

精密万能试验机 AGX™-V, 显微维氏硬度计 HMV™-G31FA 系列, 电子探针显微分析仪 EPMA™-8050G, 示差热 / 热重量同时测定仪器 DTG-60、热机械分析仪器 TMA-60

采用径向锻造加工 EV 驱动电机轴的多角度评价

矢野 文彬, 小野 卓男, 大城 真爱, 长西 敦子

特点描述

- ◆ 通过对径向锻造加工制造的中空轴进行多角度评价, 可以期待加工技术和材料强度的提高。
- ◆ 精密万能试验机和硬度计可以评价金属材料的力学特性。
- ◆ 通过 EPMA 和热分析, 可以进行金属材料的元素分布测定和评价与强度提高相关的相变。

■ 引言

近年来, 为实现温室气体的减排, 正在加速推进低碳化进程。其中, 可以说汽车行业向电动汽车 (EV) 的转变对于实现减少碳排放社会发挥着重要作用。为了普及 EV 化, 需要提高续航里程, 车身的轻量化也成为开发主题之一。其中, 减轻轴的重量是一个重要的开发主题, 因为它不仅可以提高续航里程, 还可以通过抑制惯性来提高电机的响应性。径向锻造加工是一种中空轴的新型锻造技术, 通过锻造锤 (模具) 在中空轴的径向施加力量, 同时插入模芯, 形成内径形状, 实现内外径的同时成型¹⁾。采用径向锻造加工方法的中空轴是一种兼具强度和轻量化的产品, 作为下一代轴而受到广泛关注。

之前报告^{2)、3)}的电机轴的静态拉伸试验和硬度试验的力学特性的评价之外又加上, 此次新实施了使用电子探针显微分析仪的元素分析和热分析装置的热特性评价。本文如表 1 所示, 介绍比较各测定结果的电机轴的多角度评价例。

■ 静态拉伸试验 (试样信息)

试样从 3 种径向锻造加工品和无加工 (对照试样) 的 4 种产品中切出来的。径向锻造加工品是相对于对照试样, 锻造加工成截面积的减少量为 50%、60%、70%。试样切出位置的示意图如图 1 所示。试样是以产品表层为标准, 从 4 ~ 28 mm, 每 6 mm 从 5 处切出来的。但是, 对于面缩率 70% 的径向锻造加工品, 从 4 ~ 22 mm 的 4 处切出了试样。试样信息如表 2 所示。

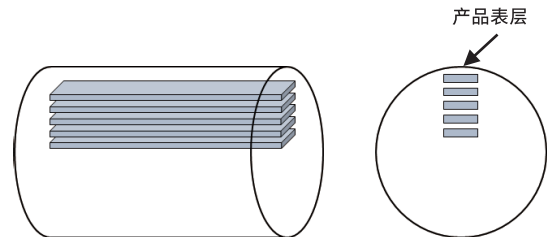


图 1 试样切出位置的示意图

表 1 本文的配置

| 评价方法 | 评价内容 |
|---------|--|
| ①静态拉伸试验 | • 拉伸强度, 弹性模量, 断裂伸长率的测定 |
| ②硬度试验 | • 维氏硬度的测定 |
| ③元素分布测定 | • 元素分布像分析 • 拉伸强度与元素分布像分析的比较 • 断裂伸长率与元素分布像分析的比较 • 硬度试验和元素分布像分析对硬度局部测定的评价 |
| ④热特性评价 | • 示差热和热重量的测定 (TG-DTA 测定) • 热机械分析 (TMA 测定) |

表 2 试样信息

| | |
|--------|---|
| 试样材料 | : SCr420 |
| 试样尺寸 | : 厚度: 2.5 mm、宽度: 11 mm 平行部长度 56 mm |
| 试样种类 | : 试样①对照试样 试样②径向锻造品 (面缩率 50%) 试样③径向锻造品 (面缩率 60%) 试样④径向锻造品 (面缩率 70%) |
| 试样切出位置 | : 4, 10, 16, 22, 28 mm ※ 仅试样④, 10, 16, 22 mm |

(样品由: 株式会社都筑制作所提供)

■ 静态拉伸试验（测定结果）

拉伸试验使用精密万能试验机 AGX-V 实施。图 2 所示为试验示意图。如图 2 所示，为了测定试样的断裂伸长率，安装了非接触式引伸计 TRViewX。试样里面的示意图如图 3 所示。为了测定精确的弹性模量和泊松比，在试样里面粘贴双轴应变仪进行了试验。设备配置如表 3 所示。试验条件参考 JISZ2241 进行了设定。表 4 所示为试验条件。作为试验结果的一个例子，试样①和试样②的应力应变曲线如图 4 所示。试样切出位置分布为 4 mm。

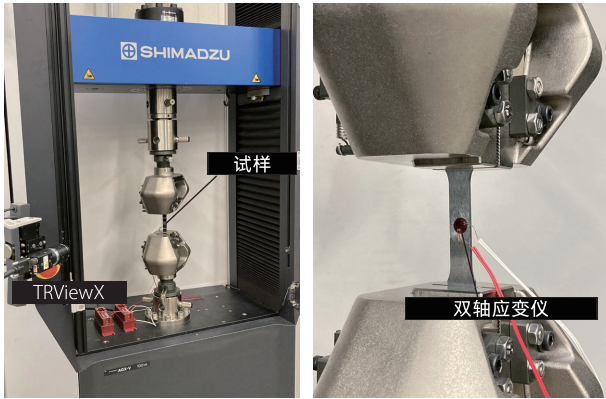


图 2 试验情形

图 3 试样里面的示意图

表 3 设备配置

| | |
|---------|----------------|
| 精密万能试验机 | : AGX-V |
| 称重传感器 | : 100 kN |
| 夹具 | : 定位楔形夹具 |
| 引伸计 | : TRViewX120S |
| 软件 | : TRAPEZIUMX-V |

表 4 试验条件

| | |
|-------|---|
| 试验速度 | : V1 10 MPa/sec V2 5%/min (V2>V1 切换为 V2) V3 40%/min (以应变 1% 切换) |
| 称重传感器 | : 30 mm (TRViewX) |
| 软件 | : n = 3 |

