

# ZG20CrNiMoRE 牙轮钻头躯体丝扣断裂失效分析

匡毅, 王新华, 邵抗振, 崔永磊

(郑州机械研究所有限公司, 河南郑州 450001)

**摘要:** 对失效的ZG20CrNiMoRE牙轮钻头躯体进行了化学成分、力学性能、微观断口、EDS能谱和气体含量的检测分析。结果表明: 牙轮躯体N含量、残余Al元素偏高, 导致晶界AlN含量偏高, 致使部分晶粒粗化, 出现混晶现象, 从而发生丝扣断裂, 基于这个原因提出相应解决措施。

**关键词:** 牙轮钻头躯体; 失效分析; AlN; 混晶

牙轮钻头是石油钻井的重要工具<sup>[1]</sup>, 其性能的好坏将直接影响钻井质量、钻井效率和钻井成本。牙轮钻头躯体是携带钻头的载体, 钻头在各种地质条件下转动时躯体会受到高频冲击和剪切的作用力, 因此对躯体的力学性能要求很高, 尤其是要有良好的塑韧性。以往大部分牙轮钻头躯体是采用锻件铣削加工而成, 其工序复杂, 成本很高。如今在激烈的市场竞争下, 在一些载荷不高、受冲击较小的工况下, 相对成本较低的铸造牙轮钻头躯体就应运而生。然而, 近期我们在小批量躯体铸造件试制过程中, 遇到“丝扣处出现裂纹”的现象, 导致牙轮钻头失效的问题, 这也给此类零件“以铸代锻”的设计思路蒙上了一层“阴影”。因此, 针对牙轮钻头丝扣断裂的问题, 笔者从多个角度出发, 对失效零件进行分析, 提出应对措施。

## 1 问题描述

某型号的钻头(图1a)在使用扭矩扳手预紧时(加载力10 kN), 丝扣螺纹发生断裂, 图1b为丝扣断裂剖面。断裂位置在大端螺纹倒数第2~3扣处出现, 并延伸到整个圆周。断口宏观形貌见图1c, 可以看出断口呈脆性断口特征, 无明显塑性变形, 断面存在光滑发亮小平面, 结晶面呈冰糖状。

## 2 生产过程

牙轮钻头躯体零件如图2所示。为了保证钻头体的致密度, 在躯体丝扣处增加壁厚为40 mm的工艺补贴, 保证铸件实现顺序凝固。冒口在丝扣凸台上部(如图3), 内孔尺寸砂芯直径60 mm, 采用水玻璃砂型铸造工艺, 砂芯采用树脂铬矿砂, 造型时一箱一件。合金成分牌号为ZG20CrNiMoRE(见表1), 浇注温度1 560 ℃, 熔炼时插铝脱氧两次, 炉中一次0.05%, 包中一次0.05%, 合计加入铝量为0.1%, 0.2%的稀土硅铁冲包加入。工件重量220 kg, 工艺重量390 kg。牙轮钻头体铸件CAE分析如图4所示。从铸造工艺CAE图4中可以看到, 丝扣下部(钻头躯体脖颈处)散热条件较差, 在这种砂型工艺条件下凸台脖颈处形成较大热节, 导致凝固时间较长, 这也使得丝扣凸台处原始铸态组织晶粒粗大。客户用圆环试样(图5)代替实际工件做等效工件试验, 用于过程管理控制。热处理工艺采用930 ℃正火加调质(870 ℃淬火, PAG淬火液, 590 ℃回火), 圆环试样和钻头体均采用该工艺进行了热处理, 将失效

作者简介:

匡毅(1978-), 男, 硕士, 主要从事耐磨材料的生产及其工业生产中的应用研究。E-mail: ky9812@126.com

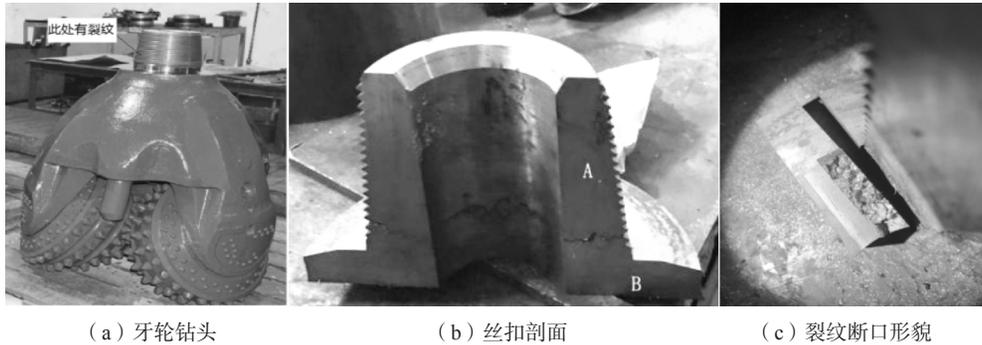
中图分类号: TG142.41

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)11-1185-07

收稿日期:

