S含量对18CrNiMo7-6齿轮钢中夹杂物和疲劳性能的影响

尉文超，谢地荣，时　捷，王毛球
（钢铁研究总院有限公司特殊钢研究院，北京 100081）

摘　要：以w[S]为0.002%（低S含量）和0.022%（高S含量）的两种18CrNiMo7-6齿轮钢为研究对象，参照齿轮热处理工艺获得伪渗碳试样，并对其力学性能、显微组织、疲劳性能和夹杂物分布进行了分析表征。结果表明，两种齿轮钢的强度基本相当，而高S含量试验钢具有更好的塑性和低温冲击韧性，并且其疲劳极限、疲劳寿命均优于低S含量试验钢，疲强比由0.445提高到0.479。S含量显著影响钢中的夹杂物分布情况：低S含量试验钢中夹杂物以MnS-Oxide为主，数量较少，同时尺寸更大；而高S含量试验钢夹杂物以CaS-MnS-Oxide复合型夹杂物为主，数量提高1倍以上，但尺寸更为细小。高S含量试验钢采用Ca处理工艺对夹杂物进行改性，夹杂物尺寸明显细化，有利于钢的塑韧性提升，并改善疲劳性能。

关键词：18CrNiMo7-6齿轮钢；力学性能；疲劳性能；非金属夹杂物；硫含量
DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00091　　**中图分类号：**TF142.3

Influence of Sulfur Content on Inclusion and Fatigue Properties of 18CrNiMo7-6 Gear Steels

Yu Wenchao, Xie Dirong, Shi Jie, Wang Maoqiu
(Institute of Special Steels, Central Iron and Steel Research Institute Co.,Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: In this paper, two kinds of 18CrNiMo7-6 gear steels with sulfur content of 0.002% (low sulfur content) and 0.022% (high sulfur content) were studied. Pseudo-carburizing samples were obtained by reference to gear heat treatment process, and the effects of sulfur content on mechanical properties, microstructure, fatigue properties and inclusion distribution of the steels were investigated. The results show that the strength of the two steels is basically similar, while the steel with high sulfur content has better plasticity and low temperature impact toughness. Meanwhile, its fatigue limit and fatigue life are better than those of the low sulfur content steel, the fatigue ratio increases from 0.445 to 0.479. Sulfur content significantly affects the distribution of inclusions in steel, the inclusions in low sulfur content steel are mainly composed of MnS and oxides with less quantity but larger size, while the inclusions in the high sulfur content steel are mainly complex inclusions composed of Cas, MnS and oxides with more than doubled quantity but smaller size. By employing Ca treatment technique, the inclusion size of high sulfur content steel is obviously refined, which favors better mechanical properties and fatigue performance of steel.

Key Words: 18CrNiMo7-6 Gear Steel; Mechanical Properties; Fatigue Properties; Non-metallic Inclusion; Sulfur Content

齿轮是机械传动系统的核心零件，制造过程中需要经历切削、渗碳、磨削等多道工序。在全球节能减排的背景下，提高齿轮钢的切削性能成为齿轮制造行业研究的热点，不仅可以提高齿轮零件的加工精度和生产效率，还可以有效降低生产制造成本和能源消耗[1]。适当添加硫元素是改善钢铁材料切削性能普遍采用的方式，通过S与Mn结合形成MnS夹杂物，可以有效的提高钢的切削性能[2]。然而，钢中较多的MnS在轧制时易形成条带状夹杂物，增加钢的各向异性，影响钢的力学性能和疲劳性能。因此，在实际生产中，通常需要对含硫钢中的硫化物进行改性，例如添加Ca、Mg、Te等元素[3-5]。其中，Ca处理是目前齿轮钢生产中常用的硫化物改性方式，通过形成以Ca-Al-O氧化物为核心的MnS-CaS复合夹杂物，可以抑制条带状夹杂物的形成，降低夹杂物的危害[6]。18CrNiMo7-6钢是欧洲标准的齿轮钢，具有良好的强韧性匹配，广泛应用于高铁、风电等大载荷工况下的大型齿轮零件制造，对其疲劳性能有较高要求[7]。目前，国内使用的18CrNiMo7-6齿轮钢多采用高洁净度冶炼工艺，严格控制钢中的S含量，通常要求低于0.005%，从而降低钢中的夹杂物尺寸和数量，提高疲劳性能。但是较低的S含量