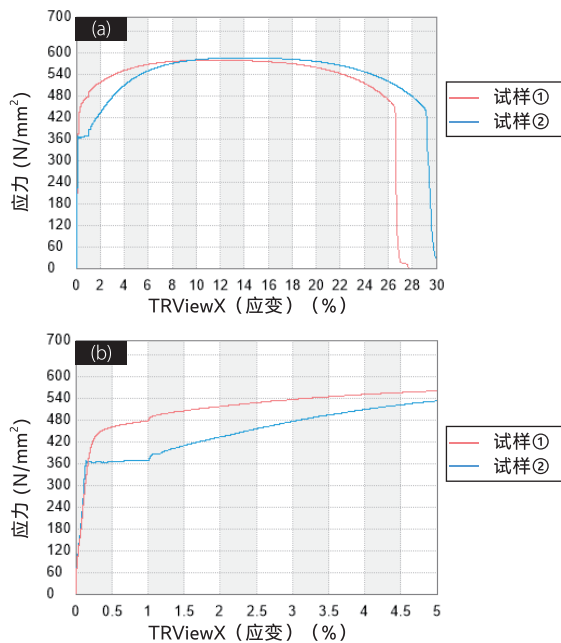


图 4 应力应变曲线的一例
(a) 试验全域 (b) 试验初期

如图 4 所示，作为对照试样的试样①没有出现屈服点，但进行径向锻造加工后，如试样②所示出现了屈服点。相对于表层试样切出位置的各力学特性如图 5 所示。拉伸强度和弹性模量在对照试样和径向锻造加工品上有差异，但由于试样切出位置的不同几乎没有差异。泊松比与试样切出位置，是否进行径向锻造加工无关，几乎保持不变。关于断裂伸长率，从表层到 16 mm，无论有无径向锻造加工，几乎保持不变。另一方面，试样②、③的 22、28 mm 的断裂伸长率下降。从这些结果中，可以把握具有优异特性的加工领域。

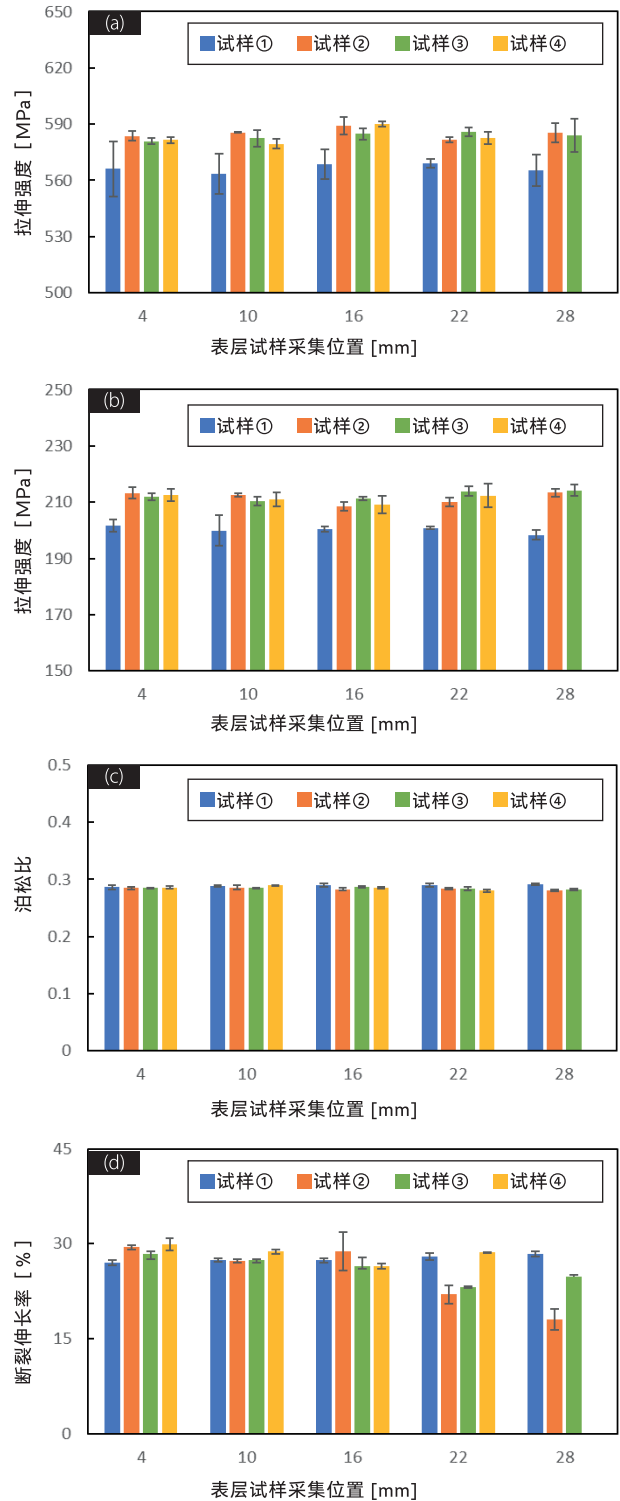


图 5 相对于表层试样切下位置的各力学特性
(a) 拉伸强度 (b) 弹性模量 (c) 泊松比 (d) 断裂伸长率

■ 维氏硬度的测定 (试样信息)

径向锻造加工前的试样的对照试样的切出位置如图 6 (a) 所示。从圆柱形状 (虚线) 的材料中切出彩色部分。径向锻造加工后的试样 4 种 (面缩率 50% 为 1 处, 70% 为 3 处) 的切出位置如图 6 (b) (c) 所示。对这些进行镜面研磨, 沿着图 6 的红点线, 从表面侧以 1 mm 间隔测定了约 30 点的维氏硬度。测定条件如表 5 所示。图 7 是用硬度计的工作台查看器功能拍摄并显示测定位置的图像。图 8 是测定后的压痕图像的 1 例。

