**《铜及铜合金带箔材弹性弯曲极限试验方法》行业标准**

**编制说明（预审稿）**

1. 任务来源

根据《工业和信息化部 2022 年第二批行业标准制修订和外文版项目计划》【工信厅科函〔2022〕158号】文件，《铜及铜合金带材弹性弯曲极限试验方法》行业标准（计划号： 2022-1024T-YS），由宁波宁波博威合金板带有限公司、绍兴市特种设备检测院、安徽鑫科新材料股份有限公司、绍兴市质量技术监督检测院、有研工程技术研究院有限公司、宁波兴业盛泰集团有限公司、宁波金田铜业（集团）股份有限公司、浙江惟精新材料股份有限公司、凯美龙精密铜板带(河南)有限公司、苏州金江铜业有限公司、广东中发摩丹科技有限公司等负责起草，完成年限为2023年。

二、工作简况

* 1. 立项目的和意义

 为了提高铜合金带材的质量和市场竞争力，国内和国际市场高端客户对铜合金力学性能指标要求越来越高。传统的抗拉强度、屈服强度和延伸率已不能满足高端客户的需求。由于带材在应用领域都会涉及弯曲等问题，因此，对于铜及铜合金弯曲下的性能指标就显的尤为重要。其指标之一弹性弯曲极限（σFB）目前国内各行业均无统一的检测方法。目前，检测弹性弯曲极限需送到德国相关检测机构进行测试。

 本标准制定的目的，主要是规定汽车连接器电子元器件、5G通信电子元器件、航空航天用电子元器件用铜及铜合金带材弹性弯曲极限测试方法，为判定汽车连接器电子元器件、5G通信电子元器件、航空航天用电子元器件用铜及铜合金带材产品弯曲性能优劣提供判定依据。目前，在高性能铜合金带材生产和研发上，博威合金开发了铜铬锆合金、铜镍锡合金、铜镍磷合金、铜镍硅钴合金、铜锡磷合金、铜锡镍硅合金等系列、60多个牌号的高精度、高性能合金板带，具有优异的物理性能、机械性能、折弯性能和加工性能，以及更好的公差控制、表面光洁度、抗热应松弛、高温软化、抗疲劳性能，广泛应用于汽车电子、5G通讯、消费电子、引线框架等领域。

因此，本标准的制定，对于促进我国高性能铜合金及汽车电子和通信电子产业具有重要的意义。

1. 本标准的制定有助于铜加工产品转型升级和国产化应用，并促进新产品、新技术发展，利于电子信息发展和产业化，提升高端铜合金材料供给质量和水平，符合工信部《关于促进制造业产品服务质量提升的实施意见（工信部科[2019]188号）》文件 第三章 增强质量提升动力 第七条 发挥标准带动作用的规定，和《促进制造业产品和服务质量提升的实施意见》解读（四）加快重点产业质量提升：“对于原材料工业，以提高产品质量的稳定性、一致性和耐久性为基础，增加高性能、功能性、 差别化产品的有效供给”。

2 项目编制组单位简况

2.1编制组成员单位

本标准由宁波宁波博威合金板带有限公司、绍兴市特种设备检测院、安徽鑫科新材料股份有限公司、绍兴市质量技术监督检测院、有研工程技术研究院有限公司、宁波兴业盛泰集团有限公司、宁波金田铜业（集团）股份有限公司、浙江惟精新材料股份有限公司、凯美龙精密铜板带(河南)有限公司、苏州金江铜业有限公司、广东中发摩丹科技有限公司等共同起草，以上编制组成员单位均是《铜及铜合金弯曲应力松弛试验方法》的应用单位。

