

某舰主齿轮减速器齿轮擦伤技术分析(续)

袁大成

(哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所)

(上接1988年第1期)

四、齿面瞬时接触温度与滑油特征退吸温度

由上述可知,齿面处于弹塑性混合接触状态与微润滑的混合润滑状态,则必须对与擦伤密切相关的齿面温度进行分析,首先对轮齿表面接触温升进行分析,特别是滑动速度较高的啮合始点与啮合终点,齿面接触温升也就是轮齿接触中赫兹宏观面积上的瞬时平均温度,可用L.S.Akin公式计算:

$$T_f = \left(\frac{25.4 \times 2.2}{9.8 \times 1000} \right) \frac{0.024 f w (\sqrt{V_1} - \sqrt{V_2})}{\cos \alpha_s \sqrt{b}} \left(\frac{5}{9} \right) \text{ } ^\circ\text{C}$$

式中 f 为摩擦系数,它可用Camoron公式求得

$$f = \frac{s+22}{35} \cdot \frac{0.6}{\eta_0^{0.116} V_s^{\frac{1}{3}} V_\Sigma^{\frac{1}{6}} \rho^{\frac{1}{2}}} \cdot \left(\frac{25.4}{1000} \right)$$

$$= 0.013895 (V_s^{-\frac{1}{3}} \cdot V_\Sigma^{-\frac{1}{6}} \cdot \rho^{-\frac{1}{2}})$$

式中 $V_s = V_1 - V_2$, $V_\Sigma = V_1 + V_2$, $b = 1.52 \sqrt{\frac{W \rho}{E'}}$, 求得齿面接触温升 T_f 后即可求齿面瞬时接触温度 T_s' , $T_s' = T_f + T_B$ 。轮齿啮合前温度 T_B 可近似地由下式决定:
 $T_B = T_{油} + 0.11w$ (w 为 N/mm), $T_{油}$ 为油温,代入各已知值 S , η_0 , V_1 , V_2 , ρ , α^s , $T_{油}$, 即可求得第二级齿轮啮合始点和啮合终点的瞬时表面接触温度。如表4。

齿面擦伤的发生与否,不仅决定于齿面瞬时接触温度,还决定于润滑油特征退吸温度,润滑油特征退吸温度表征滑油抗擦伤能力,用 T_c 表示。其与相对油膜亏损和滑动速度有关。在擦伤过渡点润滑油特征退吸温度应用 T_c' 表示。当 $\beta = 0.001$ 时润滑油特征退吸温度用 T_c'' 表示,将 T_c'' 与齿面接触温度 T_s' 作比较来评定擦伤具有足够的安全性, L.S.Akin所推荐的 T_c' 与 T_c'' 对滑动速度的关系曲线见图2,由滑动速度即可求得 T_c'' ,但由于 T_s' 系宏观赫兹接触面积上的温度,因此 T_c'' 必须校正后才能与 T_s' 进行比较,即: $T_c'' = Q T_c'$, T_c'' 为润滑油宏观退吸温度

$$Q = \frac{\text{弹性接触面积}A_e + \text{塑性接触面积}A_p}{\text{宏观接触面积}A}$$

A_e, A_p 可以用下节求得的弹性接触概率与塑性接触概率值代入, 即:

$$A_p = P \cdot (\Delta h' \leq 0) A$$

$$A_e = [P \cdot (\Delta h \leq 0) - P(\Delta h' \leq 0)] \cdot A$$

由图 2 求得的 T_c'' 经校正后得润滑油特征退吸温度 T_c''' 与瞬时表面接触温度 T_s' 比较 (见表 5)。考虑图纸要求的接触精度以及动负荷影响和考虑接触精度超差时的结果见表 6。由表 5 表 6 可知, 接触精度符合图纸要求时, 第二级齿轮啮合始点不会擦伤, 啮合终点仅全速工况发生擦伤。接触精度超差时, 啮合始点在高工况开始擦伤, 而啮合终点则大部分工况都擦伤。总之啮合终点较啮合始点易于擦伤。这也说明了擦伤都发生在大齿轮齿根与小齿轮顶的原因。

