

谐波减速器柔轮用特殊钢 RL40 的组织特性

王洋¹ 王欢² 张朝磊² 王浩¹ 张旭³ 苗红生³

(1 北京中技克美谐波传动股份有限公司,北京 101318;2 北京科技大学材料科学与工程
学院,北京 100083; 3 西宁特殊钢股份有限公司,西宁 810005)

摘要 通过光学显微定量分析和热膨胀实验,研究了柔轮用钢 RL40(0.40C,0.90Cr,1.85Ni,0.25Mo,0.05Nb,0.016Ti)的微观组织、相变点和奥氏体晶粒粗化规律等材料基本特性。结果表明:轧材组织为贝氏体+马氏体,原始奥氏体晶粒平均尺寸为 14.0 μm,晶粒度级别为 9.0~9.5,平均标准偏差均在 0.46~0.48;相变点 Ac₁ 为 729 ℃,Ac₃ 为 769 ℃,Ms 点为 281 ℃;奥氏体晶粒粗化温度为 1 000 ℃。

关键词 谐波减速器柔轮用钢 RL40 粗化温度 相变点

Structure and Characteristics of Special Steel RL40 for Flexspline of Harmonic Reduction Gear

Wang Yang¹, Wang Huan², Zhang Chaolei², Wang Hao¹, Zhang Xu³ and Miao Hongsheng³

(1 Beijing CTKM Harmonic Drive Co Ltd. Beijing 101318;2 School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;3 Xining Special Steel Co Ltd, Xining 810005)

Abstract The materials basic characteristics of structure, austenite grain coarsening and phase transformation point of RL40 steel for flexspline (0.40C,0.90Cr,1.85Ni,0.25Mo,0.05Nb,0.016Ti) has been studied by the quantitative analysis of optical microscopy and thermal expansion experiment. The results show that the microstructure of the rolled bar is bainite + martensite, the average grain size of primary austenite is 14.0 μm, and the austenite grain size rating is 9.0~9.5, and the average standard deviation is 0.46~0.048. The transformation point Ac₁ is 729 ℃, Ac₃ is 769 ℃, Ms is 28 ℃, and the austenite grain coarsening temperature is 1 000 ℃.

Material Index Steel RL40 for Flexspline of Harmonic Reduction Gear, Coarsening Temperature, Phase Transformation Point

随着中国工业制造技术的不断革新进步,也推动了工业机器人的发展。中国早在 2013 年已经成为全球第一大工业机器人市场,但国内工业机器人制造产业与世界先进水平仍有较大差距,研发核心技术、生产重要零部件是重要任务^[1-3]。

柔轮作为工业机器人核心零件谐波减速器的重要部件之一,承担着机器人手臂的作用。近年来先后有学者对其齿廓设计^[4-6]、疲劳性能^[7-8]等方面进行研究,并取得了突破性进展,但在柔轮专用材料方面的开发和生产与先进水平差距较大。

1 实验材料与方法

柔轮专用材料为国内特殊钢企业生产的 Φ80 mm 的 RL40 棒材,其化学成分如表 1 所示,生产流程为 60 t EAF + LF 精炼 + VD 真空脱气→铸 3 000 kg 电极坯→保护气氛电渣重熔 Φ490 mm 锭→坑冷、700 ℃退火→检查、清理→开 220~240 mm 方坯→步进梁式加热炉加热→25 架轧机连轧产材(开轧温度 1 050~1 120 ℃,终轧温度 ≥850 ℃)

表 1 试验 RL40 钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of tested RL40 steel/%									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Ti
0.40	0.25	0.75	≤0.020	≤0.015	0.90	1.85	0.25	0.05	0.016

→坑冷、退火→矫直→扒皮、清理→超声波探伤→检查、检验→包装、入库。

根据 GB/T 6394-2002《金属平均晶粒度测定法》中的直接淬硬法:当碳含量大于 0.35% 的试样应在(860±10) ℃保温 1 h 后淬火,浸蚀后观察其原始奥氏体晶粒。对于 RL40 柔轮钢,其碳含量大于 0.35%,因此把试样加热至 860 ℃保温 1 h 后淬火,以观察轧材的原始奥氏体晶界。

