

## 连铸工艺参数对 SWRH82B 钢 160 mm × 160 mm 坯 中心碳偏析的影响

童为硕 李晶 闫威

(北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要** 试验研究了结晶器电磁搅拌频率、拉速、过热度及二冷强度对 SWRH82B 连铸小方坯中心碳偏析的影响。研究表明, 结晶器搅拌电流为 300 A 时, 低电磁搅拌频率下铸坯中心碳偏析情况较好; 拉速为 1.8 m/min 时, 提高二冷比水量有利于改善中心碳偏析, 但二冷比水量过高会加剧偏析; 拉速为 1.8 m/min 时, 二冷比水量为 0.75 L/kg 较为合适, 拉速为 1.9 m/min 时, 二冷比水量为 0.8 L/kg 是比较合适的; 当过热度在 20 ~ 30 °C 时, 过热度对铸坯中心碳偏析的影响不大。

**关键词** SWRH82B 钢 160 mm × 160 mm 连铸坯 中心碳偏析 拉速 二冷比水量 过热度

## Effect of Continuous Casting Parameters on Center Carbon Segregation of SWRH82B Steel 160 mm × 160 mm Billet

Tong Weishuo, Li Jing and Yan Wei

(State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

**Abstract** The effect of continuous casting process parameters including M-EMS stirring frequency, casting speed, superheat and secondary cooling water ratio on the center carbon segregation of SWRH82B billet were investigated. The results indicated that low center carbon segregation index could be obtained in lower M-EMS stirring frequency with constant stirring current 300 A, center carbon segregation could be improved by increasing secondary cooling water ratio, but it would get worse with the further increase of secondary cooling water ratio; secondary cooling water ratio of 0.75 L/kg was suitable for casting speed of 1.8 m/min while 0.80 L/kg was proper for 1.9 m/min. In addition, superheat between 20 ~ 30 °C had negligible effect on the carbon center segregation.

**Material Index** SWRH82B Steel, 160 mm × 160 mm Casting Billet, Center Carbon Segregation, Casting Speed, Secondary Cooling Water Ratio, Superheat

SWRH82B 钢是金属制品领域的主要原料之一, 可用于生产具有高技术含量、高附加值的高强度低松弛预应力钢丝和钢绞线。82B 钢碳含量约为 0.82%, 为过共析钢, 此类钢种碳含量高于 0.77% 后碳偏析将显著恶化, 易造成盘条拉拔断裂<sup>[1]</sup>。为保证线材的质量, 一般要求钢的成分稳定、钢质纯净、铸坯中心碳偏析程度轻、金相组织均匀合适, 线材索氏体率高, 要避免较大的非塑性夹杂物、网状渗碳体以及马氏体等有害物质和组织。在生产 82B 盘条时由于工艺不合理, 往往会出现铸坯中心碳偏析严重、盘条在后续拉拔和绞线过程中会出现断裂的现象, 而这种严重的碳偏析现象很难通过后续的热处理工艺消除。

连铸过程被认为是控制碳偏析最好的阶段, 因而本文针对连铸工艺参数对 82B 钢中心碳偏析的

影响进行了研究, 通过现场试验研究了结晶器电磁搅拌频率、拉速、过热度及二次冷却强度对 82B 钢铸坯中心碳偏析的影响, 确定了现行生产要求和现有设备下的最佳工艺参数。

### 1 试验方法

82B 钢的生产流程为: 120 t 转炉 → LF 精炼 → 160 mm × 160 mm 小方坯连铸 → 控轧控冷工艺。试验所取的 82B 铸坯化学成分见表 1, 连铸过程基本工艺参数如表 2 所示。

在结晶器电磁搅拌电流不变的情况下, 改变结晶器电磁搅拌频率、过热度及二冷比水量, 进行了一系列的工艺试验。试验过程中针对不同连铸参数从同一流取 2 块 10 ~ 15 mm 小方坯, 对其中一块的横截面进行热酸侵蚀, 观察其低倍组织; 另一块用于铸