2020-05-15 收到初稿,  
2020-06-22 收到修订稿。



(a) 牙轮钻头 (b) 丝扣剖面 (c) 裂纹断口形貌

图1 牙轮钻头及其丝扣剖面与裂纹断口形貌

Fig. 1 Section and fracture morphology of cone bit body and its screw thread

钻头体和圆环试样进行多方面对比试验，分析钻头驱体失效原因。

### 3 失效工件分析

#### 3.1 化学成分分析

对裂纹钻头（编号a）、圆环试样（编号b）和非同炉本体解剖试样（与裂纹钻头a不是同炉浇注，编号c）用光谱仪进行化学分析，结果见表1。化学成分基本在允许范围内，但对残余Al元素的检测结果发现，b样残余Al量0.05%；c样0.06%；a样中Al含量达到0.13%，此含量异常高，超出平常控制的炉后标准。

#### 3.2 金相组织分析

各试样金相分析结果见图6，金相组织显示都是回火索氏体。从晶粒度的角度来看，圆环试样b样晶粒细小均匀，可以达到7~8级。图8中a为断裂钻头裂纹附近金相组织，可以看出裂纹周围未见脱碳（a黑色区域为裂纹区），晶粒大小不均匀，在裂纹附近出现混晶，大的晶粒在4级，小的晶粒在8~9级，视场中出现较多4级左右的大晶粒。非同炉c样的“混晶”问题比较突出，4级左右的大晶粒甚至能达到视场的30%。总之，a样与c样都有相当程度的“混晶”现象。

#### 3.3 力学性能分析

从力学性能检测表2中可以看出，圆环试样b的力学性能都在合格范围内。发生断裂的钻头a样塑性指标很差，伸长率0.5%，冲击韧性值在11.7~28.1 J·cm<sup>-2</sup>；经重新调质处理后的a1样，伸长率达到5%与断面收缩率16%稍有提升，冲击韧性值达到44~92 J·cm<sup>-2</sup>，冲击值有所提高，但波动较大。非同一炉c样，伸长率在9.5%左右，冲击韧性值在37.6~73.7 J·cm<sup>-2</sup>，塑性指标与b样相比有较大差距，笔者认为这与“混晶”有关<sup>[2-6]</sup>。在调质时，新形成的奥氏体晶粒继承和恢复原始粗大铸态的奥氏体晶粒，这些粗大的晶粒导致了力学性能的不稳定，表现为冲击性能波动较大。a样经过再次调