2.2主编单位的技术基础

本标准的负责起草单位宁波博威合金板带有限公司、宁波博威合金材料股份有限公司是国家技术创新示范企业、国家级制造业单项冠军示范企业，拥有国家认定企业技术中心、国家级博士后科研工作站、国家认可实验室、国家地方联合工程研究中心等。先后承担国家“十四五”重点研发计划项目、国家“十三五”、科技支撑计划等项目，迄今已获得198项国内外发明专利，主持、参与我国国家、行业标准制修订工作26项，引领我国有色合金新材料行业持续发展。博威合金致力于有色合金新材料的研发和生产,服务于半导体、超大规模集成电路、5G/6G通讯、航空航天、高铁、船舶、新能源汽车等30多个行业，打破了多项国外企业对高端合金领域的垄断，解决了新材料“卡脖子”问题，助推我国产业升级。公司在有色合金新材料领域多种新材料的成功研发及产业化，为起草本行业标准提供了有力的技术支撑，具备了起草本国家标准的技术基础。

3 主要工作过程

接到标准起草任务后，宁波博威合金板带有限公司、宁波博威合金材料股份有限公司立即成立了标准编制小组，主要由检测中心、技术部、研发中心等技术人员组成。首先整理各国的测试标准，经综合研究、分析、整合调查的资料，对铜及铜合金弹性弯曲极限的试验方法、工装夹具、测量装置等进行了反复试验、检测、验证和确定。开始了本标准的起草工作，经过编制小组多次内部讨论及广泛征求意见，于2021年12月8日形成了本标准的《讨论稿》。此后，经过标准编制小组内分工协作、试验、验证，以及多次内部讨论和广泛征求意见，于2023年3月形成了标准预审稿。

1. 标准编制原则

本标准起草单位自接受起草任务后，成立了本标准编制工作组负责收集该测试方法的相关信息。确定了《铜及铜合金带材弹性弯曲极限》标准起草所遵循的基本原则和编制依据：

1）查阅相关标准和国内外客户的相关技术要求；

2）根据国内铜及铜合金板带生产企业具体情况，力求做到标准的合理性与实用性；

3）完全按照GB/T 1.1和有色加工产品标准和国家标准编写示例的要求进行格式和结构编写。

1. 确定标准主要内容的论据

1标准题目与适用范围

本文件立项名称为《铜及铜合金带材弹性弯曲极限试验方法》，适用范围为铜及铜合金带材，为覆盖厚度0.05mm以上的箔材的测试需求，将标准名称更改为《铜及铜合金带箔材弹性弯曲极限试验方法》本文件规定了一种测定铜及铜合金带材弹性模量（E）和弹性弯曲极限 σFB试验方法。