五、擦伤概率

接触表面轮廓分布函数如图 3 所示

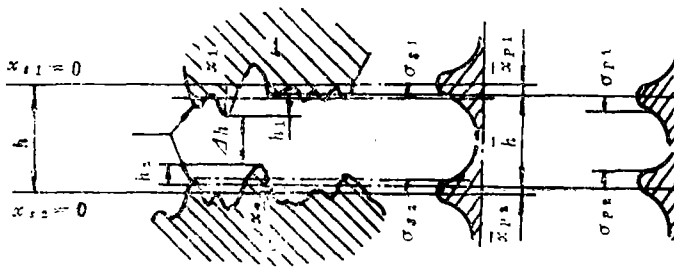


图 3 表面轮廓分布函数各参数

设: 表面轮廓尖峰高度分布的平均值为 \bar{x}_p ($\bar{x}_{p1}, \bar{x}_{p2}$), 表面轮廓尖峰标准偏差为 σ_p (σ_{p1}, σ_{p2}), 两粗糙面尖峰平均线间距离为 \bar{h} , 两粗糙面尖峰高度即由尖峰平均线为起点的峰值变量为 h (h_1, h_2), 两粗糙面尖峰之间间隙为 Δh , Km (Km_1, Km_2), kd (kd_1, kd_2) 两系数已在求塑性指数时引用。

若大小齿轮的 $\bar{x}_p, \sigma_p, s, Km, Kd$ 值均相同, 则可得 $\bar{x}_p = Km \cdot s = Km \left(\frac{\sigma_p}{kd} \right)$

$$\sigma_p = kd \cdot s$$

$$\bar{h} = h - \bar{x}_{p1} - \bar{x}_p = h - 2\bar{x}_p$$

$$\Delta h = \bar{h} - \bar{h}_1 - \bar{h}_2$$

表4 第二级齿轮各啮合点瞬时表面接触温度

序号	工 况	I		II		III		IV		V		全 速	倒 车	长 期		
		高压二级	低压二级	高压二级	低压二级	高压二级	低压二级	高压二级	低压二级	高压二级	低压二级					
1	赫兹接触宽度	b	m	0.000 553	0.000 628	0.000 487	0.000 433	0.000 443	0.000 33	0.000 418	0.000 282	0.000 284	0.000 161	0.000 484	0.000 5486	
	大齿轮移动速度	V ₂	m/s	16 856	18 856	12 811	12 811	10 673	10 673	7 928	7 923	6 089	6 089	9 840	7 582	
	小齿轮移动速度	V ₁	m/s	18 963	18 963	14 364	14 384	11 970	11 970	8 883	8 883	6 804	6 804	11 035	8 595	
	摩擦系数	f		0.023 34	0.023 34	0.027 1	0.027 1	0.029 7	0.029 7	0.035 4	0.035 4	0.031	0.031	0.038 5	0.034 7	
	啮合前温度	T _B	℃	70.44	77.55	64.72	60.5	61.5	54	59.55	60.7	51.7	47.14	70	61.7	
	齿面接触温升	T _f	℃	4.5	5.9	4.2	3.5	3.3	2.1	3.13	1.8	1.4	0.8	6.4	3	
	齿面瞬时接触温度	T _{f'}	℃	75	83	68	64	65	56	63	52	53	48	75	65	
	2	赫兹接触宽度	b	m	0.000 628	0.000 712	0.000 553	0.000 491	0.000 506	0.000 375	0.000 474	0.000 298	0.000 323	0.000 183	0.000 509	0.000 523
		大齿轮移动速度	V ₂	m/s	13 830	13 830	10 513	10 513	8 757	8 757	6 505	6 505	4 880	4 980	8 075	5 230
		小齿轮移动速度	V ₁	m/s	19 354	19 354	14 660	14 660	12 217	12 217	9 066	9 066	6 944	6 944	11 253	8 681
摩擦系数		f		0.015	0.015	0.017 3	0.017 3	0.03	0.03	0.036 4	0.038 4	0.039 3	0.039 3	0.031	0.035 3	
啮合前温度		T _B	℃	70.44	77.55	64.72	60.5	61.5	54	59.55	50.7	51.7	47.14	70	61.7	
齿面接触温升		T _f	℃	14	17	6.4	5.4	8.9	5.8	8.0	4.05	4.5	1.9	13.4	8	
齿面瞬时接触温度		T _{f'}	℃	84	95	71	66	70	60	68	55	56	49	83.4	70	