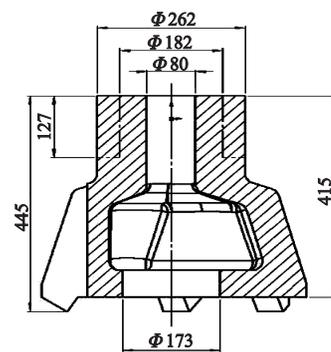


图2 钻头躯体简图

Fig. 2 Cone bit body diagram

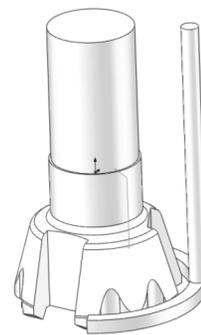


图3 铸造工艺图

Fig. 3 Casting process diagram

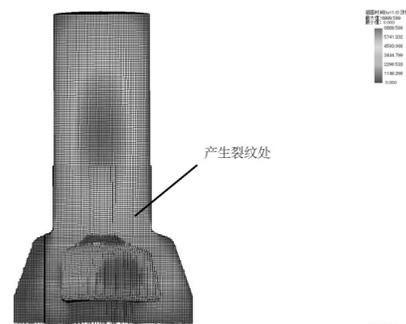


图4 铸造工艺CAE图

Fig. 4 Casting process CAE drawing

质性能有所改善,这是因为多次低温热处理有细化晶粒的作用,但不能完全消除粗大晶粒。

从宏观断口图7可以看出,a样断口由多个光滑面组成,发亮,无纤维区和剪切唇,几乎没有塑形变形的痕迹。性能比较好的圆环冲击试样b则有明显的剪切唇,断口没有发亮区域。

为更准确分析断口,我们对a与b试样进行了SEM扫描电镜和EDS能谱分析。从SEM扫描电镜照片可以看出,b样断口为韧性断裂,部分韧窝底部有第二相粒子存在。a样断口在低倍下呈20 μm宽的“层状断崖”解理台阶(图8a,图8c,图8d)形貌,将这些“层状断崖”组织高倍观察后发现内部呈羽毛状,这些形貌特征与手册<sup>[7]</sup>显示的AlN特征类似。

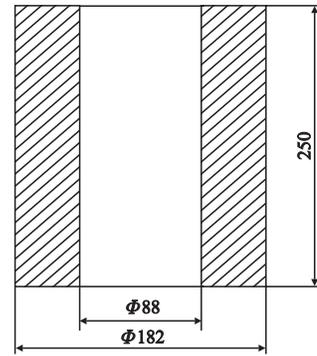


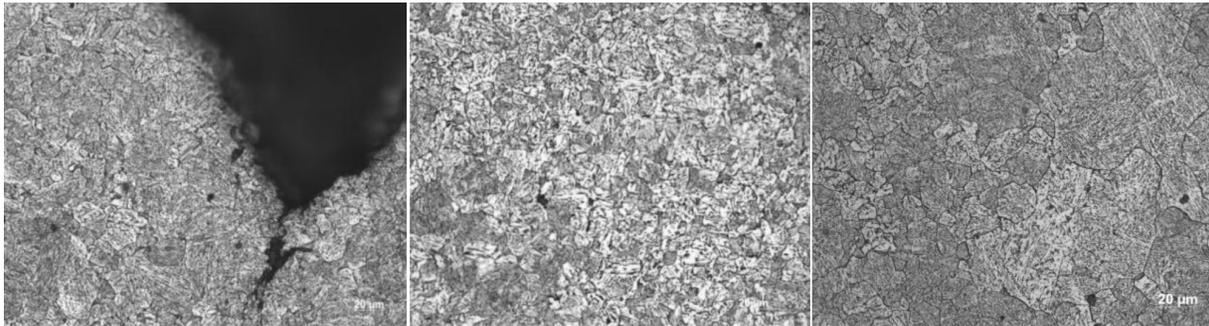
图5 圆环试样尺寸图

Fig. 5 Ring specimen

表1 各试样化学成分分析结果

Table 1 Chemical composition analysis results of each sample

项目	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	$w_B$ /%
标准要求	0.17~0.21	0.17~0.37	0.60~0.95	≤0.025	≤0.025	0.90~1.10	0.60~0.90	0.25~0.35	≤0.20	≤0.08	
a	0.18	0.38	0.81	0.018	0.018	0.95	0.63	0.28	0.01	0.13	
b	0.19	0.27	0.85	0.014	0.009	0.92	0.65	0.28	0.01	0.05	
c	0.18	0.34	0.73	0.023	0.015	1.04	0.72	0.32	0.01	0.06	



(a) a样裂纹处金相

(b) b圆环试样金相

(c) c样

图6 金相图

Fig. 6 Microstructure of samples

表2 力学性能检测结果

Table 2 Testing results of mechanical properties of each sample

编号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	断面收缩/%	冲击韧性/(J·cm <sup>-2</sup> )	硬度HRC	备注
技术标准	720	610	10	30	46	26~34	注
a	838		0.5		17.2, 11.7	28~30	A处(见图1b)
a					28.1, 13.3		B处(见图1b)
a1	799	738	5	16	92.6, 66.2	25~26	A处(见图1b)
a1					59.3, 44.7		B处(见图1b)
b	807	711	15	50	105, 108, 121	25~27	圆环试样
b	822	724	11	44	116, 116, 121	24~26	圆环试样
c	950	875	10.5	39	73.7, 37.6	29~32	二分之一处
c	931	844	9.5	21	57, 46.3		靠外圆处

