的固相率, 如果未凝固层厚度过大, 为防止内部裂纹, 必须有较大的压下量, 在本论文里, 只对 $f_s \geq 0.5$ 的范围进行研究。

(1) 成分及铸坯尺寸对未凝固层厚度的影响

对铸坯凝固断面影响的主要因素是铸坯的尺寸与化学成分。图5示出了固相率在0.6和1.0的位置上,上述因素对铸坯凝固断面的影响。钢中碳含量越高,则固-液共存层厚度增加,未凝固层厚度增加。铸坯厚度增加则凝固界面的凝固速度降低,未凝固层厚度增加。铸坯厚度为400mm,含碳0.8%的场合下,固相率为0.6~1.0之间未凝固层厚度 d 为108mm。同样厚度的铸坯,碳含量在0.15%的情况下,则未凝固层厚度为46mm,而同样的碳含量,铸坯厚度为270mm,则未凝固层厚度为80mm。即正确的锻压条件,不仅要考虑铸坯厚度,钢水成分也必须考虑。

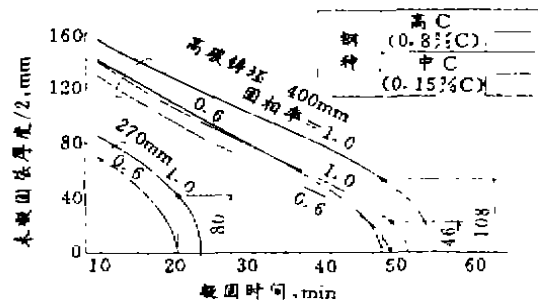


图5 钢种及铸坯尺寸对未凝固层厚度的影响

(2) 表观未凝固层厚度对中心偏析的影响

在第1、3号连铸机上,当锻压量为一定时,进行了表观未凝固层厚度 d 对中心偏析的影响试验。 d 决定了浇注速度,其结果由图6示出。在 $d=20\sim40\text{mm}$ 的范围内,则 C/C_0 为0.9~1.1,若 d 增加,则 C/C_0 变小,负偏析增加。与锻压量相比,若表观未凝固层厚度大,则将挤向被压碎的面相上游侧。这种现象可认为是因 δ_2 不足引起的。

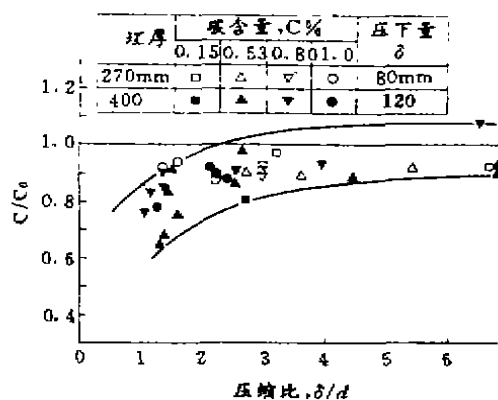


图6 未凝固层厚度对中心偏析的影响

(3) 锻压条件对中心偏析的影响

锻压条件对铸坯中心部位的 C/C_0 的影响,是将锻

压量 δ 和表观未凝固层厚度 d 的比值 δ/d 关系整理成图7。由图7可看出, δ/d 变大时,则 C/C_0 从负偏析起逐渐增大,可达 $C/C_0 \approx 1$ 。为了达到 $C/C_0 \geq 0.9$, δ/d 必须大于2。

即为了改善中心偏析,其锻压量如仅使固液共存层内的液相排出将是十分不利的,而经过观察认为,锻压量必须将破裂的固相部分仅作为等轴晶排出。

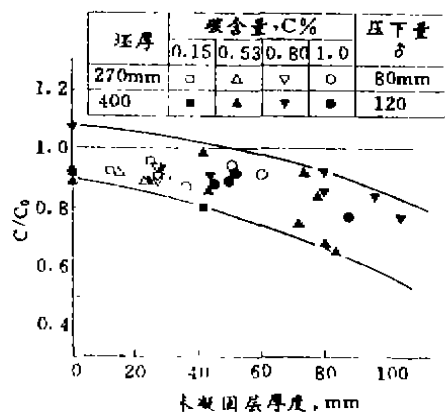


图7 压缩比对中心偏析影响

图8示出了在 $1.5 \leq \delta/d \leq 3.0$ 的条件下,中心部位的表观固相率 f_s 与 C/C_0 间的关系。由图可见 f_s 的增加,看不出 C/C_0 有明显变化。因此,在锻压位置上如果能得到与表观固相率相对应的锻压量的话,可得到同样的锻压效果。如果从锻压的铸坯在以后的轧制过程方面来考虑的话,锻压量少一些为好,以普通钢为例,使铸坯的中心偏析 C/C_0 接近1左右时其锻压条件由式(2)、(3)示出:

