

高温技术

I. E. 坎柏尔 主編

科学出版社

71227
255
c2

高 溫 技 術

I. E. 坎柏尔 主編

高 楊 等 譯

科 学 出 版 社

I. E. Campbell
High-Temperature Technology
John Wiley & Sons 1956

內 容 簡 介

本书是一本介绍高温材料的生产、应用及研究方法的专著。收集了有关难熔金属、碳化物、硼化物、硅化物、氮化物、硫化物、石墨等的物理化学及工艺性能的许多资料，并讨论了各种类型的电炉的结构及操作，以及测定热导、电阻、热膨胀及热稳定性的方法等。

本书适合科学工作者、冶金学家、金属学家、物理学家、X-射线研究者、设计者、工艺师及高等学校的师生们阅读和参考。

高 溫 技 術

I. E. 坎柏尔 主編
高 楊 等 譯

*

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业许可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1961 年 3 月 第 一 版	书号：2321 字数：398,000
1961 年 3 月 第一次印刷	开本：850×1168 1/32
(京) 0001—8,000	印张：14 插图：14

定价：2.35 元

俄譯本序言

战后数年来在原子能、火箭技术、燃气輪机及其它热力发动机方面所取得的成就是在一系列的冶金学、力学、热学、化学及其它边缘科学技术問題获得解决的基础上而发展出来的。新型耐热合金及耐高温材料(碳化物、硼化物、硅化物、金属陶瓷等)的研究成功将能使我們大大提高热力机的工作温度,延长其使用寿命,并提高其效率。

这本“高温技术”专著是由美国在高温材料方面最有成就的专家之一坎柏尔(Campbell)主編,1956年末在美国出版,是一本根据美国电化学学会會議上的报告材料編写的論文集。其内容主要叙述高温条件下結構材料及耐热材料的性质,生产工艺及試驗方法。虽然涉及的問題很多,但并未破坏它們之間的相互联系,能使讀者获得統一的整体印象。这无疑地应归功于主編及各章节的作者为本书选择了有意义的重要材料,并进行了成功的編排。

这本书的价值不仅在于所涉及的問題适合当前的迫切需要,而且其中选入了大量以前未发表的新資料,在各章中并列举了大量参考文献。

在苏联的文献資料中具有类似内容的书籍显然还不够多,因此出版此书的俄譯本无疑地不仅对于高温材料的研究工作者、設計师、各工业部門的工艺师有用,而且对許多高等学校的教师、研究生及大学生有用。

最后,让我衷心地感謝技术科学副博士 Ю. А. Скаков, Б. Л. Марков, А. К. Натансон 及工程师 Б. С. Лысов 的同志式的协助,及对翻譯过程中发生的一系列問題所提出的意見。

В. 叶尔金

04837

原 序

近代高温技术对于材料的需要使得科学工作者和工程师們煞費苦心。当設計工程师們发现有必要認真地考虑一些极端新型的結構材料时,許多各种不同的問題就产生了。其中有些問題主要是与冶金工作者有关,有些与陶瓷工作者有关,还有些与其它科学技术領域中的工作者有关。

美国电化学学会,特别是学会中的电热学与冶金組,一直重視現代高温材料与高温技术的发展,并曾在这方面召集了許多次討論会。

这个学会在 1951 年在華盛頓举行的年会中曾有一个“高温材料、方法和測量”的討論会。在年会結束前,許多与会者曾指出需要出版一本总结近代高温技术发展的书。本书就是为了滿足这个需要而編写的。

这本专著的目的是使讀者熟悉这个領域中的最近发展情况,同时指出已成熟的技术和材料在現代高温技术中的重要性。

与其它科学技术著作一样,本书在取材方面不得不采取了一些折衷的措施。主要的原因是:經濟方面的考虑限制了本书的篇幅,同时有些科学技术工作者不愿談論尚在萌芽阶段中的新发展。因此很难避免有些折衷会使个别讀者感到失望,但是我們希望,本书的取材能更好地滿足在这个技术領域中的广大工作者的要求。