表1 试验 SWRH82B 钢成分/%

C	Si	Mn	Cr	P	S
0.81 ~ 0.83	0.21 ~ 0.25	0.73 ~ 0.77	0.25 ~ 0.27	≤0.017	≤0.012

表2 连铸过程基本工艺参数

项目	基本参数
连铸机型	全弧型
机流数	1机6流
铸坯断面/mm <sup>2</sup>	160 × 160
铸机半径/m	9
结晶器长度/m	0.95
拉速/(m · min <sup>-1</sup> )	1.8
二冷比水量/(L · kg <sup>-1</sup> )	0.65
M-EMS 电流/A、频率/Hz	300、4.5

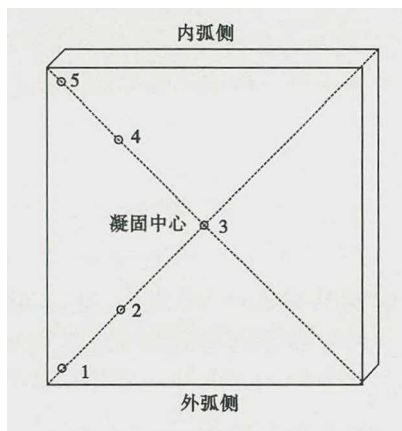


图1 铸坯横截面钻屑位置

Fig.1 Location of drilling samples at cross-section of casting bloom

坯中心碳偏析分析,具体碳偏析检测方法如图1所示,在距边部10 mm处、对角线1/2处以及凝固中心附近,用Φ5 mm的钻头进行钻屑取样,采用碳硫仪检测碳含量以用来确定中心碳偏析指数。中心碳偏析指数的计算式如(1)式所示:

$$C_{\text{index}} = \frac{5C_3}{\sum C_i} \quad (1)$$

式中: $C_{\text{index}}$ -中心碳偏析指数; $C_3$ -图1中3号位置碳含量,即凝固中心位置碳含量; $C_i$ -第*i*个位置的碳含量, $i=1、2、3、4、5$ 。

## 2 生产现状

取正常生产炉次的82B连铸坯对铸坯进行低倍组织与碳偏析分析,分析结果如表3所示。可以看出正常生产情况下铸坯的碳偏析指数为1.11,碳偏析较为严重。铸坯横截面经铣床加工后,进行热酸侵蚀,获取低倍组织,评级结果如表4所示。可以

表3 优化前铸坯中心碳偏析检测结果

试样	边缘碳含量/%	1/2碳含量/%	中心碳含量/%	中心碳偏析指数
No.1	0.82	0.84	0.93	1.11

表4 优化前铸坯低倍评级结果

中心疏松/级	中心偏析/级	缩孔/级
1.5	1~1.5	0.5

看出,中心疏松较为严重,中心偏析控制水平较差,此外还有轻微的缩孔。

连铸坯的中心偏析是选分结晶的结果。钢液凝固时由于选分结晶,C、S、P、Mn等溶质元素在柱状晶形成发展过程中会析出进入到枝晶间未凝固的钢液中,并随着柱状晶向前生长而推进,最终在连铸坯中心富集产生中心偏析缺陷。高碳钢由于其凝固特性,易在铸坯中出现中心偏析缺陷,连铸工艺中影响铸坯内部质量的因素主要有钢水过热度、拉速、二冷水强度、电磁搅拌等,对于不同的设备和现场生产条件,可以通过优化连铸工艺参数来改善铸坯中心偏析缺陷。

## 3 连铸工艺参数优化研究

### 3.1 结晶器电磁搅拌频率对中心碳偏析的影响

结晶器电磁搅拌能使结晶器内钢液产生旋转,加强钢水的对流运动,这种运动改善了结晶器内的传热效率,可以均匀内部钢液的温度分布,有利于消除过热。钢液的这种对流运动同时还可使凝固前沿大量不稳定的树枝晶转移到钢液中,这些树枝晶一部分被重新熔化,一部分形成等轴晶的生长核心沉积到液相穴底部,可以扩大铸坯中心等轴晶区,进而改善铸坯中心疏松和中心偏析。

试验钢厂连铸机配备了结晶器电磁搅拌装置,原始结晶器电磁搅拌(M-EMS)频率为4.5 Hz,考虑到磁场的集肤效应<sup>[2]</sup>,即M-EMS频率越大磁场穿入深度就越小,在保持过热度为26℃、拉速为1.8 m/min、二冷比水量为0.65 L/kg和M-EMS电磁搅拌电流为300 A不变的条件下,将M-EMS电磁搅拌频率分别下调至4.0 Hz和3.5 Hz,探究结晶器电磁搅拌频率对铸坯中心碳偏析的影响,将在此条件下生产的铸坯进行中心碳偏析和低倍组织分析。碳偏析检测结果见图2。

