#### ICS 77.040.10

YS

**CCS H 23**

**中华人民共和国有色金属行业标准**

**YS/T XXX XX －XXX**

铜及铜合金带、箔材弹性弯曲极限试验方法

### **Copper and copper alloys - Determination of spring bending limit on strip and foils**

（送审稿）

**XXXX—XX--XX发布 XXXX—XX--XX实施**

**中华人民共和国工业和信息化部 发布**

**前 言**

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由全国有色金属标准化技术委员会（SAC/TC 243）提出并归口。

本文件起草单位：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

本文件主要起草人：张明、陈纪东、孟祥鹏、余焕伟、黄翔、王生、彭丽军、苑和锋、孙晓丽、吴存慧、鲁长建、王琳、韩坦、杜锡勇、冯丽婷、沈忠昀、郑芸、裘桂群、高文栋、刘爱奎、唐艳同、茆耀东、许丁洋

铜及铜合金带、箔材弹性弯曲极限试验方法

1范围

本文件描述了测定铜及铜合金带、箔材弹性模量（E）和弹性弯曲极限（σFB）的试验方法。

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测试。

2规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 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

3术语与定义

GB/T 10623-2008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

s

试样在受力时，试样中间在垂直于中间方向的线位移。

3.3

强制挠度 permanent deflection

S

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）。

产生规定残余挠度的强制挠度用S\*表示。

3.4

残余挠度 residual deflection

Sc

卸除强制挠度后试样残余的挠度。(见图1中c）。

41

31

221

11

F

S

SC

a)自由放置 b)加载 c)卸载

标引说明：

1——施力压头；

2——试样；

3、4——支撑件；

F——负载。

图1 弯曲弹性极限测试示意图

4 试验原理

本方法利用三点弯曲的形式，试样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。

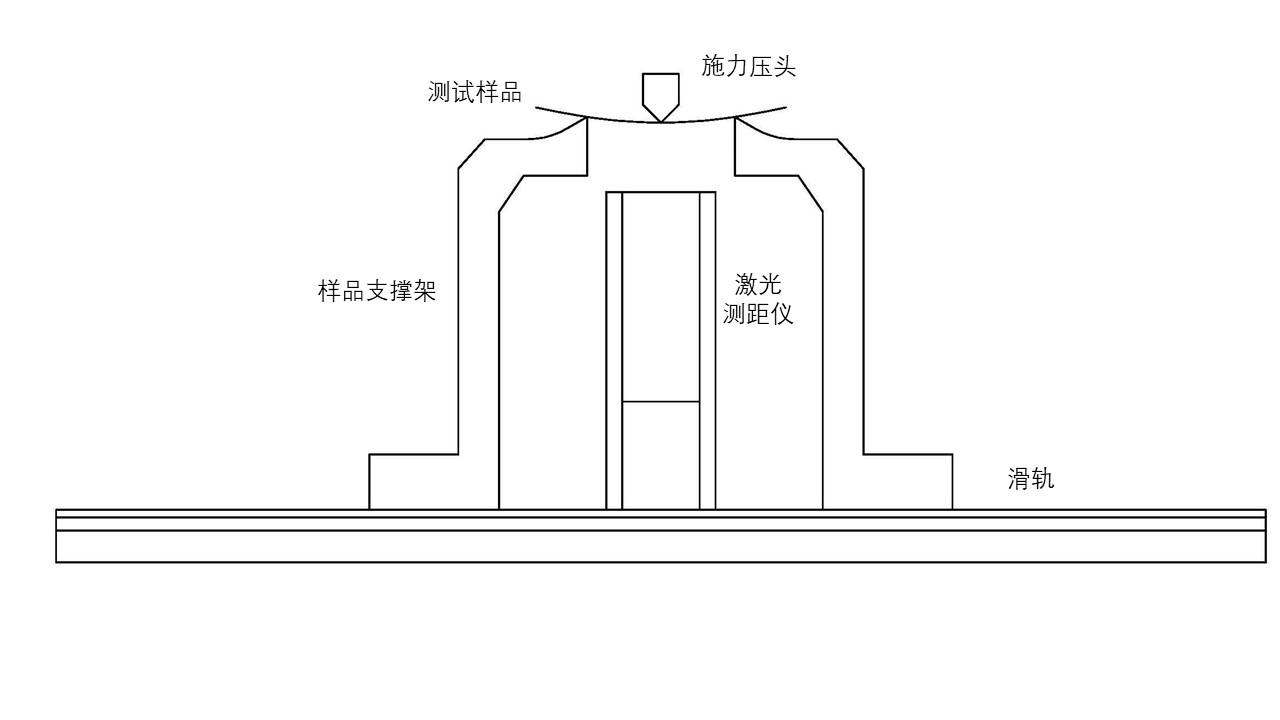
5 试验设备

5.1样品支撑架

样品支撑架（见图2）由两个相同的支撑件组成。支撑架的宽度应大于10.2mm，与试样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，两支撑件间距离在0.1mm~100mm间连续可调，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。

