425

軸受鋼の焼入れ変形に及ぼす諸因子

THK(株)	基礎技術研究所
京都大学	エネルギー科学研究科

1. はじめに

高炭素クロム軸受鋼は、球状炭化物を分散させるこ とで耐摩耗性を向上させる材料で、主にベアリング用 材料として利用されている.しかしながら、焼入れ後 の変形予測に関しては、未だ経験に依存するところが 多く、熱処理品のサイズ、形状が変わるとその変形予 測は困難なものとなる.

これまで、CAEによる浸炭焼入れ、高周波焼入れ、 普通焼入れ等の熱処理シミュレーションが行われ、そ の変形予測に関する報告がなされているが、今回は軸 受鋼のソルト焼入れについてシミュレーションを行っ た、それにより、熱処理変形について、変形に及ぼす 試験片のサイズの影響、さらに浸炭焼入れで重要な役 割を果たす変態塑性の影響について考察した。

2. 実験方法

2・1 材料 材料は,比較的大型のベアリングレースに使用される SUJ3 を用いた.その化学成分を Table 1 に示す.

Table 1. Chemical composition of SUJ3. (wt.%)

С	Si	Mn	Р	S	Cr	Мо
1.02	0.49	0.95	0.015	0.002	0.97	0.02

2・2 試験片 ベアリングレースや歯車の形状に類 似したリング形状を用いた.焼入れで、マルテンサイ ト変態のみ起こる場合と、マルテンサイト変態及び拡 散型変態(パーライト・ベイナイト変態)が起こる場合に ついて調査を行うため、Fig.1及び Table 2 に示す4種類 の異なる寸法のリングについて試験を行った.



Fig.1 Shape of specimen.

Ta	able	2.	Di	mens	ion	of	specimen.

No.	a	b	С
1	75	25	10
2	80	40	30
3	120	60	45
4	160	80	60

2・3 熱処理条件 焼入れ温度は 820℃とし、その 温度で球状炭化物のマトリックスへの固溶が十分に行 〇吉井聡一山中茂 坂之上隆行 井上達雄

われる(平衡になる)ように保持時間を設定した. すなわち, 試験片の大きさを考慮し試験片 No.1 の場合は40min, No.2~4 の場合は45min とした.

焼入れ冷却剤は、ベアリングレースの焼入れなどに 利用され、ひずみ低減に有効とされるソルトを用いた. ソルトの液温は 160℃とし、試験片を投入後 10min 間 保持し、その後室温まで空冷した.

ソルトは、蒸気膜段階がないため、油などと比べ、 試験片全体が均一に冷却されることが特長である.

3. 熱処理解析

3・1 解析コード 焼入れの解析を行うためには, 温度-応力のみならず相変態との連成を考慮する必要 がある.こうした連成による理論(metallo-thermomechanics)を基に開発された熱処理シミュレーション コード"HEARTS")を用いて,熱処理後の変形・応力を 計算した。

3・2 解析モデル 解析には、二次元の軸対称モデ ルを用いた.メッシュ分割は、焼入れ直後に試験片表 面に急激な温度勾配が予想されるため、表面付近のメ ッシュを細かくした.すなわち、各試験片において、 最表面から 1mm までは 0.1mm, 1mm から 2mm までは 0.2mm で分割を行った.各々の試験片の総節点数,総 要素数を Table 3 に示す.

No.	Total nodes	Total elements
1	1924	1836
2	2679	2576
3	4104	3976
4	5829	5676

Table 3. Total nodes and elements.

3・3 相変態のカイネティックス 軸受鋼では、焼 入れ前の加熱保持で、炭化物を完全に固溶させず数パ ーセント残存させている。今回のシミュレーションで は、この残存する炭化物の影響は無視できる程小さい と考え、単相の扱いによるマルテンサイト変態¹¹および 拡散変態¹¹を計算し、マトリックスに及ぼす炭化物の影響は無視した。

3・4 境界条件 焼入れ時の熱境界条件としては, 温度依存性を考慮した熱伝達率を用いた.このために, JIS-K2242 に規定されている方法で冷却曲線を測 定し,熱伝達率算出プログラム"LUMPPROB"³によ って,熱伝達率を逆問題的に求めた.今回は,蒸気 膜段階がないというソルトの特徴を考慮して,試験 片の場所による熱伝達率の違いは考慮していない.