表6 第二级齿轮各啮合点瞬时表面接触温度与润滑油特征退吸温度比较之二

序号	工况	I										例	车		
		单位	高压二级	低压二级	高压二级	低压二级	高压二级	低压二级	高压二级	低压二级	高压二级			低压二级	
1	啮合点	考虑动负荷及符合齿顶圆齿底圆接触的精度	T_e''''	97	97	100	97	111	103	100	103	102	97	113	112
			T_e'	84	95	76	70	71	59	68	55	56	48	85	73
1	始合点	接触精度	$T_e'''' > T_e'$	擦伤	擦伤	擦伤	擦伤	擦伤	擦伤	擦伤	擦伤	擦伤	擦伤	擦伤	$T_e'''' > T_e'$
			T_e'	119	140	101	92	94	72	88	63	65	62	121	94
1	超差时	接触精度	T_e'''' 与 T_e' 比较	擦伤	擦伤	擦伤	$T_e'''' > T_e'$	$T_e'''' > T_e'$	$T_e'''' > T_e'$	$T_e'''' > T_e'$	$T_e'''' > T_e'$	$T_e'''' > T_e'$	$T_e'''' > T_e'$	擦伤	$T_e'''' > T_e'$
			T_e'	134	158	107	95	103	78	96	67	70	64	132	102
1	严重超差	接触精度	T_e'''' 与 T_e' 比较	擦伤	擦伤	擦伤	$T_e'''' > T_e'$	$T_e'''' > T_e'$	$T_e'''' > T_e'$	$T_e'''' > T_e'$	$T_e'''' > T_e'$	$T_e'''' > T_e'$	$T_e'''' > T_e'$	擦伤	$T_e'''' > T_e'$
			T_e'	134	158	107	95	103	78	96	67	70	64	132	102

表 7

第二级齿轮各啮合点在各工况粗糙面接触概率与塑性接触概率

工 况	I		II		III		IV		V		倒 速	长 期	
	高压二级	低压二级	高压二级	低压二级	高压二级	低压二级	高压二级	低压二级	高压二级	低压二级			
1	0.89/ ρ^2	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	
啮 合 点	λ	1.62	1.62	1.56	1.6	1.34	1.5	1.18	1.3	1.06	1.23	1.3	1.3
	$\bar{\Delta h}$	0.189	0.189	0.153	0.18	0.023	0.118	-0.083	0	0.142	0.042	-0.024	-0.1
	$\phi(\Delta h \leq 0)$	0.5749	0.5749	0.5808	0.5714	0.5092	0.547	0.4693	0.5	0.4435	0.4834	0.5	0.4602
	$\bar{\Delta h}$	0.4251	0.4251	0.4392	0.4288	0.4908	0.453	0.5307	0.5	0.5465	0.5168	0.5	0.5398
	$\bar{\Delta h}$	0.479	0.479	0.443	0.471	0.58	0.408	0.207	0.29	0.148	0.33	0.29	0.19
啮 台	$\phi(\bar{\Delta h})$	0.6837	0.6837	0.672	0.6811	0.719	0.6557	0.5796	0.6146	0.5585	0.6293	0.6141	0.5763
	$P_i(\Delta h \leq 0)$	0.3163	0.3163	0.328	0.3189	0.281	0.344	0.4024	0.3854	0.4412	0.3707	0.3859	0.4237
啮 台	λ	1.7	1.7	1.7	1.7	1.5	1.6	1.25	1.4	1.1	1.3	1.4	1.1
	$\bar{j h}$	0.236	0.236	0.236	0.236	0.118	0.177	0.0297	0.0588	-0.1185	0	0.0588	-0.1185