由图2可以看出,随着M-EMS电磁搅拌频率的

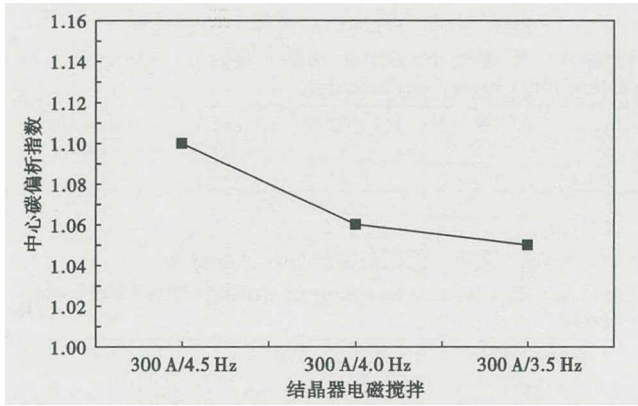


图 2 结晶器电磁搅拌频率对铸坯中心碳偏析指数的影响  
Fig. 2 Effect of M-EMS stirring frequency on center carbon segregation index of casting billet

降低铸坯中心碳偏析指数逐渐下降,当电磁搅拌频率下调至 3.5 Hz 时,中心碳偏析指数降低到 1.05。从理论上讲<sup>[3]</sup>,电磁搅拌频率与电磁搅拌力成正比,增加电磁搅拌频率会提高电磁搅拌力,但由于集肤效应,电磁力增加并不能完全等同于电磁搅拌强度的增加。集肤效应理论给出了集肤层厚度( $\delta$ )的计算式:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}} \quad (2)$$

式中: $\sigma$ - 金属的电导率; $\mu$ - 金属的导磁率。

公式表明,电磁搅拌频率上升,集肤层的厚度会减小,铸坯内部靠近中心位置的电磁搅拌强度降低,不利于中心偏析的改善,这可以很好地解释将电磁搅拌频率从 4.5 Hz 分别下调至 4 Hz 和 3.5 Hz 时,集肤效应减弱,中心碳偏析得到了有效改善。

铸坯低倍的检测结果见表 5。低倍检测结果中所有试样均存在 1.5 级的疏松和 0.5 级的缩孔,随着电磁搅拌频率的降低,中心等轴晶宽度由 80 mm 逐渐增大至 85 mm,中心等轴晶比例有了一定程度的提高。铸坯凝固过程一般希望得到更大比例的中心等轴晶区,中心等轴晶区组织致密,无明显的方向异性,能够很好的阻止溶质元素富集至中心,从而有效的减轻中心碳偏析。相比较而言,电磁搅拌频率为 3.5 Hz 时,无论是中心碳偏析程度还是低倍组织情况,都较其它两个电磁搅拌频率下要更好。

### 3.2 二冷比水量对中心碳偏析的影响

表 5 不同电磁搅拌频率下铸坯的等轴晶区宽度  
Table 5 Equiaxed crystal zone width in cast billet with different M-EMS stirring frequencies

电磁搅拌频率/Hz	中心等轴晶区宽度/mm
正常 4.5	80 左右
电搅 4.0	80 ~ 85
电搅 3.5	85 左右

铸坯质量很大程度上取决于二冷强度,而二冷强度又与二冷比水量有着直接的关系,合理的二次冷却是改善铸坯内部质量的关键。二冷强度较弱,铸坯表面温度会过高,等轴晶区扩大,但晶粒较为粗大,铸坯壳抵抗因钢水静压力引起的鼓肚变形能力减弱,会促进中心偏析的形成和加剧;二冷强度太高,会形成较为致密的柱状晶凝固组织,同样会引起严重的中心偏析<sup>[4]</sup>。