作者简介：尉文超（1988—），男，博士，高级工程师；　E-mail:yuwenchao@nercast.com；　收稿日期：2023-05-25

也导致材料的切削性能降低，不利于齿轮加工制造。关于18CrNiMo7-6齿轮钢易切削化的研究较少，提高S含量对其组织和性能，特别是疲劳性能的影响仍不清楚。因此，本文以不同S含量的两种18CrNiMo7-6钢为研究对象，通过模拟渗碳热处理获得伪渗碳试样，探究S含量对齿轮钢的力学性能、显微组织和疲劳性能的影响规律，并通过夹杂物表征分析其内在机理，对于齿轮钢的“绿色低碳”发展有指导意义。

1 试验材料及方法

试验钢为瑞典OVAKO生产的两种18CrNiMo7-6钢棒，采用电弧炉+LF+VD+模铸工艺冶炼，随后经锻造轧制后得到ϕ110 mm规格的钢棒。其中一种为低S含量材料，S含量为0.002%（简记为C-Q），另一种为高S含量易切削材料，S含量为0.022%（简记为C-S），其他元素含量相近，两种材料的成分见表1。

表1 试验钢的化学成分（质量分数）

Table 1 Chemical composition of experimental steels %

试验钢	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
C-Q	0.20	0.25	0.52	0.008	0.002	1.70	1.45	0.26
C-S	0.19	0.29	0.49	0.006	0.022	1.60	1.44	0.26

钢棒经锻造后获得直径80 mm的试棒，参照齿轮实际生产工艺进行伪渗碳处理，具体工艺如图1所示。随后在试棒的1/2半径处切取试样进行分析。

室温拉伸试验采用ϕ5 mm标准拉伸试样，在WE300B拉伸试验机上进行测试，试验标准为GB/T228.1—2010，平行测试2个试样，结果取均值。冲击试验采用尺寸为10 mm×10 mm×55 mm的V型缺口试样，在JBN-300B型摆锤式冲击试验机进行，试验温度为-40 ℃，试验标准为GB/T 229—2020，平行测试3个试样，结果取均值。

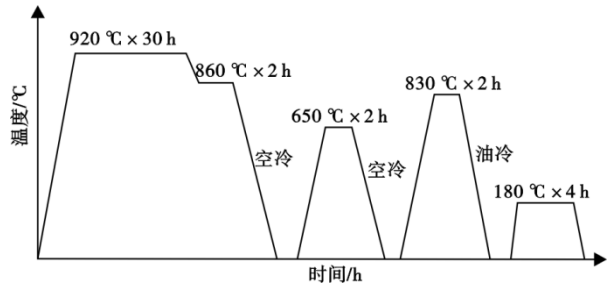

图1 试验钢的热处理工艺

Fig. 1 Heat treatment processes of the experimental steels

切取组织试样经机械研磨抛光后，采用4%体积分数的HNO_3酒精溶液进行浸蚀，浸蚀时间5～10 s，利用Olympus GX51型光学显微镜观察金相组织形貌；同时，试样经研磨抛光后，采用苦味酸活性试剂腐蚀出原奥氏体晶界，利用光学显微镜获得晶粒形貌，并测定平均晶粒尺寸进行晶粒度评级。

切取金相试样，经粗磨、细磨、抛光等工序后，制成可用于分析夹杂物的金相试样，采用Aspex扫描电镜对试样中的非金属夹杂物进行分析，检测视场面积为30 mm^2。

按照标准GB/T 4337—2015进行室温旋转弯曲疲劳试验，设备为国产PQ 1-6型旋弯疲劳试验机，试验机为四点加力，加载频率为5 000 r/min，应力比R=-1，当试样循环加载到10^7次或失效则停止加载。疲劳失效断口经酒精超声清洗后，利用日立S-4300型冷场发射扫描电子显微镜进行断口形貌观察。

2 试验结果与讨论

2.1 力学性能和组织分析

试验钢的力学性能见表2。经过热处理后，低S含量的C-Q钢的抗拉强度达到1 168 MPa，伸长率达到12.5%，同时-40 ℃低温冲击功为36 J；而高S含量的C-S钢抗拉强度为1 120 MPa，较C-Q钢低48 MPa，同时屈服强度也低51 MPa，伸长率则稍高，达到14%，低温冲击韧性则较高，冲击功达到44 J，相比C-Q钢提高20%。两种材料的屈强比分别为0.736和0.721，基本相当。由此可见，较高S含量的C-S钢虽然强度有所降低，但是塑性和冲击韧性均较C-Q钢有所提升。