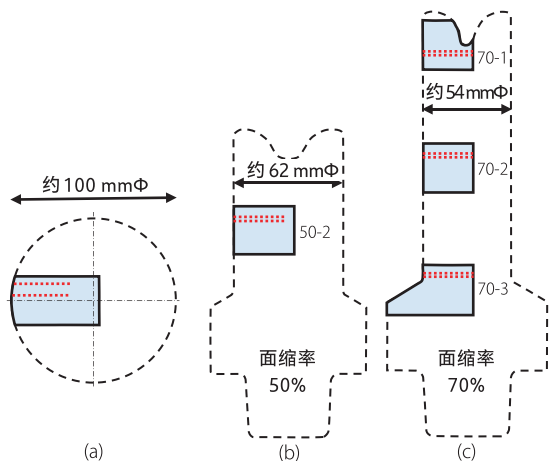


图 6 试样的切下位置和测定位置
(a) 对照试样 (b) 径向锻造加工品 (面缩率 50%)
(c) 径向锻造加工品 (面缩率 70%)

表 5 测定条件

| | |
|---------|----------------------|
| 硬度计 | : 显微维氏硬度计 HMV-G31-FA |
| 压块种类 | : 维氏压块 |
| 试验力 | : HV0.2 (1.96 N) |
| 保留时间 | : 10 秒 |
| 测定间隔及次数 | : 每隔 1 mm 29 点或 30 点 |

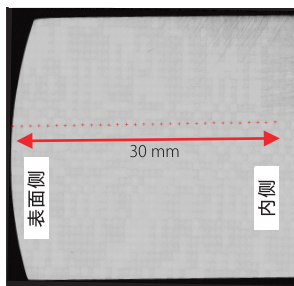


图 7 通过工作台查看器功能的对照试样图像

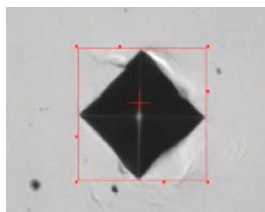


图 8 压痕图像 (对照试样第 2 次第 24 分)

■ 维氏硬度的测定 (测定结果)

测定结果如图 9 ~ 图 13 所示。在硬度的分布方面, 对照试样表面附近很硬, 向内部下降, 比 6 mm 左右内部几乎有一定的趋势。另一方面, 径向锻造加工品的 50-2 和 70-2 不仅限于表面, 而且内部几乎也是如此。此外, 比较同样的面缩率 70% 的径向锻造加工品的话, 看到尖端侧 (70-1) 和根本侧 (70-3) 的内部侧的测定值的偏差大的趋势。关于该因素的调查, 与使用 EPMA 的元素分布像分析结果一起如第 6 页所示。

从以上结果可以看出, 对照试样表面附近的硬度有较高的趋势, 但在径向锻造加工品中, 根据锻造加工的程度 (被敲击时间的程度), 硬度没有大的显著差异。

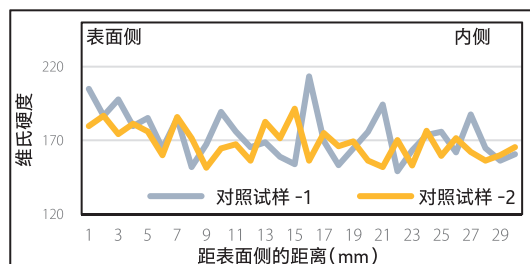


图 9 对照试样的硬度测定结果

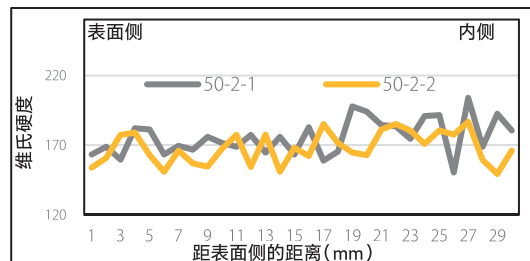


图 10 径向锻造加工品的硬度测定结果 (50-2)

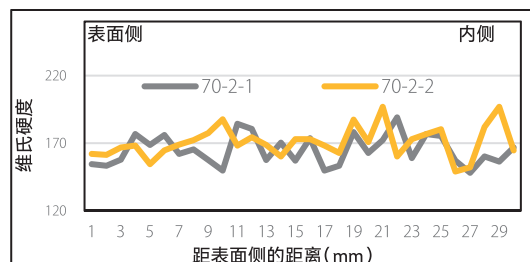


图 11 径向锻造加工品的硬度测定结果 (70-2)

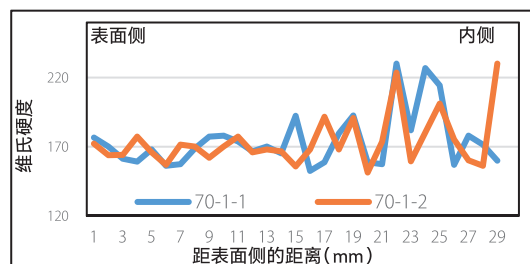


图 12 径向锻造加工品的硬度测定结果 (70-1)

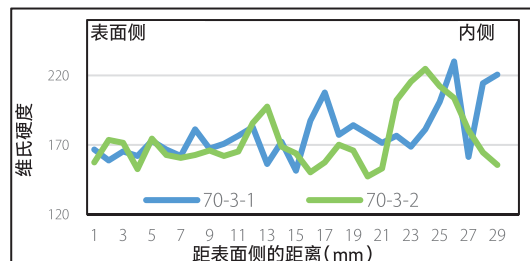


图 13 径向锻造加工品的硬度测定结果 (70-3)

■ 使用 EPMA 进行广域元素分布像分析

沿着用硬度计打痕了的对照试样和径向锻造加工品的 50%，70%（参照图 6）的凹陷位置做了广域元素分布像分析。作为 1 例，径向锻造加工品（面缩率 50%）的背散射电子图像和主要含有元素 C、Si、Cr、Mn、Fe 的元素分布像图像如图 14 所示。此外，关于显示特别特征性分布的 C 和 Cr，从各试样 3 种的表面侧向内部侧放大 3 ~ 5 mm、9 ~ 11 mm、15 ~ 17 mm、21 ~ 23 mm、27 ~ 29 mm 的元素分布像图像如图 15 ~ 图 17 所示。另外，背散射电子图像是 SEM 像的一种，主要表现为平均原子数的差和结晶方位和极端的凹凸（用维氏打痕的凹陷）等表面形状的信息作为对比度的差。元素分布像图像将检测出的 X 射线强度用彩色表示，强度越高，该部位的元素浓度相对越高。