本文件适用于厚度为0.05 mm ~ 1.0 mm的铜及铜合金带、箔材的弹性模量和弹性弯曲极限。

2规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件

GB/T 8170 数值修约规则与极限数字的表示和判定

GB/T 10623-2008 金属材料 力学性能试验术语

GB/T 16825.1-2022 静力单轴试验机的检验 第1部分：拉力和（或）压力试验机测力系统的检验与校准

GB/T 26303.3 铜及铜合金加工材外形尺寸检测方法 第3部分：板带材

3术语与定义

GB/T 10623界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

弹性弯曲极限 spring bending limit

σFB

在不超过给定的小塑性变形的情况下，材料所承受的最大弯曲应力值。

3.2

 挠度 deflection

试样在受力时，试样中面在垂直于中面方向的线位移。

3.3

强制挠度 permanent deflection

试样放置在支撑件上，人为在试样中部施加载荷产生的挠度。见图1中b）。

3.4

残余挠度 residual deflection

卸除强制挠度后试样残余的挠度。见图1中c）。

4

3

2

1

F

5

6

a)自由放置 b)加载 c)卸载

标引序号说明：

1—施力压头；

2—试样；

3、4—支撑件；

 5—强制挠度；

 6—残余挠度。

图1 弯曲弹性极限测试示意图

 4 符号及说明

 本文件适用的符号及说明见表1。

表1 符号及说明

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 符号 | 单位 | 说明 |
| t | mm | 试样的厚度 |
| w | mm | 试样的宽度 |
| L | mm | 试样的长度 |
| F | N | 施加的负载力 |
| *E* | MPaa | 弹性模量 |
| l | mm | 支撑间距，三点弯曲试验装置两支撑件之间的距离 |
| l’ | mm | 弹性极限超过700MPa时样品的支撑间距（见9.3.4） |
| k | - | 常数（见9.3.2.1） |
| k’ | - | 常数（见9.3.4） |
| s | mm | 固定载荷下样品的挠度（见9.2.3） |
| S\* | mm | 产生规定残余挠度的强制挠度b |
| C | mm | 渐进加载测试时，倒数第二个荷载下的强制挠度 |
| D | mm | 渐进加载测试时，最后一个荷载下强制挠度 |
| c | um | 渐进加载测试时，倒数第二个荷载下的残余挠度 |
| d | um | 渐进加载测试时，最后一个荷载下的残余挠度 |
| σFB | N/mm2 | 弹性弯曲极限 |
| $$σ\_{FB\*}$$ | N/mm2 | 将E0=100000N/mm2作为弹性模量计算或查表获得的弹性弯曲极限值c |
| a1MPa=1N/mm2。b规定残余挠度为50um，弹性极限超过700MPa时为25um。c试样的弹性弯曲极限还要根据试样的弹性模量再计算获得。 |

 5 试验原理

 该试验方法利用三点弯曲的形式，样品支撑在靠近测试样品端部的两个支撑件上，并且在支撑件之间的中间施加负载。通过测量弹性挠度确定弹性模量，测量残余挠度对应的强制挠度确定弹性弯曲极限。

6 试验设备

6.1样品支撑架

样品支撑架（见图2）为两个相同的支撑件组成。支撑架与试样接触边宽度大于10.2mm，与样品接触的支撑边缘截面为60°角的三角形，边缘半径小于0.03mm。在支撑架下方装有滑轨，两个支撑件可以相向运动，调整精度0.02mm。激光测距仪始终保持在两支撑架中心位置，与加载轴线一致。

6.2施力压头

施力压头（见图2）为头部为90°且光滑平整的压块，压块上端连接传感器，下部尖端处对样品施加向下的压力。压头应位于支撑件中心。

60°

60°1

图2 试验工装示意图

6.3试验机

试验机的测力系统应按照GB/T 16825.1-2022进行校准，并且其准确度应为1级或者优于1级。传感器力值不应超过100N。

6.4激光测距仪

在支撑架中心部位测量挠度值，测量时不应与样品接触，测量误差不应超过±0.002mm。测量挠度用的激光测距仪的误差不应超过±0.001mm。

7 试样

7.1 试样的切取与制备

7.1.1试样应从平整度不大于2mm/m的板带材上截取，平整度的检测按GB/T 26303.3的规定进行。

7.1.2试样应从带、箔材上沿轧制方向截取，当客户有要求时，可沿其它方向截取，并在报告时予以说明。

7.1.3 切取样品时，应使用切割工具从样品上切割或铣削试样，取样过程应尽量避免试样过热和加工硬化对试验结果产生影响，且制样过程中不可拉直和弯曲试样，不得进行可能改变其应力状态的矫正。

7.1.4 完成加工的试样应平直、无油污和氧化层，无毛刺，表面无划伤及其他人为或机械损伤。

7.2 试样的尺寸

7.2.1根据试样的厚度分为A、B区间，试样尺寸应符合表2的规定。

表2试样尺寸

 单位为毫米

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 区间 | 厚度t | 宽度w | 长度L |
| A | 0.300～1.000 | 10.00 | 150 |
| 0.150～＜0.300 | 70 |
| B | 0.100～0.200 | 60 |
| 0.050～＜0.100 | 50 |
| 注：当厚度区间重合时，A、B区间均适用。 |