依据 YB/T 5127-1993《钢的临界点测定方法(膨胀法)》,测量 RL40 钢的相变点,试样尺寸为 Φ4 mm × 10 mm,试验设备为 DIL805A 型热膨胀仪。热膨胀试验的过程及工艺参数如图 1 所示,相变升温阶段与降温阶段的冷速均为 0.05 ℃/s,加热至 950 ℃后保温 5 min。

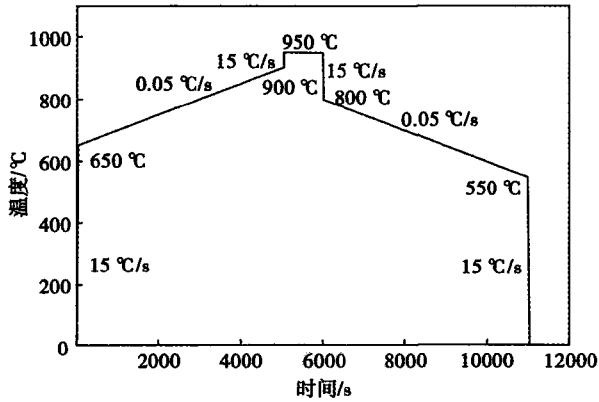


图1 热膨胀试验过程及工艺参数

Fig. 1 Process parameters of thermal expansion test

将试验轧材线切割加工成 15 mm × 15 mm × 15 mm 的方块试样,在 800、850、900、950、1 000、1 050、1 100、1 150、1 200 °C 下等温加热,保温时间为 40 min,保温后立即进行水淬。试样从中间切开、打磨、抛光、浸蚀后显示原始奥氏体晶界,研究其粗化规律。

2 结果分析

2.1 热轧材显微组织和相变点

RL40 钢轧材 1/2 半径处显微组织、基体碳化物形貌扫描电子显微镜和原始奥氏体晶粒照片如图 2 所示,且各位置处的原始奥氏体平均晶粒尺寸和级别如表 2 所示。

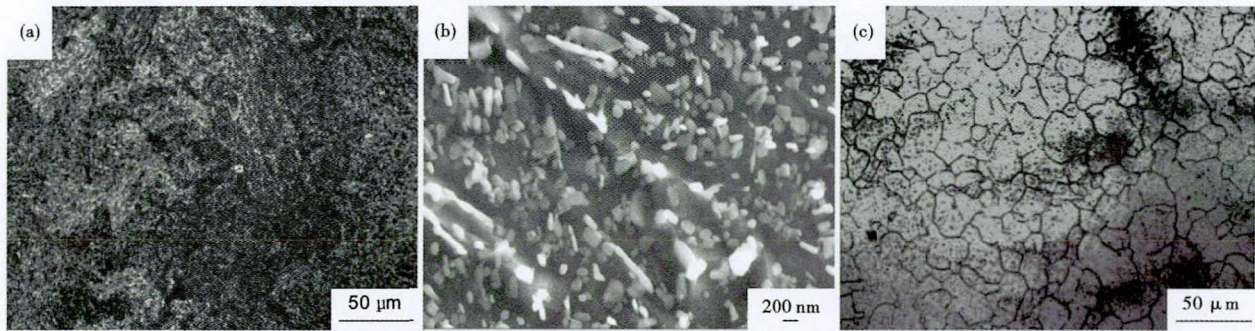


图2 轧材 1/2 半径处显微组织照片:(a)光学;(b)SEM;(c)原始奥氏体晶粒

Fig. 2 Micrographs of hot-rolled bar at 1/2 radius:(a) optical,(b) SEM,(c) original austenite grain

表2 RL40 钢轧材原始奥氏体平均晶粒尺寸和级别
Table 2 Average size and rating of original austenite grain in hot-rolled bar of RL40 steel

位置	平均晶粒尺寸/ μm	晶粒度级别/级	平均标准偏差
边部	12.4	9.5	0.48
1/2 半径	14.9	9.0~9.5	0.46
心部	14.7	9.0~9.5	0.46
平均值	14.0	9.0~9.5	0.47