关注各元素的分布的话，径向锻造加工品特别在 Si，Cr，Mn 中显现为沿着与表面平行方向（纵向）的组成分布的流动。在径向锻造加工过程中，结晶和组织发生了变化，特定的微量元素发生了偏析。此外，从表面到浅的部分是微细的，深的部分是粗浓淡的差较大的分布。此外，70% (70-2) 还原度的分布比 50% (50-2) 还原度的分布更细，这表明晶粒大小和微观结构因锻造程度更高（出铁时间更长）而发生了变化。

■ 锻造流线的观察

对径向锻造加工品的试样同等品的截面进行了化学处理，观察了锻造流线。图 18 是面缩率 50% 的截面照片，可以看出锻造流线的流动有起伏。进一步放大前端侧，根据 EPMA 的 Cr 的元素分布像图像重合的东西如图 19 所示。由此可见，锻造流线与 Cr 元素分布的流动是一致的。

图 14 的分析区域

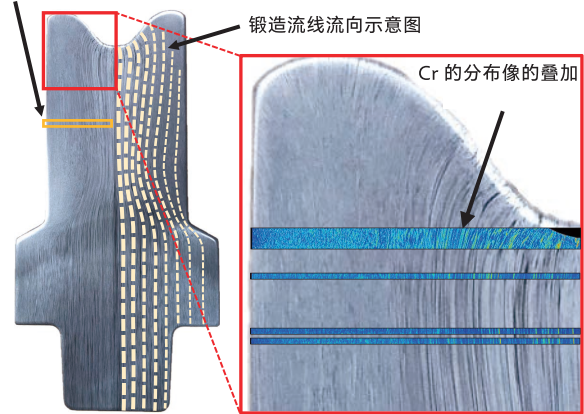


图 18 面缩率 50% 截面的锻造流线观察照片

图 19 锻造流线观察图像的放大和 Cr 的元素分布像的叠加

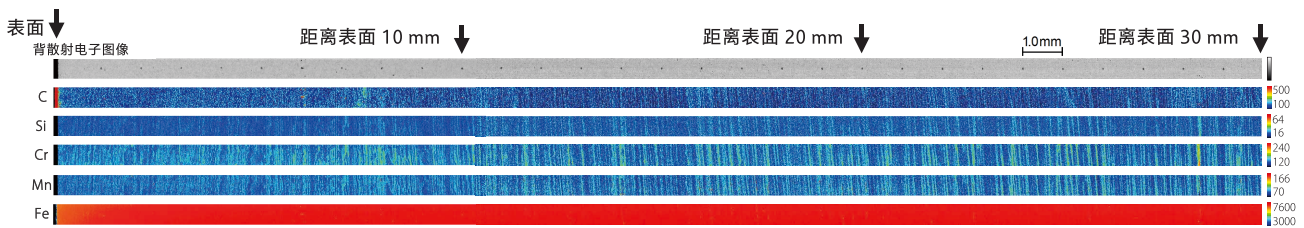


图 14 广域元素分布像 (50-2)

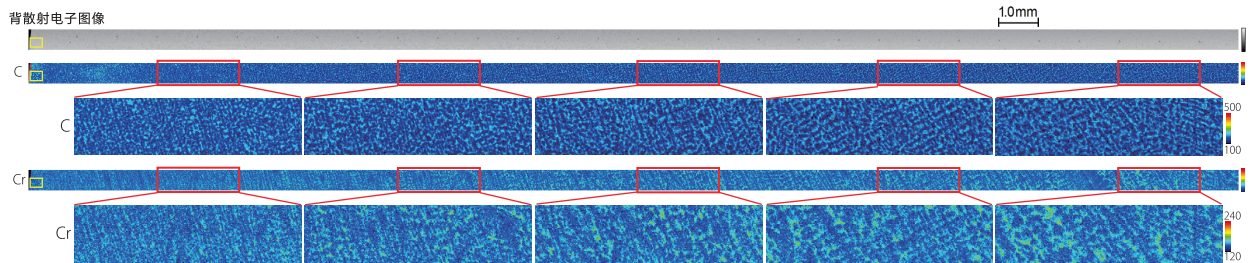


图 15 广域元素分布像 (对照试样)

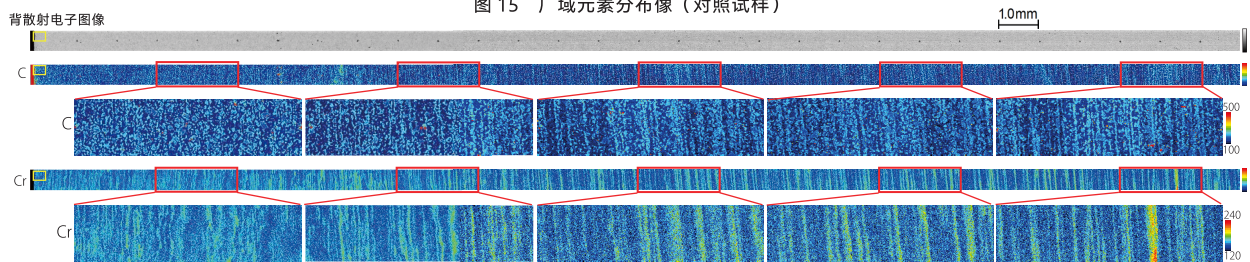


图 16 广域元素分布像 (50-2)

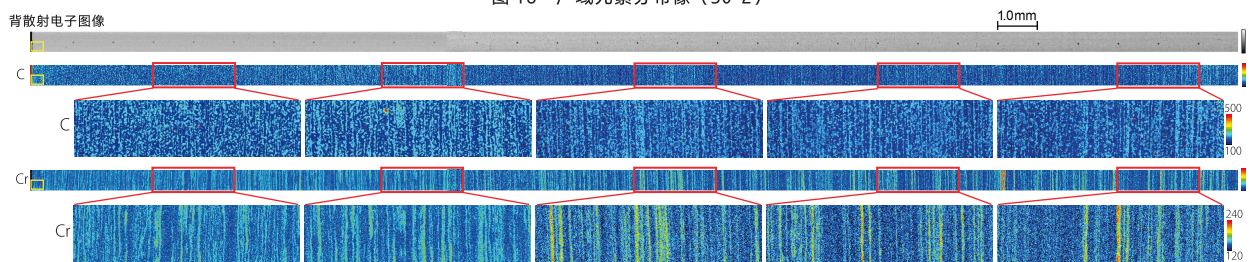


图 17 广域元素分布像 (70-2)