在編輯这些稿件时,为了寻求内容的清晰和一致,曾作了某些修改,但是仍尽可能地保持原稿的内容和体裁。

讀者立即会察觉到不同作者对“高温”的概念有所不同,这是由于不同技术領域内的工作者的不同認識所造成的。他們对于“高温”的概念取决于温度与他們所从事的工作的关系。

一般說来,本书主要考虑的工作温度是在 1500°C 以上,但是在这样高温使用的材料的处理常是在較低的温度进行的。因此,

特别是在“材料”与“方法”編中,常常涉及到中温操作。

本书分为四編:一是序論部分,討論現代高温材料与高温技术的发展,二是材料部分,三是方法部分,四是測量部分。

金属材料中只有很少几种还有可能在本书所定的温度范围以内应用,在“材料”編中遂未能广泛地加以叙述,只作了簡明的討論,以指出它們可能在某些特殊用途方面的应用和作为高温結構材料方面所存在的缺点。随即討論到氧化物、碳和石墨,以及碳化物等耐热材料。碳化物材料虽仍在繼續发展,但除某些例外,都曾在工业上应用过一段时期。最后,对更新型的耐热材料作了評論。这些材料包括硅化物、氮化物、硫化物,以及最近发展出来的复合材料——金属陶瓷。后者的設計原理是想把金属和陶瓷的良好性能綜合在一起。在緒論中虽然也曾提到金属間化合物,但本书对此沒有进行詳細討論。由于缺乏資料,本书亦沒有討論及氟化物、氟氧化物、硫氧化物和磷化物。經過繼續发展,其中可能有一些会成为具有特殊用途的材料。

燒結虽然是一种比較成熟的技术,但是考虑到它在高温材料領域中的重要性,因此在“方法”編中加以詳細討論。接着討論了不同类型的高温炉及其它达到高温的途径。我們的主要目的是提供新型高温炉的一些設計資料,同时也对一般常用的达到高温的方法作了簡述。我們並沒有在这一編中詳細地概括多年来发展出来的高温炉設計,因为这将超出本书的范围,如果讀者对此有需要,可參閱 Lebeau 和 Trombe¹⁾ 的著作。

在最后的“測量”編中評論了温度及其測量仪器,接着有选择性地討論了各种特殊的机械和其物理性質檢驗,最后叙述了特殊設計的高温光学和 X-射綫技术。主要用作金属材料試驗的一些技术如拉断、压力和悬梁蠕变試驗都沒包括在內,有关这些測量的資料是很容易在科学技术文献中查到的。

I. E. 坎柏尔

1) Les Hautes Températures et Leurs Utilisations en Chimie, T. Lebeau, F. Trombe, Vol. 1, Masson et Cie, Paris, 1950.

目 录

俄譯本序言.....	i
原序.....	iii

第一編 序 論

第一章 高温耐热材料序論.....	1
-------------------	---

第二編 材 料

第二章 金属.....	10
第三章 氧化物.....	21
第四章 碳和石墨的高温性質.....	92
第五章 碳化物.....	111
第六章 硼化物.....	127
第七章 硅化物.....	148
第八章 氮化物.....	168
第九章 硫化物.....	185
第十章 金属陶瓷.....	206

第三編 方 法

第十一章 金属与非金属耐热材料的燒結.....	229
第十二章 达到高温的途径及其限制.....	243
第十三章 电阻加热和感应加热炉.....	250
A. 1500—2800℃ 高温淬火炉.....	250
B. 氧化物电阻炉.....	254
C. 易氧化金属的高温感应热处理.....	257
D. 热压炉.....	260

第十四章 电弧炉	267
A. 高温电弧炉設計的探討	267
B. 熔化鈦及鎢的电弧炉	276
第十五章 获得高温的其它方法	304
A. 用太阳炉获得极高的温度	304
B. 电子火炬	311

第四編 測 量

第十六章 温度及其測量	317
A. 輻射法測高温学	317
B. 高温热电偶	336
C. 绝对噪声温度計	354
第十七章 力学性質	360
A. 1100°C以上范性形变的測定	360
B. 研究高温蠕变的扭轉試驗裝置	373
C. 高温硬度	378
第十八章 物理性質	384
A. 熔点和相平衡的測定	384
B. 耐热材料蒸汽压的測定	393
C. 热导率	402
D. 温度高于 1700°C 时的綫热膨胀	418
E. 1000—2500°C 的膨胀計的新发展	421
F. 高温电导率的測定	421
G. 热震	432
第十九章 特种技术	456
A. 高温显微鏡技术	456
B. 高温 X 射綫衍射	462