5.2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，下部尖端处对试样施加向下的压力。压头应位于支撑件中心。



60°

60°1

图2 试验工装示意图

5.3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。试验机应能实现施力压头位移控制，位移精度不低于0.02mm。

5.4激光测距仪

挠度值应在支撑架中心部位测量，测量时不应与试样接触，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。

6 试样

6.1 试样的切取与制备

6.1.1试样应从带、箔材上轧制方向截取，当客户有要求时，可从其它方向截取，并在报告时予以说明。

6.1.2 切取试样时，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，且制样过程中不应拉直和弯曲试样，不应进行可能改变其应力状态的矫正。

6.1.3完成加工的试样应平整，无油污、氧化层，无毛刺，表面无划伤及其他人为或机械损伤。

6.2 试样的尺寸

6.2.1根据试样的厚度分为A、B区间，试样尺寸应符合表1的规定

表1试样尺寸

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 区间 | 厚度（t）  mm | 宽度（w）  mm | 长度（L）  mm |
| A | 0.050～＜0.100 | 10.00+0.05 | 50 |
| 0.100～0.200 | 60 |
| B | 0.150～＜0.300 | 70 |
| 0.300～1.000 | 150 |

6.3 试样的数量、标识及使用

6.3.1从同一件样品应至少取四个试样，应明确标识带、箔材的正面和反面。正面、反面参考试样的自然曲率来确定，纵向弯曲的带、箔材凸面表示为正面，凹面表示为反面。不同表面（正面、反面）各测量两个试样。

6.3.2已测过弹性模量的试样可以用来测量弹性弯曲极限，测量弹性弯曲极限的试样不能重复使用。

7 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）℃。

8 试验步骤

8.1 试验准备

在支撑间距范围内至少测量试样的三个位置的尺寸（厚度t和宽度w），厚度精确到0.001mm，宽度精确到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，宽度偏差不超过0.05mm，取三次测量的平均值，并作记录。

8.2 弹性模量的测定

8.2.1 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。

8.2.2测量弹性模量时，其支撑间距按照表2的要求进行：

表2 不同试样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 | 215.4×t | 0.098±1% |
| B | 100×t | 0.98±1% |

当试样厚度小于0.07mm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。

8.2.3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，测量由规定负载（见表2）产生的强制挠度S，并记录。

8.2.4 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。

…………………… (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2负载产生的挠度值，单位为毫米（mm）；

t——试样的厚度，单位为毫米（mm）；

w——试样的宽度，单位为毫米(mm)。

8.2.5在四个试样上分别测试弹性模量值，取平均值作为试样的弹性模量。

8.3弹性弯曲极限的测定

8.3.1 残余挠度的测定

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。

8.3.2强制挠度的测定

8.3.2.1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）计算得到支撑间距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）。

8.3.2.2当试样具有很高的弹性弯曲极限（＞700MPa）时，支撑间距应按照公式(3)计算，并取残余挠度为25μm的值为该试样的弹性弯曲极限。

…………………… （3）

其中：

k'——为常数，0.4mm；

l'——支撑间距，单位为毫米（mm）；

t——试样的厚度，单位为毫米（mm）。

8.3.2.3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≥50μm。当试样弹性弯曲极限＞700MPa时，直至残余挠度≥25μm。

8.3.2.4测试完成后，用公式（4）计算强制挠度，用线性插值法求得：

…………………… (4)

其中：

——产生残余挠度50μm时的强制挠度，单位为毫米（mm）；

——倒数第二次荷载时的强制挠度，单位为毫米（mm）；

——最后一次荷载时的强制挠度，单位为毫米（mm）；

——倒数第二个荷载下的残余挠度，单位为微米（μm）；

——最后一个荷载下的残余挠度，单位为微米（μm）。

注：表示产生残余挠度25μm时的强制挠度时，公式（4）中的50替代为25计算。

8.3.3弹性弯曲极限的计算

8.3.3.1当弹性弯曲极限不大于700Mpa时：

带、箔材的弹性极限σFB按公式（4）计算。

…………………… (5)