$$f_s \geq 0.7 \quad (2)$$

$$\delta/d \geq 2.0 \quad (3)$$

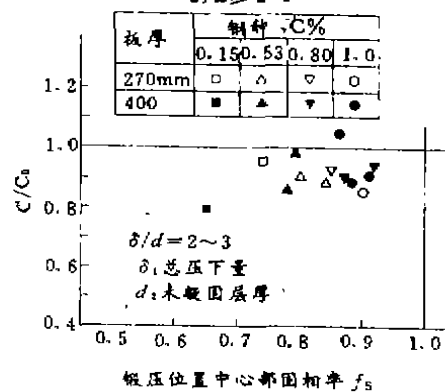


图8 锻压位置的固相率与中心偏析的关系

4.2 对结晶颗粒细化的影响

对于高碳钢(0.8%C),铸坯中心部位附近在浇注方向的断面宏观组织由照片1示出(略)。锻压坯与无

锻压坯比较, 由于锻压, V形偏析线减轻, 中心部位的晶粒明显细化, 并可认为溶质进一步均匀化了。另外, 从低碳钢 (0.07%C) 的浸透探伤的结果分析, 经锻压后的铸坯, 疏松缺陷完全消除, 也不产生内部裂纹了。

关于半宏观偏析, 是用电子扫描测定仪测定 P 的偏析度在 3 以上时偏析晶粒的直径与个数的关系, 其结果由图 9 示出。由图可看出由于锻压, 大的偏析晶粒大幅度减少, 小的偏析晶粒也被分散了。

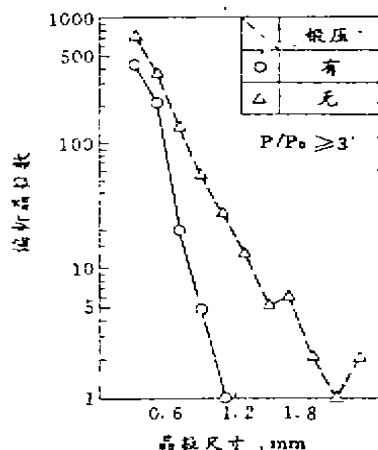


图 9 经锻压铸坯的半宏观偏析晶粒尺寸减小

4.3 锻压位置附近未凝固部的浓化现象

由于锻压, 使得未凝固部的浓化钢水连续地被挤压到上流侧, 在锻压部位附近的钢水形成了浓化区。为了研究这种状况, 当锻压达到正常状况后, 停止浇注作业, 在连铸机的铸坯内出现静止凝固。停止作业前的铸坯厚度为 270mm 时, 注速为 0.7m/min; 铸坯厚度为 400mm 时, 则为 0.49m/min。从冷却后的铸坯上用钻头取样, 从铸造方向上测定其偏析度。

测定结果示于图 10。由图可知, 在锻压机近前偏析度 C/C_0 取最大峰值, 向上流侧则呈逐渐减小的趋势。收缩度的峰值以 C 为例可达 C/C_0 为 2~2.5, 当铸坯厚度为 270mm 时, $C/C_0 \geq 1.5$ 的浓化区是在锻压位置上流侧 1.5m 处, 当铸坯厚度为 400mm 时则浓化区在上

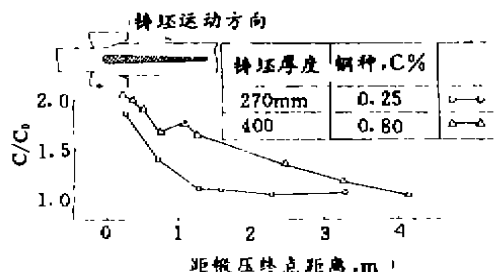


图 10 距锻压位置在铸坯长度方向上碳浓度的变化

流侧 4m 处。已经清楚的是, 浓化区的长度是依扩散、对流及伴随锻压而强制流动的影响而决定的, 其长度是有限的。上述两种浓化区之所以不同, 可认为是由于铸坯尺寸及成分的不同所致。

4.4 连续锻压稳定性的试验结果

为了清楚地掌握连续锻压对铸坯未凝固部分浓化钢水的影响, 对 270mm 和 400mm 厚的铸坯, 分别进行了 2.5h 和 3h 时的连续锻压, 观察了在铸坯中心部的 C/C_0 在浇注方向的变化。从锻压的铸坯上每隔 10m 用 5mm 钻头取样, 分析结果由图 11 示出。