7.3 试样的数量

7.3.1从同一件样品应至少取四个平行样，不同表面（顶部、底部）应分别测量两个样品。

7.4 试样的标识及使用

7.4.1 试样应明确标识带、箔材的顶部和底部。顶部、底部参考试件的自然曲率来确定，纵向弯曲的带、箔材凸面表示为顶部，凹面表示为底部。

7.4.2已测过弹性模量的试样可以用来测量弹性极限，测量弹性弯曲极限的试样只能使用一次。

8 试验环境条件

试验应在10℃~ 35℃的温度范围内进行。对温度要求严格的试验，试验温度应为（23 ± 5）℃。

9 试验步骤

9.1 试验准备

在支撑间距范围内至少等距测试试样三个位置的尺寸（厚度t和宽度w），试样的厚度测量精确到0.001mm，宽度测量精确到0.01mm。试样要求厚度均匀，同一片试样上厚度偏差不超过0.002mm，取三次测量的平均值，并作记录。

9.2 弹性模量的测定

9.2.1 测量弹性模量时的弹性挠度应在支撑架中间位置进行测量。在试样加载时测量挠度。测量误差应不超过0.002mm。

9.2.2测量弹性模量时，其支撑架的跨距按照表3要求进行：

表3 不同样品区间对应测量弹性模量试验条件

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 区间 | 支撑间距l/mm | 负载F/N |
| A | 100×t | 0.98±1%  |
| B | 215.4×t | 0.098±1%  |
| 注：t为样品厚度，单位mm。 |

当试样厚度小于0.07mm时，因测量的不确定性与支撑架之间的间距成反比，此时可以使用弹性模量理论值或者其他方法测得的弹性模量值来计算弹性弯曲极限。

9.2.3试样应对称放置在支撑架上，该位置为挠度测量的零位。给试样加载，测量由规定荷载（见表3）产生的强制挠度s，并记录。

9.2.4 将所测挠度值按照公式（1）计算弹性模量。计算结果精确到1000MPa，应根据GB/T 8170进行修约。

 $E=\frac{F}{4×ω×s}×\left(\frac{l}{t}\right)^{3}$$E=\frac{F}{4×ω×s}×\left(\frac{l}{t}\right)^{3}$ …………………… (1)

其中：

 E——弹性模量（杨氏模量），单位为牛顿每平方毫米N/mm2；

 F——载荷力值，单位为牛顿N；

 l——支撑间距，单位为毫米mm；

 s——按表3加载的挠度值，单位为毫米mm；

 t——试样的厚度，单位为毫米mm；

 ——试样的宽度，单位为毫米mm。

9.2.5在同组四个试样上分别测试弹性模量值，测试时两个试样顶部朝上，两个试样底部朝上，取四个试样的测试平均值作为材料的弹性模量。

9.3弹性弯曲极限的测定

9.3.1 测量弹性弯曲极限时的残余挠度应在支撑架中间位置进行测量。在试样卸载时测量挠度。测量误差应不超过0.002mm。

9.3.2强制挠度的测定

9.3.2.1试样应对称放置在支撑架上，该位置为挠度测量的零位。按照公式（2）计算得到跨距l。

 …………………… (2)

其中：

k——为常数，为0.8mm；

l——支撑间距，单位为毫米mm；

t——试样的厚度，单位为毫米mm。

9.3.2.2 对试样施加一定的载荷，使之产生2mm的强制挠度，保持5s～10s后，卸除载荷并立即测试其残余挠度，测量时间应控制在5s～10s。然后以给定的增量（0.667mm）逐渐加载和卸载，每次试样卸载后测量残余挠度，直至残余挠度等于或大于50μm。

9.3.2.3测试完成后，用公式（3）计算强制挠度，用线性插值法求得：

 …………………… (3)