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（4）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（5）中得到公式（6）所获得。

…………………… （6）

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。

8.3.3.2当弹性弯曲极限大于700Mpa时：

带、箔材的弹性极限σFB用公式（3）调整支撑间距，在残余挠度为25μm的基础上进行测量，用l'替代l后，用公式(5)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。

8.3.4在四个试样上分别测试弹性弯曲极限，取平均值作为试样的弹性弯曲极限，结果精确到1MPa。

9 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）；
7. 本文件编号。

附 录 A

（资料性）

弹性弯曲极限的确定

表A.1 E0=100000N/mm2时弹性弯曲极限

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品厚度  mm | 支撑间距l  mm | 弹性弯曲极限单位为N/mm2，强制挠度s\*单位为mm | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.000 | 2.667 | 3.333 | 4.000 | 4.667 | 5.333 | 6.000 | 6.667 | 7.333 | 8.000 | 8.667 | 9.333 | 10.000 | 10.667 | 11.333 | 12.000 | 12.667 | 13.333 | 14.000 | 14.667 | 15.333 |
| 0.050 | 20.00 | 145 | 188 | 225 | 258 | 284 | 306 | 323 | 336 | 346 | 353 | 359 | — | — | — | — | — | — | — | — | — | — |
| 0.060 | 21.91 | 146 | 190 | 230 | 264 | 294 | 319 | 339 | 356 | 368 | 378 | 386 | 392 | 396 | — |  |  |  |  |  |  |  |
| 0.070 | 23.66 | 147 | 192 | 233 | 270 | 302 | 329 | 352 | 371 | 387 | 399 | 409 | 417 | 423 | 427 |  |  |  |  |  |  |  |
| 0.080 | 25.30 | 147 | 193 | 235 | 273 | 308 | 337 | 363 | 384 | 402 | 417 | 429 | 438 | 446 | 452 | 456 |  |  |  |  |  |  |
| 0.090 | 26.83 | 148 | 194 | 237 | 277 | 312 | 344 | 372 | 395 | 415 | 432 | 446 | 457 | 466 | 473 | 479 | 484 |  |  |  |  |  |
| 0.100 | 28.28 | 148 | 194 | 238 | 279 | 316 | 349 | 379 | 404 | 426 | 445 | 460 | 473 | 484 | 493 | 500 | 505 | 510 |  |  |  |  |
| 0.110 | 29.66 | 148 | 195 | 239 | 281 | 319 | 354 | 385 | 412 | 436 | 456 | 473 | 488 | 500 | 510 | 518 | 525 | 531 | 535 |  |  |  |
| 0.120 | 30.98 | 148 | 195 | 240 | 283 | 322 | 358 | 390 | 419 | 444 | 466 | 485 | 501 | 514 | 526 | 535 | 543 | 550 | 555 | 559 |  |  |
| 0.130 | 32.25 | 148 | 196 | 241 | 284 | 324 | 361 | 395 | 425 | 451 | 474 | 495 | 512 | 527 | 540 | 551 | 560 | 567 | 573 | 578 | 583 |  |
| 0.140 | 33.47 | 149 | 196 | 242 | 286 | 326 | 364 | 399 | 430 | 458 | 482 | 504 | 523 | 539 | 553 | 565 | 575 | 583 | 591 | 596 | 601 | 605 |
| 0.150 | 34.64 | 149 | 197 | 243 | 287 | 328 | 367 | 402 | 434 | 463 | 489 | 512 | 532 | 550 | 565 | 578 | 589 | 598 | 606 | 613 | 619 | 623 |
| 0.160 | 35.78 | 149 | 197 | 243 | 288 | 330 | 369 | 405 | 438 | 468 | 495 | 519 | 541 | 559 | 576 | 590 | 602 | 612 | 621 | 629 | 635 | 640 |
| 0.170 | 36.88 | 149 | 197 | 244 | 288 | 331 | 371 | 408 | 442 | 473 | 501 | 526 | 549 | 568 | 586 | 601 | 614 | 625 | 635 | 643 | 651 | 656 |
| 0.180 | 37.95 | 149 | 197 | 244 | 289 | 332 | 372 | 410 | 445 | 477 | 506 | 532 | 556 | 576 | 595 | 611 | 625 | 637 | 648 | 657 | 665 | 672 |
| 0.190 | 38.99 | 149 | 197 | 244 | 290 | 333 | 374 | 412 | 448 | 481 | 511 | 538 | 562 | 584 | 603 | 621 | 636 | 649 | 660 | 670 | 679 | 686 |
| 0.200 | 40.00 | 149 | 198 | 245 | 290 | 334 | 375 | 414 | 451 | 484 | 515 | 543 | 568 | 591 | 611 | 629 | 645 | 659 | 672 | 682 | 692 | 700 |
| 0.210 | 40.99 | 149 | 198 | 245 | 291 | 335 | 377 | 416 | 453 | 487 | 519 | 548 | 574 | 598 | 619 | 638 | 654 | 669 | 682 | 694 | 704 | 712 |
| 0.220 | 41.95 | 149 | 198 | 245 | 291 | 336 | 378 | 418 | 455 | 490 | 523 | 552 | 579 | 604 | 626 | 645 | 663 | 679 | 692 | 705 | 715 | 725 |