3		4												
表	项	中												
		λ	1.8	1.9	1.7	1.75	1.5	1.6	1.3	1.4	1.1	1.3	1.4	1.1
表	$\phi(\Delta\bar{h})$	0.5932	0.5932	0.5932	0.5932	0.547	0.5717	0.4874	0.5234	0.4528	0.5	0.5234	0.4528	
	$P(\Delta\bar{h} \leq 0)$	0.4058	0.4068	0.4068	0.4068	0.453	0.4283	0.4126	0.4766	0.5472	0.5	0.4765	0.5471	
	$\Delta\bar{h}'$	0.526	0.526	0.526	0.526	0.408	0.467	0.26	0.3488	0.17	0.29	0.3488	0.17	
	$\phi(\Delta\bar{h}')$	0.6905	0.6905	0.6905	0.6905	0.695	0.6697	0.6026	0.6367	0.5675	0.6141	0.6365	0.5675	
	$P(\Delta\bar{h}' \leq 0)$	0.3095	0.3095	0.3095	0.3095	0.341	0.3203	0.3974	0.3633	0.4325	0.3859	0.3632	0.4321	
表	项	λ	1.8	1.9	1.7	1.75	1.5	1.6	1.3	1.4	1.1	1.3	1.4	1.1
		$\Delta\bar{h}$	0.2852	0.3543	0.236	0.2657	0.118	0.177	0	0.0588	-0.1185	0	0.0588	-0.1185
		$\phi(\Delta\bar{h})$	0.6166	0.6383	0.5932	0.6042	0.548	0.5717	0.5	0.5234	0.4528	0.5	0.5234	0.4528
		$P(\Delta\bar{h} \leq 0)$	0.3834	0.3619	0.4068	0.3958	0.453	0.4283	0.5	0.4766	0.5472	0.5	0.4766	0.5472
		$\Delta\bar{h}'$	0.5852	0.6443	0.526	0.5557	0.408	0.467	0.29	0.3488	0.17	0.29	0.3488	0.17
		$\phi(\Delta\bar{h}')$	0.7207	0.7402	0.6905	0.7108	0.659	0.6717	0.6146	0.6367	0.5675	0.6141	0.6367	0.5675
	$P(\Delta\bar{h}' \leq 0)$	0.2793	0.2598	0.3095	0.2892	0.341	0.3203	0.3854	0.3673	0.4325	0.3859	0.3673	0.4325	

擦伤概率应在表面轮廓粗糙面接触概率与表面轮廓塑性接触概率之间,即:塑性接触概率 \leq 擦伤概率 \leq 粗糙面接触概率。先求粗糙面接触概率:设接触函数为正态分布如图4。

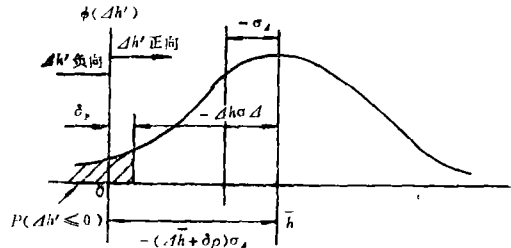


图4 粗糙面接触正态分布函数

由图4可知粗糙面接触概率为:

$$P(h_1 + h_2 > \bar{h}) = \int_{\bar{h}}^{\infty} \phi(h_1 + h_2) d(h_1 + h_2)$$

$$\Delta \bar{h} = \bar{h} - (h_1 + h_2) \quad \text{由 } \sigma_{\Delta} \text{ 求编率偏差}$$

$$\Delta \bar{h} = \frac{\bar{h}}{\sigma_{\Delta}} \quad \sigma_{\Delta} = \sqrt{\sigma_{P_1}^2 + \sigma_{P_2}^2} = \sqrt{2} \sigma_P$$

$$\Delta \bar{h} = \frac{\lambda}{\sqrt{2} K d} - \frac{\sqrt{2} K m}{K d} = 0.59A - 0.768$$

$$\therefore \text{接触概率密度 } \phi(-\Delta \bar{h}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta}} e^{-\frac{(-\Delta \bar{h})^2}{2\sigma_{\Delta}^2}}$$