两种试验钢的金相组织如图2所示。两种试验钢均为马氏体-贝氏体复相组织，而C-Q钢的组织较C-S钢更为细小。为了进一步表征试验钢的组织特

表2 试验钢的力学性能

Table 2 Mechanical properties of the experimental steels

试验钢	R_m/MPa	$R_{p0.2}$/MPa	A/%	Z/%	KV_2(−40 ℃)/J	屈强比($R_{p0.2}$/ R_m)
C-Q	1 168	860	12.5	61	36	0.736
C-S	1 120	808	14.0	60	44	0.721

征,对晶粒度进行了表征,同时利用截点法测量并计算平均晶粒尺寸,其结果见表3。可见C-Q钢的平均晶粒尺寸为7.7 μm,而C-S钢的平均晶粒尺寸为9.3 μm。

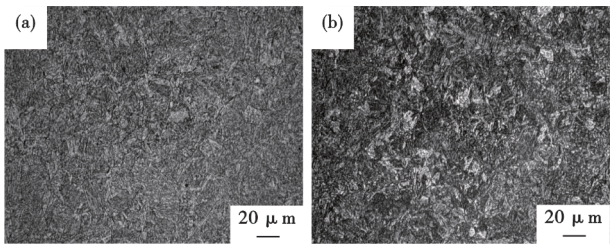

图2　试验钢的金相组织:(a)C-Q钢,(b)C-S钢

Fig. 2　Optical microstructure of the experimental steels : (a) C-Q steel , (b) C-S steel

表3　试验钢的原奥氏体晶粒度

Table 3　Average prior austenite grain sizes and grades of the experimental steels

试验钢	平均晶粒尺寸/μm	晶粒度/级
C-Q	7.7	10.8
C-S	9.3	10.2

2.2　疲劳性能及断口观察

对热处理后的两种试验钢进行旋转弯曲疲劳测试,并绘制S-N曲线,其结果如图3所示。由图3可知,C-Q钢的疲劳极限为520 MPa,而C-S钢的疲劳极限为536 MPa,较C-Q钢有所提高,同时其在高应力下的疲劳寿命也较C-Q钢有所提高。利用疲劳极限与抗拉强度可以计算得到材料的疲强比,其数值是体现材料疲劳性能的重要指标。通过计算可知,C-Q钢的疲强比为0.445,而C-S钢的疲强比达到0.479,可见C-S钢具有更好的疲劳性能。

利用扫描电子显微镜对疲劳试样的断口进行分析,结果见表4。C-Q试验钢断口总计18个,其中源于夹杂物起裂的试样有7个,其余为表面基体起

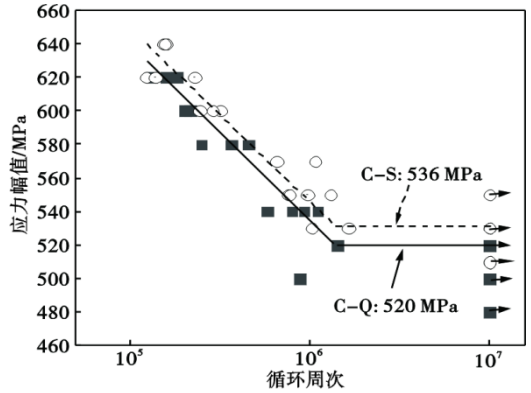

图3　试验钢的旋转弯曲疲劳曲线

Fig. 3　Rotating bending fatigue S-N curves of the experimental steels

裂;C-S试验钢断口总计16个,其中夹杂物起裂试样仅4个,表面基体起裂试样为12个。从断口分析数据可知,C-S钢的夹杂物起裂试样所占比例明显少于C-Q钢。

表4　疲劳断口统计

Table 4　Statistics of types of fatigue crack initiation

试验钢	断口数量/个	夹杂物起裂试样/个	表面基体起裂试样/个
C-Q	18	7	11
C-S	16	4	12

图4所示为两组试验钢的典型疲劳断口形貌,σ_a为加载应力水平、N_f为循环周次。图4(a)和(b)为C-Q试样夹杂物起裂断口形貌,在起裂源处可以看到Al_2O_3型夹杂。图4(c)和(d)为C-S试样表面基体起裂断口形貌,可以看到近表面组织发生明显的塑性变形特征。值得注意的是,在断口形貌分析中发现,所有试样的起裂源位置均发生在表面或近表面,特别是基体起裂试样,有别于传统渗碳试样在渗碳层与基体过渡区起裂。