■ 使用 EPMA 进行狭域分布分析

对照试样，用高倍率对径向锻造加工样（50%，70%）的表面附近进行了狭域元素分布分析。将上一頁的图 15 ~ 17 的表面附近放大后的分布图像如图 20 所示，将图 20 的框部进一步放大后的分布图像如图 21 所示。在背向散射电子图像中，获得了反映基于通道从中可知的晶体取向的图像，通过径向锻造加工，可以看到晶粒变细了。从 Cr 的分布来看，明显地出现径向锻造加工品沿着与表面平行的方向（纵向）的组成分布的流动，特别是 70% 是精细的分布。

从图 20 的 C 的分布来看，径向锻造加工品的 70% 与 50% 相比，C 析出的组织有小的趋势。在放大的图 21 中为细小的层状组织（珠光体；铁素体（ α 铁）和渗碳体（ Fe_3C ）2 相分离的组织），径向锻造的加工时间越短，层的间隔越窄，推测强度会增加。微小析出物的评价事例的详细情况请参照附件 4）。

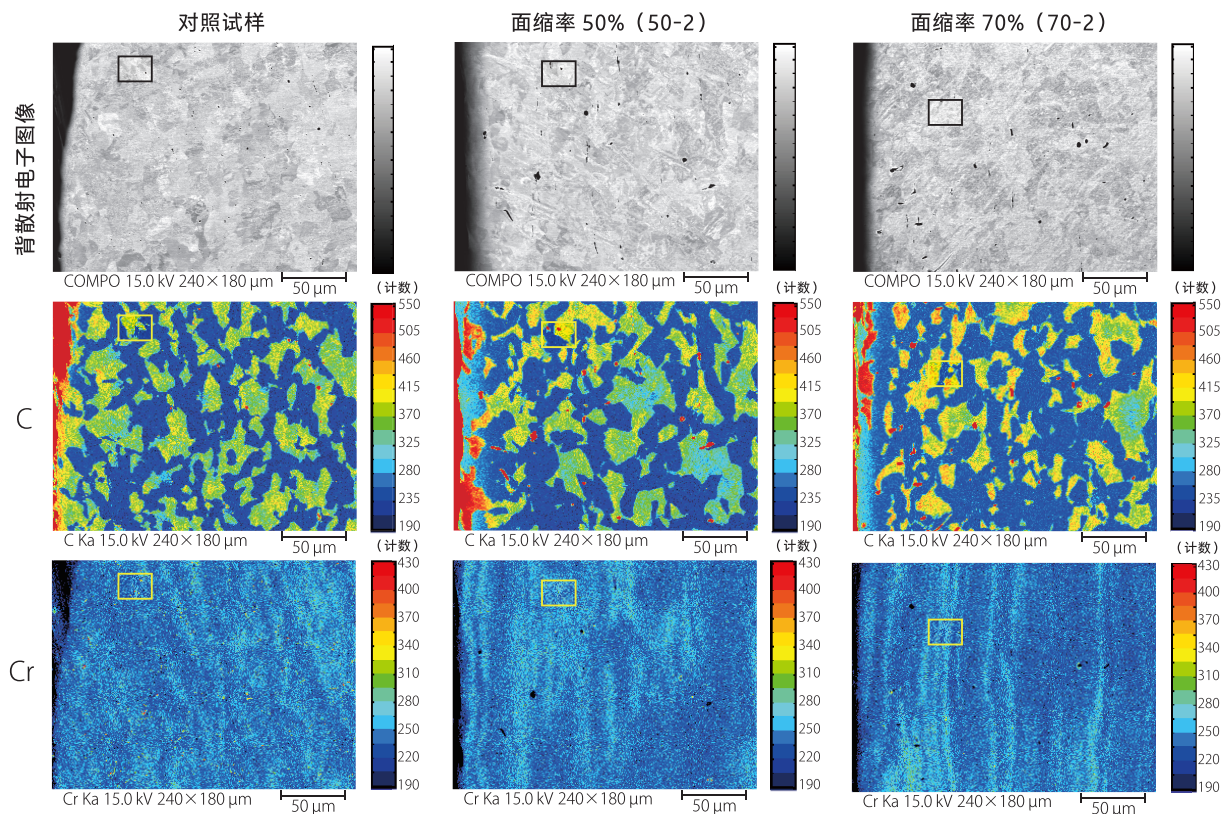


图 20 表面附近的元素分布像（图 15 ~ 17 的黄色框部放大）

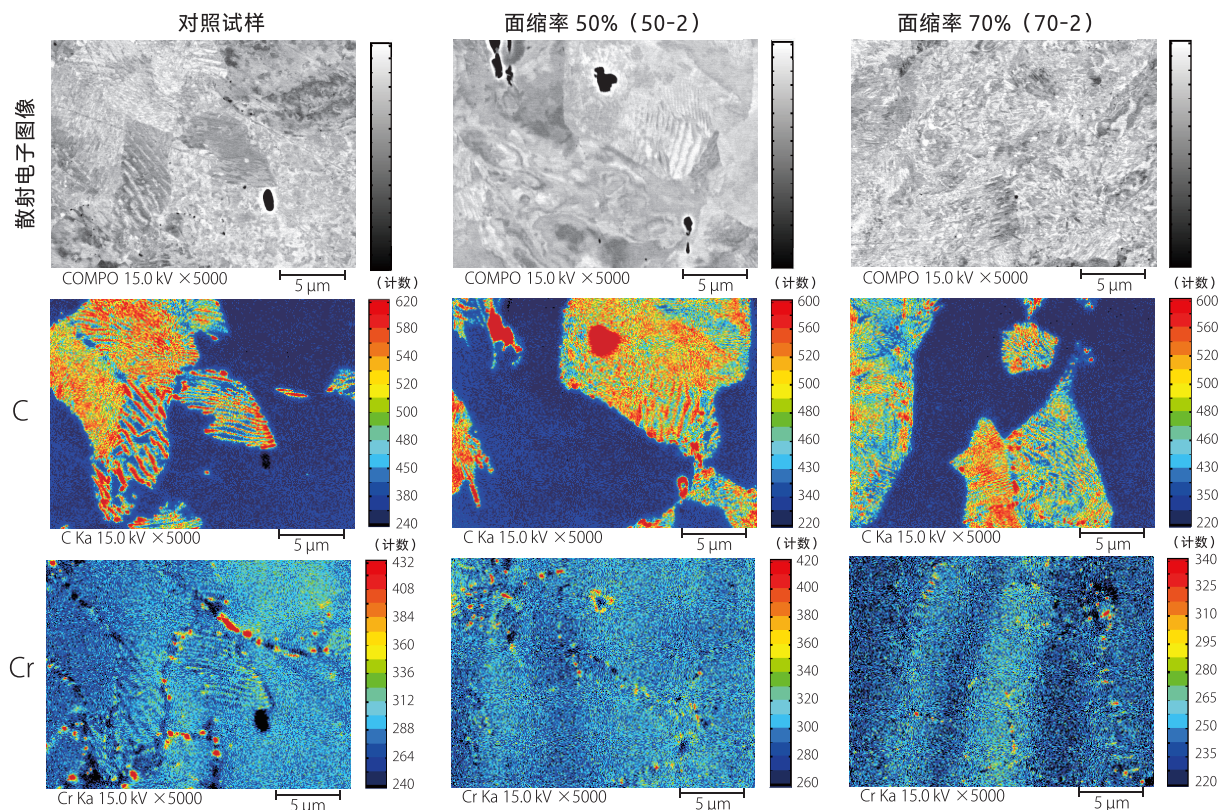


图 21 表面附近的元素分布像（图 20 的框部放大）

■ 拉伸强度与元素分布像分析的比较

从静态拉伸试验的拉伸强度的结果（图 5（a））来看，径向锻造加工品的拉伸强度比对照试样大。这是根据 EPMA 的元素分布像分析（4 ~ 5 页）的结果，径向锻造加工品的组织和晶粒变细，强度提高了。

■ 断裂伸长率与元素分布像分析的比较