注:试样a1为重新调质处理试样。

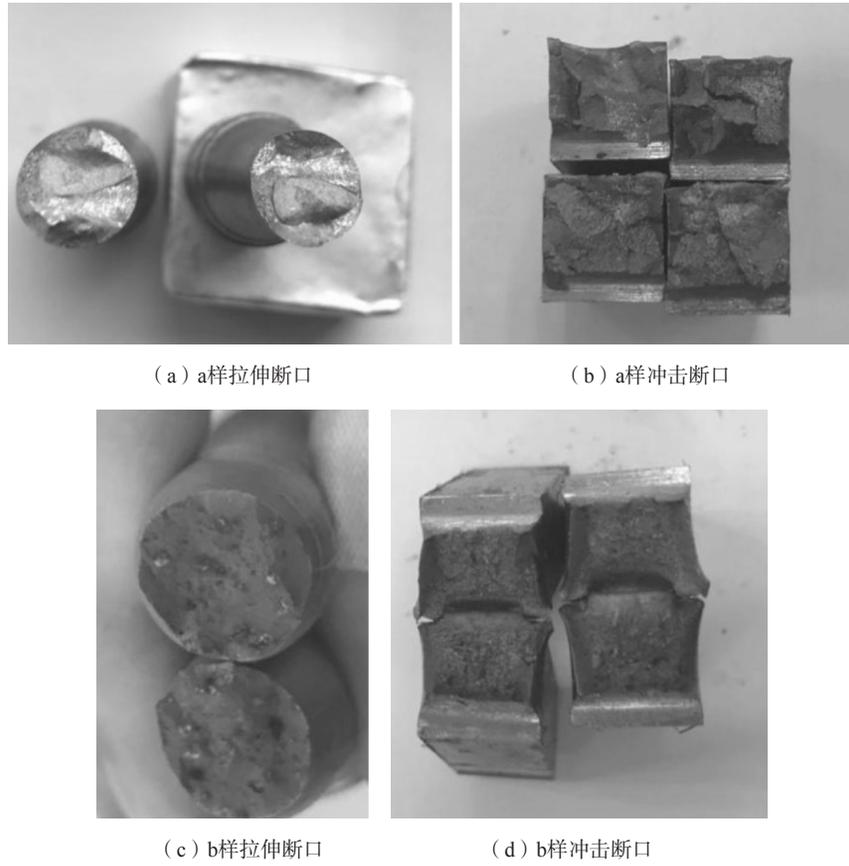
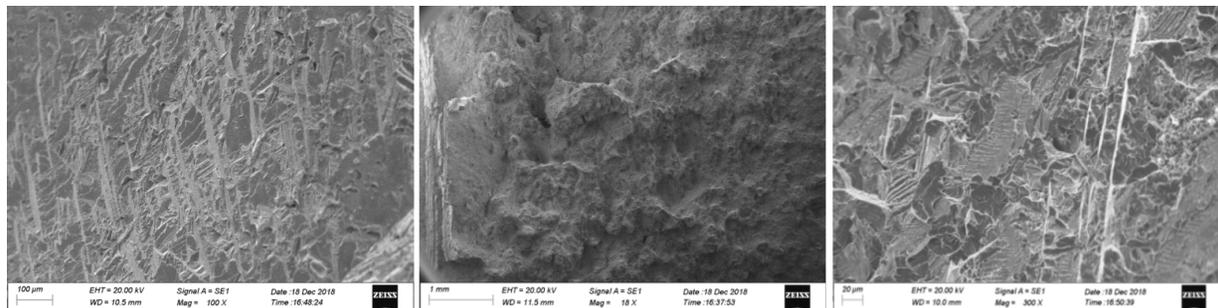


图7 断口形貌

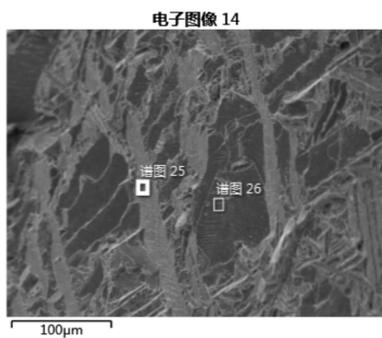
Fig. 7 Macroscopic fracture morphologies of tensile and impact samples