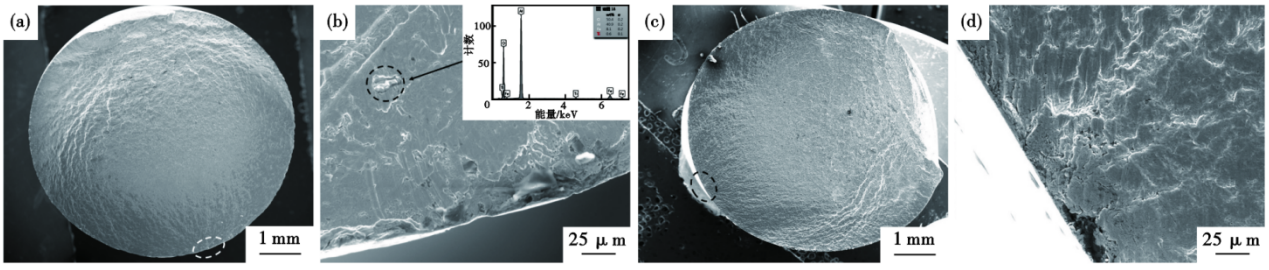

图4　试验钢疲劳断口SEM照片:(a,b)C-Q钢,σ_a=520 MPa,N_f=1.43E06;(c,d)C-S钢,σ_a=530 MPa,N_f=1.02E06

Fig. 4　SEM fractographs of fatigue specimens of the experimental steels : (a , b) C-Q steel , σ_a=520 MPa , N_f=1.43E06 ; (c , d) C-S steel , σ_a=530 MPa , N_f=1.02E06

2.3 夹杂物分析

利用Aspex夹杂物分析仪对两种试验钢的夹杂物进行表征，统计结果见表5。低S含量的C-Q钢中夹杂物较少，数量仅114个，主要为MnS、Oxide及复合型夹杂物。而高S含量的C-S钢中夹杂物数量更多，达到265个，同时，CaS夹杂物和复合型夹杂物数量显著增多。

表5 试验钢中夹杂物统计结果

Table 5 Statistical results of inclusions in experimental steels

夹杂物类型	C-Q钢		C-S钢	
	计数/个	百分比/%	计数/个	百分比/%
Oxide	19	16.7	29	10.9
MnS	19	16.7	33	12.5
MnS-Oxide	74	64.9	10	3.8
MnS-CaS	2	1.7	12	4.5
MnS-CaS-Oxide	–	–	103	39.6
CaS	–	–	49	18.5
CaS-Oxide	–	–	27	10.2
夹杂物总数	114	100	265	100

对夹杂物的尺寸信息进行统计，并绘制夹杂物尺寸分布和长径比分布图，结果如图5所示。由图5(a)可见，C-Q钢中的夹杂物尺寸分布较为均匀，1～3 μm的小尺寸夹杂物仅占32%，7 μm以上的较大尺寸夹杂物则占到21%；而C-S钢中的夹杂物则主要是小尺寸夹杂物，1～3 μm的夹杂物占到了48%，而7 μm以上的较大尺寸夹杂物仅占10%，并且未发现10 μm以上的大尺寸夹杂物。图5(b)为两种试验钢的夹杂物长径比分布图，长径比越小，则夹杂物越接近球形或椭球型，而长径比越大，则夹杂物为更加细长的条状。由此可知，C-Q钢中较大长径比的夹杂物数量较多，而C-S钢中夹杂物多具有较小的长径比。