可以看出,轧材组织为贝氏体 + 马氏体,基体碳化物数量较多,尺寸较小,长轴的长度为 100 ~ 200 nm,但仍存在长轴长度达 400 nm 及以上的棒状碳化物。从边缘到心部原始奥氏体晶粒尺寸相差不大,平均值为 14.0 μm ,晶粒度为 9.0 ~ 9.5 级,平均标准偏差均在 0.47 左右,因此轧材从边缘到心部的奥氏体晶粒细小且均匀分布。

2.2 相变点

试验测得的膨胀量随温度的变化曲线如图 3 所示,根据切线法测得 A_{c1} 为 729 °C, A_{c3} 为 769 °C, M_s 点为 281 °C。相变点的测定为 RL40 钢的生产工艺及后续的热处理过程提供了参考。

2.3 奥氏体晶粒粗化规律

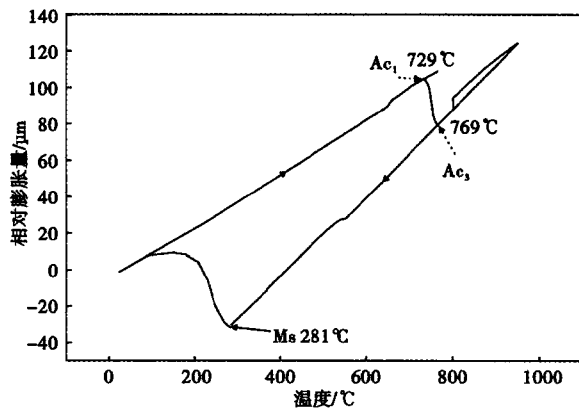


图3 RL40 钢热膨胀曲线

Fig. 3 Thermal expansion curves of RL40 steel

晶粒的长大存在正常长大和异常长大两种情况,图 4 为 RL40 钢加热至不同奥氏体化温度,保温 40 min 后的奥氏体晶粒照片。

从图 4 可以看出,随着温度升高至 1 000 °C,原始奥氏体晶粒异常长大,最大晶粒尺寸高达 341.6 μm ,晶粒分布极不均匀,出现了混晶形貌,如图 4(b) 所示;随着温度的进一步升高,在 1 050 °C 时,晶粒迅速长大,且大尺寸的晶粒分布较均匀。从

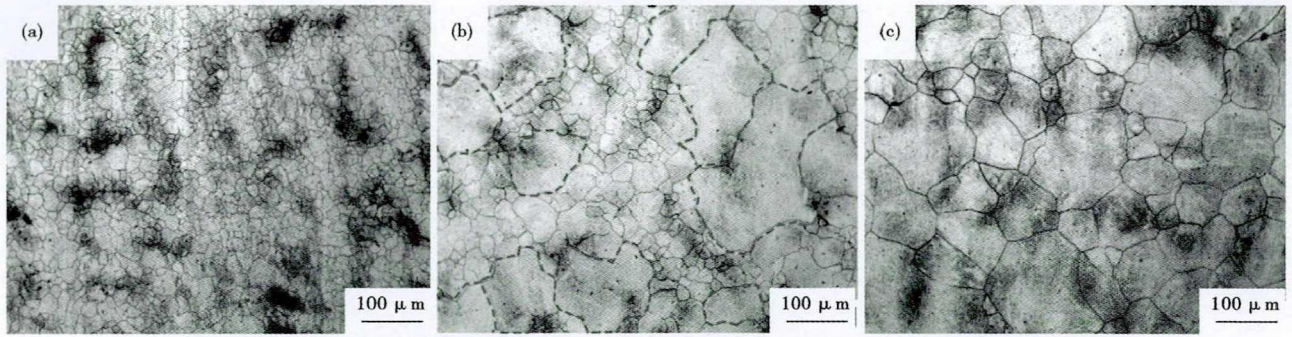


图 4 (a) 950 °C ;(b) 1000 °C ;(c) 1050 °C 加热的 RL40 钢奥氏体晶粒形貌
Fig. 4 Morphology of austenite grains in RL40 steel heated at:(a) 950 °C ;(b) 1000 °C and (c) 1050 °C