从静态拉伸试验的断裂伸长率结果（图 5（d））可以看出，试样②的面缩率为 50% 的断裂伸长率在内部侧有下降的趋势。从 EPMA 的元素分布像分析（图 14、图 16）和锻造流线的照片（图 18、图 19）可以看出，面缩率为 50% 的锻造流线的流动根据场所不同，有相对于拉伸试验方向不平行而起伏的趋势，因此，拉伸时作为材料的弱部分容易断裂。另外，这次目标的产品形状是中空的，可以排除内部力学特性的下降。

■ 硬度试验和元素分布像分析对硬度局部测定的评价

比较同样的面缩率 70% 的径向锻造加工品的话，看到尖端侧（70-1）和根本侧（70-3）的内部侧的测定值的偏差大的趋势。为了调查这个原因，使用 EPMA 对压痕附近进行了分布像分析（图 3）。作为 1 例，在压痕附近试样表面周围形状不良部位的分布像图像（二次电子像和 C 的元素分布像图像）如图 22 所示。在二次电子像中看到的压痕周围褶皱一样的歪斜部位相当于 C 的 X 射线强度低的部分，没有歪斜的部位 C 的 X 射线强度有高的趋势。根据 C 的偏析硬度的不同，产生了像皱纹一样的歪斜。

接着调查了面缩率 70%（70-1）的试样的各元素分布。硬度分布如图 23 所示（重新揭示）。

其中，关注了硬度测量值有大点（24 mm）和小点（20 mm）的区域。元素分布像分析结果如图 24 ~ 25 所示。图 24 中放大 C 和 Cr 的内部侧（距表面 19 ~ 25 mm），图 25 中放大压痕附近。20 mm 的压痕附近 C 和 Cr 的 X 射线强度低，24 mm 的压痕附近 C 和 Cr 的 X 射线强度高。这些结果表明，硬度测量值受 C 和 Cr 偏析的影响。