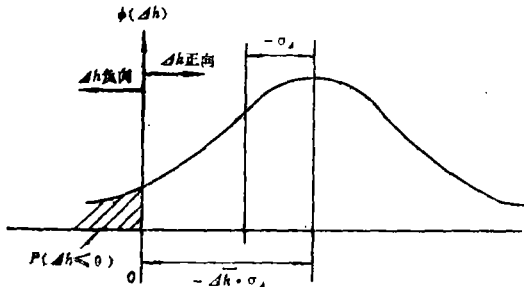


图5 塑性接触的正态分布函数

粗糙面接触概率为:

$$P(\Delta h \leq 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta}}$$

$$\int_0^{\infty} e^{-\frac{(-\Delta \bar{h})^2}{2\sigma_{\Delta}^2}} d(-\Delta \bar{h})$$

$$\therefore P(\Delta h \leq 0) = 1 - P(\Delta h > 0) = 1 - \phi(\Delta \bar{h})$$

同理塑性接触概率可计算如下:

塑性接触概率为:

$$P(h_1 + h_2 > \bar{h} + \delta_P) = \int_{\bar{h} + \delta_P}^{\infty} \phi(h_1 + h_2) d(h_1 + h_2)$$

其中为 δ_P 粗糙面塑性偏差,按Tabar公式

$$\delta_P = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 r \left(\frac{0.6H}{E'}\right) = 0.89r \left(\frac{H}{E'}\right)^2$$

r 为粗糙面尖峰曲率半径 δ_P 标准化得:

$$\frac{\delta_P}{\sigma_{\Delta}} = 0.89 \frac{r}{\sigma_{\Delta}} \left(\frac{H}{E'}\right)^2 \quad \text{即: } \delta_P = \frac{0.89\sigma_{\Delta}}{\phi^2}$$

\therefore 塑性接触概率为:

$$P(\Delta h \leq \delta_P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Delta}} \int_{\delta_P}^{\infty} e^{-\frac{(-\Delta \bar{h})^2}{2\sigma_{\Delta}^2}} \cdot d(-\Delta \bar{h})$$

假定 $\Delta h + \delta_p = \Delta h'$ 可得标准偏差

$$\bar{\Delta h'} = \frac{\bar{h} + \delta_p}{\sigma_A} = \Delta h + \frac{0.89}{\phi^2}$$

则得:
$$\phi(-\Delta h') = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_A} e^{\left[-\frac{(-\Delta h')^2}{2\sigma_A^2}\right]^2}$$

$$P(\Delta h' \leq 0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_A} \int_0^{\infty} e^{\left[-\frac{(-\Delta h')^2}{2\sigma_A^2}\right]} d(-\Delta h')$$

∴ 塑性接触概率为:

$$P(\Delta h' \leq 0) = 1 - P(\Delta h' > 0) = 1 - \phi(\Delta h')$$

设 $K_m = 0.5$, $K_d = 0.92$, 代入其它各已知值即可求得第二级齿轮各啮合点在各工况的粗糙面接触概率与塑性接触概率如表 7。擦伤概率则在两者之间, 由表 7 可知约为 40~45% 左右。

六、实船跑合与结论

表 5, 表 6 结果表明, 当齿面质量不符合图纸要求时第二级齿轮在高工况将发生擦伤, 而低工况一般不会擦伤, 因此, 逐渐加负荷进行实船重跑合以改善齿面质量从而抑止擦伤的办法是可行的。还应当注意倒车面的跑合或用长期倒车工况作为跑合工况, 而不要过早使用全速倒车工况。英国舰船齿轮, 在五十年代, 也发生过类似的擦伤, 推荐跑合时间为 48 小时。目前我们用第 V 工况作为初始跑合负荷, 按文献 [4] 方法估算, 总的跑合时间约需 70~80 小时。近年来, 对跑合机理的研究日益引起国内外学者的重视, 最佳实船跑合规范的研究, 值得我们注意。另外还应该指出, 发生齿面擦伤必须满足三个条件, 即弹性流体动力油膜的破裂, 边界油膜表面层穿透, 金属之间发生强烈塑性接触。国外文献报道, 在润滑剂汽轮机油中加极压添加剂, 可使边界油膜抗擦伤能力提高三倍。但是, 因实船推广应用比较复杂故极压添加剂不能规范化使用。而应结合试验进行优选。为了防止高速齿轮在新运转的初始擦伤, 在齿面上镀一层铜(或其它金属), 这一镀层不仅有利于传热与改善齿面接触状态, 还可以在初始擦伤时不致损伤钢基齿面, 使齿面安全通过初始擦伤危险期。目前还有快速电刷涂镀工艺, 经我所试验效果良好。齿面镀铜与实船跑合结合是简单可行的办法。