其中：

s\*——产生残余挠度50μm时的强制挠度，单位为毫米mm；

 C——倒数第二次荷载时的强制挠度，单位为毫米mm；

 D——最后一次荷载时的强制挠度，单位为毫米mm；

 c——倒数第二个荷载下的残余挠度，单位为微米um；

 d——最后一个荷载下的残余挠度，单位为微米um。

9.3.3弹性弯曲极限的计算

9.3.3.1不大于700Mpa

 带箔材的弹性极限σFB按公式（4）计算。

 …………………… (4)

其中：

——弹性弯曲极限，单位为牛顿每平方毫米N/mm2；

E——用公式（1）计算得到的弹性模量，单位为牛顿每平方毫米N/mm2；

t——试样厚度，单位为毫米mm；

l——支撑间距，单位为毫米mm；

S\*——用公式（3）计算得到的强制挠度，单位为毫米mm。

附录A的表A.1是为了更好的计算弹性弯曲极限，将E0=100000N/mm2作为弹性模量代入公式（4）中得到公式（5）所获得。

 …………………… （5）

从表中获得值后：用E/E0，其中E是用公式(1)计算所得，就可以获得。

9.3.3.2大于700Mpa

当材料具有很高的弹性弯曲极限时，由于所使用的设备类型不同，可能在设备达到行程极限时，也无法实现50μm的永久变形。在这种情况下，支撑间距需要用公式(6)来调整：

 …………………… （6）

 其中：

 l’——是支撑间距，单位为毫米mm

 k’——是常数，0.4mm

 t——试样的厚度，单位为毫米mm

并在残余挠度为25μm的基础上进行测量，用l’替代l后，用公式(4)计算弹性极限。

如使用该方法测试弹性弯曲极限，需在试验报告中注明。

9.3.4在同组四个试样上分别测试弹性弯曲极限，测试时两个试样顶部朝上，两个试样底部朝上，取四个试样的测试平均值作为材料的弹性弯曲极限，结果精确到1MPa，依据GB/T 8170进行修约。

10 试验报告

试验报告应包含以下信息：

1. 试样名称，牌号、状态、厚度；
2. 试验日期和温度；
3. 试样的取样方向（非轧制方向取样时）；
4. 弹性模量*E*的获得方式（非此方法获得时）；
5. 弹性弯曲极限σFB。如有要求，提供每次测量值并标注试样的测试面（顶部向上/底部向上）；
6. 弹性弯曲极限残余挠度（非50μm时）；

本文件编号。

1. 标准水平分析

根据查阅的资料，国内外测试铜及铜合金弹性弯曲极限的方法标准主要有EN 12384-1999 ，未查到相关的国际标准和美国标准。

基于上述现状，宁波博威板带有限公司和宁波博威合金材料有限公司根据多年研究铜及铜合金带材弹性弯曲极限特性的经验，借鉴欧盟标准EN 12384-1999 《铜及铜合金弹性弯曲极限测试方法》，重新设计了工装卡具，采用精度等级更高，测量更加方便的激光测量模式，使测量值更加精准和快捷。本标准相比欧标EN12384-1999标准具有实用性强、制样方便、试验装置简单易操作，测量值更加精准等优点。

五、与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

与现行相关法律、法规、规章及相关强制推荐的标准没有冲突。

六、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

七、作为强制性国家标准的建议

 本标准建议不作为强制性标准，而建议作为推荐性标准。

1. **贯彻标准的要求和措施建议**

为使标准能更好地发挥作用，提高铜及铜合金板带生产企业的控制水平，建议针对本标准制订切实可行的贯彻措施，做好宣传培训工作，使各相关单位充分掌握标准中所规定的检测方法，并加强示范推广，让标准在铜及铜合金板带的生产和使用过程中得以广泛应用。同时，对标准执行情况进行跟踪调查，及时发现标准执行中的问题，不断修改完善，提升标准水平，提高标准的科学性、合理性、协调性和可操作性，以保证产品质量，满足国内、外市场及用户的需要。