综上所述，在硬度测定时压痕的凹陷周边出现歪斜，硬度测定值偏差较大的情况下，主要是 C 的偏析。因此，也可以从硬度测定值的偏差大小推测元素的偏析程度。

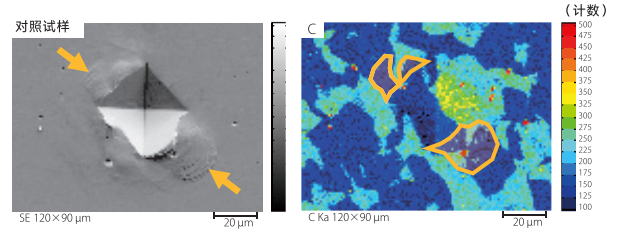


图 22 形状不良凹陷的元素分布像图像

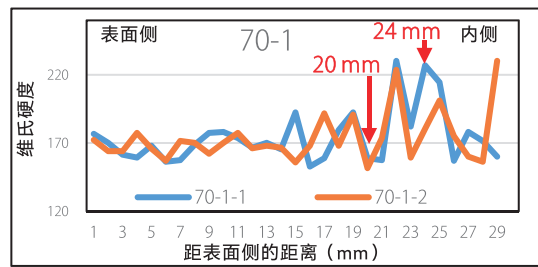


图 23 径向锻造加工品的硬度测定结果（面缩率 70%，70-1）

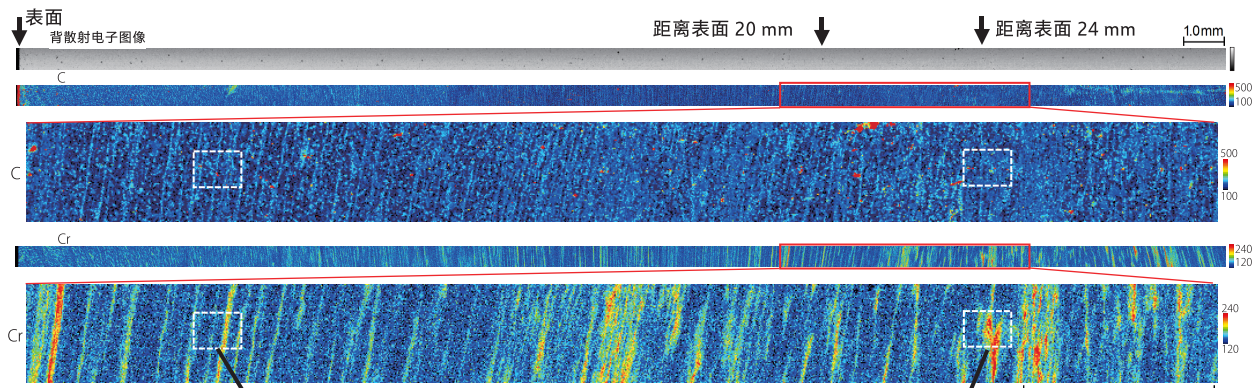


图 24 广域元素分布像（70-1）

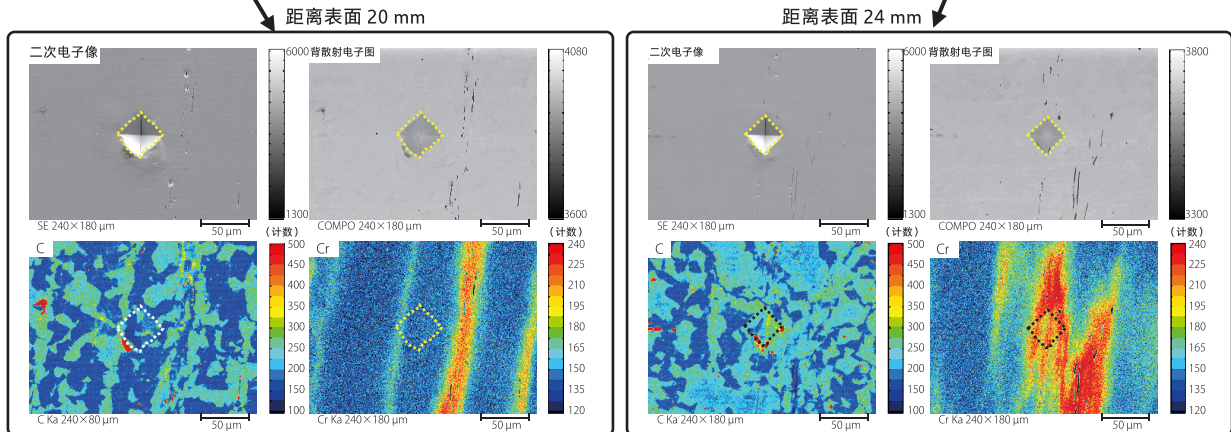


图 25 图 24 的框部放大分布像（70-1）

■ 径向锻造加工品的 TG-DTA 测定

使用图 26 的 DTG-60, 在表 6 的测定条件下, 对 SCr420 制作的材料通过径向锻造加工而成的 2 种样品进行了 TG-DTA 测定。70% 的样品比 50% 的样品通过锤子施加更大的力, 成为加工度大的样品。分别以 n=2 测定的结果如表 7 所示。根据图 28 和图 29, 从 200°C 到 1000°C 没有发现重量变化, 在 770°C 附近发现了吸热峰。

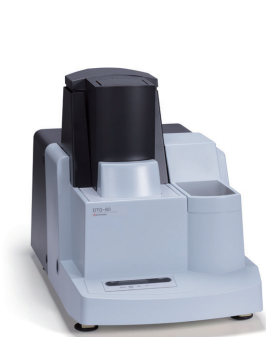


图 26 DTG-60



图 27 TMA-60

表 6 TG-DTA 测定条件

| | |
|------|--------------------------|
| 仪器 | : 示差热 / 热重量同时测定仪器 DTG-60 |
| 试样量 | : 约 392 mg |
| 测量池 | : 氧化铝测量池 |
| 气氛 | : 氮 |
| 加热速度 | : 20°C / min |

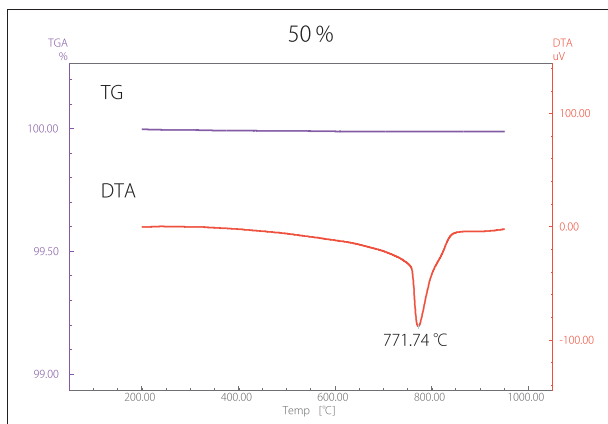


图 28 样品 50% 的 TG-DTA 曲线

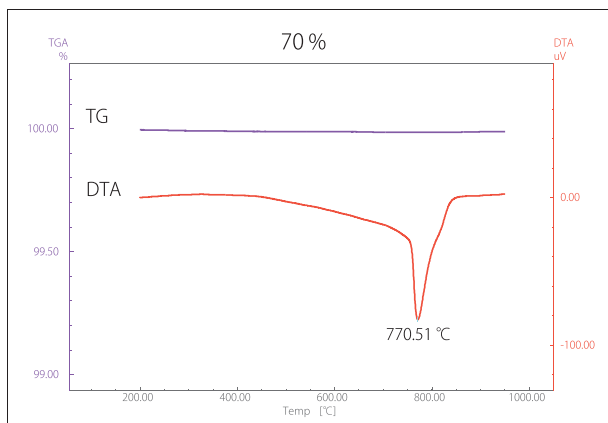


图 29 样品 70% 的 TG-DTA 曲线

表 7 TG-DTA 测定结果

| 样品名称 | 峰 (°C) |
|--------|--------|
| 50%_① | 771.7 |
| 50%_② | 771.6 |
| 50%_平均 | 771.6 |
| 70%_① | 770.5 |
| 70%_② | 770.4 |
| 70%_平均 | 770.5 |