为进一步分析试验钢中的夹杂物特征，对Aspex分析数据中大于7 μm的大尺寸夹杂物信息进行统计，结果见表6和表7。由表6可知，对于低S含量的C-Q钢，大尺寸夹杂主要是MnS-Al_2O_3复合型夹杂物，第一主元素为Mn或Al元素，最大夹杂物尺寸达到11.5 μm；而对于高S含量的C-S钢，大尺寸夹杂主要是CaS-Al_2O_3-MnS复合型夹杂物，第一主元素则主要是S元素，最大夹杂物尺寸仅为9.7 μm。值得注意的是，C-S钢的夹杂物中Ca元素显著增多，结合表5的统计结果可知，其在冶炼过程中采用了Ca处理工艺[8]。

图6所示为试验钢典型夹杂物形貌，由图6可见，C-Q钢中夹杂物尺寸较大，沿轧制方向变形较小。而C-S钢，其夹杂物沿轧制方向呈细长条状分布，同时发生明显的破碎，表现为单个夹杂物的尺寸较小而数量较多。两者对比则可以发现，C-Q钢的夹杂物尺寸较C-S钢的夹杂物尺寸明显偏大，与Aspex的分析结果一致。

2.4 分析与讨论

齿轮零件通常要求具有较高的表面硬度和良好的心部韧性。针对不同S含量的两种18CrNiMo7-6齿轮钢，采用齿轮实际生产工艺进行伪渗碳处理，模拟大型齿轮的心部组织状态，并进行综合性能分析。两种试验钢经过热处理后均为马氏体-贝氏体复相组织，不仅可以降低淬火变形，同时有利于获得齿轮表面压应力状态，有利于齿轮零件疲劳性能的提升。通过力学性能分析结果可知，试验钢具有良好的强韧性匹配，满足实际生产的性能要求。

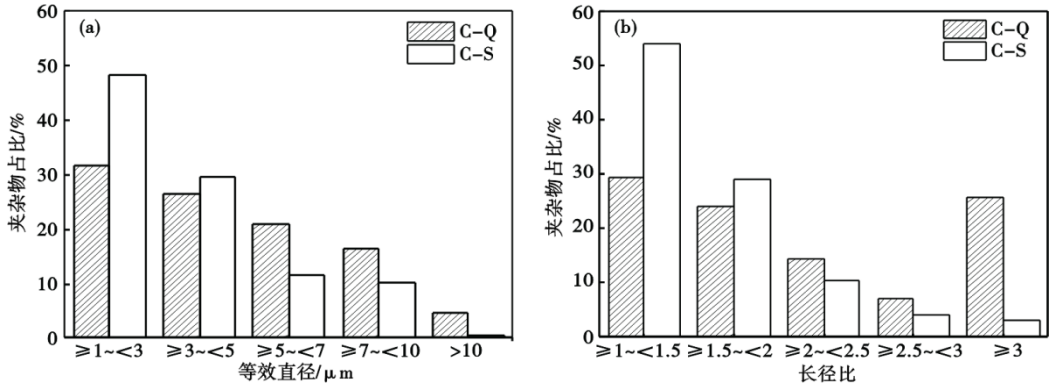

图5 试验钢中夹杂物的等效直径(a)和长径比(b)分布

Fig. 5 Distribution of inclusion equivalent diameter (a) and length-diameter ratio (b) in the experimental steels

表6　C-Q试样中大尺寸夹杂物分析

Table 6　Analysis of large inclusions in C-Q experimental steels

等效尺寸/μm	夹杂物类型	第一主元素		第二主元素		第三主元素		第四主元素	
		元素	占比/%	元素	占比/%	元素	占比/%	元素	占比/%
7.0	MnS - Oxide	Mn	50	S	37	Al	8	Mg	2
7.2	MnS - Oxide	Mn	38	Al	28	S	28	Mg	4
7.3	MnS - Oxide	Al	46	S	16	Mn	14	Mg	13
7.6	MnS - Oxide	Mn	54	S	37	Al	8	Cr	2
7.7	MnS - Oxide - CaS	Mn	41	S	38	Ca	9	Al	7
7.7	MnS - Oxide	Mn	50	S	34	Al	13	Mg	2
8.0	MnS - Oxide	Al	59	Mg	14	Mn	14	S	10
8.1	MnS	Mn	59	S	40	Al	1	-	0
8.5	MnS - Oxide	Mn	49	S	36	Al	10	Cr	3
9.2	MnS - Oxide	Al	34	Mn	30	S	24	Mg	10
9.6	MnS - Oxide	Mn	45	S	31	Al	22	Cr	2
9.9	MnS - Oxide	Mn	53	S	38	Al	6	Mg	2
10.7	MnS - Oxide	Al	46	Mn	18	S	16	Mg	15
10.8	MnS - Oxide	Al	48	Mn	17	S	16	Mg	15
11.5	MnS - Oxide	Mn	42	S	35	Al	11	Mg	4