目前现场生产实施的二冷制度中的二冷比水量为 0.65 L/kg,属于弱冷制度。为了探究二冷比水量对 82B 钢中心偏析的影响,确定更为合适的二冷比水量,在保持过热度在 30 °C 左右、拉速为 1.8 m/min、结晶器电磁搅拌参数为 300 A/4.5 Hz 参数不变的条件下,进行了比水量为 0.65、0.75、0.87 L/kg 的试验。图 3 为铸坯中心碳偏析检测结果,表 6 为不同二冷比水量下的中心等轴晶区宽度。

从表 6 中的检测结果来看,提高比水量一定程度上促进了柱状晶的生长,导致等轴晶区宽度略有下降,而铸坯疏松和缩孔情况改变不大。从图 3 中心碳偏析检测结果来看,二冷比水量在 0.65 L/kg 时,中心碳偏析指数在 1.07 左右;比水量提高到 0.75 L/kg 时,中心碳偏析指数降到了 1.04;比水量进一步提高到 0.87 L/kg 时,中心碳偏析指数又升至 1.09。随着二冷比水量的提高,中心碳偏析指数先

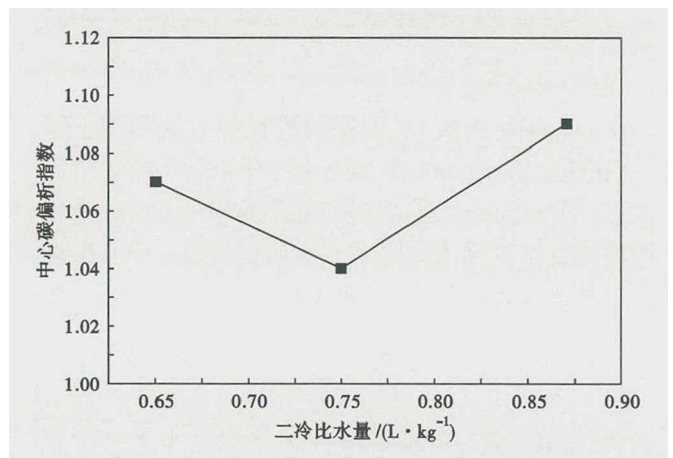


图 3 二冷比水量对铸坯中心碳偏析指数的影响  
Fig. 3 Effect of secondary cooling water ratio on center carbon segregation index of casting billet

表 6 不同二冷比水量下铸坯的等轴晶区宽度  
Table 6 Equiaxed crystal zone width in cast billet with different secondary cooling water ratios

二冷比水量/(L · kg <sup>-1</sup> )	中心等轴晶区宽度/mm
0.65	80 左右
0.75	75 ~ 80
0.87	75 左右

降低后又上升。这是因为增大二冷比水量,会使二次枝晶间距减小<sup>[5]</sup>,形成细密的枝晶结构,阻碍枝晶间残余液相的流动,从而降低中心碳偏析。比水量由0.65 L/kg升至0.75 L/kg时,二次枝晶间距减小对中心碳偏析的改善作用要大于中心等轴晶区比例下降对中心碳偏析的不良影响,因而总体上呈现中心碳偏析下降的趋势;同理,比水量由0.75 L/kg升至0.87 L/kg时等轴晶区二次枝晶间距减小所引起中心碳偏析的下降已不能满足中心等轴晶区比例下降造成中心碳偏析的增大程度,因而中心碳偏析又回升到1.09。可见在当前的连铸工艺条件下,0.75 L/kg的二冷比水量是较为合适的。

### 3.3 拉速对中心碳偏析的影响

拉坯速度对浇注的质量有着重要的影响,同时也是决定连铸机的生产能力的一个重要工艺参数。钢厂目前拉速为1.8 m/min,从提高生产率的角度出发,希望能够适当提高拉速,为此进行了拉速为1.9 m/min的提拉速试验。保持过热度在32℃左右,二冷比水量为0.75 L/kg,结晶器电磁搅拌参数为400 A/4.5 Hz,将拉速从1.8 m/min提高到1.9 m/min,探究拉速对铸坯中心碳偏析的影响。图4为不同拉速下中心碳偏析结果。