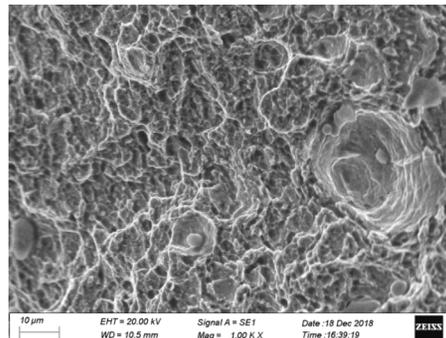
(a) a试样SEM低倍断口

(b) b试样低倍SEM断口

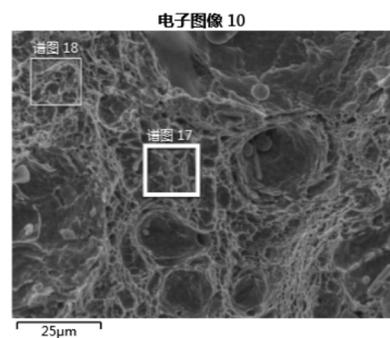
(c) a试样SEM高倍断口



(d) a试样EDS测试点



(e) b试样SEM高倍断口



(f) b试样EDS测试点

图8 SEM断口形貌与EDS能谱测试图

Fig. 8 SEM fracture morphology and EDS spectroscopy

EDS能谱分析结果见表3。a样断口的解理台阶(25)上的Al和N含量明显高于其他部位, b样在韧窝处EDS检测Al、N含量较低未检测出(17, 18)。为了进一步验证成分差异, 我们又分别对a和b样进行了氧氮氢气体含量测试, 见表4。分析结果表明, a样中N含量明显高于b样。

综合上述分析, 推断a样断口解理台阶处有大量AIN聚集长大析出。

### 3.4 讨论

根据金属学的强度理论, 晶粒粗大导致强度与塑性均降低, 特别是混晶一旦产生, 会对材料的冲击韧性造成损害<sup>[8-9]</sup>。对于低合金钢本质晶粒度的控制基本上是对AIN析出相的数量、大小以及分布情况进行控制<sup>[10-15]</sup>, 从而能够有效控制奥氏体本质晶粒度以避免混晶的产生。

通过计算AIN析出相的析出热力学, 研究了不同时间第二相粒子AIN的析出情况(图9)。从分析结果来看, 钢液中的氮含量较低, 形成的AIN较少, 在加铝制度不严的情况下, 残Al量过多, 即使Al含量达到0.013 5%, 工件也不会出现脆性断口。图9a样中Al

高N高(图9a, Al0.13%, N0.013%), 形成的AIN最高含量为0.038%; b样中Al低N低的条件下(图9b, Al0.03%, N0.007%), 形成AIN的最高含量仅为0.021%。从热力学计算得知, 在一般铸造冶炼条件下

表3 EDS能谱分析表  
Table 3 EDS spectrum analysis table

解理台阶	C	N	O	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
25	10.04	5.14	1.27	4.11	0.53	1.13	0.77	76.37	0.63
26	9.19			0.57	0.53	1.04	0.61	88.06	
17	5.92				0.27	0.98	0.89	91.35	0.59
18	7.58				0.29	1.02	0.88	89.54	0.68

表4 氧氮氢检测结果  
Table 4 Testing results of oxy-nitrogen and hydrogen content

编号	O/( $\times 10^{-6}$ )	N/( $\times 10^{-6}$ )	H/( $\times 10^{-6}$ )
a	1-1	25.8	131.0
	1-2	29.0	138.0
b	3-1	43.3	78.0
	3-2	42.6	74.4