表7　C-S试样中大尺寸夹杂物分析

Table 7　Analysis of large inclusions in C-S experimental steels

等效尺寸/μm	夹杂物类型	第一主元素		第二主元素		第三主元素		第四主元素	
		元素	占比/%	元素	占比/%	元素	占比/%	元素	占比/%
7.0	CaS-(Al,Mg)O	S	49	Ca	35	Mg	8	Al	4
7.0	MnS-CaS-(Al,Mg)O	S	53	Mg	16	Ca	14	Mn	12
7.1	MnS-CaS-(Al,Mg)O	S	52	Ca	23	Mn	12	Mg	10
7.2	MnS-CaS-(Al,Mg)O	S	52	Ca	23	Mn	12	Mg	10
7.3	CaS-(Al,Mg)O	S	46	Ca	36	Al	6	Mg	6
7.4	CaS-(Al,Mg)O	S	47	Ca	38	Mg	5	Al	4
7.5	CaS-(Al,Mg)O	S	46	Ca	34	Mg	8	Al	7
7.5	CaS	S	50	Ca	44	Mn	2	Mg	2
7.6	CaS-MgO	S	50	Ca	40	Mn	5	Mg	4
7.6	MnS-CaS-(Al,Mg)O	S	52	Mg	16	Mn	12	Ca	11
8.1	MnS-CaS-(Al,Mg)O	S	49	Ca	35	Mg	7	Mn	4
8.9	CaS	S	50	Ca	47	Mg	1	Cr	1
9.7	CaS	S	49	Ca	44	Mg	2	Cr	2

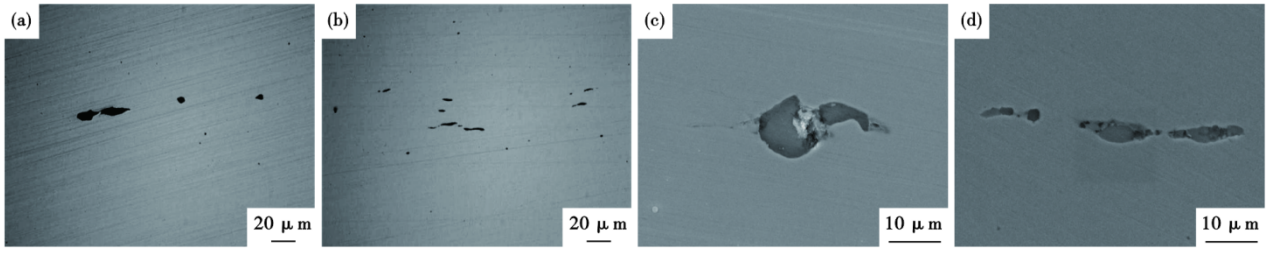

图6　试验钢中夹杂物显微照片:(a,c)C-Q 钢,(b,d)C-S钢

Fig. 6　Optical and SEM micrographs of inclusions in the experimental steels : (a , c) C-Q steel , (b , d) C-S steel

疲劳性能是齿轮服役的关键指标,对于心部组织,弯曲疲劳应力是典型的载荷状态,因此,通常利用旋转弯曲疲劳试验表征材料的疲劳性能。旋转弯曲疲劳试验的加载应力随着距表面距离的增加而减小,对于常规表面硬化型齿轮,由于表面强化后渗碳(氮)层的硬度较高,通常达到700HV左右,

起裂位置通常位于硬化层与基体层的过渡区[9]。而采用伪渗碳试样，试样的表面与心部组织均匀一致，因此，试样表面承受更高的疲劳应力，更易发生疲劳失效。通过疲劳断口分析可知，多数失效试样源于表面的塑性变形。由此可知，表面强度不足是引起试样疲劳失效的主要原因。