第一編 序 論

第一章 高溫耐熱材料序論

L. D. 理查 孙

現代耐熱材料的發展

隨着燃氣渦輪式、沖壓噴氣式和火箭推進式飛機以及導彈等的發展，材料工程師們發現現有材料在許多情況下都不能適應上述推進器所產生的條件和應力。如果設計師們想要達到適合於現代飛機要求的效率和速度，擺在他們面前有兩種途徑：一是对表面或部件採用強制冷卻，以避免材料超過所能適應的最高溫度；另一是尋找性能有顯著改善的材料，使其能滿足現代飛機的要求。本書內容主要論及有關新材料的最近發展情況。

可以預期，一般常用的結構材料還會不斷地改進，但是需要能夠經受這種苛刻條件的新材料已成為非常迫切，因此有必要研究本質上完全不同的結構材料。這種需要促使材料工程師探索一些通常不大使用的材料，例如碳化物、硼化物、氮化物、鋁化物、硅化物和硫化物，以及一些混合製成的材料，如金屬陶瓷和用難熔化合物強化的金屬。

在第二次世界大戰結束以後的研究結果指出，氧化物制品中存在玻璃質（非晶態）的結合相會顯著地降低它承受溫度陡度的能力（熱震），同時也會降低它的機械強度。但是不含玻璃相的純氧化物如氧化鋁、氧化鎂、氧化鈹、二氧化硅等的制品的抵抗熱震能力也不佳。由此得到的結論是：用玻璃結合的以及純氧化物為基的耐火材料，均具有較低的热傳導系數和較高的热膨脹系數，這是造

成它們抗熱震性能不佳的基本原因。這個結論可以由下面的實例進一步証實；鋰-鋁-矽酸鹽及幾種鈦酸鹽的製品的熱膨脹系數很低，甚至為負值，同時它們具有良好的抗熱震性。不幸的是，這些材料的抗張強度較低。

為了克服這些缺點，就需要發展導熱率較好的耐熱材料，使它們的抵抗熱震能力更接近於金屬。因此就出現了叫作金屬陶瓷的金屬氧化物和耐熱金屬的複合體，其中值得注意的是氧化鋁和金屬鉻製成的材料。一開始，這種金屬陶瓷就顯示了較好的高溫性能，現正從事不斷地改善它的抗熱震性和衝擊強度。

但是，氧化物-金屬複合體的導熱率還不夠好，因此就需要尋找具有導熱率更好的材料。有些材料不但導熱率很高，熔點也高，並且具有良好的高溫化學穩定性。這些材料包括碳化物、氮化物、硼化物、鋁化物、矽化物和硫化物，但是用這些化合物作為結構材料的可能性一直到現在還沒有注意到。對一些市面上可以得到的材料，如碳化矽、碳化鎢、碳化鈦、碳化鋁以及鎢和鈦的複合碳化物，甚至一些市面上不能得到的碳化物、氮化物、硼化物、矽化物和鋁化物等都進行了研究。

不幸的是，這些材料的燒結體的強度、抗氧化、抗熱震和衝擊性能都不佳。不過，用金屬做粘結劑，可以增加碳化物（特別是碳化鈦）的抗氧化能力和抗熱震性，因此就使金屬粘結的碳化鈦成為研究的主要方面。這似乎也是合理的，因為碳化鈦很容易為許多種粘結金屬所濕潤，容易得到，從而也適於大規模生產。

近年來在發展粘結碳化鈦的主要努力方向，是改善碳化鈦的純度及適當地選擇粘結劑以改善金屬陶瓷的性能。過去在消除游离碳方面進行了很多工作，並且已取得相當的成功，目前已能制出游离碳含量大約在 0.02% 或更低的碳化鈦。減少碳含量的方法是採用浮選技術。現在認為氧及氮的存在甚至比游离碳可能更嚴重，因此對這些雜質的影響，正在進行研究。當碳化鈦塊在球磨机中研細到 2—4 微米（為滿足成型要求）的過程中，可能摻入氧、氮、鈦和鉍。

改变金属粘结剂也可以改善碳化钛基金属陶瓷材料。早期使用钴或镍粘结碳化钛,它的抗热震能力较低,在金属粘结剂中加入适当量的合金元素,如 Mo, Al 及 Cr, 不但可以改善材料的热震性,并且可以延长材料的持久寿命。

