

# 如何选择矿物绝缘热电偶的护套

H.L. Daneman, P.E.

## 简介

矿物绝缘金属护套(MIMS)热电偶包含配套的热电偶线, 这些热电偶线由通过轧制、拉伸或旋锻等方式压缩直到减小至护套直径的绝缘材料(通常是氧化镁)包裹。MIMS热电偶的优势包括:

- 实现热电偶线与周围环境的化学隔离。
- 屏蔽电干扰源对热电偶的干扰。
- 保护热电偶线和绝缘层免受冲击损坏。
- 总装允许弯曲, 具有灵活性。

二十年来, 人们夸大了MIMS结构的性能。与非护套元件相比, MIMS结构频繁出现的情况是: 可靠性较低、耐久性较差, 且温度限制也较低。在400°C (750°F) 以上的环境中使用时, 含镍MIMS热电偶特别容易出现校准不稳和寿命缩短等问题, 而这是使用和选择热电偶时要着重考虑的因素。

## 滞后

热电滞后是导致校准不稳的一个重要因素。滞后是镍铬合金(如K型)在温度为200°C和600°C(最常发生在400°C)之间时发生的一种短期有序/无序现象。其表现是热电偶温度在此温度范围内周期变化时, 校准也会出现几度的变化。在200°C和1000°C(最常发生在750°C)之间加热或冷却时, N型热电偶的滞后可高达5°C。在900°C时滞后为2°C到3°C。举例来说, 如果在500°C以下使用K型热电偶, 可以通过在450°C时进行整夜退火处理来减少滞后。

## 氧化

氧化是影响校准的另一种现象。由于氧化现象, Ni-Cr-Al合金(例如镍铬合金\*)在500°C以上空气环境中的寿命有限。有一种特殊形式的氧化被称为“线朽铬线”(Green Rot), 它是指在含氧量低的环境(例如空气有限且不流通的护套中)中发生选择性铬氧化。镍铬硅的抗氧化温度高达约1250°C (2300°F), 并且不会出现线朽铬线。

几种称为“Microbell”(\*\*)的新型护套材料都包含铈含量为1.5%或3.0%的镍铬硅。Microbell “A”是为抗氧化而特制的。另外一种称为Nicrosil + (\*\*\*)的护套材料包含镍铬硅和0.15%的镁。据报告(见参考文献4), 与一些经过测试的Microbell材料相比, 这种材料不易剥落, 而且寿命可能会更长。

镍铬硅本身对还原气体(大部分燃烧过程或许多热处理过程的产物)的耐受能力不高。将镍铬硅用作护套材料的其他改造方

法(如Microbell B、C和D)可用于应对典型的非氧化环境。

## 污染

影响校准稳定性的第三个因素是污染。矿物绝缘、一体化设计、金属护套热电偶背后的理念是, 对包裹热电偶线和填充护套的极细矿物氧化物(通常为氧化镁)绝缘层进行均匀压缩能密封内部空间, 从而消除污染。通过旋锻、轧制或拉伸压缩的绝缘体85%左右是固体材料。这很有用, 因为管材可以弯曲, 也可以制造直径更小的组件。但是, 它确实可能发生气体(如水蒸气或空气)侵入的现象。组成热电偶线或护套的元件也可能发生蒸汽扩散。Bentley和Morgan断定, 透过氧化镁绝缘层的锰蒸汽相扩散对热电偶校准的影响最大。

## 金属疲劳

金属疲劳是热电偶寿命缩短的另一个原因。护套和热电偶线之间的温度线性膨胀系数差异能导致加热或冷却时发生应变。这些应变会因金属疲劳最终导致断裂。加热到900°C时, 镍硅热电偶合金与304不锈钢的热膨胀差异为长度的0.4%。镍铬硅与镍硅(支腿最容易断裂)相比, 两者的膨胀系数差只有0.05%。因此, 对于N型热电偶的支腿来说, 镍铬硅、Nicrosil+或Niobell制成的护套比不锈钢护套的抗金属疲劳性要好。

## 成分

不锈钢护套热电偶的成分变化通常高于Inconel (\*\*\*\*)护套热电偶。Anderson等人进行的测试表明, KN支腿会出现铬元素增

加, 铝元素减少。这些成分变化是导致热电偶发生校准变化的主要因素。

大多数不锈钢的含锰量为1%到2%。304不锈钢的含锰量约为2%。其他不锈钢的锰浓度在1%到10%之间。Inconel的含锰量高达1%。根据经验, 在1100°C时持续1000小时, 护套材料中每1%的锰能导致出现-10°C的校准偏移。根据Bentley的测试, 在1200°C时, 直径为3 mm的N型不锈钢护套在1000小时内漂移-24°C。