表A.1 E0=100000N/mm2时弹性弯曲极限（续表）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品厚度  mm | 支撑间距l  mm | 弹性弯曲极限单位为N/mm2，强制挠度s\*单位为mm | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.000 | 2.667 | 3.333 | 4.000 | 4.667 | 5.333 | 6.000 | 6.667 | 7.333 | 8.000 | 8.667 | 9.333 | 10.000 | 10.667 | 11.333 | 12.000 | 12.667 | 13.333 | 14.000 | 14.667 | 15.333 | |
| 0.230 | 42.90 | 149 | 198 | 245 | 292 | 336 | 379 | 419 | 457 | 493 | 526 | 556 | 584 | 609 | 632 | 653 | 671 | 687 | 702 | 715 | 726 | 736 | |
| 0.240 | 43.82 | 149 | 198 | 246 | 292 | 337 | 380 | 421 | 459 | 495 | 529 | 560 | 588 | 614 | 638 | 659 | 678 | 696 | 711 | 725 | 737 | 747 | |
| 0.250 | 44.72 | 149 | 198 | 246 | 293 | 338 | 381 | 422 | 461 | 498 | 532 | 563 | 593 | 619 | 644 | 666 | 686 | 704 | 720 | 734 | 747 | 758 | |
| 0.260 | 45.61 | 149 | 198 | 246 | 293 | 338 | 382 | 423 | 463 | 500 | 534 | 567 | 596 | 624 | 649 | 672 | 692 | 711 | 728 | 743 | 756 | 768 | |
| 0.270 | 46.48 | 149 | 198 | 246 | 293 | 339 | 382 | 424 | 464 | 502 | 537 | 570 | 600 | 628 | 654 | 677 | 699 | 718 | 735 | 751 | 765 | 778 | |
| 0.280 | 47.33 | 149 | 198 | 246 | 293 | 339 | 383 | 425 | 465 | 503 | 539 | 573 | 603 | 632 | 659 | 683 | 705 | 725 | 743 | 759 | 774 | 787 | |
| 0.290 | 48.17 | 149 | 198 | 247 | 294 | 340 | 384 | 426 | 467 | 505 | 541 | 575 | 607 | 636 | 663 | 688 | 710 | 731 | 750 | 767 | 782 | 795 | |
| 0.300 | 48.99 | 149 | 198 | 247 | 294 | 340 | 384 | 427 | 468 | 507 | 543 | 578 | 610 | 640 | 667 | 692 | 716 | 737 | 756 | 774 | 790 | 804 | |
| 0.320 | 50.60 | 149 | 199 | 247 | 294 | 341 | 385 | 429 | 470 | 510 | 547 | 582 | 615 | 646 | 675 | 701 | 726 | 748 | 769 | 787 | 804 | 820 | |
| 0.340 | 52.15 | 149 | 199 | 247 | 295 | 341 | 386 | 430 | 472 | 512 | 550 | 586 | 620 | 652 | 682 | 709 | 735 | 758 | 780 | 800 | 818 | 834 | |
| 0.360 | 53.67 | 150 | 199 | 247 | 295 | 342 | 387 | 431 | 474 | 514 | 553 | 590 | 625 | 657 | 688 | 717 | 743 | 768 | 790 | 811 | 830 | 848 | |
| 0.380 | 55.14 | 150 | 199 | 247 | 295 | 342 | 388 | 432 | 475 | 516 | 556 | 593 | 629 | 662 | 694 | 723 | 751 | 776 | 800 | 822 | 842 | 860 | |
| 0.400 | 56.57 | 150 | 199 | 248 | 296 | 343 | 389 | 433 | 477 | 518 | 558 | 596 | 632 | 667 | 699 | 729 | 758 | 784 | 808 | 831 | 852 | 872 | |
| 0.420 | 57.97 | 150 | 199 | 248 | 296 | 343 | 389 | 434 | 478 | 520 | 560 | 599 | 636 | 671 | 704 | 735 | 764 | 791 | 817 | 840 | 862 | 882 | |
| 0.440 | 59.33 | 150 | 199 | 248 | 296 | 344 | 390 | 435 | 479 | 521 | 562 | 601 | 639 | 674 | 708 | 740 | 770 | 798 | 824 | 849 | 871 | 892 | |
| 0.460 | 60.66 | 150 | 199 | 248 | 296 | 344 | 390 | 436 | 480 | 523 | 564 | 604 | 642 | 678 | 712 | 745 | 775 | 804 | 831 | 856 | 880 | 902 | |
| 0.480 | 61.97 | 150 | 199 | 248 | 297 | 344 | 391 | 437 | 481 | 524 | 566 | 606 | 644 | 681 | 716 | 749 | 780 | 810 | 837 | 864 | 888 | 910 | |
| 0.500 | 63.25 | 150 | 199 | 248 | 297 | 344 | 391 | 437 | 482 | 525 | 567 | 608 | 647 | 684 | 719 | 753 | 785 | 815 | 844 | 870 | 895 | 919 | |
| 0.550 | 66.33 | 150 | 199 | 248 | 297 | 345 | 392 | 438 | 484 | 528 | 570 | 612 | 652 | 690 | 727 | 762 | 795 | 827 | 857 | 885 | 912 | 937 | |
| 0.600 | 69.28 | 150 | 199 | 249 | 297 | 346 | 393 | 440 | 485 | 530 | 573 | 615 | 656 | 695 | 733 | 769 | 804 | 837 | 869 | 898 | 927 | 953 | |