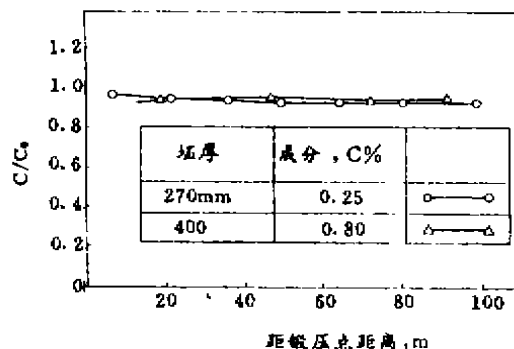


图 11 在整个锻压过程中沿铸坯长度方向上中心偏析的变化

C/C_0 。在锻压开始后迅速达到了稳定状态, 在 4.3 节叙述的未凝固部分的浓化达到某一饱和值, 锻压效果就不再变化了。

为了清楚掌握浇注速度变化所产生的影响, 在连铸机上进行连续锻压 1h 后, 停浇 1min, 而后再开始锻压, 在中断浇注的那段铸坯的浇注方向断面上, 进行硫印与 C/C_0 在浇注方向的变化分析。这些结果与正常锻压浇注所得到的结果基本相同, 也就是说, 在整个锻压过程中即使多次变化浇注速度, 其效果不变。

4.5 未凝固部浓化现象的模型分析

在第 4.3 节里所得出的结果, 作者们所用模型分析的要点如下⁽¹⁾。从锻压位置向上流侧的液相穴内, 沿浇注方向逐段分割, 分析溶质的质量平衡。由于锻压, 被挤压出去的浓化钢水除一般扩散外, 是由于对流和强制混合而产生的扩散。被锻压出的钢水的溶质浓度, 可由锻压点前后的溶质浓度及钢水的溶质质量平衡求出。认为液相穴内钢水是向边缘坯壳方向凝固, 为进一步简化模型, 假定铸坯在厚度方向上的浓度是一定的, 故只在浇注方向上进行一维分析。

图 12 示出了铸坯厚度 270mm, 混合扩散系数 $60\text{cm}^2/\text{s}$ ⁽²⁾, 锻压后的 C/C_0 取 0.9 时的浓度变化状况。

浓度变化范围约 1.2mm, 锻压位置近前 C/C。浓度峰值为 2.1, 与图 10 所示的测定值大体一致。经 35min 浓缩就已达到饱和的稳定状态。根据这一结果, 可以判明锻压后中心部位的 C/C。很快就达到了稳定状态, 所以即使是长时间锻压, 其效果也不再变化了。

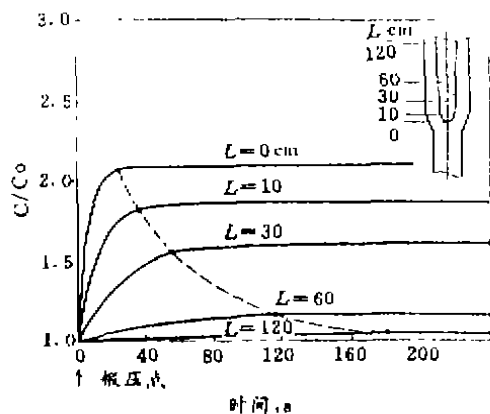


图 12 锻压坯液相穴内碳浓度的变化

5 锻压后质量改善的效果和分析

5.1 连续锻压材的机械特性及其效果

(1) 拉伸加工性

关于线材的拉伸性能^[20]，是采用碳含量为 0.83% 的碳钢，用 12 段模具进行拉伸试验，将直径 5.5mm 试验材拉伸到直径为 1.44mm。由于模具角度导致失效，因而使角度增大 1 倍，即 25°。用以做比较材的直径在 1.88~1.61mm 的范围内引起失效，而锻压材可全部拉伸到 1.44mm。在第 3 号连铸机上实际生产的拉伸材性能比较如图 13 示出，可见由于采用了连续锻压技术，失效率大幅度降低。

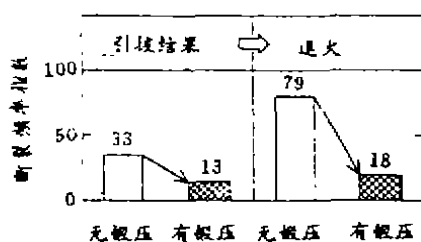


图 13 拉伸过程的断裂频率

(2) 中心部位的加工性能

以 S45C 钢作为被加工材，用 SKH4 钢制成钻头，对在中心部位穿孔加工时的钻头寿命进行比较。锻压材是普通材的两倍以上，即锻压材中心部位的加工性

能优越。这是由于锻压材消除了中心偏析的原因。另外，在加工无缝钢管时，使用锻压材，其冲头的寿命同样提高了一倍。

(3) 锻造加工性

整体成形的机械部件在横向加工时，中心部位形成很大应力场，以前用未经锻压材，由于中心偏析，很容易产生曼内斯曼裂纹，而使用锻压材则不产生裂纹。

5.2 连续锻压材的产品质量效果

用碳含量 0.82%、直径 11mm 线材，拉拔到 4.2mm 孔径经过试验后，其断面的延伸率和收缩率特性示于图 14。由图可看出，锻压材的拉拔性能及断面收缩率均优于非锻压材，上述锻压材的中心部位 C/C₀=0.9，故可认为加工线材时，适当的负偏析可增加延展性及提高断面收缩率。