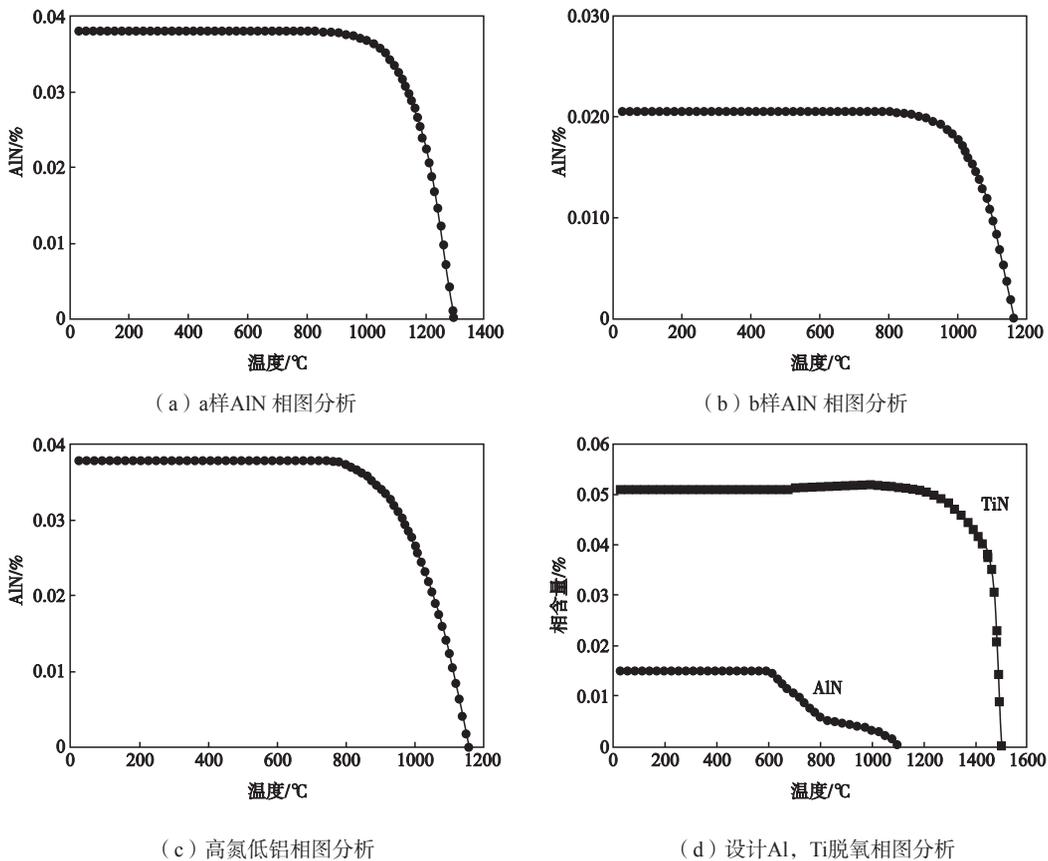


图9 相图分析

Fig. 9 Phase diagram analysis

(Al含量范围0.030%~0.008%), AlN的含量基本是由钢液里的N含量来决定的,比如高N低Al的样中也会形成0.038%的AlN(图9c, Al0.03%, N0.013%)。若要减少AlN,也可以通过加入微量Ti(0.04%Ti,图9d),这样可以利用Ti在更高的温度下与N结合形成TiN,剩下很少N与Al的参与反应生成少量AlN(0.015%)。但值得注意的是,所形成的TiN也有可能形成在晶界上,它也会削弱晶界强度。因此,控制钢液中的氮含量至关重要,对于一些塑性指标要求高,比如在低温条件下使用的铸件,要更加注意氮的含量。控制氮的难度比较大,降氮重要的是降低炉料中的氮含量,少加废钢,采用低氮增碳剂、低氮Ca-Si合金、低氮铁合金及其低氮优质原材料。同时,在熔炼过程中钢液表面覆盖好保护剂减少与大气的接触时间等。总之,高品质铸件不仅要控制残余Al,还需要通过上述方法降低钢液中的氮含量。

在上述断口分析过程中,我们推断丝扣断裂是由于大量聚集长大的AlN造成的。一般认为,AlN在晶界上富集析出,可降低晶界强度。在钢制品中,若残余铝太多,容易产生杆状晶断口(亦称无光泽小棱面断口或贝壳状断口),恶化塑性和韧性。Al在钢液中不仅作为有效的脱氧剂,而且还与钢液中的N结合形成AlN;当AlN粒子的尺寸小于临界尺寸且弥散度较高时,才能起到钉扎晶界的作用<sup>[16]</sup>。一般残余Al控制量在0.03%~0.08%。至于实际过程中AlN能不能析出,怎么析出,对AlN析出的数量、大小及分布问题的讨论还

要考虑动力学条件。牙轮钻头躯体铸件在其圆周外部增设补贴,上部有厚大冒口,使得整个凸台凝固时间较长,导致合金成分偏析严重,铸件凝固时间延长,这为AlN粒子迅速长大创造了动力学条件。这种大尺寸AlN无法钉扎晶界,因此在厚大部位容易出现晶粒粗大现象。

文献[16]中提到高温加热可以消除大量AlN的影响,在1 250℃左右加热铸件,可以用来挽救AlN含量高的铸件,这与相图(图9a、图9b)分析有些不同。Al与N的含量不同,AlN固溶温度也有所不同,加热温度应控制在1 150~1 290℃这一范围,而不是在1 250℃这一固定温度下。因此,AlN含量高的铸件可根据Al和N的含量,借助热力学相图,制定合适的加热温度,来挽救铸件。