■ 径向锻造加工品的 TMA 测定

使用图 27 的 TMA-60, 在表 8 的测定条件下, 对 SCr420 制作的材料通过径向锻造加工后的 70% 样品进行了 TMA 测定。从图 30 的 TMA 曲线 790°C 附近可以看到拐点, TG-DTA 曲线中看到的吸热反应被认为是相变引起的峰值。如果能掌握相变温度, 在比相变温度高的温度下锻造加工的话组织会均匀化, 在比相变温度低的温度下锻造加工的话组织会微细化, 所以可以进行组织的均匀化和微细化的划分。

表 8 TMA 测定条件

| | |
|------|------------------|
| 仪器 | : 热机械分析仪器 TMA-60 |
| 样品长度 | : 2.592 mm |
| 初始负荷 | : 10 g |
| 气氛 | : 氮 |
| 加热速度 | : 10°C / min |

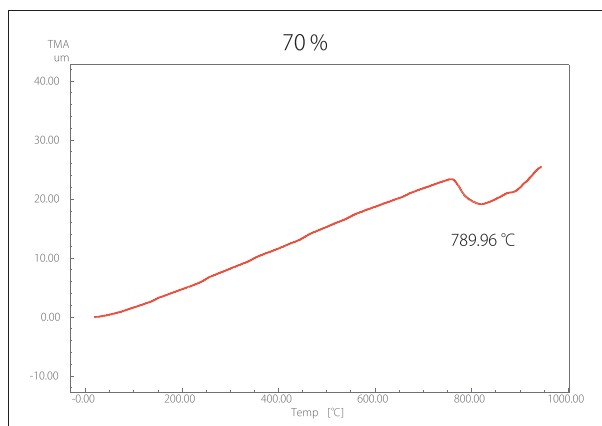


图 30 样品 70% 的 TMA 曲线

■ 热特性评价与元素分布像分析的比较

从 TG-DTA 测定结果来看, 70% 的样品的吸热峰值温度比 50% 的样品低。此外, 根据 EPMA 的元素分布像分析的结果 (图 16、图 17、图 20、图 21), 确认了样品 70% 比样品 50% 通过加工使组织变细。综上所述, 加工度大的样品 70% 的铁素体 + 珠光体相的晶粒组织由于加工而变细, 反应迅速发生, 因此吸热峰顶温度变低。

■ 对照试样与径向锻造加工品比较的总结

在精密万能试验机的力学特性评价中，径向锻造加工品在拉伸强度和弹性模量的测定中得到了提高，泊松比几乎保持不变。另一方面，也发现在径向锻造加工品的内部侧断裂伸长率下降。

在维氏硬度测定中，对照试样在表面和内部的硬度有差异，但在径向锻造加工品中几乎保持不变。但是，在径向锻造加工品中，锻造导致的拉伸方向的端部硬度的测定值偏差明显，这表明是由于含有元素（主要是 C）的偏析造成的影响。

通过 EPMA 的元素分布像分析，可以看到径向锻造加工品沿锻造所敲击方向的垂直方向的组成分布（主要是 Si、Cr、Mn）的流动，与锻造流线观察到的流动一致。此外，通过微小部的元素分布像分析，发现径向锻造加工品，锻造的加工度越大，析出的晶粒越微细。

在热特性评价中，径向锻造加工品从 200°C 到 1000°C 没有发现重量变化，在 770°C 附近发现了吸热峰。此外，从 TMA 测定结果可知，该吸热反应是相变引起的峰值。而且，同样是径向锻造加工品，加工度大的面缩率 70% 的吸热峰值温度也会变低。这与 EPMA 的元素分布像分析结果结合起来考虑的话，在径向锻造加工的同时冷却的过程中相变为“铁素体 + 珠光体”，并且由于锻造加工的效果晶粒变得更细是主要原因。

综上所述，通过各试验测量、分析装置的多角度评价，确认了径向锻造加工的有效性。

■ 通过各试验测量、分析装置进行的多角度评价

综上所述，通过精密万能试验机（图 31）测定力学特性，通过硬度计（图 32）测定维氏硬度，通过 EPMA（图 33）测定元素分布和观察结晶方位，通过热分析（图 34，图 35）测定重量变化和吸热反应，可以多角度评价材料和产品。此外，也可以作为评价显示优异特性的加工领域、优化锻造加工条件和热处理控制条件的的评价工具。

< 参考文献 >

- 1) 株式会社都筑制作所、轴的介绍
<https://www.tsuzuki-mfg.co.jp/solution/2020/01/post-12.php>
- 2) 应用新闻 01-00440-JP 中“采用径向锻造加工的 EV 用电机轴的评价 - 径向锻造加工对静态拉伸特性的影响 - ”
- 3) 应用新闻 01-00445-JP 中“采用径向锻造加工的 EV 驱动电机轴的评价 - 硬度分布与元素分布之间的相关性确认 - ”
- 4) 应用新闻 01-00513-JP 中“采用径向锻造加工的 EV 驱动电机轴的评价 - 基于 EPMA 的元素分布像分析 - ”



图 31 精密万能试验机 AGX-V



图 32 显微维氏硬度计 HMV-G31-FA



图 33 电子探针显微分析仪 EPMA-8050G



图 34 DTG-60



图 35 TMA-60

岛津应用云



AGX, HMV 及 EPMA 是岛津制作所株式会社或其相关公司在日本及其他国家 / 地区的商标。



岛津企业管理（中国）有限公司
岛津（香港）有限公司

<http://www.shimadzu.com.cn>

用户服务热线电话： 800-810-0439
400-650-0439

免责声明：

* 本资料未经许可不得擅自修改、转载、销售；
* 本资料中的所有信息仅供参考，不予任何保证。
如有变动，恕不另行通知。

第一版发行日：2023 年 3 月