九、废止现行有关标准的建议

无。

十、其它应予说明的事项

无。

十一、预期效果

本标准制定的目的，主要是规定汽车连接器电子元器件、5G通信电子元器件、航空航天用电子元器件用铜及铜合金带材弹性弯曲极限测试方法，为判定汽车连接器电子元器件、5G通信电子元器件、航空航天用电子元器件用铜及铜合金带材产品弯曲性能优劣提供判定依据。

《铜及铜合金弹性弯曲极限》国家标准编制组

2023年3月18日

附表：

附表1： C70250 TM03 0.2mm 弹性弯曲极限测试值

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 测试员一 | 测试员二 | 测试员三 |
| 弹性模量（GPa） | 平均弹性模量（GPa） | 弹性弯曲极限（MPa） | 平均弹性弯曲极限（MPa） | 弹性模量（GPa） | 平均弹性模量（GPa） | 弹性弯曲极限（MPa） | 平均弹性弯曲极限（MPa） | 弹性模量（GPa） | 平均弹性模量（GPa） | 弹性弯曲极限（MPa） | 平均弹性弯曲极限（MPa） |
| 1 | 131 | 132  | 327 | 323  | 130 | 131  | 325 | 320  | 131 | 132  | 326 | 321  |
| 2 | 133 | 327 | 130 | 324 | 133 | 314 |
| 3 | 132 | 324 | 131 | 310 | 132 | 329 |
| 4 | 133 | 315 | 131 | 320 | 133 | 313 |
| 5 | 131 | 131  | 316 | 322  | 131 | 130  | 310 | 316  | 132 | 133  | 331 | 327  |
| 6 | 130 | 333 | 132 | 328 | 133 | 327 |
| 7 | 131 | 313 | 129 | 310 | 133 | 328 |
| 8 | 130 | 326 | 128 | 317 | 133 | 322 |
| 9 | 132 | 131  | 312 | 321  | 127 | 127  | 312 | 317  | 133 | 133  | 311 | 315  |
| 10 | 132 | 330 | 127 | 310 | 133 | 320 |
| 11 | 131 | 313 | 128 | 322 | 133 | 323 |
| 12 | 130 | 327 | 127 | 325 | 133 | 306 |
| 13 | 130 | 131  | 315 | 317  | 131 | 129  | 339 | 321  | 130 | 131  | 302 | 313  |
| 14 | 131 | 318 | 128 | 322 | 131 | 313 |
| 15 | 131 | 321 | 127 | 314 | 131 | 323 |
| 16 | 131 | 314 | 128 | 309 | 131 | 315 |
| 17 | 131 | 131  | 308 | 317  | 129 | 128  | 334 | 326  | 131 | 131  | 318 | 316  |
| 18 | 131 | 325 | 127 | 333 | 130 | 331 |
| 19 | 132 | 311 | 129 | 314 | 132 | 312 |
| 20 | 130 | 322 | 127 | 321 | 129 | 301 |
| 21 | 130 | 130  | 318 | 326  | 129 | 129  | 318 | 317  | 131 | 131  | 316 | 321  |
| 22 | 131 | 323 | 129 | 328 | 130 | 332 |
| 23 | 131 | 333 | 128 | 319 | 131 | 311 |
| 24 | 129 | 329 | 129 | 303 | 131 | 326 |
| 25 | 131 | 132  | 310 | 314  | 127 | 128  | 310 | 320  | 131 | 131  | 321 | 315  |
| 26 | 132 | 302 | 129 | 334 | 132 | 312 |
| 27 | 132 | 320 | 128 | 329 | 131 | 314 |
| 28 | 131 | 323 | 129 | 305 | 131 | 311 |
| 29 | 130 | 130  | 316 | 310  | 131 | 130  | 325 | 324  | 131 | 131  | 326 | 325  |
| 30 | 131 | 308 | 130 | 331 | 131 | 325 |
| 31 | 130 | 307 | 129 | 313 | 130 | 325 |
| 32 | 130 | 309 | 129 | 327 | 131 | 323 |
| 33 | 130 | 130  | 325 | 324  | 131 | 131  | 317 | 316  | 131 | 131  | 332 | 322  |
| 34 | 130 | 303 | 130 | 316 | 129 | 325 |
| 35 | 130 | 331 | 131 | 318 | 132 | 313 |
| 36 | 130 | 337 | 131 | 312 | 130 | 318 |
| 37 | 131 | 132  | 329 | 322  | 130 | 130  | 317 | 322  | 131 | 130  | 323 | 315  |
| 38 | 131 | 317 | 128 | 312 | 130 | 322 |
| 39 | 132 | 324 | 131 | 328 | 130 | 307 |
| 40 | 132 | 317 | 129 | 329 | 130 | 308 |
| 最大值 | **132** | / | **326** | / | **131** | / | **326** | / | **133** | / | **327** |
| 最小值 | **130** | / | **310** | / | **127** | / | **316** | / | **130** | / | **313** |
| 极差 | **2** | / | **16** | / | **4** | / | **10** | / | **3** | / | **14** |
| 平均值 | **131** | / | **319** | / | **129** | / | **320** | / | **131** | / | **319** |
| 方差 | **0.50** | / | **24.91** | / | **1.32** | / | **10.88** | / | **1.02** | / | **23.42** |
| 标准差 | **0.67** | / | **4.74** | / | **1.09** | / | **3.13** | / | **0.96** | / | **4.59** |