在其他工艺条件相同的情况下提高拉速后,铸坯中疏松由1.5级上升到2级,缩孔也从0.5级升至1级,均有所恶化,同时铸坯中心碳偏析指数明显增大,由1.04上升到了1.09左右,铸坯中心碳偏析有明显恶化的趋势。这是因为,对于断面和成分确定的铸坯来说,在相同的工艺条件下,拉速增大会减少钢液在结晶器内的停留时间,增加转移钢液过热量所需的时间,延缓中心等轴晶的生成,促进柱状晶发展和加剧轴向偏析,拉速增加同时会增大液相穴

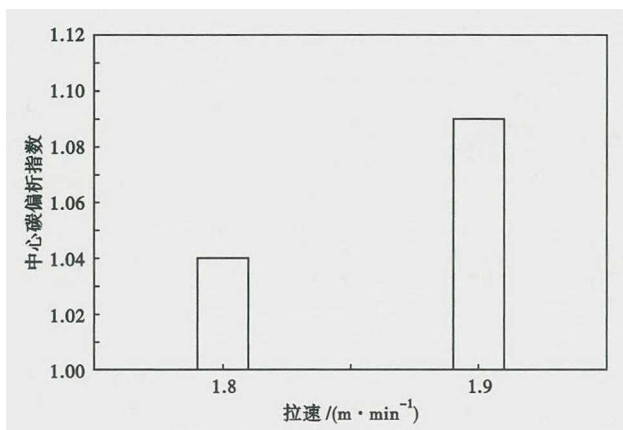


图4 拉速对铸坯中心碳偏析指数的影响

Fig. 4 Effect of casting speed on center carbon segregation of casting billet

深度,促进凝固桥的形成,从而加剧中心偏析程度。

### 3.4 提高拉速的合理配水量研究

前述研究已经表明,将拉速由1.8 m/min提高到1.9 m/min后,在其他工艺相同的情况下,铸坯中心碳偏析明显恶化。考虑到炼钢到连铸流程工艺的稳定性,希望通过调整二冷配水,适当提高二冷比水量来改善1.9 m/min拉速下的中心碳偏析。在保持拉速为1.9 m/min,过热度为32℃左右,结晶器电磁搅拌参数为300 A/4.5 Hz的条件下将二冷比水量分别提高到0.80 L/kg和0.85 L/kg进行二冷配水试验。图5为中心碳偏析结果。

从图5中可以看出,0.80 L/kg和0.85 L/kg二冷配水下铸坯中心碳偏析指数基本相同,约为1.02,较0.75 L/kg配水下中心偏析指数(1.09)有显著的改善,铸坯低倍组织(疏松1.0级、缩孔0~0.5级)同样较0.75 L/kg时(疏松2.0级、缩孔1.0级)有明显好转。这与之前所研究的二冷配水对铸坯中心碳偏析影响结果相吻合,即适当增大二冷强度,钢液的凝固速度增大,溶质元素的析出和扩散减少。树枝晶组织细小致密化,阻碍了枝晶间溶质向中心的富集,从而减轻了中心偏析<sup>[6]</sup>。

为确保拉速为1.9 m/min时,0.8 L/kg二冷比水量的合理性和稳定性,对拉速为1.9 m/min时,0.8 L/kg二冷配水量试验条件进行扩大试验研究。受限于现场操作,试验过程过热度在20~30℃波动,保持拉速为1.9 m/min,0.8 L/kg二冷比水量,结晶器电磁搅拌参数为300 A/4.5 Hz。铸坯中心碳偏析结果见图6。

从图6中可以看出,过热度在20~30℃时,在其他工艺条件相同的情况下,随着过热度的增大,中

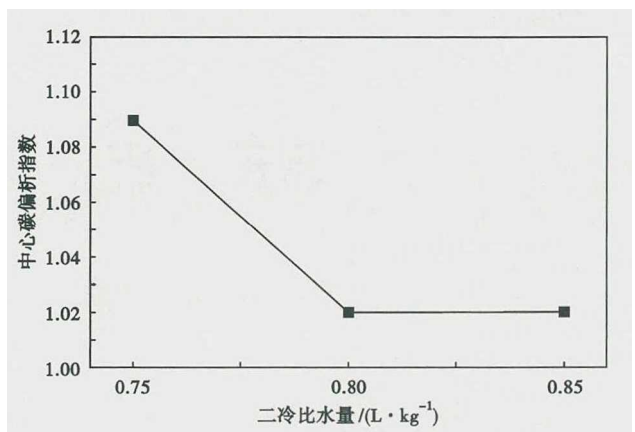


图5 拉速为1.9 m/min二冷配水量对铸坯中心碳偏析指数的影响

Fig. 5 Effect of secondary cooling water ratio on center carbon segregation index of casting billet with casting speed 1.9 m/min