这些材料的另一个重要性质是能经得起高速颗粒的冲击,通常用冲击试验来模拟这种情况。不幸的是,粘结的碳化钛的冲击值连较脆的金属材料都不如。直到目前,最好的碳化钛基材料在不同温度下的冲击强度仅为 0.06~0.3 公斤-米,而一些较脆的合金的冲击强度为 0.57~0.69 公斤-米。从这个事实来看,碳化钛的冲击值是不够的。应该指出,为了保持一定的高温强度,牺牲一点冲击值是不可避免的。

改善碳化钛基材料的第二种方法是发展更好的粘结剂及采用更高含量的金属粘结剂。已有的数据指出,碳化钛的含量必须减到 20~25% 或更低,才能使材料具有必要的冲击韧性。现在正打算研究象烧结铝(SAP)型的材料,这些材料最好称为“经过强化的合金”,或称为金属陶瓷更合适些。把这个类型的材料当作一个以金属为基的材料,比当作以难熔化合物为基的材料更合理些。

改进碳化钛基材料的第三种方法是发展新的和改善生产技术。在这个方面,对挤压、熔态浇铸及改善热压、冷压与烧结都进行了研究。

在碳化物铸造的研究方面,发现碳化物的含量必须降低到 50% 以下才能成为可铸造的材料。碳化物含量较高的熔融液体的粘度太大,不能注入合适的模型中。

研究了用挤压方法改善碳化钛部件的物理性质的可能性。有人认为,当粉末通过挤压嘴时,受到很大的摩擦,因而破坏了粉末表面的氧化膜,使颗粒间得到更密切的接触,从而加强它们的结合。

粉末材料的挤压工作进行得还不够多,从而不能判断生产异型部件(如导向叶片)的可能性。但是已经成功地挤出形状规则的产品,这种产品在烧结后的收缩和残余空隙度均比一般经过冷压

和燒結而制出的產品為小。

硼化物型材料非常脆，可能不會用到負荷很高的地方，但是在火箭引擎另件方面却可能找到用途。這些材料的熔點與碳化物相似，可能更適用於高溫沖刷成問題的部位。

氮化物基材料極脆，抗氧化能力也較差，所以這些材料的發展不是很樂觀的。但是氮化物和碳化物、硼化物等結合，可能會成為有用的材料，這方面的工作仍有待進行。

在鋁化物基材料（如鋁化鉬或鋁化鎳）方面進行的研究指出：鋁化鉬雖然具有某些較好的高溫性能，但是似乎並不具有高強度的本質。此外，它的抗氧化性能雖好，但其抗熱震性較差，成型也比較困難。另一方面，鋁化鎳具有良好的熱震性，高溫抗氧化性及室溫延展性（可能可以鍛造），但是強度低。鋁化鎳的室溫沖擊性能雖有改進，但是它似乎並不隨溫度升高而增加。為了改進這種材料，現正設法加入少量的碳化物、氧化物或其他鋁化物。這是“強化合金”技術的一種應用。

最近在氧化鋁-鉻型金屬陶瓷方面進行研究的結果指出，鉻和其他金屬結合可以改善這種金屬陶瓷的熱震性。在鉻中加入這些元素可使氧化物和粘結金屬的熱膨脹性質接近。這種方法也許可以改進碳化鈦基材料的性能。在鎳中加入鉬及鋁，可能使這種粘結金屬的熱膨脹性質和碳化鈦的熱膨脹性質趨向一致，這可能是改善碳化鈦基材料的性能的有效途徑。

難熔金屬，如鉬及鉬基合金，在高溫用途方面也很有前途。除了加工和焊接的困難外，存在的主要問題是鉬的氧化問題。這種材料即使在較低的溫度也會發生急劇的氧化。氧化產物具有揮發性，對其他部件有腐蝕作用。為了防止鉬在高溫下氧化，曾研究過許多不同的擴散型保護層，但是要得到完善的保護層和金屬陶瓷應具有適當的沖擊韌性是同樣困難的問題。硅或鋁的擴散層可以防止鉬氧化，但是這種保護層極難達到需要的完整程度。此外，這種塗層很脆，加負荷後的伸長率和基體不一樣。曾經企圖在鉬基合金表面生成一層穩定的鉬酸鹽，主要問題是如何能得到一種和

基体热膨胀性质相适应的钼酸盐。如果能作到这一点，就可以得到一种再生型的保护层。为了保证保护层具有所需要的完整性，曾研究过用电镀法或扩散法作成的多层保护层。铬及镍的交互层似乎是很有希望的组合，但是，即使采用这种多层法，要想得到一个完整的保护层还是困难的。在钼及钼合金的表面上复合一层其他的金属可能是解决氧化问题的最好方法，但在制造另件时，却存在着实际中的问题，如接头及切边的保护。