附表2 不同厚度弹性弯曲极限测试结果

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 样品牌号 | 状态 | 厚度（mm） | 弹性模量（GPa） | 平均弹性模量（Gpa） | 弹性弯曲极限（MPa） | 平均弹性弯曲极限（MPa） |
| 1 | C19920 | 固溶 | 0.080 | 118 | 120 | 476 | 484 |
| 122 | 485 |
| 122 | 485 |
| 118 | 488 |
| 2 | C19920 | 固溶 | 0.080 | 124 | 123  | 471 | 489  |
| 124 | 508 |
| 124 | 466 |
| 121 | 510 |
| 3 | C42300 | 固溶 | 0.150 | 118 | 118  | 285 | 294  |
| 118 | 296 |
| 122 | 290 |
| 113 | 305 |
| 4 | C42300 | 固溶 | 0.150 | 117 | 117  | 329 | 296  |
| 116 | 258 |
| 118 | 338 |
| 115 | 257 |
| 5 | C72500 | 固溶 | 0.40 | 128 | 127  | 508 | 509  |
| 126 | 513 |
| 127 | 505 |
| 127 | 508 |
| 6 | C72500 | 固溶 | 0.40 | 129 | 126  | 506 | 515 |
| 123 | 517 |
| 122 | 514 |
| 128 | 523 |
| 7 | C52100 | 气退 | 0.50 | 104 | 105  | 396 | 408  |
| 104 | 406 |
| 105 | 403 |
| 105 | 426 |
| 8 | C52100 | 气退 | 0.50 | 102 | 104  | 407 | 419  |
| 104 | 403 |
| 103 | 421 |
| 107 | 443 |
| 9 | C14415 | R420 | 1.0 | 129 | 130  | 233 | 260  |
| 130 | 288 |
| 129 | 230 |
| 130 | 288 |
| 10 | C14415 | R420 | 1.0 | 129 | 130  | 239 | 264  |
| 130 | 273 |
| 129 | 257 |
| 130 | 285 |
| 11 | C19920 | 固溶 | 0.044 | 130 | 130 | 432 | 407 |
| 130 | 425 |
| 130 | 385 |
| 130 | 385 |
| 12 | C19920 | 固溶 | 0.044 | 130 | 130 | 410 | 397 |
| 129 | 410 |
| 130 | 391 |
| 129 | 378 |