用于制做车轴的棒钢，过去使用不经连续锻压材，由于中心偏析在进行热处理时易引起裂纹，而使用锻压材则不产生裂纹。这可从中心部位的硬度来分析，即连续锻压材的中心部位无硬度峰值。

连续锻压材即使用于制做轴承，与不经连续锻压材比，其疲劳寿命提高了 1 倍。影响轴承转动寿命的因素^[21,22]是中心偏析与钢水的洁净度。使用连续锻压材提高其寿命就是因为消除了中心偏析。另外，还有如下理由：即对于锻压材，可以不必为了减少偏析而采用低温浇注，这有利于钢水过热度提高，本例就是采用了锻压技术而使浇注温度提高了 10℃，从而钢中夹杂物可减少。

加工无缝钢管时，要求有好的内表面，如果母材中心部存在疏松，则内表面易形成疤痕。而锻压材可显著减少中心疏松，从而保证无缝管的内表面质量。

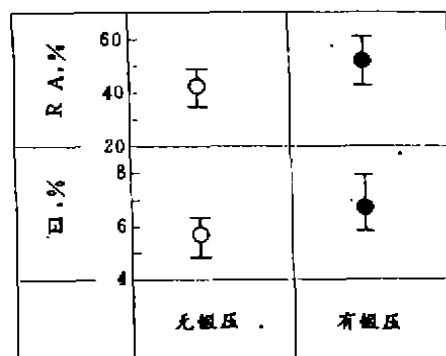


图 14 0.82% 碳钢拉拔成线材 ($\phi 4.2\text{mm}$) 的断面收缩率 (EI) 和延伸率 (RA)

(下转第 36 页)

改进措施是连续的,在某些场合下,是同时进行的,还由于改变了浇注的钢种,因而不可能定量地确定各项改进对减少角裂的作用。但是,可以确信的是,安装弯曲机与弧形装置的对中夹具,采用中度二次冷却,改进弯曲机设计和定期检查辊缝及其维护对减少角裂起到了最大的作用。

这些改进从总体上减少了 2 号连铸机中厚板坯角裂的发生率,从 60% 左右减少到 5% 左右,还大大减少

了板坯形状的变形。结果,2 号连铸机 90% 以上的板坯在中厚板轧机上轧制不需修整。

(参改文献略)

沈华枢 译自《Steelmaking Conference Proceedings》, 1992, 557~562

沈怡存 校

(编辑 沈立)

(收稿日期 1993 年 3 月 22 日)

(上接第 21 页)

6 结 论

(1) 连续锻压法作为消除连铸坯中心偏析的一种方法,在工业上已得到开发。这种技术在工业连铸机上已达到可以应用的水平。

(2) 为了改善中心偏析所必需的压下量,除了使固-液共存层内浓化钢水排出所必要的压下量 δ_1 外,还必须使枝晶破碎,并作为等轴晶被挤向未凝固部的压下量 δ_2 。必要的压下量由浇注的钢种与铸坯尺寸而定。

(3) 采用锻压技术中心偏析 C/C。可由锻压位置中心部的表现固相率 f_s 、锻压量 δ 与表现未凝固层厚度 d 的比值得出。对未凝固层较厚的铸坯,如果压下量小,易引起内部裂纹,而随着压下量的增加还可减少负偏析,考虑到后道的轧制工序,目前的参数为 $f_s \geq 0.7$ 、 $\delta/d \geq 2$ 。

(4) 由于锻压,细化了铸坯中心部的结晶组织。

(5) 由于锻压减轻了半宏观偏析,特别是大幅度地减少了大的偏析晶粒。

(6) 锻压时未凝固部顶端的收缩,在锻压开始很快就达到饱和,在经过长达 3h 的连续锻压作业,变动浇注速度相当于停止 1min 的拉坯,中心部 C 偏析的改善效果也无改变。

(7) 经连续锻压的铸坯轧制成各种产品的质量特性如下:

① 由于中心部位无偏析,在线材拉伸加工时减少了断线率,在穿孔加工时延长了钻头寿命,并获得了热处理加工时减少裂纹倾向等效果;

② 由于中心部无疏松,加工成无缝钢管时,提高了内表面质量,在进行大应力塑性加工时,可得到防止裂纹产生的明显效果。

金培洪 译自《铁と钢》, 1992, No12, 42~49

蔡永林 校
钟 静

(编辑 钟 静)

(收稿日期 1993 年 2 月 25 日)