表A.1 E0=100000N/mm2时弹性弯曲极限（续表）

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 样品厚度  mm | 支撑间距l  mm | 弹性弯曲极限单位为N/mm2，强制挠度s\*单位为mm | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2.000 | 2.667 | 3.333 | 4.000 | 4.667 | 5.333 | 6.000 | 6.667 | 7.333 | 8.000 | 8.667 | 9.333 | 10.000 | 10.667 | 11.333 | 12.000 | 12.667 | 13.333 | 14.000 | 14.667 | 15.333 | |
| 0.650 | 72.11 | 150 | 199 | 249 | 298 | 346 | 394 | 441 | 487 | 532 | 576 | 618 | 660 | 700 | 739 | 776 | 812 | 846 | 878 | 910 | 939 | 967 | |
| 0.700 | 74.83 | 150 | 199 | 249 | 298 | 346 | 394 | 441 | 488 | 533 | 578 | 621 | 663 | 704 | 743 | 781 | 818 | 853 | 887 | 919 | 950 | 979 | |
| 0.750 | 77.46 | 150 | 200 | 249 | 298 | 347 | 395 | 442 | 489 | 534 | 579 | 623 | 666 | 707 | 747 | 786 | 824 | 860 | 895 | 928 | 960 | 990 | |
| 0.800 | 80.00 | 150 | 200 | 249 | 298 | 347 | 395 | 443 | 489 | 535 | 581 | 625 | 668 | 710 | 751 | 791 | 829 | 866 | 901 | 936 | 969 | 1000 | |
| 0.850 | 82.46 | 150 | 200 | 249 | 298 | 347 | 395 | 443 | 490 | 536 | 582 | 627 | 670 | 713 | 754 | 794 | 833 | 871 | 907 | 943 | 976 | 1009 | |
| 0.900 | 84.85 | 150 | 200 | 249 | 298 | 347 | 396 | 444 | 491 | 537 | 583 | 628 | 672 | 715 | 757 | 798 | 837 | 876 | 913 | 949 | 983 | 1016 | |
| 0.950 | 87.18 | 150 | 200 | 249 | 298 | 347 | 396 | 444 | 491 | 538 | 584 | 629 | 674 | 717 | 759 | 801 | 841 | 880 | 918 | 954 | 989 | 1024 | |
| 1.000 | 89.44 | 150 | 200 | 249 | 299 | 348 | 396 | 444 | 492 | 539 | 585 | 631 | 675 | 719 | 762 | 803 | 844 | 884 | 922 | 959 | 995 | 1030 | |