铬及铬基合金的主要问题是延性低，和钛一样，铬似乎也严重地受到很少量间隙原子的影响。值得注意的是铬合金虽然延性低，加工性能也差，但是它的热震性较其它高温合金为优。在钴基及钴镍基合金中加入钨似乎是一个较有前途的领域，不过遗憾的是，大量的加入钨会使比重显著增加。

石墨可以在极高的工作温度下使用，如火箭和冲压喷气方面。在第二次世界大战时，在 V-2 型火箭中就成功地使用了石墨，石墨是一种很有意义的材料。它的比重低，而耐热性好，强度随温度的升高而增加。石墨的最主要缺点是，它在较低的温度就会氧化。然而，这个问题并不象铝那样严重，石墨抗氧化层的初步研究已得到相当的成功。在石墨件上涂以硅化物，然后进行烧结，就可防止过份氧化，而且这个保护层还能耐一定程度的冲刷。这方面的工作正在开展中。现正拟研究以碳及石墨为主要成份的碳或石墨基材料，希望能得到比石墨更为优越的材料。目前正进行在石墨中加入形成碳化物的金属，其他碳化物，氮化物，硅化物等的研究工作。

对强化原理的认识

在上面几节中已经谈到关于 SAP (Sintered Aluminum Powder, 烧结铝粉) 型的材料。虽然 SAP 本身的耐热性并没有达到本书所要求的温度范围，但是它的强化原理可能也适用于耐热性更高的材料，因此我们将简要地讨论这种材料，以说明这种强化原理，在生产 SAP 部件时使用的金属粉末的粒度为 2 微米或更细，

这样大小的粉末，比表面积很大，因而氧化物的数量约达 10~15%。粉末先经过冷压、烧结、再在高温进行压制，就可得到一个在中温有良好机械强度的部件。挤压是一个增加材料密度有效的途径，只有经过长时间连续而多次的热压才能得到同样的密度。烧结铝的物理性质比成分相同的锻造铝合金的性质还要优越。值得注意的是目前金属陶瓷的研究也趋向于类似烧结铝的金属组成范围。

当金属陶瓷型材料开始发展的时候，研究工作者认为在组织结构中存在着连续的所谓硬相或难熔相（如碳化物或氧化物）是在高温下能承受负荷的必要条件。因为在这样高的温度下，金属粘结剂的强度基本上已经消失掉。因此在所研究的成分中，金属粘结剂的含量常在 20% 以下。在这个成分范围内，碳化钛基材料有连续的碳化物网络，它的热震性很差，为了提高金属陶瓷的热震性，金属粘结剂愈加愈多，从而碳化物不再是连续相而以独立质点形状出现，同时，金属反而成了连续相。

金属陶瓷的研究趋向于 SAP 型的金属成分范围，或者称为“强化合金”型材料的成分范围，但是，这是一个慢而复杂的过程。

因而，我们有理由相信，在一个已经很强的合金中再加入一些适当的硬而难熔的稳定性相来“强化”应该是有效的。这种稳定性相将在容易发生滑移的部份产生强化作用。这就意味着所加入硬相的粒度大小及在组织中的分布都是重要的。在单相，特别是铝中加入少量（1—2%）的氧化物粉末，可以改善铝的高温性能。这些氧化物粉末不象增加固溶体或合金元素那样会影响铝的可锻性。由于仅研究了少数几种材料，还不可能确切地描述强化的机理，也不可能肯定这些强化作用在许多种金属材料中是否是普遍相加的。另外一个问题是在含有碳化物沉淀相的合金中加入惰性粉末，是否也起良好的作用。从过去的令人鼓舞的结果来看，我们有理由相信，这个强化原理将会推广到更复杂的合金系统中去，以延长使用寿命和改善高温性能。

脆性材料的行为

在断裂以前只产生很少形变的材料可以认为是处于脆性状态。但是,脆性材料的强度的确定并不这末简单。本书中所讨论的材料,无论在目前或是将来的使用条件下几乎都可以认为是脆性材料。因为我们发现脆性材料在断裂时所表现的强度并不一致,结构部件的设计者就遇到一个如何选择设计应力的问题,在这个应力下,材料有一个已知的发生断裂的机率。