## 4 结论

(1) ZG20CrNiMoRE牙轮钻头躯体断裂失效主要原因是钢液中含氮量与残余Al偏高,在断口解理台阶处形成大量的大颗粒AlN,这种大尺寸AlN无法钉扎晶界,由此形成的“混晶”在后续热处理中未有效改善,使得铸件冲击性能变差。

(2) 对于高品质铸件,控制残余Al及N含量是质量控制的一个重要环节。

(3) 通过高温热处理固溶AlN颗粒,使其在后续调质热处理期间均匀弥散析出,可以达到细化晶粒度,消除或减轻“混晶”的目的。

### 参考文献:

- [1] 张祥. 基于磨损理论的牙轮钻头材料与结构优化研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
- [2] 孙后金, 张永安, 张三平. 22CrMoH齿轮钢奥氏体晶粒度影响因素及混晶原因分析 [J]. 山东冶金, 2019, 41(6): 29-31.
- [3] 徐晓文, 刘亮, 湘钢, 等. ML40Cr钢线材表面混晶原因分析及控制 [J]. 山东冶金, 2019, 41(6): 24-25.
- [4] 王月乔, 李其. 缓慢加热条件下2.25Cr1Mo0.25V钢晶粒细化工艺研究 [J]. 大型铸锻件, 2018(6): 26-29.
- [5] 温玉磊, 杨后雷, 王菲, 等. PCrNi3MoV钢奥氏体晶粒细化工艺 [J]. 金属热处理, 2019, 44(9): 212-215.
- [6] 叶玉娟, 高全德. 30CrNi3MoVA钢的晶粒细化及组织均匀化研究 [J]. 锻压技术, 2019(5): 169-173.
- [7] 姜锡山, 赵晗. 钢铁显微断口速查手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 425-428.
- [8] 宫庆丰, 王丽萍, 冯义成, 等. Al含量对E级钢力学性能及断口形态的影响 [J]. 金属热处理, 2016, 41(5): 62-66.
- [9] 郭秀辉, 杜传治, 李超, 等. 提高特厚规格Q275D热轧H型钢冲击性能的研究 [J]. 钢铁研究, 2017, 45(3): 44-46.
- [10] 刘阳春, 傅杰, 吴华杰, 等. 低碳铝镇静钢中AlN的沉淀析出 [J]. 钢铁研究学报, 2009, 21(6): 20-23.

- [11] RADIS R, KOZESCHNIK E. Kinetics of AlN precipitation in microalloyed steel [J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2010, 18 ( 5 ) : 1-16.
- [12] 格兰德曼 T, 李凤珍. 铝对晶粒尺寸的控制 [J]. 黑龙江冶金, 1995, 6 ( 3 ) : 45-47.
- [13] SENNOUR M, ESNOUF C. Contribution of advanced microscopy techniques to nano-precipitates characterization: case of AlN precipitation in low-carbon steel [J]. Acta Materialia, 2003, 51: 943-957.
- [14] USHIODA K, SUZUKI H G, KOMATSU H, et al. Influence of sulfur on AlN precipitation during cooling after solidification and resulting hot shortness in low carbon steel [J]. J. Japan Inst. Metals, 1995, 59 ( 4 ) : 369-381.
- [15] 职任涛, 刘昌其, 屠欢, 等. 钢中奥氏体的粗化 [J]. 特殊钢, 1982 ( 6 ) : 36-56.
- [16] 涂伯敏, 孙象明, 袁羽, 等. 35SiMn铸钢贝壳状断口形成原因及消除途径 [J]. 石油矿场机械, 1998 ( 1 ) : 46-49.

---

## Failure Analysis for Thread Fracture of ZG20CrNiMoRE Cone Bit Body

KUANG Yi, WANG Xin-hua, SHAO Kang-zhen, CUI Yong-lei

( Zhengzhou Research Institute of Mechanical Engineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, Henan, China )

### Abstract:

The chemical composition, mechanical properties, micro fracture, EDS spectrum and gas content of the failed body of ZG20 CrNiMoRE cone bit were analyzed. The results show that the content of N and residual Al in the cone bit body was high, and the high content of AlN was found at the grain boundary. This caused the coarsening of some grains and the phenomenon of mixed crystal, and finally led to the screw thread fracture. Based on this reason, the corresponding solutions are proposed.

### Key words:

cone bit body; failure analysis; AlN; mixed crystal

---