研究表明，大尺寸夹杂物对齿轮钢的疲劳性能有显著的影响[10]。低S含量的C-Q钢中的夹杂物多以较大尺寸的MnS-Oxide形式存在，在疲劳加载过程中，容易形成疲劳裂纹源。而较高S含量的C-S钢，由于采用Ca处理工艺，硬质的Al_2O_3型夹杂物转变为Al_2O_3-CaS复合型夹杂，同时钢中的夹杂物尺寸发生明显细化，有效改善了夹杂物引起的疲劳失效风险[11]。通过表4的疲劳断口统计结果可知，C-Q钢由夹杂物引起的疲劳失效更多，而C-S钢则相对减少，这与夹杂物分析结果一致。另一方面，材料的韧性与大尺寸夹杂物密切相关，硬质大尺寸夹杂物在冲击作用下易成为断裂的起裂源[12]。由表2的低温冲击韧性结果可知，C-S钢较C-Q钢的韧性更好，这也与其夹杂物尺寸较为细小密切相关。通过以上分析可知，对于含有较高S含量的易切削齿轮钢，利用Ca处理手段进行夹杂物改性，可以有效降低钢中的夹杂物尺寸，进而获得良好的低温韧性和疲劳性能，对于齿轮加工的绿色化、低成本和高效制造有重要意义。

3 结论

（1）两种试验钢经过伪渗碳热处理后均为马氏体-贝氏体复相组织，力学性能基本相当，而高S含量的试样具有更好的低温冲击韧性，相比低S含量的试样提高20%。

（2）高S含量试验钢的旋转弯曲疲劳强度和疲劳寿命均高于低S含量的试验钢，疲强比达到0.479，断口分析表明疲劳失效主要由表面塑性变形引起，而低S含量的试验钢中夹杂物起裂失效的试样数量更多。

（3）高S含量试验钢中的夹杂物多以CaS-MnS-Oxide复合型夹杂形式存在，且尺寸较为细小；而低S含量试验钢中的夹杂物多以大尺寸MnS-Oxide硬质相形式存在，易形成疲劳裂纹源。因此，夹杂物改性处理是改善高S含量齿轮钢疲劳性能的有效手段。

参考文献

[1] 陈宣宇，曹建春，周晓龙，等. 国内外易切削钢的研究进展及展望[J]. 热加工工艺，2016，45(24)：25-28.

[2] 姜周华，孙　萌，李　阳，等. 汽车用特殊钢中夹杂物控制技术的研究进展[J]. 材料与冶金学报，2019，18(3)：159-168.

[3] 乔晓阳，裴小芳，崔　冕，等. 易切削齿轮钢22CrMoHS的开发[J]. 特殊钢，2020，41(3)：32-34.

[4] 轩康乐，刘栋林，俞　杰，等. 碲处理改善汽车曲轴用非调质钢38MnVS6硫化物形貌的研究[J]. 特殊钢，2022，43(6)：79-82.

[5] 朱浩然，刘年富，周　蕾，等. 镁处理对45钢中夹杂物的改质效果[J]. 特殊钢，2022，43(1)：6-10.

[6] Zhang T，Liu C，Mu H，et al. Inclusion evolution after calcium addition in Al-killed steel with different sulphur content [J]. Ironmaking & Steelmaking，2018，45(5)：447-456.

[7] 王之香，南　海，张锦文. 高铁齿轮用钢18CrNiMo7-6电渣生产工艺实践[J]. 特殊钢，2023，44(3)：29-33.

[8] 田　俊，王德永，屈天鹏，等. 钙、镁在含硫钢中硫化物变性过程中的作用[J]. 钢铁，2017，52(11)：27-31.

[9] Xue Y J，Yan Y M，Yu W C，et al. Microstructure and fatigue properties of 17Cr2Ni2MoVNb gear steel after gas carburizing and low-pressure carburizing [J]. International journal of Fatigue，2023，167：107314.

[10] He X F，Wang M Q，Hu C F，et al. Study of the relationship among total oxygen，inclusions and fatigue properties of gear steel [J]. Materials Science and Engineering：A，2021，827：141999.

[11] 张宏艳，田志红，邵肖静，等. 改质工艺对高强度低合金钢夹杂物特性的影响[J]. 中国冶金，2021，31(2)：31-37.

[12] 郭　帅，朱航宇，韩　赟，等. 夹杂物对钢塑性和韧性的影响研究进展[J]. 钢铁研究学报，2022，34(8)：713-726.