## 湿度

护套内的水蒸气会产生多方面的影响。它能迅速被氧化镁吸收, 从而降低绝缘电阻。湿气侵入可以在短短几分钟之内毁掉MIMS热电偶组件。轻而言之, 它会破坏镍铬合金表面的氧化保护涂层, 进而加速损坏热电偶组件。因水蒸气而导致的变化后果非常严重, 能使绝缘电阻降低, 足以使受影响的热电偶失效。绝缘电阻降低, 能导致形成开路后出现具误导性的温度读数、提早失效, 甚至读数错误。

在热电偶制造或维修过程中可以引入水蒸气, 甚至会因空运或在建筑工地长期存储(例如六个月)过程中产生的气压变化而引入水蒸气。

## 建议

虽然上述内容未提及, 但这些热电偶材料的直径与高温环境下的稳定性和长寿命之间存在着一定的关系。在高温环境下, 支撑电加热器的砖表面会变为导体。这会导致电流通过热电偶护套(也可能通过测量仪器)传导到地面。

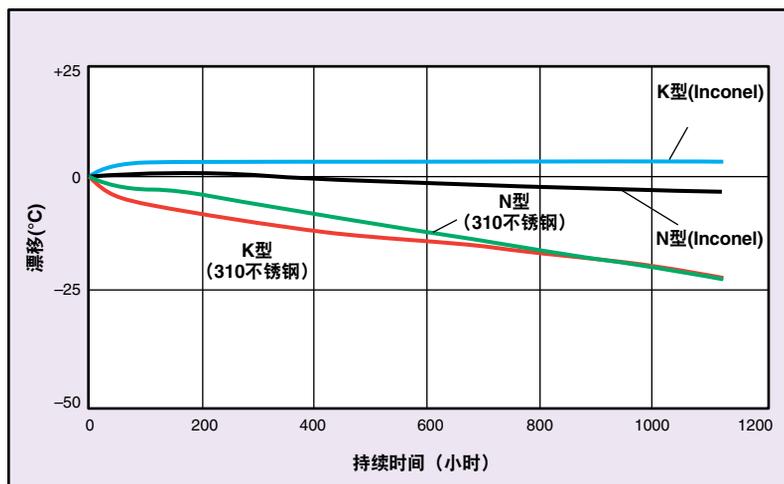


图1. 1200°C真空环境中直径3 mm不锈钢护套及Inconel 600护套K型和镍铬硅热电偶漂移与镍硅热电偶漂移的比较。漂移曲线中的波谷是“就地非均匀性测试”的结果, 测试取样是从炉中取出的5 cm。

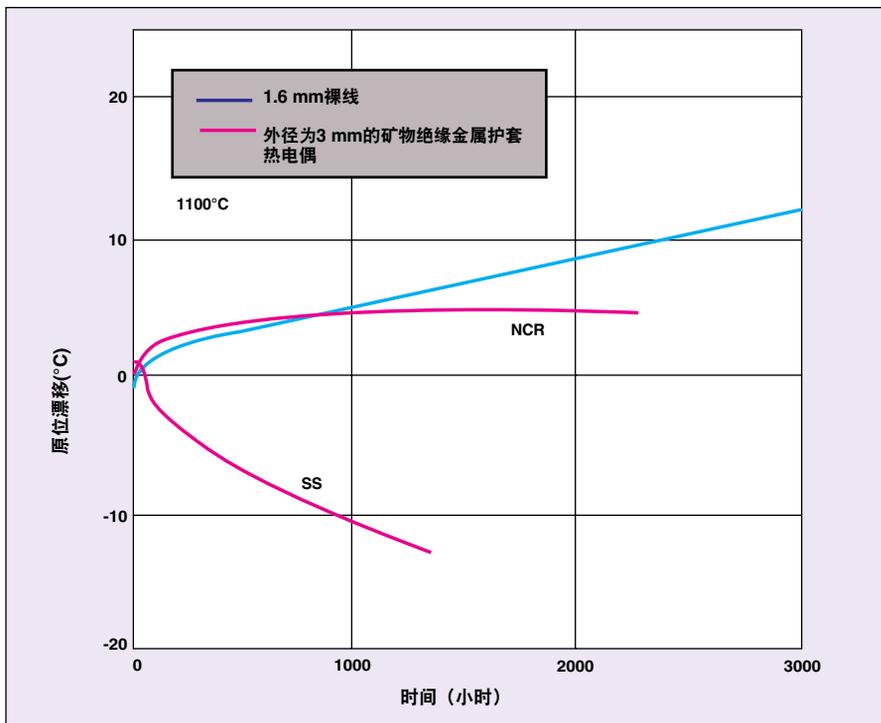


图2. 尖端维持在1100°C的N型热电偶的原位漂移。曲线分别表示空气中带有外径为3mm的310不锈钢(SS)或镍铬硅(NCR)护套的矿物绝缘金属护套热电偶, 以及1.6mm裸线热电偶。后者的漂移范围也已指明。