一个脆性材料的设计应力可以认为是一个材料的强度,这时材料有一个允许的断裂机率。如果设计者不允许任何发生断裂的机率,必须用试验确定相当于断裂机率为零的应力,也就是说必需有足够的样品,得到的数据才能用统计方法处理。因此,在每一个使用条件下,都要确定所要使用的材料的一个性质或几个性质的分布曲线,然后设计者才能根据这个分布曲线,选择他所能接受的断裂机率的设计应力。

从这个角度来了解脆性材料的行为需要大量精密试样,象金属粘结的碳化物这种材料,制出所需数目的样品的费用极大,常常是不允许的。所以,最好是找一个可靠的取样方法,发展一种可靠的技术来分析由少量样品所得到的数据。这样一种技术应该使每一种材料在每一个使用条件下都只用几个样品,如此,分析数据所需的时间和制出样品所需的费用都会保持最低限度。当然,为了使这个技术可靠,建立这种技术所根据的原始数据还需要大量样品。

除了需要一个将材料强度和断裂机率联系在一起的分布曲线以外,设计者也需要一种没有发生断裂可能的强度。为了找出这种断裂机率为零的强度,也需要很多的样品以作出原始数据。对脆性材料的断裂强度分布曲线进行初步分析以后,就有可能采用质量控制法以大大地改进强度值的分布。但是,这似乎并不能解决这个问题,因为许多脆性材料的强度值分布太宽了。有一些理论(象 Griffith 及 Weibull),假定在结构中存在着临界大小的缺陷,

这已由实验结果证明。由于缺陷象是脆性材料的天生的性质，而脆性材料对缺陷又很敏感，所以这种脆性材料的任何设计数据必须包括强度与断裂发生机率的分布曲线。

高温的重要性

提高工作温度除了可以增加某些推进器的效率和输出功率外，现代耐热材料的制造和检验也需要在高温下进行。制造高温材料所用热源的设计、建立和校正几乎要与研究和发展新型高温材料需要同样多的劳动。由于电的缺乏和费用很大，许多研究机构没有足够的电力得到高温来“烧”他们所要制作的材料。这对许多研究机构来说，将仍为一个严重问题。

模拟目前或未来飞机及导弹所遭遇到的条件的试验方法所需要的高温，甚至比制造耐热材料的高温更难达到。为了估计材料工程师所面临的问题的困难程度，可以举例来说明：在实际飞行情况下，一个速度4倍于声速的导弹，由于空气动力的加热，表面温度达到415°C仅系几秒钟内的事。一个远程高空导弹在返回大气层时的情况与流星相仿，可以想象到这种导弹在进入大气层时的速度接近于每小时24,000公里，在这种情况下，热传导率将超过 5.4×10^7 大卡/小时·平方米。这些数值表明高温材料在实验室中在上述条件下检验所存在的问题是多么大。一种试验装置是太阳炉，它能熔化许多或者是几乎所有现代高温材料。这样一个装置能在一个很小的区域内“聚焦”大量热，从这个热源可能得到数量级为 $2.7 \times 10^6 \sim 27 \times 10^6$ 大卡/小时·平方米的热通量。一个焦点直径为50~76毫米的热源，需要18.3米直径的抛物体镜，这样就限制了使用太阳炉作为检验实际部件的工具；但是，用这个设备还可能对许多高温材料作出初步的评价。

再者，模拟一些导弹飞行的设备也同样受到限制，因为一个研究者观察在这样高速下飞行的物体，仅限于几个微秒范围以内，如果需要在试验室中鑑定现代高温材料，就需要一个热风风洞，这个风洞要能供给模拟马赫数不断增加的飞行条件下所需要

的热通量,因为发射一个导弹的费用非常大,这种试验就成为必要的了。所以材料的进一步发展在很大程度上系于研究工作者所能得到的愈来愈高的温度及极大的热源的能力,除非研究材料的科学工作者和工程师们能得到这些数据,进一步的发展就缺少指针。但是,建立这种检验装置的费用很可能大大地超过研究和实际耐热材料所需的费用。

結 語

至此,希望讀者們对于現代高温結構材料的制造、评价和使用中存在的問題,已經得到一个全面了解,以后各部分的取材将使讀者能够詳細的判断各种技术的現狀及尙待解決的問題,并激发讀者对高温材料新用途的思考。