通过以上计算分析, 得出以下结论与看法:

1. 齿面质量符合图纸要求时, 第一、二级齿轮均处于弹性流体动力润滑状态, 都不会擦伤。
2. 当齿面质量不符合图纸要求时, 第一级齿轮仍处于弹性流体动力润滑状态, 不会擦伤, 第二级齿轮则可能擦伤, 啮合终点较啮合始点易于擦伤, 所以擦伤发生在大齿轮齿根与小齿轮齿顶, 其擦伤概率约为 40%。
3. 擦伤属初始擦伤, 实船重跑合可改善与抑止初始擦伤。注意不要过早使用全速

倒车工况, 倒车面也应跑合或者用长期倒车工况起跑合作用。

4. 虽然加极压添加剂的汽轮机油与实船跑合结合更有利于抑止擦伤, 但推广应用比较复杂, 齿面镀铜与实船跑合结合则是简单可行的办法。

本文在撰写过程中, 得到车华文同志的热情帮助, 谨此致谢。

参 考 文 献

1. D. Dowson & G. R. Higginson: Elasto-Hydrodynamic lubrication, Pergamon press Ltd, 1977.
2. 霍斯特, 契可斯: 摩擦学(对摩擦, 润滑和磨损科学技术的系统分析)机械工业出版社 1984年
3. L. Sakin: 齿轮跨学科的润滑理论, 国际齿轮装置与传动会议论文集 机械工业出版社 1979年
4. N. B克拉盖尔斯基: 摩擦磨损计算原理 机械工业出版社 1982年
5. 徐秉业等: 弹塑性力学及其应用 机械工业出版社 1984年
6. 范垂本: 齿轮的强度和计算 机械工业出版社 1979年
7. 董航: 润滑理论 交大出版社 1984年
8. 林之光等: 齿轮的传动与润滑 机械工业出版社 1980年
9. ISO. 齿轮强度计算标准 河南机械传动分会 1982年
10. S. Andersson: A partial elasto hydrodynamical theorg for the running-in process of hobbled gears wear (1972).
11. A. Dgson: Scuffing-A review, Tribology (1975).
12. S. Andersson: Initial wear of gears, Tribology (1975).

(渠源溯 编辑)

新技术新产品信息

R88—29 中小型核热电站汽轮机组设计

对于生产过程中需要大量蒸汽和电能的生产单位(如石油化工联合企业)以及缺少一次能源且运输不便的边远地区建造中、小型核热电站具有重要意义。它能提供清洁干净的工业用汽、生活用汽和电能, 并具有安全、可靠、减少环境污染等特点。近年来, 哈尔滨船舶锅炉涡轮机研究所积极利用军工技术为国民经济建设服务, 竭诚为用户设计性能良好、安全可靠的核热电厂汽轮机组和二、三回路系统及其主要配套设备。

R88—30 聚氨酯硬质泡沫塑料应用

这种新型材料是近年来国内外发展较快的高分子合成的微孔泡沫材料。把它作为供热工程地下无补偿直埋管道的保温材料, 又得到迅速的发展。采用此项新技术后, 与传统的管沟敷设工艺相比, 使工程造价降低30~50%。现已在东北和内蒙古地区广泛应用。服务方式: 1. 采用该项新技术的供热管网设计; 2. 聚氨酯硬质泡沫塑料现场发泡技术咨询服务; 3. 耐高温型聚氨酯硬质泡沫塑料的应用技术咨询服务。

(如需以上技术请与编辑部联系)