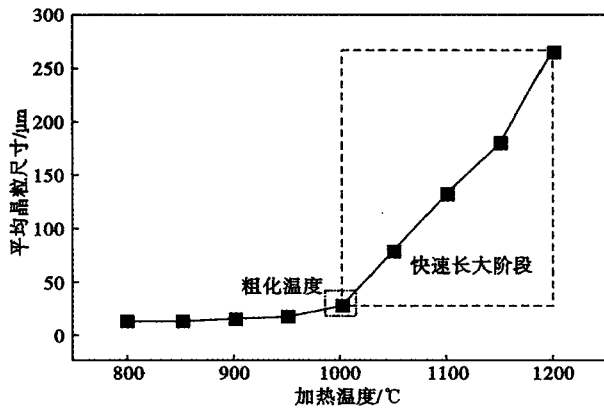


图 5 加热温度对 RL40 钢奥氏体平均晶粒尺寸的影响
Fig. 5 Effect of heating temperature on average grain size of austenite of RL40 steel

金相组织和粗化曲线上判定,RL40 钢的奥氏体晶粒粗化温度为 1 000 °C,如图 5 所示。造成柔轮 RL40 钢 1 050 °C 以上奥氏体急剧长大的原因是 M(C, N)析出物的减少。M(C, N)析出物能在晶界处析出对晶界产生钉扎作用,阻碍奥氏体晶界的迁移,因此能起到细化晶粒的作用。当 M(C, N)析出物数量减少或消失时,钉扎作用随之减弱或消失,使奥氏体晶粒尺寸增大^[9]。

3 结论

(1)RL40 钢 Φ80 mm 棒材,基体碳化物数量较多,尺寸较小,长轴的长度为 100 ~ 200 nm,但仍存在长轴的长度达 400 nm 及以上的棒状碳化物;原始奥氏体晶粒尺寸平均值为 14.0 μm,晶粒度为 9.0 ~ 9.5 级,平均标准偏差均在 0.46 ~ 0.48。因此轧材

从边缘到心部的奥氏体晶粒细小且均匀分布。

(2)RL40 钢相变点 Ac_1 为 729 °C, Ac_3 为 769 °C, Ms 点为 281 °C。

(3)RL40 钢奥氏体晶粒粗化温度为 1 000 °C,此温度条件下奥氏体晶粒异常长大,出现混晶现象。800 ~ 1 000 °C 奥氏体晶粒长大缓慢,温度继续升高则进入快速长大阶段。

参考文献

- [1]任永杰,尹仕斌,郑继贵.面向现代柔性制造的工业机器人高精度控制方法[J].航空制造技术,2018,61(5):16-21.
- [2]张朝磊,魏 畅,方 文,等.谐波减速器特殊钢材质柔轮的组织和力学性能分析[J].材料导报,2018,32(16):137-141.
- [3]元 卉.工业机器人:市场巨大,竞争加剧[J].上海企业,2018,433(12):22-22.
- [4]吴上生,孙韩磊,杨 琪.谐波传动柔轮空间齿廓设计与制造工艺[J].华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(1):38-44 + 91.
- [5]王家序,蒋倩倩,李俊阳,等.双圆弧谐波传动柔轮齿形参数多目标优化设计[J].吉林大学学报(工学版),2019,49(4):1194-1202.
- [6]邢静忠,庞满意,张 泽.超短筒谐波齿轮柔轮变厚度杯底的结构最优化设计[J].天津工业大学学报,2019,38(3):74-81.
- [7]张功学,马 车.谐波减速器的柔轮应力及疲劳强度分析[J].煤炭技术,2018,37(3):209-212.
- [8]叶南海,邓 鑫,何 韵,等.谐波柔轮力学分析与疲劳寿命研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(2):18-25.
- [9] Hellman P, Hillert M. Effect of Second-Phase Particles on Grain Growth[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 1975, 4(5): 211-219.

王 洋(1983-),男,硕士(2009年中央财经大学),高级工程师,2001年南京财经大学(本科)毕业,谐波减速器研发和制造。E-mail:wangyang@ctkmhd.com

收稿日期:2020-10-04