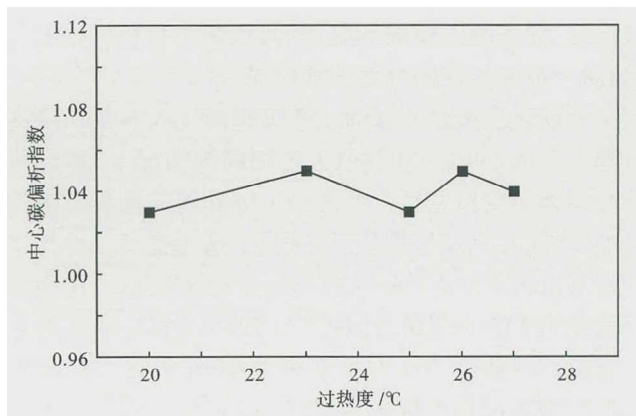


图 6 过热度对铸坯中心碳偏析指数的影响

Fig. 6 Effect of superheat on center carbon segregation index of casting billet

心碳偏析指数在 1.04 上下波动,并没有呈现逐渐增大的趋势,这与张广军<sup>[7]</sup>和张玉海<sup>[8]</sup>等人的试验结论相吻合:当过热度处于 20 ~ 30 °C 时,过热度不再是影响铸坯中心偏析的主要因素,将过热度控制在 20 ~ 30 °C 能够满足正常生产需求,且铸坯中心碳偏析指数基本满足质量要求。这表明拉速为 1.9 m/min 时,0.80 L/kg 的二冷比水量是非常适合的。

#### 4 结论

(1)适当降低结晶器电磁搅拌频率有利于改善 82B 钢连铸小方坯中心碳偏析,结晶器电磁搅拌电流 300 A、搅拌频率 3.5 Hz 时,铸坯中心碳偏析指数最小。

(2)提高二冷比水量有利于改善中心碳偏析,

但二冷比水量过高也会加剧偏析程度。当拉速为 1.8 m/min 时,二冷比水量为 0.75 L/kg 较为合适;当拉速提升到 1.9 m/min 时,二冷比水量为 0.80 L/kg 较为合适。

(3)当过热度在 20 ~ 30 °C 时,过热度对铸坯中心碳偏析的影响不大。

#### 参考文献

[1] 桂美文,覃之光. 82B 高碳钢连铸坯中心偏析及线材质量的改善[J]. 炼钢,2005,21(3): 1-4.

[2] 王 韬,陈伟庆,王宏斌,等. 连铸参数和末端电磁搅拌对 82B 钢小方坯中心碳偏析的影响[J]. 特殊钢,2013,34(1): 49-51.

[3] 韩至成. 电磁冶金技术及装备[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.

[4] 王琳松,龙 雨,郑家良,等. 高碳钢铸坯缺陷分析[C]//纪念全国金属制品信息网建网 40 周年暨 2014 金属制品行业技术信息交流会论文集. 2014.

[5] 冯 军,陈伟庆,韩 静,等. 连铸参数对高碳钢小方坯二次枝晶间距的影响[J]. 钢铁,2006,41(9): 37-39.

[6] 周青峰,王敏花,马建超,等. SWRH82B 小方坯中心偏析的改善[J]. 上海金属,2014,36(1): 48-50.

[7] 张广军,张旭东,张劲峰,等. 连铸工艺对铸坯碳偏析的影响[J]. 连铸,2010(3): 43-46.

[8] 张玉海. 连铸工艺对铸坯碳偏析的影响[A]. 中国金属学会炼钢分会. 第十七届(2013 年)全国炼钢学术会议论文集(B 卷)[C]. 中国金属学会炼钢分会:2013:5.

童为硕(1994-),男,硕士生(北京科技大学),2016 年辽宁科技大学(本科)毕业,高碳钢连铸凝固质量研究。  
E-mail:s20161312@xs.ustb.edu.cn

收稿日期:2018-02-28

=====

### “讲文明树新风”公益广告