4. 材料データ

4・1 マトリックスへの固溶炭素量 残存炭化物が

共存する焼入れでは、試験片の固溶炭素量を一定にし て試験することが重要である。そのため、所定の加熱 温度において、炭化物のマトリックスへの固溶が平衡 に達するまでの時間を測定した。Figure 2 に加熱温度 820℃における保持時間と固溶炭素量を示す。これによ ると保持時間約 20min でほぼ平衡状態に達することが わかる。



4・2 マルテンサイトの変態膨張率及び線膨張率 変態膨張率及び線膨張率はフォアマスター試験機によ り測定される温度ー伸び線図から求められる. 軸受鋼 のような高炭素鋼では、マルテンサイト変態終了温度 は室温以下となり、フォアマスター試験機の冷却限界 を超えてしまう. したがって、マルテンサイトの変態 膨張率及び線膨張率を測定するため、フォアマスター 試験片を焼入れ後に取り出し、-50℃で 10min 間サブゼ ロ処理し 100%変態させた後に、寸法を測定し、再度フ オアマスター試験機でマルテンサイトの分解が生じる 温度以下の 100℃まで再加熱し、伸びを測定した.

4・3 拡散型変態の変態膨張率及び線膨張率 軸受 鋼で生じる拡散型変態には、パーライト及び(上部・下 部)ベイナイトがある.それらの変態膨張率及び線膨率 を測定するため、フォアマスター試験の冷却過程で、 600、550℃で 200s、400、350℃で 2000s 保持し、完全な パーライトおよびベイナイト組織に変態させその特性 を測定した.今回データとしては上部・下部ベイナイ トを平均したものを用いた.

5. 結果及び考察

5・1 焼入れ後の変形 試験片 No.1 について焼入れ 後の解析及び実験結果の断面形状を Fig.3 に示す. なお, 変位については 100 倍に拡大して示している.



Fig.3 Simulated distortion after quenching.

これからわかるように、焼入れ後の形状は、外径で

約55µm,内径で約15µm,幅方向で約10µm膨脹している.また、断面形状は、各面の中心付近の膨脹がコーナー付近よりも大きい太鼓型を示している.解析と実験結果では断面形状及び変位量ともに良く一致している.

5・2 熱処理後の寸法変化 外径中心点及び上下面 中心点の熱処理後の寸法変化を Fig.4,5 に示す. Fig.4,5 では、実験結果及び変態塑性の影響を考慮したもの、 しないものについての解析結果を示している.



変形量は、外径、高さ共に解析結果の方が値は大き いが、試験片寸法による変化の傾向は一致している. すなわち、試験片が大きくなるにつれ、寸法変化は大 きくなるが、内部で不完全焼入れ組織の多く現れる試 験片 No.4 では寸法変化が小さくなる.

変態塑性の効果については、著者らの浸炭焼入れの 報告³と比べ、その影響は小さい.これは表面から変態 が進行する普通焼入れの特徴である.一方、内部で不 完全焼入れ組織が現れる試験片 No.3,4 ではその影響が 大きく現れる.すなわち、ベイナイト、パーライトが 内部で生じる場合、変態塑性係数を含めた材料データ が変形予測精度の向上に重要になる.

参考文献

- 1) 井上達雄, 有本享三, 材料, 44, 103 (1995)
- M. Narazaki, A. Kogawara, A. Shirayori and S. Fuchizawa, Proc. 6th Int. Seminar of IFHT, 428, (1997)
- 山中茂,坂之上隆行,吉井聡一,井上達雄,材料, 48,733 (1999)