应避免在温度较高或具有腐蚀性的工业环境中用最精细的金属护套热电偶(细到1 mm)。

对矿物绝缘、金属护套的热电偶来说, 与镍铬热电偶(如K型或N型)配合使用时, 不锈钢护套的效果比Inconel 600或改良的镍铬硅护套差。改良的镍铬硅护套热电偶可在高达1100°C(N型为1200°C到1250°C)时提供更强的抗氧化能力、降低因热膨胀差异导致的故障、提高延展性并消除因不锈钢或Inconel中锰的蒸汽扩散引起的漂移问题。

考虑到较新材料的供货现状, 用户可以选择低锰(0.3%或更少)Inconel金属护套K型MIMS热电偶, 直到改良的镍铬硅金属护套K型或N型及相应的支持数据成熟。

(\*) CHROMEL是Hoskins Manufacturing Co.的商标。

(\*\*) NICROBELL是NICROBELL Pty. Ltd的商标。NICROBELL护套合金已在包括美国在内的多个国家/地区获得专利权。

(\*\*\*) NICROSIL +是Pyrotenax Australia Pty Ltd的商标。

(\*\*\*\*) INCONEL是International Nickel Co.的商标。

经H.L. Daneman PE许可转载,  
电子邮箱: hankdan@comcast.net

#### 参考文献

- Anderson, R. L., Ludwig, R.L., FAILURE OF SHEATHED THERMOCOUPLES DUE TO THERMAL CYCLING, Temperature, (1982) pp 939-951
- Anderson, R. L., Lyons, J. D., Kollie, T G., Christie, W. H., Eby, R., DECALIBRATION OF SHEATHED THERMOCOUPLES, Temperature, (1982) pp 977-1007
- Bentley, R. E., NEW-GENERATION TEMPERATURE PROBES, Materials Australasia, April (1987), pp. 10-13
- Bentley, R. E., THEORY AND PRACTICE OF THERMOELECTRIC THERMOMETRY, 2nd Edition, CSIRO Div. of Applied Physics, (1990) 152 pages.
- Bentley, R.E., private communication, 11/22/90
- Burley, N. A., HIGHLY STABLE NICKEL-BASE ALLOYS FOR THERMOCOUPLES, J. of the Australian Institute of Metals, May (1972), pp 101-113
- Burley, N. A., Burns, G. W., Powell, R. L., NICROSIL AND NISIL: THEIR DEVELOPMENT AND STANDARDIZATION, Inst. Physical Conf. Ser. No. 26, (1975), pp 162-171
- Burley, N. A., Jones, T.P., PRACTICAL PERFORMANCE OF NICROSIL-NISIL THERMOCOUPLES, Inst. Physical Conf. Ser. No. 26, (1975), pp 172-180

- Burley, N. A., Powell, R. L., Burns, G. W., Scroger, M. G., THE NICROSIL VS NISIL THERMOCOUPLE: PROPERTIES AND THERMOELECTRIC DATA, NBS Monograph 161, April (1978), pp 1-156
- Burley, N. A., THE NICROSIL VS NISIL THERMOCOUPLE: THE FIRST TWO DECADES, (1986) private communication
- Burley, N. A., N-CLAD-N: A NOVEL ADVANCED TYPE N INTEGRALLY-SHEATHED THERMOCOUPLE OF ULTRA-HIGH THERMOELECTRIC STABILITY, High Temperatures-High Pressures, (1986) pp 609-616
- Burley, N. A., NICROSIL/NISIL TYPE N THERMOCOUPLE, Measurements & Control, April (1989), pp 130-133
- Burley, N. A., ADVANCED INTEGRALLY SHEATHED TYPE N THERMOCOUPLE OF ULTRA-HIGH THERMOELECTRIC STABILITY, Measurement, Jan-Mar 1990, pp 36-41
- Daneman, H. L., THERMOCOUPLES, Measurements & Control, June (1988), pp 242-243
- Frank, D.E., AS TEMPERATURES INCREASE, SO DO THE PROBLEMS!, Measurements & Control, June (1988), p 245
- Hobson, J. W., THE INTRODUCTION OF THE NICROSIL/NISIL THERMOCOUPLES IN AUSTRALIA, Australian Journal of Instrumentation and Control, October (1982), pp 102-104
- Hobson, J. W., THE K TO N TRANSITION - BUILDING ON SUCCESS, Australian Journal of Instrumentation and Control, (1985) pp 12-15
- Northover, E. W., Hitchcock, J. A., A NEW HIGH-STABILITY NICKEL ALLOY, Instrument Practice, September (1971), pp 529-531
- Paine, A., TYPE N AND K MIMS T/C'S, fax LNA5195, 11/23/90
- Wang, T P., Starr, C. D., NICROSIL-NISIL THERMOCOUPLES IN PRODUCTION FURNACES, ISA (1978) Annual conference, pp 235-254
- Wang, T. P., Starr, C. D., EMF STABILITY OF NICROSIL-NISIL AT 500°C, ISA (1978) Annual conference, pp 221-233

经H.L. Daneman, P.E.许可转载